

CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA SISTEMELOR DE CORECTAREA TORENȚILOR CU REFERIRE LA CURGEREA BIFAZICĂ

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

Ing. Sergiu – Flavius Jianu

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Mircea Bărglăzan
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Nicolae Vasiliu
prof.univ.dr.ing. Diana Robescu
prof.univ.dr.ing. Ilare Boredeașu

Ziua susținerii tezei: 12.10.2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

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

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

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Facultății de Mecanică, la Catedra de Mașini Hidraulice a Universității „Politehnica” din Timișoara.

Lucrarea se adresează tuturor celor interesați a cunoaște aspectele principale legate de corectarea torenților și curgerea în canalele sistemelor de corectare ale acestora.

Consider că lucrarea este un suport științific de luat în seamă pentru cercetările viitoare care vor avea ca subiect de pornire Corectarea Torenților și curgerea în canale și albiile torențiale.

Timișoara, septembrie 2011

Jianu Sergiu - Flavius

Destinatarii dedicației.

Alese mulțumiri și profundă recunoștință se cuvin adresate conducătorului de doctorat **prof.dr.ing. Mircea Bărglăzan** pentru consilierea permanentă și îndrumarea atentă pe tot parcursul realizării lucrării.

Adresez mulțumiri deosebite domnului **prof. dr. Nicolae Vasiliu** atât pentru materialul documentar pus la dispoziție, pentru ajutorul competent și susținerea constantă pe parcursul elaborării acestui material, cât și pentru calitatea de referent al tezei de doctorat.

Mulțumesc, de asemenea membrilor comisiei de doctorat, în persoanele domnilor **prof. dr. Diana Robescu** și **prof. dr. ing. Ilare Bordeășu** în calitate de referenți ai lucrării și domnului **prof. dr. ing. Liviu Bereteu** în calitate de președinte al comisiei.

Aduc mulțumiri familiei mele și tuturor celor care mi-au oferit o susținere morală și profesională.

Jianu, Sergiu - Flavius

Contribuții privind îmbunătățirea sistemelor de corectarea torenților cu referire la curgerea bifazică

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 102, Editura Politehnica, 2011, 120 pagini, 83 figuri, 27 tabele.

ISSN: 1842 - 4937

ISBN: 978-606-554-363-8

Cuvinte cheie: corectarea torenților, curgere bifazică, protecția mediului, stațiune experimentală

Rezumat,

Prin subiectul abordat, teza de doctorat răspunde unor probleme de maximă actualitate privind dezastrelor naturale datorate inundațiilor provocate de șiroirile torențiale. Prin partea experimentală și numerică se găsește o soluție optimă din punct de vedere tehnico-economic pentru viitoare sisteme de corectarea torenților

Tema este tratată în mod interdisciplinar, îmbinând aspecte legate de mecanica fluidelor, silvicultură, hidrotehnică și protecția mediului.

CUPRINS

ACKNOWLEDGEMENT	6
CAPITOLUL 1. INTRODUCERE	7
1.1. Justificarea alegerii temei de cercetare	7
1.2. Stadiul actual al cercetării în tematica tezei	7
1.3. Necesitatea amenajării bazinelor hidrografice torențiale.	8
CAPITOLUL 2. CURGEREA BIFAZICĂ ÎN TORENȚI ȘI CANALE TORENȚIALE	16
CAPITOLUL 3. ASPECTE TEORETICE REFERITOARE LA CORECTAREA TORENȚILOR	27
3.1. Mecanismul formării torenților și posibilități de corectare ale acestora	27
3.2 Curgerea în canalele sistemelor de corectarea torenților	30
3.2.1. Definiție și diferențe între curgerea în conducte și curgerea în canale deschise	30
3.2.2. Tipuri de curgere ce pot apărea în canale torențiale	32
3.2.3. Caracteristicile canalelor deschise	33
3.2.4. Ecuațiile fundamentale	33
3.2.5. Determinarea coeficienților energetici și de moment	36
3.2.6. Curgere laminară și turbulentă	36
3.2.7. Curgerea uniformă și stabilirea formulei frecării	36
3.2.8. Calcule în curgerea uniformă	39
3.2.9. Aplicarea ecuației conservării energiei pentru curgeri cu variație rapidă	39
3.2.10. Curgere critică, sub-critică și super-critică	41
3.2.11. Numărul Froude	43
3.2.12. Aplicarea ecuației momentului pentru curgere cu variație rapidă	44
3.2.13. Curgere staționară uniform variabilă	45
3.2.14. Metode de rezolvare a curgerii în canale deschise (curgere staționară, uniform variabilă)	46
3.2.15. Curgerea nestaționară	47
3.3. Disiparea energiei rezultate în urma curgerii torențiale	48
3.3.1. Formule echivalente pentru rezistențele hidraulice liniare	49
3.3.2. Analiza numerică a unui curent torențial nestaționar după obstacole.	51
3.3.3. Curgerea turbulentă în canalele torențiale în prezența unor obstacole adiacente peretelui canalului	71
CAPITOLUL 4. STAȚIUNEA EXPERIMENTALĂ	76
4.1. Prezentarea general a stațiunii experimentale	76
4.2. Condițiile și metodele de măsurare	86
4.2.1. Metoda volumetrică	86
4.2.2. Morisca hidrometrică	86
4.3. Efectuarea măsurătorilor	88
CAPITOLUL 5. SIMULAREA NUMERICĂ	101
5.1 Etape În rezolvarea problemelor prin simulare numerică	102
CAPITOLUL 6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	109
BIBLIOGRAFIE	115

**"Teza de doctorat a fost realizata cu sprijin
parțial din grantul strategic
POSDRU/6/1.5/S/13, ID6998, cofinatat din
Fondul Social European "Investește in oameni",
in cadrul Programului Operațional Sectorial
Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013"**

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Obiectul cercetării în cadrul tezei de doctorat:

Obiectul cercetării îl constituie sistemele de corectare a torenților cu referire la curgerea torențială. Curgerea torențială în prezența disipatoarelor de energie este un fenomen complex, relativ puțin studiat până în prezent din punct de vedere al mecanicii fluidelor. Gradul mare de actualitate al obiectului cercetării îl prezintă situațiile recente la nivel mondial și național cu influențele nefaste pe plan uman, social și economic ale efectelor torenților.

1.1. Justificarea alegerii temei de cercetare

Procesele torențiale produc mari perturbații și dezechilibre atât ecologice, cât și în activitatea și viața umană, ajungându-se până la producerea unor catastrofe cu victime omenești.

Tema de cercetare aleasă este gândită să ajute la prevenirea acestor catastrofe, iar soluțiile oferite să fie cât mai puțin perturbante pentru mediul înconjurător.

Actualitatea temei alese este dată de faptul că în ultimele decenii schimbările climatice au produs dereglări ale precipitațiilor, astfel că în unele zone unde formarea de torenți era puțin probabilă și deci nu existau nici sisteme de corectare a acestora, acum se produc inundații și alunecări de teren. De asemenea, o problemă majoră o reprezintă despăduririle, în special tăierile rase (un bun exemplu sunt dezastrele produse în Moldova în ultimii ani). Activitatea umană constituie deci un factor important în formarea torenților.

Cercetările efectuate au un pronunțat caracter multidisciplinar, ele înglobând atât elemente de meteorologie, geologie, dar mai ales de silvicultură și mecanica fluidelor. Cele de silvicultură se referă în special la capacitățile arborilor de a fixa solul, de a reține prin suprafața foliară picăturile de apă și amânând ajungerea lor pe sol concomitent cu reducerea vitezei de cădere a acestora. Cele de mecanica fluidelor se referă în special la curgerea nepermanentă în mediul bifazic, formațiunile torențiale fiind întotdeauna compuse din apă în care există particule de sol în suspensie.

Abordarea corectării torenților din punct de vedere al mecanicii fluidelor este o noutate, până în prezent acțiunile de corectare se fac mai mult empiric. Deși există numeroase firme de construcții hidrotehnice, există prea puține preocupări în domeniul curgerii torențiale, care este de fapt cauza distrugerilor provocate de torenți. Optimizarea sistemelor de corectare impune analiza fenomenului de curgere, nu doar a tipului de sol, configurației geometrice a zonei și vegetației existente.

1.2. Stadiul actual al cercetării în tematica tezei

În momentul de față cercetarea sistemelor de corectarea torenților și a curgerii torențiale se află în stagnare, soluțiile tehnice de amenajarea torenților fiind

la nivelul stadiului pe care îl aveau și acum 70-80 de ani, bazate mai mult pe experiență practică decât pe o fundamentare teoretică, cel puțin referitor la fenomenele aferente curgerii. Astfel, în jurul Municipiului Reșița, județul Caraș Severin, societatea care se ocupa cu gospodărirea fondului forestier din zonă, STEG – Steirische Eisenbahngesellschaft, instala primele baraje din lemn și pietriș pe pârâiașele din pădure încă din secolul al 19-lea. Ele aveau rolul de a opri prima viitură și deci a da posibilitatea nivelului apei din râuri să scadă până ca albia naturală să poată prelua excesul de apă. Pământul și pietrele aflate în suspensie în apă se sedimentau în spatele barajelor și nu putea producă distrugerii în aval de baraj. Sistemele folosite atunci sunt folosite și în prezent, eventualele schimbări fiind efectuate doar la nivelul materialelor folosite.

Deși din punct de vedere al mecanicii fluidelor fenomenele de curgere în canale, albiile de râuri și baraje au fost studiate în detaliu, corelarea cu specificul fenomenelor torențiale nu a fost studiat suficient.

Putem concluziona deci că cercetările în domeniul corectării torențurilor, deși relativ dificile datorită necesității corelării studiilor silvotehnice cu cele de mecanica fluidelor și construcțiilor hidrotehnice trebuie continuate pentru evitarea/limitarea dezastrelor cauzate de torenți, dar și pentru protejarea mediului înconjurător prin evitarea amplasării de construcții hidrotehnice necesare.

1.3. Necesitatea amenajării bazinelor hidrografice torențiale.

Procesele torențiale și de degradare a terenurilor produc mari perturbații și dezechilibre atât ecologice, cât și în activitatea și viața umană, ajungându-se până la producerea unor catastrofe cu victime omenești.

Așa cum s-a arătat, principalul factor determinant al proceselor torențiale îl constituie dereglajul regimului hidrologic al cursurilor de apă. Această dereglare alterează funcțiile de protecție împotriva scurgerilor superficiale și eroziunii accelerate ale învelișului vegetal, precum și degradarea funcțiilor fizico-biologice ale solurilor, ca urmare a modului de exploatare a bogățiilor naturale din zonele montane și colinare, în special prin exploatarea nerațională și distrugerea sălbatică a pădurilor.

Consecințele negative constau în principal în:

- scăderea sau chiar pierderea totală a fertilității solului;
- favorizarea producerii inundațiilor care avariază și distrug diverse obiective economice, așezăminte umane, duc la colmatarea lacurilor de acumulare, și afectează negativ economia națională și în consecință și viața oamenilor. [1]

În ultimii ani, teritoriul țării noastre a fost afectat de producerea unor inundații cu urmări catastrofale. Astfel începând cu anul 1997 inundațiile au afectat Banatul, Moldova și Muntenia, în anul 2006 localitățile situate în Lunca Dunării, iar în anul 2008 județele Moldovei din bazinele râurilor Prut și Siret. Aceste inundații au produs pierderi de vieți omenești, distrugerea infrastructurii, a culturilor agricole, degradarea mediului ambiant. Situația a fost atât de gravă încât localități întregi au fost șterse de pe fața pământului sau au trebuit să fie strămutate total sau parțial. Practic, ultimul deceniu a marcat o creștere fără precedent, ca frecvență și amploare, a distrugerilor produse de inundații, sub toate formele lor de manifestare, majoritatea acestor inundații, mai ales în zonele rurale au fost cauzate de ineficiența sau lipsa sistemelor de corectarea torențurilor.

Județul Iași a fost puternic afectat în luna august 2005 de inundațiile produse de râul Siret în municipiul Pașcani și suburbiile acestuia, iar în perioada iulie – august 2008, în special localitățile de pe cursul aceluiași râu Siret.

Județul Caraș - Severin și mai ales Municipiul Reșița a fost puternic afectat de inundații în anul 1997, în special din cauza viiturilor venite de pe fâgăse torențiale aflate pe versanții dealurilor din imediata apropiere a cartierelor mărginite de pădure.



Fig. 1.1. Inundații produse în zonele de deal

În zonele unde inundațiile sunt produse de torenți, acestea afectează:

- **populația**, precum și bunurile sale mobile și imobile;
- **obiectivele sociale**;
- **capacitățile productive** (societăți comerciale, platforme industriale, centrale electrice, ferme agrozootehnice, amenajări piscicole, porturi și altele);
- **barajele și alte lucrări hidrotehnice** care reprezintă surse de risc în aval, în cazul producerii de accidente;
- **căile de comunicații** rutiere, feroviare și navale, rețelele de alimentare cu energie electrică, gaze, sursele și sistemele de alimentare cu apă și canalizare, stațiile de tratare și de epurare, rețelele de telecomunicații și altele;
- **mediul natural** (ecosisteme acvatice, păduri, terenuri agricole, intravilanul localităților și altele). [1]

De foarte multe ori aceste fenomene ar putea fi putut fi prevenite prin întreținerea sistemelor de corectarea torenților existente. Din păcate în ultimele decenii în acest domeniu au fost făcute foarte puține investiții și în foarte multe locuri se pot observa lucrări de corectarea torenților care fie nu au fost întreținute fie au fost dimensionate greșit și în consecință au fost distruse, fără a mai fi reparate.



Fig. 1.2. Sistem de corectarea torenților distrus parțial datorită subdimensionării



Fig. 1.3. Baraj de corectarea torenților neîntreținut

Pentru evitarea acestor dimensionări greșite pe viitor și pentru verificarea sistemelor de corectarea torenților deja existente este necesară o cercetare mai exactă a zonei unde aceste vor fi amplasate cât și simulări ale instalațiilor ce vor fi utilizate.

De asemenea, pe lângă calculul mai exact al sistemelor de corectarea torenților, este necesară și o privire de ansamblu a tuturor lucrărilor de acest gen dintr-un bazin hidrografic torențial

Amenajarea bazinelor hidrografice torențiale, în sensul hidrologic al noțiunii, constă în aplicarea, pe suprafața bazinelor, a unui ansamblu de măsuri organizatorice, de lucrări biologice, agrotehnice, silvice și hidrotehnice în scopul principal al controlului debitului de apă. [2]

Caracterul amenajării bazinelor torențiale trebuie să fie:

1. Integral asigurat prin:

- aplicarea tuturor măsurilor și lucrărilor hotărâtoare pentru un rațional control al apei și solului;
- aplicarea pe întreaga suprafață a bazinului a ansamblului de măsuri și lucrări pentru controlul apei și solului de la cumpăna apelor până la confluența cu emisarul

2. Complex- asigurat prin:

- integrarea reciprocă a măsurilor și lucrărilor prevăzute, atât din punct de vedere tehnic(al funcționalității) cât și spațial(pe toată suprafața bazinului), astfel încât să fie constituit un ansamblu unitar.

Trebuie menționat că realizarea echilibrului hidrologic este de neconceput fără realizarea echilibrului ecologic dintr-un bazin. Aceste două forme de echilibru sunt asociate,se realizează concomitent și se condiționează reciproc.

O atenție deosebită trebuie acordată amenajării bazinelor hidrografice montane. In aceste bazine se concentrează cele mai rapide și violente mase de apă, în timpul ploilor mari și a topirii bruște a zăpezilor. Tot în aceste bazine se află și sursa cea mai importantă de aluviuni transportate de viiturile torențiale spre câmpie, cu efectele nedorite [3].

Bazinele hidrografice montane trebuie amenajate cât mai bine și cât mai urgent, deoarece hidrologia muntelui comandă hidrologia câmpiei și nu invers. Se confirmă astfel dictonul: CÂMPIA SE APARĂ LA MUNTE.

Procesele torențiale odată declanșate, se accelerează în timp și concomitent, inevitabil, cresc dificultățile și costul de combaterea lor. În consecință este de preferat să se prevină din timp efectuând lucrări și măsuri corespunzătoare, combaterea fiind mai ușoară, mai eficientă și mai ieftină.

Într-un bazin hidrografic degradarea versanților se poate produce într-un interval de luni sau ani. Refacerea rețelei hidrografice respectiv a echilibrului hidrologic durează zeci sau chiar sute de ani. În figura 3 este redat „fenomenul de histerezis hidrologic torențial” definit printr-un grad evident de ireversibilitate (prin analogie cu fenomenul histerezis din electricitate, magnetism).

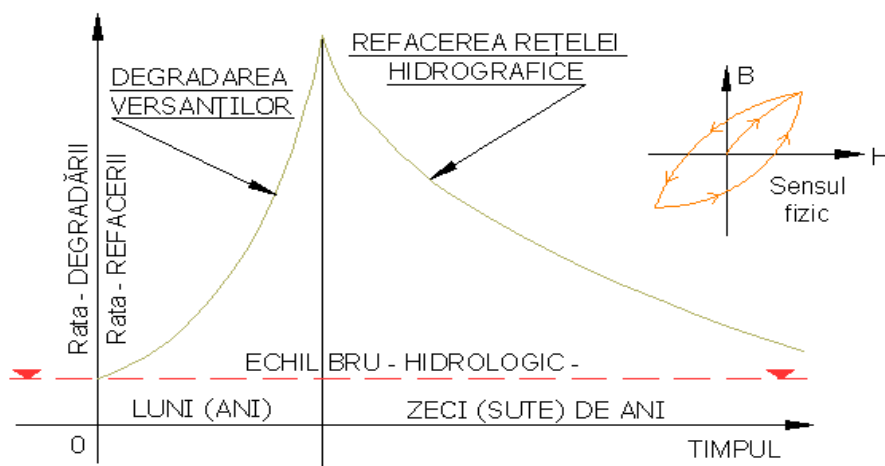


Fig. 1.4. Fenomenul de histerezis hidrologic torențial [1]

Amenajarea bazinelor hidrografice torențiale (BHT) trebuie deci făcută corect de la început pentru a reduce la minim un posibil viitor dezastru. Efectele hidrotehnice folosite la amenajarea bazinelor hidrografice torențiale sunt deci multiple. [1]

Lucrările de amenajare a bazinelor hidrografice torențiale, au efecte economice deosebit de importante, ca o consecință a efectelor anti-erozionale și de ameliorare a solului, cât și a protejării obiectivelor și terenurilor aferente.

Simpla raportare a cheltuielilor de amenajare, la valoarea unor produse limitate și cuantificabile, conduce la o evaluare incompletă a efectelor economice reale, fapt ce în unele cazuri a dus la neexecutarea sau la întârzierea execuției unor lucrări, cu consecințe dezastruoase pe mari suprafețe. Pentru obținerea unor efecte economice maxime, lucrările ce se execută trebuie să fie la nivelul necesarului pe întreaga suprafață a bazinelor hidrografice torențiale.

Deoarece efectele economice se realizează într-o perioadă lungă de timp, evaluarea atât a cheltuielilor cât și a efectelor economice trebuie făcută pe perioada de la declanșarea proceselor de eroziune și degradare a terenurilor până la stingerea torentului și evident și după această perioadă, când efectele economice au devenit maxime și se mențin mai mult sau mai puțin constante.

Caracteristica acestor costuri este dată de eșalonarea lor în timp. Astfel din costul global, valoarea consumată în primii ani de execuție este maximă, costurile descrescând foarte repede fiind formate doar din lucrări de completare, întreținere și reparații, costuri care se mențin pe o perioadă lungă. [4]

Toate costurile se evaluează pe baza proiectelor, respectiv pe baza normelor în vigoare

Venituri importante, ca urmare a execuției lucrărilor de amenajare se realizează în agricultură și zootehnie, urmare a executării lucrărilor de combatere a eroziunii solului pe terenurile arabile, pe pășuni, fânețe, livezi și vii.

Venituri respectiv cote de venituri aduc lucrările de amenajare a bazinelor torențiale și atunci când prin executarea lor, părți ale bazinului pot fi amenajate ca

zone turistice sau de tratament balnear, pentru acumulări de apă de diferite folosințe (energetice, irigații, consum casnic, etc.)

Orice bazin hidrografic, până la declanșarea proceselor de eroziune, are un potențial productiv bine determinat prin veniturile directe ce le realizează.

Din momentul declanșării proceselor torențiale, aceste venituri scad până la punerea în funcțiune a lucrărilor de amenajare. De abia după o perioadă de timp aceste venituri încep să crească la valori egale sau mai mari decât cele inițiale.

Dacă nu se intervine în bazin cu lucrări aceste venituri scad la valoarea zero.

Efectele sociale pe care le implică lucrările de corectarea torenților în majoritatea lor derivă din efectele de ordin tehnic și economic, cum sunt realizarea unor producții de lemn și produse accesorii necesare oamenilor. Regularizarea regimului hidrologic asigură apa potabilă, pentru irigații, etc. Prin lucrările executate sunt apărute de distrugere diverse obiective și terenuri în care oamenii fie că locuiesc, fie că își desfășoară diverse activități. Ameliorarea condițiilor de sol, permite o valorificare superioară a acestuia în viitor, însăși activitatea de amenajarea a BHT asigură locuri de muncă pentru oamenii din zonă.

Așa cum s-a arătat bazinele hidrografice torențiale au devenit în cadrul peisajului geografic "segmente alterate" ale mediului înconjurător, cu consecințele negative asupra acestuia [4].

Lucrările de amenajare a bazinelor hidrografice torențiale prin efectele hidrologice și antierozionale contribuie într-o măsură foarte mare la protecția mediului, aducând servicii deosebite de ordin sanitar, turistic și estetic.

Este cunoscut faptul că în multe zone devastate de procese torențiale și de eroziune, depopulate, după executarea lucrărilor de amenajare, aceste zone s-au transformat treptat în zone agreabile și căutate din punct de vedere turistic și de agrement.

În fond se poate afirma că lucrările de amenajare a bazinelor hidrografice torențiale fac parte din lucrările de "reconstrucție ecologică".

Din acest punct de vedere este necesară coroborarea tuturor factorilor care influențează fenomenul de formare a torenților.

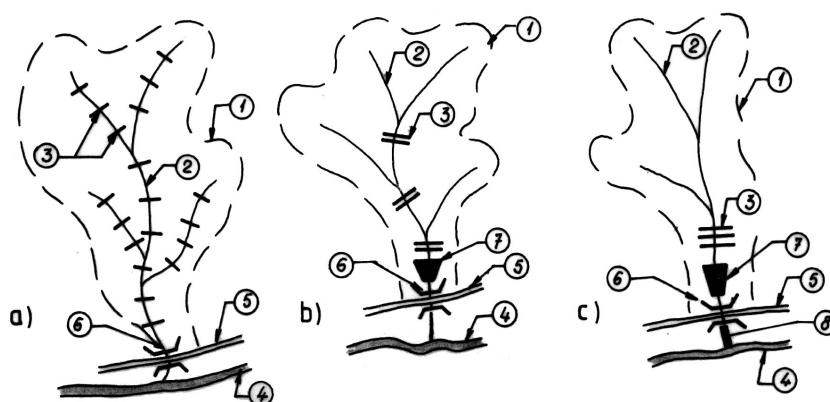


Fig. 1.5.

Modalități de amplasare ale lucrărilor hidrotehnice transversale pe rețeaua hidrografică. a) amplasarea pe întreaga rețea; b) amplasarea barajelor de retenție a aluviunilor după modelul nodurilor hidrotehnice; c) amplasarea barajelor de retenție la gura torentului.
 1- limită bazin torențial; 2- cursul torentului; 3- lucrări transversale (praguri, baraje); 4- emisar (râu); 5- drum forestier; 6- podeț tubular; 7- baraj priză; 8- canal protejată. [2]

Cele mai importante lucrări de corectarea torenților sunt pragurile, traversele și barajele.

Pragurile, sunt lucrări amplasate transversal în albiile torenților / ravenelor și au drept rol funcțional de a reduce viteza de curgere (reducerea eroziunii și favorizarea depunerilor) și a dirija curentul de apă după un traseu favorabil. Se construiesc prioritar din materiale locale (lemn, fascine, saltele de fascine, pământ vegetal).

Traversele, sunt lucrări transversale amplasate de asemenea în albie, având rolul menținerii patului albiei la cota inițială. Sunt executate din beton sau zidărie de piatră.

Traversele, sunt lucrări transversale amplasate, de asemenea în albie, având rolul menținerii patului albiei la cota inițială. Sunt executate din beton sau zidărie de piatră.

Barajele, sunt lucrări masive față de cele anterior prezentate, cu înălțimi cuprinse între $H = (2,0 \div 4,0)$ m. Utilizarea lor este justificată când lucrările efectuate în bazin și pe cursul superior al ravenelor nu pot reține în totalitate scurgerea materialului solid. Aceasta pentru că barajele sunt cele mai eficiente lucrări transversale destinate acestui scop. De asemenea, barajele sunt justificate în dreptul centrelor populate, ale căilor de comunicație (căi ferate, șosele) și pentru protejarea lucrărilor hidrotehnice existente. [3]

Folosirea betonului și a betonului armat se recomandă doar în cazuri impuse de condiții constructive, statice, sau dacă din calculele economice utilizarea acestor materiale rezultă ca fiind mai rentabilă decât zidăria de piatră.

În prezenta teză de doctorat am studiat canelele prevăzute cu disipatoare de energie (obstacole puse în canalul torențial) pentru a stabili forma optimă din punct de vedere hidrodinamic a acestor disipatoare.

CAPITOLUL 2. CURGEREA BIFAZICĂ ÎN TORENȚI ȘI CANALE TORENȚIALE

Cele mai multe râuri și canale au albiile din sol obișnuit, de natură mai mult sau mai puțin erodabilă. Chiar și în canalele care fac parte din sistemele de corectare a torenților care uzual sunt din beton, cu timpul albia este erodată, respectiv apar depuneri de sedimente. Apa care curge în astfel de canale cu timpul erodează albia, antrenează particule care sunt mai grele decât apa, modificând astfel topografia canalului și practic are loc o curgere bifazică. Acest fenomen este de importanță economică și ecologică majoră nu doar în cazul sistemelor de corectare a torenților, ci și pentru determinarea posibilității de colmatare, de subspălare a structurilor (poduri, podețe), etc.

Transportul sedimentelor

Granulele care formează frontiera unui curent aluvionar au o greutate și o capacitate de rezistență limitate, apar fenomene de coeziune și frecare. Ele sunt puse în mișcare dacă forțele rezultate din mișcarea fluidului care acționează pe aceste particule sunt mai mari decât forțele rezistente (de coeziune, respective frecare). De obicei acest aspect este exprimat sub forma tensiunilor disturbatoare și rezistente din albia curentului de fluid. Dacă tensiunea tangențială τ care acționează într-un punct al frontierei curentului este mai mare decât o anumită valoare critică τ_{cr} , atunci granulele vor fi transportate din această regiune și albia va fi supusă eroziunii în acea zonă. În literatura de specialitate se introduce noțiunea de *forță de tracțiune relativă* într-un punct, τ/τ_{cr} . Dacă aceasta este puțin mai mare decât 1, doar granulele din stratul superficial al frontierei necompacte vor fi detașate și transportate. Dacă τ/τ_{cr} este mai mare decât 1, dar sub o anumită valoare, granulele sunt transportate "în salturi" din vecinătatea albiei. Acest mod de transport se numește "încărcarea albiei". Dacă raportul este mai mare, granulele vor fi antrenate în curentul de fluid și vor fi transportate înspre aval datorită turbulenței. Acest mecanism se numește "încărcare în suspensie". Mișcarea simultană a fluidului care efectuează transportul și a sedimentelor transportate este o formă de *curgere bifazică*.

Variabilele care descriu transportul particulelor sunt:

- ρ - Densitatea apei (kg/m^3)
- ρ_s - Densitatea particulelor solide (kg/m^3)
- ν - Vâscozitatea cinematică a apei (m^2/s)
- Φ - Diametrul granulei (m)
- g - Accelerația gravitațională (m/s^2)
- h - Adâncimea de curgere (m)
- τ - Tensiunea tangențială a apei pe albie (kg/ms^2)

Cum există 7 mărimi și trei unități de bază implicate (lungime, masă, timp) se pot defini patru numere adimensionale care pot caracteriza problema. De fapt, este util să se înlocuiască g cu $g' = g(\rho_s/\rho - 1)$, accelerația gravitațională aparentă a

particulelor în submersiune și de a înlocui t cu viteza tangențială („de forfecare”)

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Variabilele adimensionale convenabile care derivă din considerente fizice sunt:

$$\Theta = \frac{v_*^2}{g'\phi} = \frac{ghJ_0}{g'\phi} = \frac{J_0h}{(G-1)\phi} \quad (2.1)$$

aproximativ Raportul forței de forfecare pe o particulă și greutatea sa submersată

$$R_* = \frac{v_*\phi}{v} \quad (2.2)$$

aproximativ raportul dintre forțele de inerție ale fluidului și forțele de viscozitate pe granulă

$$G = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (2.3)$$

Densitatea relativă a materialului albiei și

$\frac{\phi}{h}$, raportul dintre mărimea granulei și adâncimea apei

Două mărimi deosebit de importante sunt R_* care este numărul Reynolds al granulei și Θ parametrul Shields care poate fi considerat ca tensiune adimensională, fiind similar criteriului Froude.

Incipiența mișcării

Shields a realizat în 1930 o serie de experiențe la Berlin și a concluzionat că există o bandă extremă de îngustă de demarcare între antrenarea și ne-antrenarea particulelor din albie, corespunzătoare incipienței mișcării. El a reprezentat aceasta într-un grafic funcție de R_* . O problemă o constituie faptul că viteza fluidului (componenta tangențială) apar în ambele expresii. De aceea este mai simplu să se introducă mărimea adimensională a granulei (conform recomandărilor lui Zalin și Ferreira din 2001):

$$\delta = \left(\frac{R_*^2}{\Theta}\right)^{1/3} = \phi \left(\frac{g'}{v^2}\right)^{1/3} \quad (2.4)$$

Referitor la valoarea lui δ : dacă luăm o valoare uzuală pentru $G=2,65$ la care se adaugă $g=9,8\text{m/s}^2$, $v=10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ (la 20°C) atunci rezultă $\delta \cong \Phi \times 25000$ în unități

metrice. Dacă Φ este specificat în milimetri, atunci este $\delta \cong \Phi \times 25$, deci pentru diferite dimensiuni de paricole se obțin valorile din tabelul de mai jos:

δ	0,1	1	10	100	1000
Φ (mm)	0,004	0,04	0,4	4	40

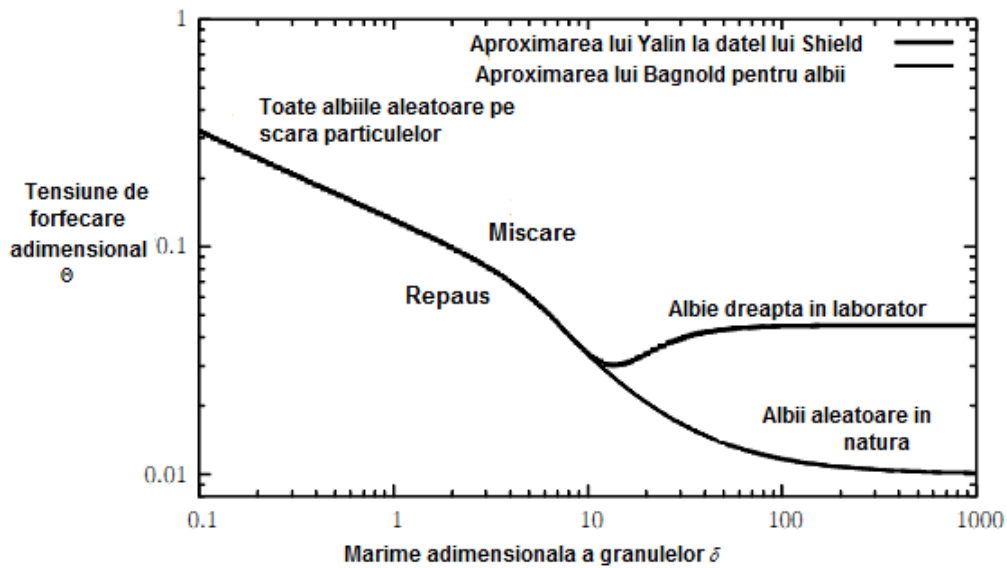


Fig.2.1 Diagrama mișcării incipiente

Figura 1 arată reprezentarea rezultatelor obținute de Shields, cu δ în abscisă. În locul rezultatelor experimentale se folosește formula lui Yalin care este o aproximare a rezultatelor pentru mișcarea incipientă, oferind valoarea Θ_{cr} :

$$\Theta_{cr} = 0.13\delta^{-0.392}e^{0.015\delta^2} + 0.045(1 - e^{0.068\delta}) \quad (2.5)$$

Deasupra liniei, pentru valori mai mari ale lui Θ și deci viteze mai mari sau granule mai ușoare și mai mici, particulele vor fi antrenate în curentul de fluid. Sub linie, particulele ar trebui să fie stabile. Pentru particulele mai mici apare o dependență liniară, în timp ce pentru particulele mai mari tensiunea tangențială critică, pe baza experiențelor lui Shear, se apropie de o valoare constantă de aproximativ 0,045. Între ele este o "adâncitură" în curbă, cu un minim la $\Phi=14$, corespunzând unei mărimi a granulei de 0,035mm, granulația nisipului fin.

Bagnold susține că probabil nu există niciun motiv legat de mecanica fluidelor pentru aceste date, ci apare un efect implicit de scară, un efect geometric artificial și sugerează că diagrama Shields nu a fost interpretată corect. Pentru particule mai mari, aplatizate în timp, se poate ca pe acestea să fie așezate granule

mici pe ele care pot fi "aruncate" în curentul de fluid. Particulele mai mari (pietriș, pietre) de asemenea pot fi antrenate de fluid, pe când albia modelată de Shields era aplatizată, nivelând vârful particulelor mai mari.

Fenton și Abbott au continuat cercetările lui Shields și, deși nu au ajuns la rezultate definitive, recomandă pentru particule mai mari să se ia valoarea Θ_{cr} mai degrabă 0,01 decât 0,045.

Curgerea turbulentă în torenți

Având în vedere complexitatea fenomenului se caută relații simple pentru a corela mărimile fizice. Viteza tangențială u este o mărime semnificativă. Considerând curgerea staționară și uniformă într-un canal componenta forței gravitaționale pe o distanță elementară Δx este $\rho g \Delta x S_0$. Forța tangențială care se opune forței gravitaționale este $\tau \times P \times \Delta x$. Egalând cele două se obține

$$\tau = \rho g \frac{A}{P} J_0 \quad (2.6)$$

În cazul canalelor largi $A/P = h$, deci rezultă

$$\tau = \rho g h J_0 \quad (2.7)$$

Iar pentru viteza "de forfecare" avem

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g h J_0} \quad (2.8)$$

În termeni de tensiune tangențială adimensională se poate scrie relația:

$$\Theta = \frac{v_*^2}{g' \phi} = \frac{g h J_0}{g' \phi} = \frac{J_0 h}{(G-1) \phi} \quad (2.9)$$

Similitudinea curentilor bifazici

În cazul fenomenelor de curgere bifazică, așa cum este transportul de sedimente este convenabilă folosirea criteriilor de similitudine (numere de similitudine adimensionale) care guvernează atât experiențele de laborator cât și fenomenul fizic real. În acest caz se dorește ca mărimea adimensională a particulelor și tensiunea tangențială adimensională să aibă aceeași valoare atât pentru model cât și la scară naturală. Folosind indicele m pentru model și niciun indice pentru scara naturală, se obțin:

$$\delta_m = \delta \text{ astfel încât } \phi_m \left(\frac{g' m}{v^2} \right)^{1/3} = \phi \left(\frac{g'}{v^2} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

Dar cum viscozitatea și accelerația gravitațională sunt aceleași în ambele cazuri, se ajunge la:

$$\phi_m (G_m - 1)^{1/3} = \phi (G - 1)^{1/3} \quad (2.11)$$

Tensiunea tangențială adimensională este:

$$\frac{J_0 h_m}{(G_m - 1) \phi_m} = \frac{Jh}{(G - 1) \phi} \quad (2.12)$$

În practică nu pot fi satisfăcute simultan toate criteriile de similitudine. Debitul de transport pe albie este dat de relația lui Bagnold

$$q_{sb} = \frac{\beta v_b (\tau - \tau_{cr})}{(\rho_s - \rho) g} \quad (2.13)$$

În care β este o funcție de δ și v_b este viteza curentului în vecinătatea albiei. În cazul curgerii turbulente, într-o albie rugoasă se poate aproxima $\beta \approx 0,5$.

Când vorbim însă de curgerea în torenții din natură, nu putem vorbi doar de particule în suspensie, ci și de diverse aluviuni pe care apa le transportă. Cele mai des întâlnite sunt:

Aluviuni cu material lemnos



Fig. 2.2. Aluviuni cu material lemnos în canalul torențial



Fig. 2.3. Aluviuni cu material lemnos în cursul natural al torentului



Fig. 2.4. Aluviuni cu material lemnos în sistemul de corectarea torenților

Aluviuni cu pietre și bolovani:



Fig. 2.5. Aluviuni cu pietre și bolovani în sistemul de corectarea torenților



Fig. 2.6. Aluviuni cu pietre și bolovani în canalul torențial

În cele mai multe cazuri însă nu este vorba de un singur tip de aluviune, ci de o combinație a acestora. Din acest motiv este imposibilă recrearea în condiții de laborator sau numeric a condițiilor din teren, în continuarea tezei urmând a se folosi apă fără particule în suspensie sau material aluvionar.



Fig. 2.7. Aluviuni mixte (material lemnos și pietre) în cursul natural al torentului

CAPITOLUL 3. ASPECTE TEORETICE REFERITOARE LA CORECTAREA TORENȚILOR

3.1. Mecanismul formării torenților și posibilități de corectare ale acestora

Prin *torent* se înțelege o rețea de ogașe și ravene care converg spre un canal colector, prin care curg cu ocazia ploilor și topirii zăpezilor, cantități mari de apă și material solid. Se consideră ravene torențiale, formațiunile la care debitul specific lichid cu asigurarea de 1 % depășește valoarea de 40 m³/s/ha, iar eroziunea specifică medie este mai mare de 4,0 m³/an și hectar. [4]

Orice ravenă torențială evoluează în adâncime până la obținerea unui profil longitudinal de echilibru morfologic, echilibru obținut în mod natural. Se consideră în acest caz că ravena torențială este inactivă.

Particularitățile scurgerii în bazinele hidrografice ale ravenelor torențiale se pot caracteriza cu ajutorul a doi coeficienți, și anume:

1. *coeficientul de încărcare* al curentului (K_i) dat de relația:

$$K_i = \frac{V_{al}}{V_a} \quad (3.1)$$

unde: V_{al} - volumul aluviunilor transportat de torent;
 V_a - volumul apei care transportă acest curent;

2. *coeficientul de torențialitate* al curentului (K_t) definit de relația:

$$K_t = \frac{v_{am}}{v_a} \quad (3.2)$$

unde: v_{am} - viteza medie de curgere a curentului încărcat cu aluviuni;
 v_a - viteza medie de curgere în aceleași condiții hidraulice al unui curent fără material aluvionar.

Clasificarea torenților se face după mai multe criterii:

1. După *forma bazinului de recepție*, deosebit:
 - torenți cu bazin de recepție circular (echivalent), caracterizați printr-o concentrare rapidă a scurgerii și apariția bruscă a viiturilor, cu debite mari;
 - torenți cu bazin de recepție alungit / longitudinal, la care apariția debitelor de viitură este mai lentă.
2. În funcție de *caracteristicile curentului*, pot fi:
 - torenți apoși, fără o încărcare deosebită cu material aluvionar (solid), având $K_i = (0...0,4)$ și $\gamma_{am} = 1,06 \text{ tf/m}^3$; sunt caracteristici bazinelor bine acoperite cu

- vegetație și cu roci rezistente la eroziune, unde γ_{am} este greutatea specifică a amestecului;
- torenți apo-pietroși, încărcăți cu mari cantități de material solid, deci $K_i = (0,04...0,4)$ și $\gamma_{am} = 1,50 \text{ tf/m}^3$; sunt caracteristici bazinelor cu vegetație degradată;
 - torenți noroioși, care au o foarte mare încărcare cu material aluvionar, cu $K_i > 0,4$ și $\gamma_{am} > 1,50 \text{ tf/m}^3$.
3. Conform criteriului *activității predominante a torentului*, distingem:
- torenți / ravene de săpare, la care activitatea principală este cea de eroziune în adâncime;
 - torenți / ravene de transport, la care s-a atins un oarecare profil de echilibru și nu mai există eroziune de fund;
 - torenți / ravene mixte, la care pe anumite porțiuni se constată o activitate intensă de săpare, iar pe altele de transport.
4. Conform *gradului de torențialitate*, sunt:
- ravene excesiv torențiale, la care debitul specific lichid cu asigurarea $p = 1\%$ este mai mare de $320 \text{ m}^3/\text{s}$ și ha, iar eroziunea specifică medie depășește $32 \text{ m}^3/\text{an}$ și ha;
 - ravene mijlociu torențiale, la care debitul specific lichid cu $p = 1\%$ este $q_{1\%} = (320 \div 40) \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$, iar eroziunea cuprinsă între $e_m = (32 \div 4) \text{ m}^3/\text{an}/\text{ha}$ [4];
- Din punct de vedere constructiv, lucrările de stăvilire a acțiunii torențiale (eroziune în adâncime) sunt lucrări transversale executate din materiale locale (nuiele, fascine, saltele din suluri de fascine, pământ vegetal, etc.) sau clasice (piatră de râu, piatră spartă, beton și beton armat). Ele pot fi amplasate, funcție de activitatea erozivă și de transport din bazin, pe întreaga suprafață a acestuia sau numai în anumite zone.
- Curgerea torențială se definește ca o curgere temporară, concentrată de apă, cu mare viteză, rezultat a unor ploii puternice sau a topirii zăpezii. Viteza mare de scurgere este dată de panta accentuată a terenului ca și de volumul mare de apă care trebuie evacuat într-o unitate scurtă de timp.
- Prin urmare putem spune că din punct de vedere hidromecanic curgerea torențială este o curgere nestaționară, nepermanentă într-un mediu bifazic.
- Datorită faptului că acest tip de curgere este foarte complexă, o rezolvare analitică a ecuațiilor de curgere este aproape imposibilă. Pentru a putea obține totuși rezultate precise referitoare la disipatoarele de energie utilizate am recurs la 2 metode alternative.

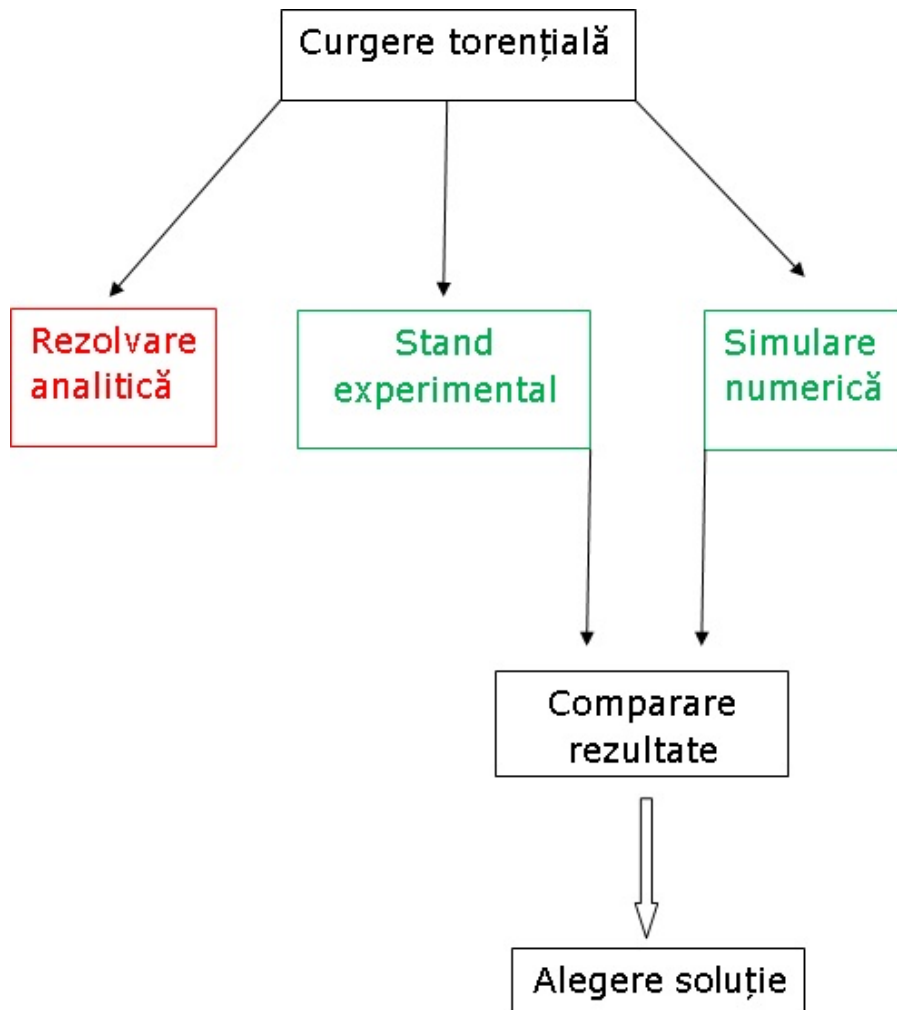


Fig. 3.1. Rezolvarea problematicii curgerii torențiale

Prima metodă este conceperea unui stand experimental care să re Creeze cât mai fidel condițiile naturale. Acest stand este prezentat în detaliu în capitolul 4.

O a doua metodă este simularea numerică.

Modelarea se bazează pe rezolvarea unui set de ecuații diferențiale de conservare, completate cu numeroase ecuații suplimentare, *modele*, adesea semiempirice, pentru tratarea turbulenței, a presiunii, cavitației, schimbului de căldură, a transportului speciilor chimice sau a fazelor disperse. Aceste ecuații sunt discretizate prin diferite metode, ca metoda diferențelor finite, a elementelor finite, a volumelor finite sau a elementelor de frontieră.

Domeniile de modelat sunt împărțite în părți mici, rezultând rețele de discretizare cu multe noduri. Ecuațiile, scrise pentru fiecare nod, sunt asamblate într-un sistem de ecuații global, care apoi este rezolvat.

Pentru aceasta modelare am ales pachetul de software-ul Ansys Fluent împreună cu componenta acestuia, programul de desen Gambit.

O prezentare mai amplă și simulările efectuate vor fi prezentate în capitolul 4.

3.2 Curgerea în canalele sistemelor de corectarea torenților

3.2.1. Definiție și diferențe între curgerea în conducte și curgerea în canale deschise

Sistemele de corectarea torenților se bazează pe colectarea apei în canale și disiparea energiei cinetice ale acesteia.

Curgerea apei într-un circuit hidraulic poate fi *curgere în canal deschis* sau *curgere într-o conductă*. Cele două curgeri sunt similare din multe privințe, dar diferă într-un punct esențial - Curgerea în canal deschis trebuie să aibă o suprafață liberă, în timp ce curgerea în conductă nu are suprafață liberă. Suprafața liberă este supusă presiunii atmosferice. În conductă nu există atmosferă "directă", ci doar presiune de natură hidraulică.

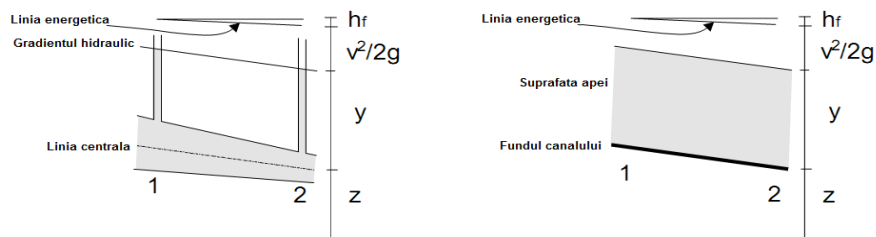


Fig. 3.2 Schema curgerii în conductă și canal deschis

Energia totală a curentului de fluid în secțiune este suma cotelor z ale liniei centrale a conductei, înălțimea piezometrică y și presiunea dinamică $V^2/2g$, unde V reprezintă viteza medie. Energia este reprezentată în figură prin linia energetică sau gradientul de energie. Pierderea de energie prin curgere de la secțiunea 1 la secțiunea 2 este reprezentată prin h_f .

În partea dreaptă se prezintă o diagramă similară pentru curgerea în canal deschis. Aceasta este simplificată presupunând curgere paralelă cu distribuție uniformă a vitezei și pantă redusă a canalului. În acest caz gradientul hidraulic este suprafața apei deoarece adâncimea apei corespunde înălțimii piezometrice.

În ciuda asemănării dintre cele două tipuri de curgere, rezolvarea problemelor de curgere în canale deschise este mult mai complicată decât a celor aferente curgerii în conducte. Condițiile de curgere în canale deschise sunt complicate de poziția suprafeței libere care se schimbă în timp și spațiu. În plus, adâncimea curentului, debitul și pantele fundului canalului și a suprafeței libere sunt interdependente.

Condițiile fizice în canale deschise diferă mult față de cele din conducte – secțiunea transversală a conductelor este de obicei rotundă, dar în cazul canalului deschis aceasta poate avea orice formă.

Abordarea rugozității de asemenea pune probleme mai mari în canale deschise decât în conducte. Deși în conducte pot exista rugozități diferite - de la metal lustruit la fier puternic corodat canalele deschise pot fi din metal lustruit până la canale naturale cu iarbă și rugozități care pot depinde de adâncimea curgerii.

Curgerea în canale deschise pot fi la diferite scări. Adâncimea curgerii poate varia între câțiva cm în cazul stațiilor de tratare a apei până la zeci de metri în fluvii. Viteza media a curentului poate varia de la sub 0,001m/s în ape liniștite la peste 50m/s în conducte deversoare de mare cădere. Domeniul debitelor poate varia de la 0,001l/s în combinate chimice la peste 10.000 m³/s în fluvii sau deversoare.

În oricare din cazurile de mai sus, situația de fapt este caracterizată prin aceea că există o suprafață liberă a cărei poziție NU este cunoscută dinainte - ea se determină aplicând principiile impulsului și continuității.

Curgerea în canal deschis este determinată mai degrabă de forța gravitațională decât de acțiunea presiunii cum este cazul conductelor.

Tabelul de mai jos prezintă o sinteză a diferențelor fenomenologice între curgerea în conducte și curgerea în canale deschise.

	Curgere în conducte	Curgere în canale deschise
Curgere determinată de	Presiune	Gravitație (energie potențială)
Secțiune transversală a curentului	Cunoscută, constantă	Necunoscută dinainte deoarece adâncimea curentului nu este cunoscută
Parametrii caracteristici ai curgerii	Viteza dedusă din ecuația de continuitate	Adâncimea curentului dedusă simultan din rezolvarea ecuației de continuitate și ecuației de conservare a impulsului
Condiții limită/ de frontieră specifice		Presiune atmosferică pe suprafața liberă

3.2.2. Tipuri de curgere ce pot apărea în canale torențiale

Clasificarea de mai jos are în vedere modificarea adâncimii curentului în timp și spațiu, unde RVF – curgere cu variație rapidă, GVF – curgere cu variație graduală.

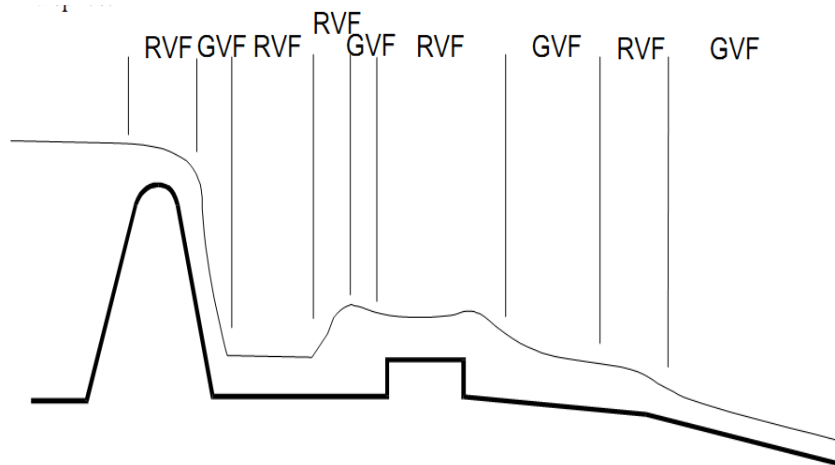


Fig. 3.3 Tipuri de curgere care pot apărea în canale torențiale

Curgere staționară/ nestaționară: Criteriul dominant este TIMPUL.

Curgerea este considerată staționară dacă adâncimea curentului într-un anumit punct nu se modifică sau poate fi considerată constantă în intervalul de timp considerat. Curgerea este nestaționară dacă adâncimea variază în timp.

Curgere uniformă: Criteriul dominant este SPAȚIUL

Curgerea în canale deschise este considerată uniformă dacă adâncimea și viteza curentului sunt aceleași în orice secțiune a canalului. De aici rezultă că curgerea uniformă poate avea loc doar în canale prismatice și/sau cilindrice. În cazul curgerii staționare și uniforme, adâncimea și viteza sunt constante atât în timp cât și în funcție de distanță. Acest tip de curgere constituie tipul fundamental de curgere într-un canal deschis. Are loc atunci când forța gravitațională este compensată (echilibrată) de forța de rezistență la înaintare.

Curgere staționară neuniformă:

Adâncimea variază cu distanța însă nu în funcție de timp. Acest tip de curgere poate fi o curgere neuniformă graduală (a) sau o curgere neuniformă cu variație rapidă (b). Rezolvarea tipului (a) necesită aplicarea ecuațiilor de energie și rezistenței de frecare, în timp ce tipul (b) necesită rezolvarea ecuațiilor conservării energiei și impulsului.

Curgere nestaționară

Adâncimea variază în timp și spațiu. Este cel mai uzual tip de curgere și necesită rezolvarea ecuațiilor impulsului și rezistenței de frecare dependente de timp. În multe cazuri practice, curgerea este suficient de apropiată de curgerea staționară și analiza se poate face ca și în cazul curgerii staționare neuniforme cu variație graduală.

3.2.3. Caracteristicile canalelor deschise

Canale artificiale.

Acestea sunt canale realizate de om. Ele includ: canale de irigații, canale navigabile, deversoare, canale de evacuare ape reziduale, canale de drenaj, etc. Ele sunt construite de regulă cu secțiuni transversală regulată, aceasta fiind constantă pe toată lungimea canalului. Se execută din beton, metal sau pământ și au rugozitatea definită clar, eventual variabilă în timp, excepție fiind acele care se înieerbează cu trecerea timpului. Analiza curgerii în astfel de canale clar definite va duce la rezultate suficient de exacte din punct de vedere al aplicabilității practice.

Canale naturale

Canalele naturale pot diferi foarte mult. Ele de obicei nu au o formă regulată și materialele din care sunt făcute pot diferi mult, deși de obicei sunt din pământ, acesta având însă proprietăți diferite. Rugozitatea suprafeței se schimbă atât în timp cât și pe lungimea canalului și de asemenea în funcție de pantă. De aceea analiza curgerii este mult mai dificilă, ținând cont și de faptul că frontiera solidă se modifică datorită eroziunii și depunerii de materiale care se sedimentează.

Proprietățile geometrice necesare analizei curgerii

Analiza curgerii necesită diferite caracteristici geometrice ale secțiunii transversale a canalului. Pentru canalele artificiale, aceste caracteristici pot fi definite folosind ecuații algebrice simple care determină adâncimea y a curentului de fluid.

Se definesc următorii parametrii geometrici:

- Adâncimea (y)- distanța pe verticală de la punctul cel mai de jos al secțiunii canalului la suprafața liberă
- Treapta (z)- distanța pe verticală de la suprafața liberă la un punct arbitrar
- Aria (A)- secțiunea transversală a curentului, normală la direcția curentului
- Perimetrul udat (P)- perimetrul suprafeței umectate măsurat perpendicular pe direcția de curgere
- Lățimea suprafeței (B)- lățimea secțiunii canalului la suprafața liberă
- Raza hidraulică (R)- raportul dintre arie și perimetrul udat (A/P)
- Adâncimea hidraulică medie (D_m)- raportul dintre arie și lățimea suprafeței (A/B)

3.2.4. Ecuațiile fundamentale

Ecuațiile care descriu curgerea fluidului derivă din trei legi fundamentale ale fizicii:

- a. **Legea conservării materiei (sau masei)**
- b. **Legea conservării energiei**
- c. **Legea conservării impulsului**

În mecanica solidului aceste legi se aplică unui obiect clar definit și având o formă fixă. În mecanica fluidelor obiectul nu este clar definit deoarece își modifică permanent forma. De aceea se folosește noțiunea de *volum de control*. Acesta este un volum imaginar de fluid în cadrul "corpului fluid". Ecuațiile de bază care descriu legile de conservare de mai sus se aplică considerând forțele aplicate colțurilor unui volum de control dintr-un fluid.

Ecuația de continuitate (legea conservării masei)

Pentru orice volum de control într-un interval de timp Δt principiul conservării masei implică faptul că masa fluidului care intră în volumul de control minus masa fluidului care iese din volumul de control este egală cu variația masei în volumul de control.

În cazul curgerii staționare a unui fluid incompresibil, masa/volumul fluidului afluent este egală cu masa/volumul fluidului efluent, deci nu există variație a masei. De aceea, ecuația de continuitate în acest caz va fi scrisă sub forma

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (3.3)$$

Ecuția energiei (legea conservării energiei)

Urmând raționamentul de la sub-punctul precedent și considerând mișcarea staționară și fluidul incompresibil, ecuația energiei va avea forma:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 = H = \text{constant} \quad (3.4)$$

Observații:

- Ecuția (3.4) reprezintă expresia matematică a ecuației Bernoulli.
- Ecuția Bernoulli a fost dedusă presupunând că fluidul este ideal, deci nu există frecare între "straturile" de fluid. Pentru fluide reale trebuie incluși termeni care țin cont de frecare.
- Termenii din ecuația (3.4) au semnificație fizică și unități de măsură de lungime. De aceea, termenii sunt considerați "înălțimi" și duc la denumirile de

$$\frac{p}{\rho g} = \text{înălțime statică}$$

$$\frac{v^2}{2g} = \text{înălțime dinamică}$$

$$z = \text{înălțime geometrică}$$

Ecuția impulsului (legea conservării impulsului)

Integrarea termenilor pentru un anumit volum de control determină forța totală pe direcția x sub forma:

$$F_x = \rho Q (v_{2x} - v_{1x}) \quad (3.5)$$

dacă viteza V este uniformă pe toată secțiunea transversală.

Ecuțiile de conservare a impulsului și energiei (Bernoulli) au fost deduse în ipoteza vitezei constante (egală cu V) pe toată suprafața transversală sau în lungul unei linii de curent. Practic nu se întâmplă așa. Pentru a se folosi totuși aceste ecuații, se definesc coeficienții energetici și de impuls, respectiv α și β care țin cont de neuniformitatea distribuției vitezei pe secțiune.

Aceștia se definesc sub forma:

$$\alpha = \frac{\int \rho v^3 dA}{\rho v_{med}^3 dA} \quad (3.6)$$

$$\beta = \frac{\int \rho v^2 dA}{\rho v_{med}^2 dA} \quad (3.7)$$

Unde V este viteza medie.

Atunci ecuația Bernoulli poate fi re-scrisă sub forma:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v_{med}^2}{2g} + z = \text{constant} \quad (3.8)$$

Și ecuația impulsului devine:

$$F_x = \rho Q \beta (v_{med_{2x}} - v_{med_{1x}}) \quad (3.9)$$

Distribuția de viteze în canale deschise

Viteza într-un canal deschis va varia întotdeauna pe secțiune datorită frecării cu frontiera solidă. Ar trebui ca viteza maximă să apară la suprafața liberă unde forța tangențială este nulă, dar nu se întâmplă așa. Viteza maximă de obicei este imediat sub suprafața liberă, explicația este dată de existența curenților secundari care circulă de la frontierele solide spre centrul secțiunii și de existența frecării la interfața aer/apă.

Figura de mai jos prezintă distribuții tipice de viteză pe secțiunile transversale ale unor canale. Cifrele indică procentajul din viteza maximă.

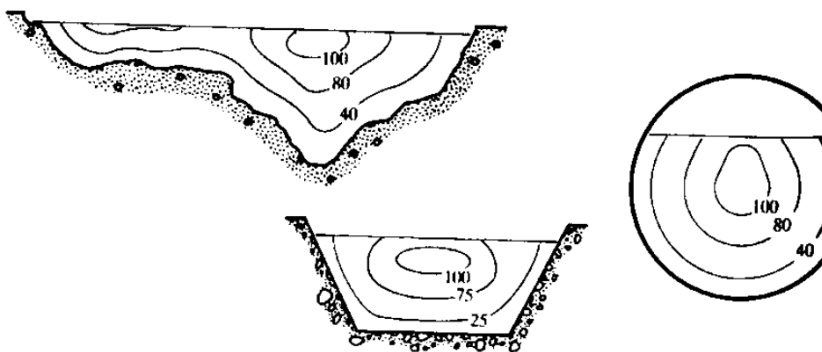


Fig. 3.4 Distribuții de viteze pe diferite secțiuni de canal închis

3.2.5. Determinarea coeficienților energetici și de impuls

Determinarea valorilor pentru α și β impune măsurarea sau cunoașterea distribuției de viteze. În canalele de secțiune neregulată α poate depăși valoarea 2 și trebuie inclus în ecuația Bernoulli.

3.2.6. Curgere laminară și turbulentă

La fel ca și în cazul conductelor, în canalele deschise, curgerea poate fi laminară sau turbulentă, în funcție de numărul (criteriul de similitudine) Reynolds (Re). La conducte, limitele pentru curgerea laminară/turbulentă sunt:

Curgere laminară: $Re_{canal} < 2000$
Curgere turbulentă: $Re_{canal} > 4000$

Se poate demonstra că în cazul canalelor deschise, aceste limite sunt:

Curgere laminară: $Re_{canal} < 500$
Curgere turbulentă: $Re_{canal} > 1000$

În practică, limita curgerii turbulente nu este atât de clar definită ca și în conducte și de aceea, de multe ori se consideră $Re=2000$ ca prag al curgerii turbulente.

Expresia coeficientului de pierderi longitudinale conform relației Darcy-Wiesbach devine în cazul canalelor deschise:

$$\lambda = \frac{8gRJ_h}{V^2} \quad f = \frac{2gRJ_h}{V^2} \quad (3.10)$$

Iar relația Colebrook-White are expresia:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.11)$$

unde f reprezintă rugozitatea geometrică.

Graficul $\lambda = f(Re)$ în cazul canalelor deschise poate fi trasat folosind această ecuație, dar aplicația practică este dificilă. Relațiile de mai sus sunt utile în conducte, dar în cazul canalelor deschise, datorită variabilei suplimentare (R variază cu adâncimea și forma canalului) acestea sunt dificil de aplicat. De aceea în practică se consideră curgerea în canale deschise ca fiind în domeniul turbulent-rugos și se aplică formule simplificatoare.

3.2.7. Curgerea uniformă și stabilirea formulei frecării

În cazul curgerii uniforme, forțele gravitaționale sunt echilibrate de forțele de frecare care sunt forțe tangențiale în lungul frontierelor solide (fundul canalului și pereții).

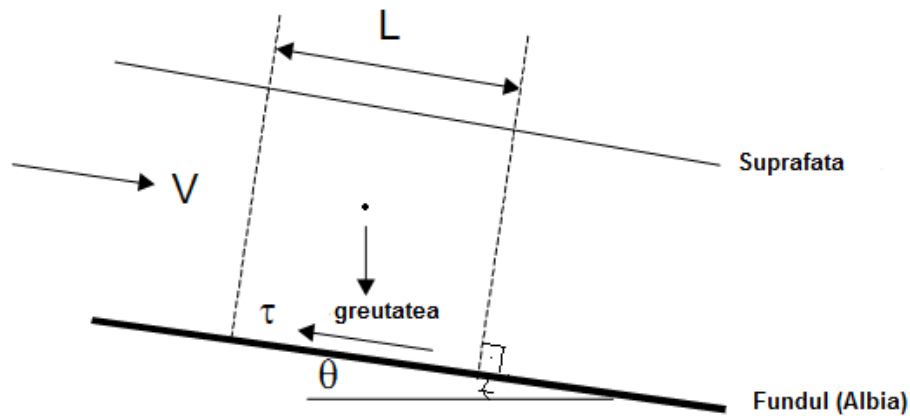


Fig.3.5 Echilibrul forțelor într-un canal deschis

Pentru curgerea uniformă în canale cu pantă redusă se poate demonstra că:

$$\tau = \frac{\rho g A J_h}{P} = \rho g A J_h \quad (3.12)$$

În curgerea turbulentă se poate aproxima că frecarea este direct proporțională cu pătratul vitezei, deci $\tau_0 = K v^2$

Înlocuind în ecuația (3.12) și grupând constantele se obține:

$$V = C \sqrt{R J_h} \quad (3.13)$$

Ecuția 3.14 este ecuația Chezy, iar C constanta Chezy. Datorită faptului că, K nu este constantă ci depinde de Re și de rugozitatea frontierelor solide, C nu este constantă ci depinde de asemenea de numărul Reynolds și de rugozitate. Ecuția Manning.

Numeroase încercări experimentale au permis determinarea unei relații pentru „constanta” C, aplicabilă în cazurile practice

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (3.15)$$

Aceasta este cunoscută ca ecuația Manning, iar n este numărul Manning. Debitul are expresia:

$$Q = \frac{1}{n} \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} J_h^{1/2} \quad (3.16)$$

Domeniul valorilor numărului Manning este cel din tabelul de mai jos:

Tipul canalului	Materialul și forma suprafeței	Domeniul numărului Manning (n)
Râu	Pământ, drept	0,02-0,025
	Pământ, meandre	0,03-0,05
	Pietriș (75-150mm), drept	0,03-0,04
	Pietriș (75-150mm), meandre	0,04-0,08
Canal necăptușit	Pământ, drept	0,018-0,025
	Stâncă, drept	0,025-0,045
Canal căptușit	Beton	0,012-0,017
Modele de laborator	Mortar	0,011-0,013
	Perspex	0,009

Capacitatea de transport

Capacitatea de transport a canalului K este o măsură a capacității canalului de a prelua un anumit debit.

Aceasta rezultă din ecuațiile Chezy și Manning din

$$Q = AC\sqrt{RJ_h} \quad (3.17)$$

$$Q = KJ_h^{1/2} \quad (3.18)$$

Deci:

$$K = ACR^{1/2} \frac{A^{5/3}}{nP^{2/3}} \quad (3.19)$$

Capacitatea de transport se folosește la calculul debitului și treptei în canale compuse și de asemenea la calculul coeficienților energetici și de impuls.

3.2.8. Calcule în curgerea uniformă

Formula Manning poate fi utilizată pentru calculul curgerii staționare și uniforme. Se determină:

- Debitul la o anumită adâncime dată
- Adâncimea pentru un anumit debit dat

În curgerea staționară și uniformă, adâncimea curenului este denumită adâncimea normală. Curgerea uniformă poate avea loc doar în canale cu secțiune transversală constantă (canale prismatice), canalele naturale fiind excluse. Ecuația Manning însă poate fi folosită etapizat pentru curgere variabilă gradual în canale naturale.

3.2.9. Aplicarea ecuației conservării energiei pentru curgeri cu variație rapidă

Oricând într-un canal există schimbări bruște ale secțiunii transversale, pantei sau obstacole vor avea loc variații rapide ale vitezei. Acest tip de curgere este curgere cu variație rapidă. Exemplele tipice sunt curgerea peste deversoare cu muchii ascuțiți și curgeri în zone cu secțiune variabilă brusc (tuburi venturi, deversoare, etc.). Variații rapide pot avea loc și la trecerea de la curgerea super-critică la curgere sub-critică și apariția saltului hidraulic.

Ecuația energiei (Bernoulli)

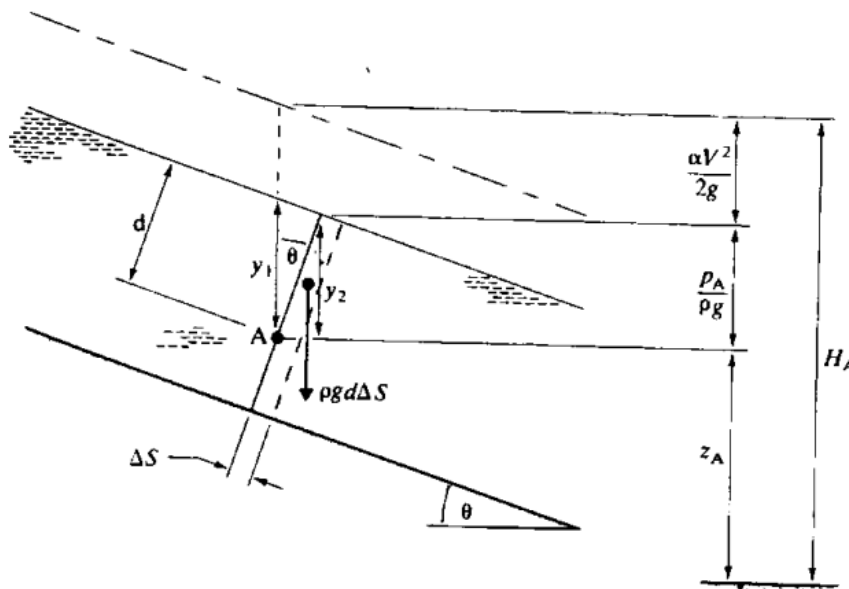


Fig. 3.6 Curgerea uniformă într-un canal

Se poate demonstra că ecuația Bernoulli va avea expresia:

$$y + \frac{\alpha v^2}{2g} + z = H \quad (3.20)$$

În cazul existenței unei proeminențe în canal, situația este cea din figura de mai jos:

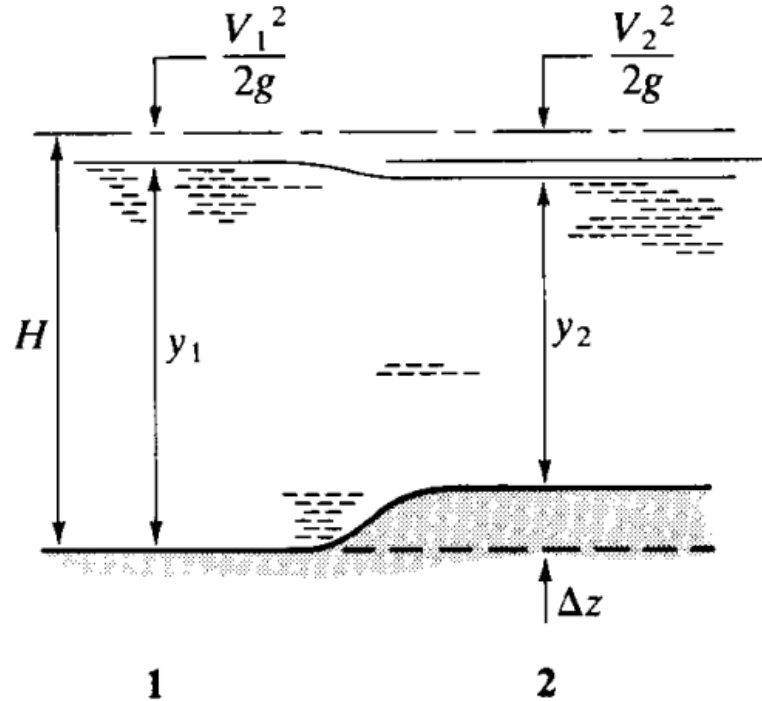


Fig. 3.7 Curgere uniformă întreruptă de proeminență bruscă

Aplicând ecuația Bernoulli între secțiunile 1 și 2 (presupunând un canal orizontal rectangular $z_1=z_2$ și $\alpha=1$) rezultă:

$$y_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \Delta z \quad (3.21)$$

Și aplicând ecuația de continuitate:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q \quad (3.22)$$

$$v_1 y_1 = v_2 y_2 = \frac{Q}{B} = q \quad (3.23)$$

Rezultă după regruparea termenilor:

$$2gy_2^3 + y_2^2 \left(2g\Delta z - 2gy_1 - \frac{q^2}{y_1^2} \right) + q^2 = 0 \quad (3.24)$$

Ecuția de gradul 3 de mai sus are o singură necunoscută, adâncimea de curgere în aval, y_2 și doar o singură soluție a acestei ecuații are sens fizic.

Energia specifică

Informația suplimentară necesară pentru rezolvarea ecuației de mai sus este furnizată de ecuația energiei specifice.

Energia specifică este definită de relația:

$$E_s = y + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (3.25)$$

Pentru curgere cu variație bruscă a secțiunii (proeminență), situația este cea din figura de mai jos:

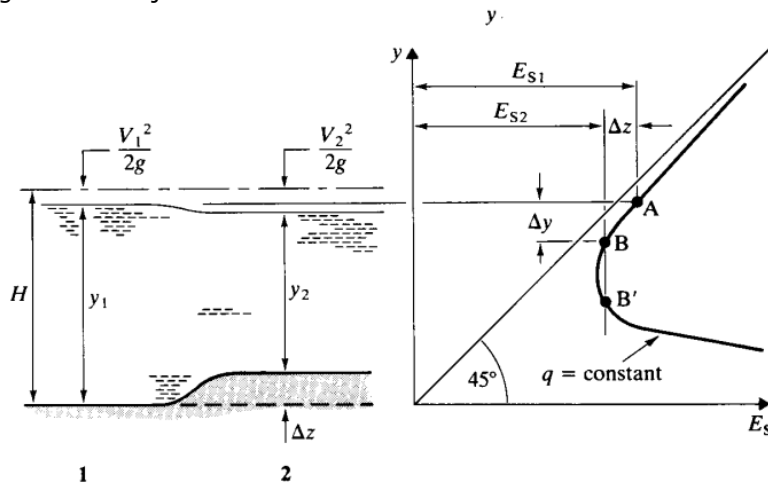


Fig. 3.8 Graficul energiei specifice pentru o variație bruscă a secțiunii

Atunci ecuația energiei specifice poate fi scrisă sub forma:

$$E_{s1} = E_{s2} + \Delta z \quad (3.26)$$

Analizând figura se remarcă: punctul A de pe curbă corespunde energiei specifice în punctul 1 din canal, dar punctul B sau B' de pe grafic poate să corespundă energiei specifice în punctul 2 al canalului. Toate punctele din canal între punctul 1 și punctul 2 **trebuie** să fie situate pe curba energiei specifice între punctul A și B sau B'. Pentru a se atinge punctul B' este necesar ca $E_{s1} - E_{s2} > \Delta z$ ceea ce fizic nu este posibil. De aici rezultă că punctul B de pe curbă corespunde energiei specifice și adâncimii de curgere din secțiunea 2.

3.2.10. Curgere critică, sub-critică și super-critică

Modificarea energiei specifice cu adâncimea s-a reprezentat pentru un debit constant Q, de asemenea se poate reprezenta energia specifică ca și constantă și se poate analiza variația debitului Q cu adâncimea. Aceste două reprezentări sunt date în figura de mai jos.

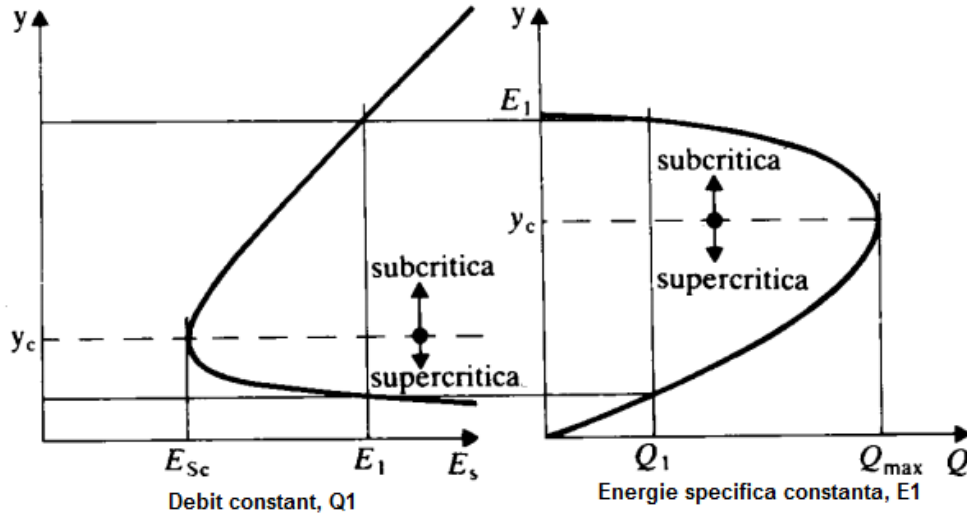


Fig. 3.9 Variația energiei specifice și debitului cu adâncimea

Pentru un debit dat:

- a. Energia specifică are valoarea minimă E_{sc} la adâncimea y_c . Această adâncime se numește *adâncimea critică*.
- b. Pentru toate celelalte valori ale E_s sunt posibile două adâncimi. Acestea se numesc adâncimi alternante. Pentru:
 - i. Curgere *sub-critică* $y > y_c$ (curgere fluvială)
 - ii. Curgere *super-critică* $y < y_c$ (curgere torențială)
 - iii.

Pentru o energie specifică dată:

1. Debitul este maxim la adâncimea critică y_c .
2. Pentru toate celelalte debite sunt două adâncimi posibile de curgere pentru un anumit E_s , deci pentru același E_s există o adâncime sub-critică și super-critică.

Ecuția adâncimii critice poate fi obținută anulând diferențiala lui E_s .

$$E_s = y + \frac{\alpha(Q/A)^2}{2g} \quad (3.27)$$

$$\frac{dE_s}{dy} = 0 = 1 + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dA} \left(\frac{1}{A} \right) \frac{dA}{dy} \quad (3.28)$$

Ținând cont de relațiile:

$$\delta A = B \delta y \quad (3.29)$$

Și la limită

$$dA/dy = B \quad (3.30)$$

Rezultă:

$$\frac{\alpha Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1 \quad (3.31)$$

Ecuția 3.31 poate fi particularizată în funcție de tipul secțiunii transversale a canalului. Pentru un canal rectangular se obține:

$$E_{sc} = y_c \frac{v_c^2}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2} \quad (3.32)$$

$$y_c = \frac{2}{3} E_{sc} \quad (3.33)$$

3.2.11. Numărul Froude

Numărul Froude este definit pentru canale prin relația:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_m}} \quad (3.34)$$

Semnificația sa fizică este pătratul raportului între forța de inerție și forța gravitațională,

$Fr^2 = \text{forța de inerție} / \text{forța gravitațională}$

De asemenea reprezintă și raportul dintre viteza apei și viteza undei.

$Fr = \text{viteza apei} / \text{viteza undei}$

Numărul (criteriul de similitudine) Froude este un număr adimensional extrem de util în hidraulica canalelor deschise. Valoarea sa determină regimul de curgere: sub-critic, critic sau super-critic și direcția de propagare a perturbațiilor.

- $Fr < 1$ curgere sub-critică, viteza apei $>$ viteza undei, nivelele din amonte **afectate** de obstacolele din aval (perturbația se propagă spre amonte)
- $Fr = 1$ curgere critică
- $Fr > 1$ curgere super-critică, viteza apei $<$ viteza undei, nivelele din amonte **nu sunt afectate** de obstacolele din aval (perturbația nu se propagă spre amonte).

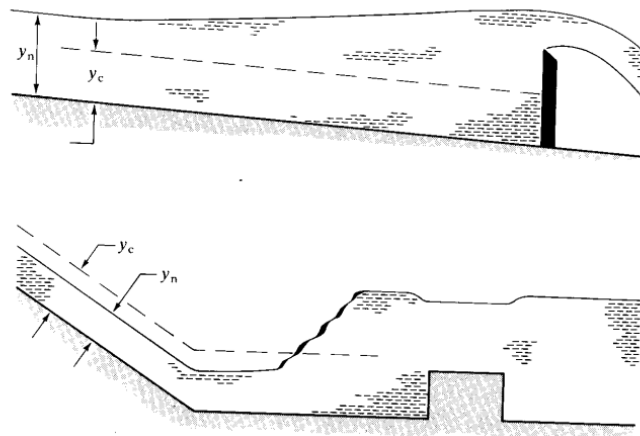


Fig. 3.10 Curgere sub și super-critică și propagarea perturbațiilor

3.2.12. Aplicarea ecuației impulsului pentru curgere cu variație rapidă

Saltul hidraulic este o caracteristică importantă a curgerii în canale deschise și un exemplu de curgere cu variație rapidă. Saltul hidraulic apare la întâlnirea unui curent sub-critic cu unul super-critic. Saltul duce la „asamblarea” suprafețelor, apare turbulență masivă care duce la pierderi mari de energie.

Datorită pierderii mari de energie nu se poate folosi ecuația energiei specifice și de aceea se aplică ecuația impulsului.

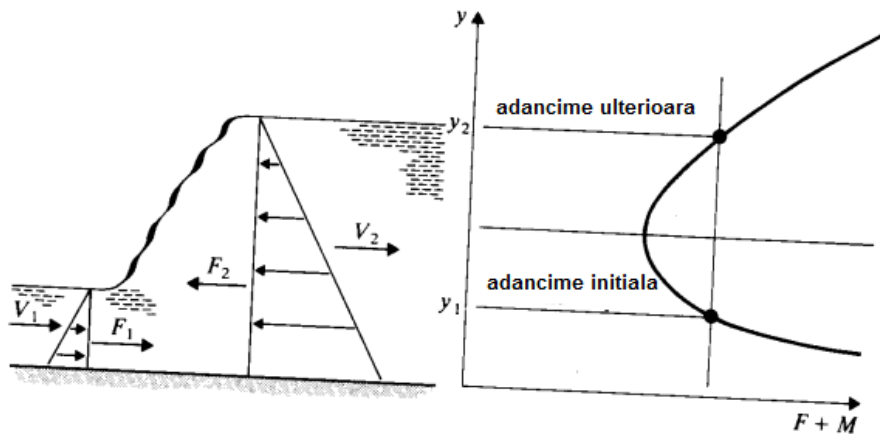


Fig. 3.11 Forțe pe volumul de control în cazul saltului hidraulic

Forța rezultantă pe direcția x= F_1-F_2

Variația impulsului= M_2-M_1

Pentru un debit constant se ajunge la:

$$F_1 + M_1 = F_2 + M_2 = \text{constant} \quad (3.35)$$

Explicitând și regrupând termenii se ajunge în cazul canalului rectangular la:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1) \quad (3.36)$$

Sau la:

$$y_1 = \frac{y_2}{2} (\sqrt{1+8Fr_2^2} - 1) \quad (3.37)$$

3.2.13. Curgere staționară uniform variabilă

La curgerea cu variație rapidă (de ex.: salt hidraulic) nu s-a ținut cont de pierderile datorită frecării și nici de influența pantei albiei. Când se analizează curgerea neuniformă cu variație graduală trebuie ținut cont și de aceste aspecte deoarece curgerea are loc pe distanțe mari.

Includerea pantei canalului și a frecării permite determinarea dacă are loc curgere critică, sub-critică sau super-critică. Se procedează astfel:

- Se calculează adâncimea normală din ecuația Manning.
- Se calculează adâncimea critică.

Adâncimea normală poate fi mai mare, mai mică sau egală cu adâncimea normală. Pentru un canal dat și o rugozitate dată există o singură pantă pentru care adâncimea normală este egală cu adâncimea critică. Această pantă se numește panta critică (J_c).

- Dacă panta este mai mică decât (J_c) adâncimea normală va fi mai mare decât adâncimea critică și curgerea va fi sub-critică. Panta este „blândă”.
- Dacă panta este mai mare decât (J_c) adâncimea normală va fi mai mică decât adâncimea critică și curgerea va fi super-critică. Panta este „abruptă”.

Pentru un canal rectangular larg, panta critică are expresia:

$$J_c = \frac{gn^2}{y_c^{1/3}} \quad (3.38)$$

Variația energiei specifice cu distanța este dată de relația:

$$\frac{dE_s}{dx} = J_h - J_f \quad (3.39)$$

Se demonstrează că ecuația curgerii cu variație graduală este

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_h - J_f}{1 - Fr^2} \quad (3.40)$$

Ecuația descrie variația adâncimii y cu distanța x în funcție de panta albiei J_h , frecarea S_f , debitul Q și forma canalului (prin F_r și J_f).

Ecuațiile 3.39 și 3.40 sunt ecuații diferențiale care leagă adâncimea de distanță. Nu există soluție explicită decât pentru anumite cazuri în canale prismatice și singura metodă practică de rezolvare este integrarea numerică, folosind programe specializate de calcul.

3.2.14. Metode de rezolvare a curgerii în canale deschise (curgere staționară, uniform variabilă)

Ecuațiile care guvernează curgerea sunt

$$\frac{dH}{dx} = -J_f \quad (3.41)$$

$$\frac{dE_s}{dx} = J_h - J_f \quad (3.42)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J_o - J_f}{1 - Fr^2} \quad (3.43)$$

În prezent, rezolvarea se face prin metode numerice.

Se folosesc două metode de bază:

1. Metoda directă- distanța calculată din adâncime
2. Metoda standard- adâncimea calculată din distanță

Metoda directă

Prin această metodă se calculează (integrând ecuația curgerii) o distanță pentru o modificare dată a înălțimii suprafeței.

Se folosește ecuația (3.43) care scrisă sub formă de diferențe finite duce la:

$$\Delta x = \Delta y \left(\frac{1 - Fr^2}{J_h - J_f} \right) \quad (3.44)$$

Pașii de rezolvare sunt:

1. Se determină adâncimea de control ca punct de pornire.
2. Se previzionează asupra tipului de curbă și modificarea adâncimii.
3. Se alege un pas adecvat de variație a adâncimii Δy .
4. Se calculează termenii din paranteză ca adâncime „medie” ($y_{\text{initial}} + \Delta y / 2$)
5. Se calculează Δx .
6. Se repetă pașii 4 și 5 până la obținerea distanței/adâncimii adecvate.

Metoda standard

Această metodă va calcula (integrând ecuația curgerii) o adâncime la o distanță dată înspre amonte sau aval. Se folosește ecuația 3.42 care scrisă sub formă de diferențe finite are expresia:

$$\Delta E_s = \Delta x (J_h - J_f) \quad (3.45)$$

Pașii de rezolvare sunt similari cu metoda directă, dar pentru *fiecare* Δx se efectuează următorul calcul iterativ:

1. Se asumă o valoare a adâncimii y (adâncimea de control sau adâncimea ultimei soluții)
2. Se calculează energia specifică E_{sG} .
3. Se calculează J_f
4. Se calculează ΔE_s folosindu-se ecuația 1.30.
5. Se calculează $\Delta E_{s(x+\Delta x)} = E_s + \Delta E$
6. Se repetă până când $\Delta E_{s(x+\Delta x)} = E_{sG}$

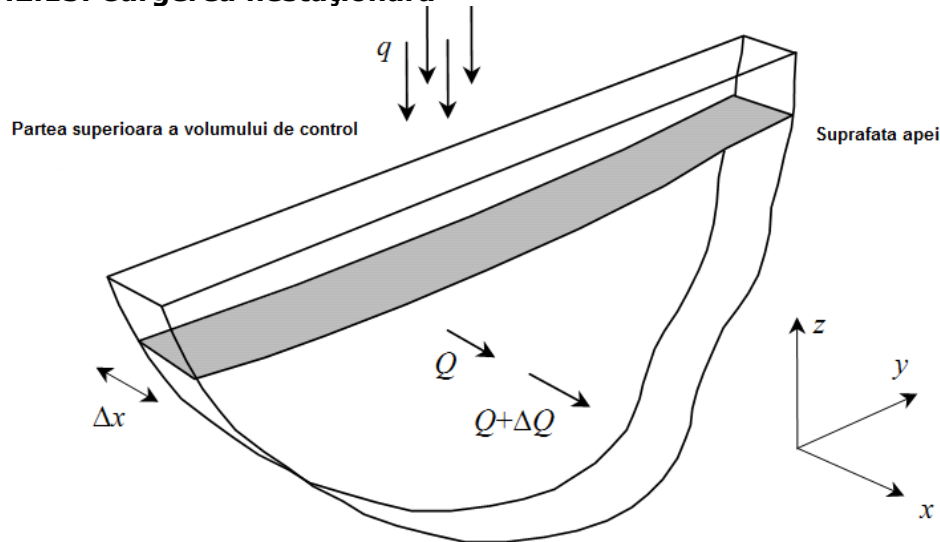
3.2.15. Curgerea nestaționară

Fig. 3.12. Curgerea nestaționară

În acest caz se folosesc:

Ecuția conservării masei și ecuația conservării impulsului

Pentru un volum de control CV limitat de o suprafață de control CS, ecuația conservării masei are forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3.46)$$

în care t este timpul dV un element de volum, u vectorul vitează, n vectorul normală exterioară pe suprafața de control, astfel încât $u \cdot n$ este componenta vitezei normale la suprafață în orice punct și dA este elementul de arie al suprafeței de control.

Efectuând transformări consecutive se ajunge la:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.47)$$

Relația reprezintă ecuația conservării masei în curgerea nestaționară, pentru canale drepte.

Procedând similar, se poate deduce ecuația conservării impulsului:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = -gAJ_h \quad (3.48)$$

Cele două ecuații sunt ecuațiile Saint Venant (ecuațiile undelor lungi). Ele se folosesc pentru simularea mișcării în râuri și canale, mai ales pentru simularea undelor de viitură și simularea curgerii în canale de irigații. Se poate demonstra matematic că soluțiile acestor ecuații au forma a două familii de undă care se propagă cu două viteze diferite, una înspre amonte și una înspre aval cu disipare diferită. Undele care se propagă spre amonte se disipează mai repede. Propagarea

în ambele direcții este importantă în regimurile tranzitorii din anumite cazuri (de ex.: în conductele forțate ale amenajărilor hidroenergetice). În multe situații însă ecuațiile pot simplificate ignorând primii doi termeni din ecuația (3.48).

Astfel se ajunge la forma simplificată, $\partial\eta$ reprezentând variația secțiunii canalului.

Se demonstrează că debitul poate fi aproximat cu relația (K este capacitatea de transport a canalului):

$$Q = K \sqrt{J_h - \frac{\partial y}{\partial x}} \quad (3.49)$$

Iar propagarea undelor este descrisă de:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\sqrt{J_h}}{B} \frac{dK}{dh} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{K}{2B\sqrt{J_h}} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3.50)$$

3.3. Disiparea energiei rezultate în urma curgerii torențiale.

În general, în cadrul sistemelor de corectarea torenților se urmărește disiparea energiei apei, adică creșterea pierderilor de sarcină (sau creșterea rezistenței hidraulice), principala cauza a efectelor negative pe care aceasta le are asupra mediului și oamenilor.

La baza calculului practic al rezistențelor hidraulice, numite adeseori pierderi de sarcină, se află noțiunile, principiile și ecuațiile generale ce guvernează mișcarea laminară și turbulentă.

Determinarea pierderilor de sarcină, definite ca lucrul mecanic rezistiv datorat rezistențelor vâscoase și turbulente ale fluidelor reale, este o problemă complicată deoarece, pe de o parte, fenomenele în mișcare în conducte, canale etc.; trebuie studiate în toată complexitatea lor, iar, pe de altă parte, pierderile de sarcină prezintă ca fenomen și alte aspecte neincluse în definiția anterioară.

În afara disipărilor de energie distribuite uniform în lungul curenților de fluid, numite pierderi liniare sau distribuite, proporționale cu lungimea curgerii, mai iau naștere și pierderi *locale*, h_l , care apar pe porțiunile scurte ale curgerii (numite singularități) și care sunt datorate variației mărimii sau direcției vitezei sau a ambelor elemente ale acesteia. Aceste variații ale mărimii și direcției vitezei sunt provocate de variații de secțiune și de traseu ale curenților, ca de exemplu, îngustarea sau lărgirea de secțiune, coturi, ramificații, vane, etc. Pierderile de sarcină liniare definite prin ecuațiile de mișcare laminară și turbulentă ale fluidelor reale exprimă corect cauzele interne care le generează, dar cauzele externe, condiționate de rugozitatea și natura pereților solizi în contact cu fluidul și influența acestor cauze, cantitativă și calitativă, asupra pierderilor de sarcină nu sunt prinse în ecuații. Pierderile de sarcină depind în mare măsură de materialul din care sunt confecționate conductele, canalele, de felul cum sunt alcătuite din elementele lor constructive, de calitatea execuției, de factorii provenind din exploatare, de uzură, etc.

Sunt numeroase cazurile tehnice, cum ar fi sistemele de corectarea torenților, în care determinarea pierderilor de sarcină este cea mai importantă

problemă, ceea ce face ca studiul legăturilor care există între pierderile de sarcină și numeroși alți factori care se manifestă în mișcările practice ale fluidelor reale să constituie una din problemele fundamentale ale mecanicii fluidelor aplicate.

Pe baza a numeroase studii și cercetări, s-a convenit ca pierderile de sarcină să se raporteze la energia cinetică a fluidului în mișcare, deci să se admită că structural formula acestora este de forma

$$h_r = \xi_r \frac{v^2}{2g} \quad (3.51)$$

în care ξ_r este un coeficient de rezistență care depinde de tipul pierderii de sarcină.

Coeficientul rezistențelor liniare este de forma: $\xi_d = \lambda \frac{l}{D}$, în care l este lungimea, D este diametrul conductei, iar λ coeficientul pierderilor de sarcină liniară, care depinde, la rândul lui, de regimul de mișcare și de natura pereților conductei sau canalului. Coeficientul rezistențelor locale ξ_l , denumit coeficientul pierderilor de sarcină locală, este, în majoritatea cazurilor, un coeficient experimental.

Se introduce noțiunea de pantă hidraulică sau pierdere de sarcină specifică, pe unitatea de lungime a curentului de fluid, J , definită prin raportul dintre pierderea de sarcină liniară h_d , dintre două puncte 1 și 2 și lungimea l pe care are loc această pierdere de sarcină

$$J = \frac{h_d}{l} = \frac{(v_1^2 / 2g + p_1 / \rho g + z_1) - (v_2^2 / 2g + p_2 / \rho g + z_2)}{l} \quad (3.52)$$

rezultă de asemenea :

$$J = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.53)$$

Natura regimului de mișcare influențează în mod direct asupra rezistențelor hidraulice liniare prin influența diferită a vitezei V , care variază în cazul celor două regimuri de mișcare, laminar și turbulent.

3.3.1. Formule echivalente pentru rezistențele hidraulice liniare

O primă formulă fundamentală este aceea a lui H.P.G. Darcy

$$h_d = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.54)$$

Această formulă se aplică conductelor cu secțiune circulară constantă. Se poate aplica și pentru alte forme ale secțiunii înlocuindu-se diametrul D cu diametrul hidraulic $D_H = 4R$, unde R_h raza hidraulică definită ca raportul dintre secțiunea conductei și perimetrul udat al secțiunii. Exprimând viteza funcție de debit,

$v = \frac{4Q}{\pi D^2} = 1,275 \frac{Q}{D^2}$ formula se mai scrie sub forma:

$$h_d = 0,0826 \lambda \frac{Q^2}{D^5} \cdot l \quad (3.55)$$

unde coeficientul 0,0826 corespunde exprimării în sistemul SI.

În general, coeficientul rezistențelor liniare λ depinde de numărul Reynolds al curgerii, deci de regimul de mișcare și de rugozitatea pereților conductei.

O a doua formulă fundamentală a pierderilor liniare este formula lui Chezy. Introducând panta hidraulică $J = \frac{h_d}{l}$ și raza hidraulică $R_h = D/4$, se determină viteza sub forma : $v = \sqrt{\frac{h_d}{l} \cdot \frac{2g}{\lambda} \cdot D} = \sqrt{J \cdot \frac{2g}{\lambda} \cdot 4R_h} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{R_h \cdot J}$; se notează $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ și se obține formula lui Chezy,

$$v = C \sqrt{R_h J} . \quad (3.56)$$

Cunoscând coeficientul lui Chezy, C , se poate determina $\lambda = 8g/C^2$. Formula lui Chezy poate fi aplicată și în studiul mișcărilor cu suprafață liberă. Din formula lui Chezy se obțin relațiile de calcul

$$Q = A \cdot V = A \cdot C \cdot \sqrt{R_h \cdot J} ; J = \frac{V^2}{C^2 R_h} ; h_d = J \cdot l = \frac{v^2}{C^2 R_h} \cdot l \quad (3.57)$$

se introduce modulul de debit $K = A \cdot C \cdot \sqrt{R_h}$ și se obține:

$$Q = K \cdot \sqrt{J} ; J_h = \frac{Q^2}{K^2} ; h_d = \frac{Q^2}{K^2} \cdot l . \quad (3.58)$$

Modulul de debit K , reprezintă debitul Q pentru panta $J = 1$ și are aceeași unitate de măsură ca și Q . Se introduce mărimea numită modulul vitezei $W = C \cdot \sqrt{R_h}$, având aceeași dimensiune ca și viteza v , în formulă și rezultă

$$v = W \cdot \sqrt{J} , \quad (3.59)$$

relație cunoscută sub numele de formula echivalentă a lui Chezy.

3.3.2. Analiza numerică a unui curent torențial nestaționar după obstacole.

Pentru a înțelege mai bine fenomenul de curgere în jurul obstacolelor am plecat de la un caz simplu ce implică două obstacole de formă paralelipipedică cu secțiune pătrată dispuse în curentul de apă.

Situațiile care implică interacțiuni între fluid și solid, vibrații induse de fluid (FIV) și vibrații induse de vârtejuri (VIV) impun atenție specială la analiza lor, în principal datorită instabilităților care apar în câmpul hidrodinamic și care se propagă

la structurile solide învecinate. Formarea și separarea vârtejurilor și dinamica curenților/jeturilor este o problemă incomplet rezolvată. Problema clasică a curgerii după obstacole este studiată în diferite domenii de cercetare cum sunt aerodinamica construcțiilor, proiectarea autovehiculelor, sportul, turbinele eoliene, structuri dispuse în ocean, pentru a numi doar câteva. Zdravkovich (1997) [13] a prezentat o analiză retrospectivă amănunțită și comprehensivă a cercetărilor din trecut și a scos în evidență provocările cărora trebuie să li se răspundă în studiul curgerii după un cilindru de secțiune circulară.

Franke, Rodi și Schonung (1990) au efectuat calcule numerice bi-dimensionale pentru a studia formarea și desprinderea vârtejurilor în curgerea laminară după obstacole cilindrice ($Re \leq 5000$) și paralelipipedice ($Re \leq 300$) folosind un algoritm cu volume finite și scheme QUICK de ordinul trei. Au obținut rezultate de calcul exacte pentru numere Reynolds mici, dar la numere Reynolds mai mari calculele lor au fost perturbate de fluctuațiile turbulente stohastice.[14] Trebuie menționate și lucrările lui Ramamurthy și Lee (1973) care au studiat paralelipede de secțiune triunghiulară [15] și cele ale lui Courchesne și Laneville (1979) care au studiat paralelipede de secțiune dreptunghiulară la numere Reynolds mai mari de ordinul 10^5 . [16] Zdravkovich (1985) a concluzionat că propagarea instabilităților în câmpul hidrodinamic și forma vârtejurilor depind în mare măsură de dispunerea relativă a unei perechi sau a unui număr mai mare de corpuri. Cele mai frecvente configurații sunt mănunchiuri de tuburi în tandem precum și dispuneri decalate de obstacole- cum este cazul schimbătoarelor de căldură sau reactoarelor și acestea formează domeniul de interes de bază pentru mulți cercetători în mecanica fluidelor.[13] Se pot menționa Schneider și Farge (2005), Farrant, Tan și Price (2000)[12], Lam, Gong și So (2007), Beale și Spalding (1999). Yen și alții (2008) au realizat studii experimentale folosind două paralelipede identice de secțiune pătrată dispuse în linie într-un rezervor cu apă, folosind PIV și au analizat efectul numărului Reynolds și a distanței între paralelipede asupra formei dârelor de vârtej în aval de ambele paralelipede.

Xu și Zhou (2004)[12] au măsurat experimental frecvențele de desprindere a vârtejurilor cu metode anemometrice pentru o pereche de cilindri de secțiune circulară dispuși în tandem în domeniul de numere Reynolds între 800 și 2400.[18] Ei au observat că desprinderea vârtejurilor în spatele ambilor cilindri este corelată și variația numărului Strouhal cu distanța dintre cilindri depinde de regimul de curgere. Pentru distanțe mai mici între cilindri, stratul tangențial se curbează în urma jetului, pentru distanțe mai mari desprinderea vârtejurilor are loc la ambii cilindri. Zhou, Cheng și Hung (2005)[12] au studiat cu metode numerice efectul unei plăci de control asupra forțelor exercitate de fluid pe un paraleliped de secțiune pătrată pentru $Re=250$. Studiul lor arată că gradul de suprimare a portanței și rezistenței la înaintare pe un paraleliped de secțiune pătrată în aval datorită plăcii de control din amonte depinde de înălțimea și poziția plăcii de control. Această parte a capitoului 1 se concentrează asupra studiului efectului unui paraleliped de secțiune pătrată dispus amonte asupra caracteristicii curențului nestaționar pe un paraleliped de secțiune pătrată dispus în linie în aval, pentru diferite rapoarte dimensionale și distanțe între paralelipede. Calculele se realizează folosind un program realizat pentru numere Reynolds mici de la $Re=100$ până la 250 pentru rapoarte dimensionale în domeniul $SR=0,6 \dots 1,4$ și distanța dintre paralelipede în domeniul $ls=2,0d \dots 5,0d$.

Domeniul bidimensional de calcul constă din două paralelipede de secțiune pătrată dispuse în linie prînse într-un canal de lungime $L_1 = 16d$ și lățime $L_2 = 6d$ așa cum se arată în fig.3.13. Paralelipedul din aval are lungimea laturii secțiunii d ,

care este aleasă ca fiind scara caracteristică a lungimii. Paralelipipedul din amonte are latura secțiunii de lungime d_1 . Raportul d_1 / d este definit ca „raport dimensional” (SR). Distanța dintre cele două paralelipipele variază de la $ls = 2d$ la $5d$ pentru fiecare valoare adoptată pentru SR și Re .

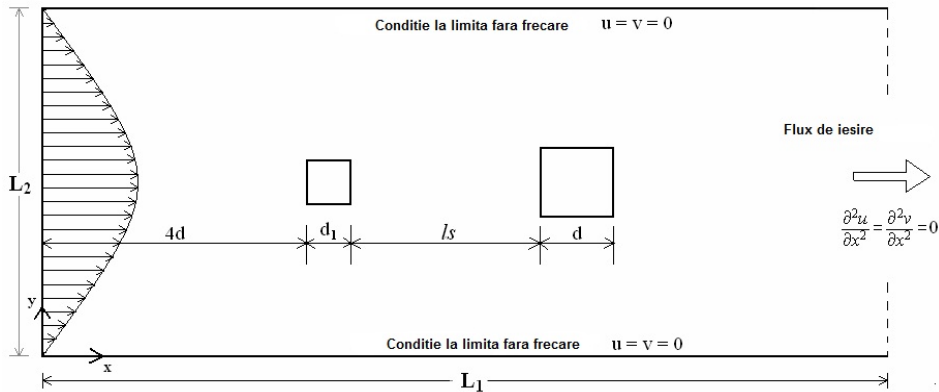


Fig. 3.13. Domeniul de calcul

Raportul laturii a paralelipipedului aval față de lățimea canalului d/L_2 , este definit ca raportul de blocare (BR). Acest raport s-a definit deoarece spre deosebire de cazul curgerii în prezența obstacolelor într-un mediu infinit, prezența pereților laterali ai canalului restricționează lateral curentul și introduce o sursă suplimentară de perturbații sub forma gradientului transversal de presiune. Pentru a se evita efectul unei blocări mai mari a tranziției stratului limită și stratului tangențial, raportul de blocare în calculele de față este păstrat constant la valoarea 0,2.

Mișcarea fluidului este guvernată de ecuațiile conservării masei și impulsului. Ecuația conservării masei pentru un fluid incompresibil se reduce la ecuația de continuitate dată de ecuația:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.60)$$

Ecuațiile bidimensionale, adimensionalizate Navier Stokes pentru curgere laminară nestaționare și fluid incompresibil au expresia:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (3.61)$$

În care u_i este componenta vitezei în lungul direcției coordonatei x_i și Re este numărul Reynolds. Pentru un sistem de coordonate 2D, ecuația (2) componentele x și y ale ecuației impulsului pentru valorile x_i (x și y) și u_i (u , respectiv v).

Numărul Reynolds este definit astfel:

$$Re = \frac{u_m D_h}{\nu} \quad (3.62)$$

unde u_m este viteza medie la intrare, D_h diametrul hidraulic (egal cu latura secțiunii paralelipipedului din aval, (d)) și ν este viscozitatea cinematică a fluidului.

Lungimea caracteristică și viteza se referă la paralelipipedul din aval (d) și viteza media este cea de intrare (u_m). Timpul a fost adimensionalizat sub forma: $t=d/u_m$.

Condițiile limită la intrare, ieșire și pereții canalului și suprafețele cilindrului sunt sintetizate în tabelul de mai jos.

Sumarul condițiilor limită pentru domeniul de calcul

Frontiera	Condiție limită impusă
Pereții canalului	Aderență: $u=v=0; \partial p/\partial y=0$
Intrare în canal	Profil de viteză parabolic: $u_m=1.0, v=0$
Ieșire din canal	Condiție limită de tip Neumann de ordinul doi: $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0$
Suprafețele paralelipipedelor	Aderență: $u=v=0, \partial p/\partial n=0$ n : normala la suprafața cilindrului

Calculul se efectuează pentru combinații a cinci rapoarte dimensionale de la 0,6 la 1,4 (0,6-0,8-1,0-1,2-1,4), patru valori diferite pentru distanța dintre cilindri $l_s=2d$ la $5d$ și patru valori ale numărului Reynolds de la 1000 la 250. Pentru a reduce complexitatea și timpul de calcul prin introducerea unor simplificări posibile cum sunt ordinul de discretizare, schema de discretizare, etc. s-a realizat un algoritm de calcul simplu folosind modelarea de ordin inferior. Galetti și alții (2004) a ajuns la concluzia că pentru simulări de curgere simple așa cum sunt acestea în regimuri laminare, modelarea de ordin inferior constituie un compromis eficient între complexitatea fenomenului fizic și posibilitățile de calcul

Algoritmul de rezolvare se bazează pe metoda MAC modificată a lui Hirt și Cook (1972). Programul de calcul s-a realizat folosind metoda diferențelor finite pentru discretizarea ecuațiilor care guvernează curgerea. Termenii convectivi sunt discretizați folosind o medie ponderată de ordinul doi (o schemă hibridă). Discretizarea termenului convectiv simplu care apare în ecuația momentului pentru dispunerea decalată a variabilelor pe rețeaua de calcul (fig.3.14) este dată mai jos.

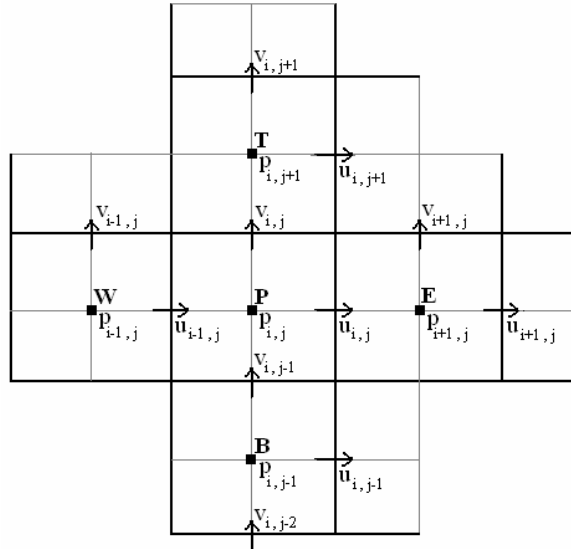


Fig.3.14. O celulă de calcul și celulele învecinate cu viteză și presiune definite în dispunere decalată

$$\left. \frac{\partial(uu)}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{u_R u_r - u_L u_l}{\Delta x} \quad (3.63)$$

Efectuând o serie de medieri se ajunge la ecuația

$$u_R = \frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2} \quad (3.64)$$

Ecuația presiunii se rezolvă iterativ, folosindu-se relația:

$$u_L = \frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2} \quad (3.65)$$

În care δt , δx și δy sunt variațiile temporale și spațiale pe direcțiile X și Y, $P_{i,j}$ este corecția presiunii, $(DIV)_{i,j}$ divergența neechilibrată pentru locația (i,j) și w_0 este factorul de subrelaxare. În calculul de față s-a folosit valoarea 0,2.

Se generează o rețea bidimensională carteziană simplă cu variabilele definite în dispunere decalată. Verificarea independenței rețelei se efectuează folosind trei rețele diferite de dimensiuni 386 x 146, 322 x 122 și 258 x 98 pentru curgerea în jurul unui singur paralelipiped, folosind același program de calcul. Fig.3.14 arată variația presiunii medii adimensionale în lungul canalului pentru cele trei mărimi de rețele analizate. Abaterea maximă a presiunii medii este în domeniul +/-1%. De asemenea abaterea numărului Strouhal pentru cele trei rețele este sintetizată în tabelul de mai jos.

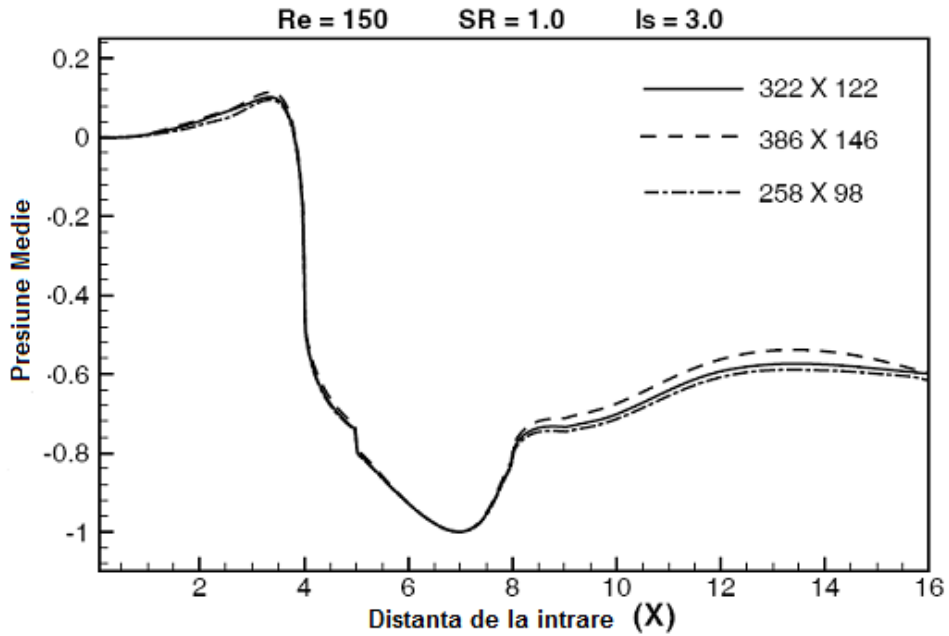


Figura 3.15. Presiunea medie în lungul canalului pentru cele trei rețele

Rețea	322×122	386×146	258×98
$\Delta x \times \Delta y$	0.05×0.0	0.04167×0.04	0.064×0.0
St1	0.2472	0.24	0.248
St2	0.2472	0.24	0.248
Cd1	3.088	3.0	3.0
Cd2	-0.42	-	-0.43

Pentru a se înțelege comportarea câmpului hidrodinamic în jurul obstacolelor (paralelipipede de secțiune pătrată în acest caz) s-au efectuat calcule pentru un domeniu cu $L_1=12d$ și $L_2=5d$. Figurile 3.16 (a) și 3.16 (b) prezintă conturul mărimii vârtejurilor pentru câmpul hidrodinamic instantaneu și câmpul hidrodinamic mediat în timp. Mărimea vârtejului s-a definit conform relației (3.66)

$$\left. \frac{\partial(uu)}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{1}{4\Delta x} \left[\left(\frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2} \right) u_{i,j} - \left(\frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2} \right) u_{i-1,j} \right] \quad (3.66)$$

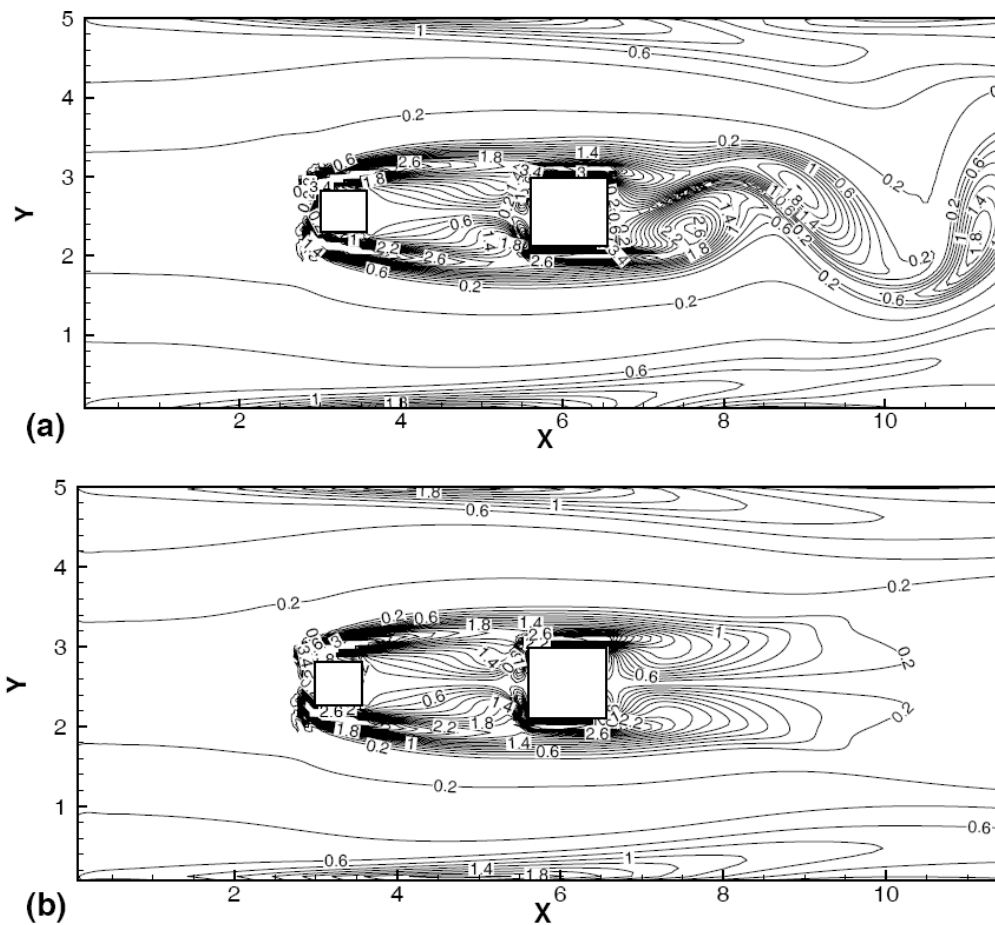


Fig.3.16. Conturul mărimi adimensionale a vârtejurilor: (a) câmp instantaneu ($t=150$) și (b) câmp mediat în timp ($Re=150$, $SR=0,6$, $ls=2,0d$, $L_1=12$, $L_2=5$)

Din figura 3.16 se observă următoarele:

- separarea vârtejurilor formate în spatele paralelipedului amonte în spațiul dintre paralelipede
- separarea straturilor tangențiale de la paralelipedul amonte asigură transportul vârtejurilor de la paralelipedul amonte la cel aval
- Lungimea și curbarea straturilor tangențiale sunt parametrii care guvernează atât stabilitatea straturilor tangențiale cât și capacitatea lor de a transporta vârtejurile.
- spațiul dintre cele două paralelipede controlează stagnarea sau transportul vârtejurilor și constituie un parametru important în fenomenul curgerii.
- Raportul dimensiunilor celor două paralelipede de asemenea influențează formarea, stagnarea și transportul vârtejurilor.
- Pereții canalului de asemenea generează vârtejuri (suplimentar față de curgerea într-un mediu infinit)

Figura 3.17 (a) și (b) prezintă conturul câmpului de presiune instantaneu și mediat în timp, scalat conform relației 3.67:

$$\bar{p} = \left(\frac{p - p_{inlet}}{|p - p_{inlet}|_{max}} \right) \quad (3.67)$$

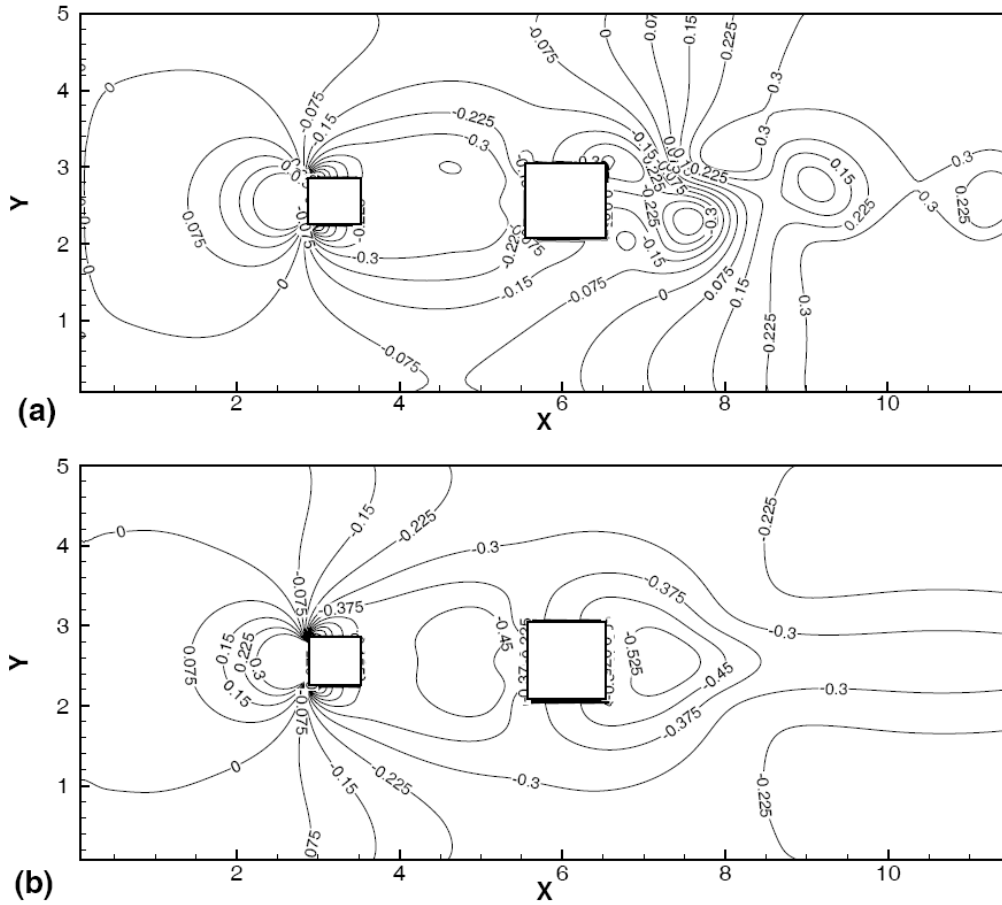


Fig.3.17. Reprezentarea presiunii adimensionalizate: (a) câmp instantaneu ($t=150$) și (b) câmp mediat în timp ($Re=150$, $SR=0,6$, $ls=2,0d$, $L_1=12$, $L_2=5$)

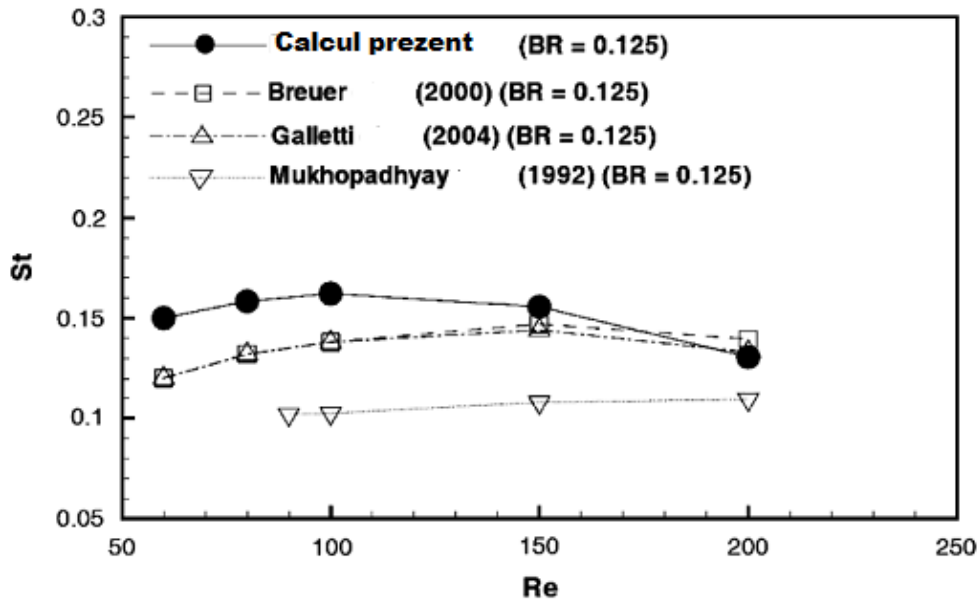


Fig.3.18. Dependența numărului Strouhal de numărul Reynolds comparativ pentru curgerea în jurul unui singur paralelipiped cu rezultatele lui Breuer ș.a. (2000), Galetti ș.a. (2004) și Mukhopadhyay, Biswas și Sundararajan (1992) [20]

Comparația s-a realizat pentru un raport de blocare $BR=0.125$. Rezultatele calculate de Breuer ș.a. (2000), Galetti ș.a. (2004) și Mukhopadhyay, Biswas și Sundararajan (1992) diferă întrucâtva între ele. Pentru valori mici ale numărului Reynolds ($Re= 50 \dots 100$) numărul Strouhal din prezentul calcul este ușor supraestimat, dar diferențele se reduc pentru numere Reynolds mai mari. Aceste calcule indică faptul că rezultatele obținute sunt în concordanță cu rezultatele de referință din literatura de specialitate.

Figurile 3.19 (a)-(e) prezintă efectul parametrului SR asupra câmpului hidrodinamic instantaneu în vecinătatea ambelor paralelipede pentru cinci valori SR diferite. Liniile de curent au fost determinate la numărul Reynolds constant, $Re=150$ și distanța dintre paralelipede constată, $l_s=3,0d$.

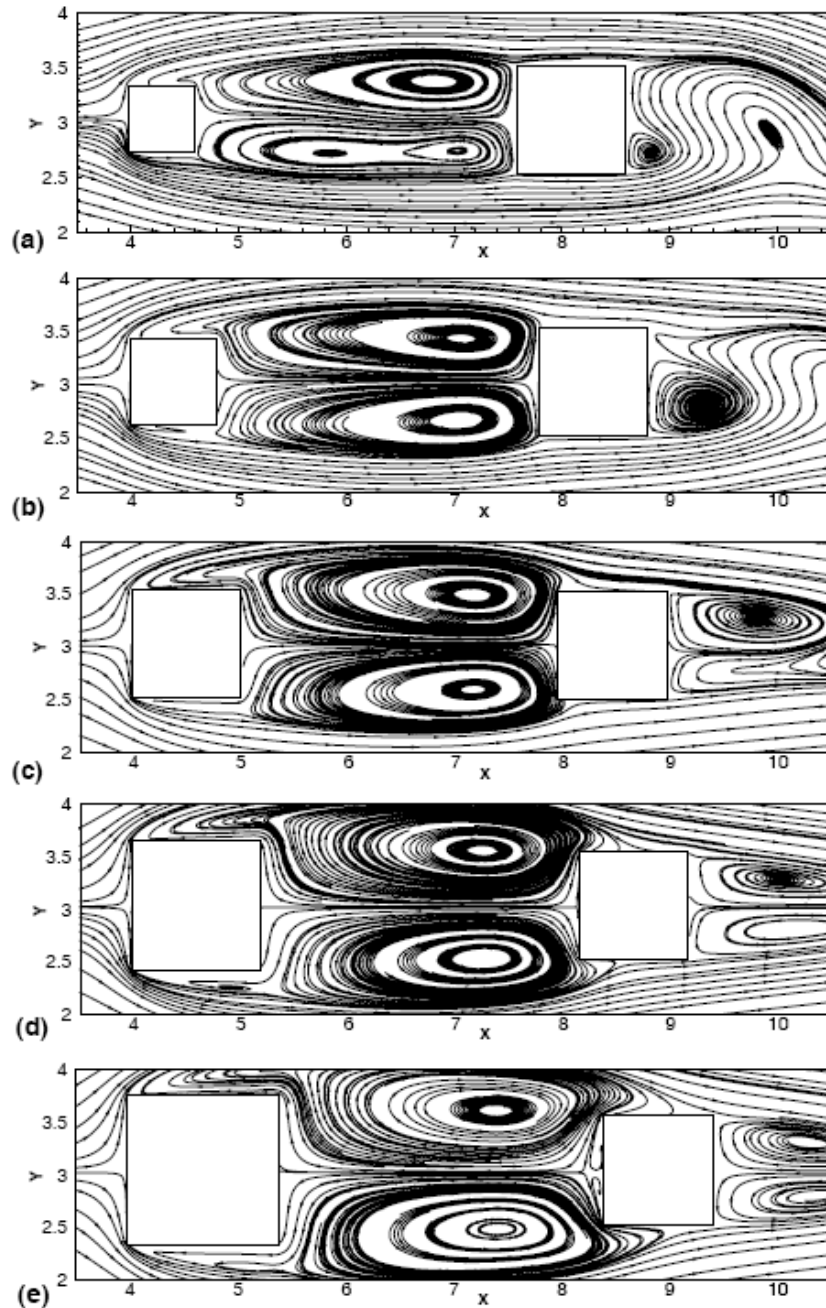


Fig.3.19. Liniile de curent pentru câmpul instantaneu ($t=250$) arătând comportarea curentului la $Re=150$, $l_s=3,0d$ și diferite rapoarte de mărimi (a) $SR=0,6$, (b) $SR=0,8$, (c) $SR=1,0$, (d) $SR=1,2$ și (e) $SR=1,5$

Se observă următoarele:

- Pentru valori reduse ale parametrului SR (până la 1,0) există formare și desprindere periodică a vârtejurilor în curentul spre paralelipipedul aval, iar

- paralelipipedul amonte nu prezintă o separare evidentă a vârtejurilor. Paralelipipedul amonte generează vorticitate de pe suprafețele sale laterale.
- Distanța redusă dintre paralelipede reduce desprinderea vârtejurilor format de pe suprafața din spate a paralelipipedului amonte.
 - Transportul vârtejurilor din amonte spre aval are loc prin stratul tangențial care se separă de la paralelipipedul amonte.
 - Desprinderea vârtejurilor după paralelipipedul aval dispăre pentru rapoarte mai mari (SR peste 1,0, figurile 3.19 d și e). Straturile tangențiale sunt mai stabile și se elimină posibilitatea desprinderii vârtejurilor în curentul de după paralelipipedul aval.

Figurile 3.20(a)-(d) prezintă semnalul vitezei transversale și spectrul Fourier corespunzător pentru o valoare fixă a numărului Reynolds ($Re=200$) și patru valori diferite ale parametrului SR .

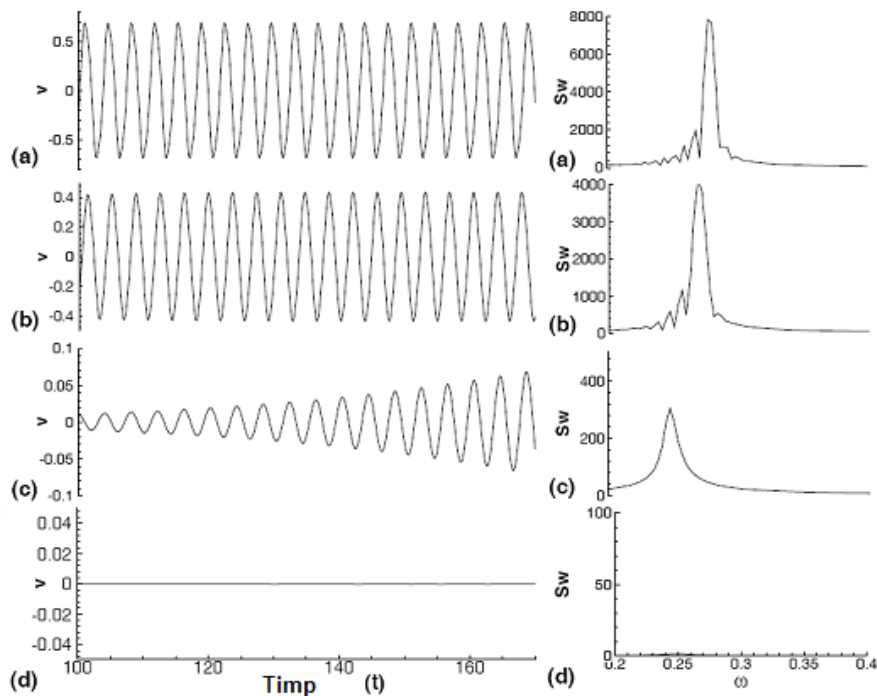


Fig.3.20. Semnalul de timp al vitezei transversale în curentul celui de-al doilea paralelipiped și spectrul său Fourier pentru $Re=200$ și $l_s=3,0d$, (a) $SR=0,6$, (b) $SR=0,8$, (c) $SR=1,0$ și (d) $SR=1,2$. unde Sw – frecvența

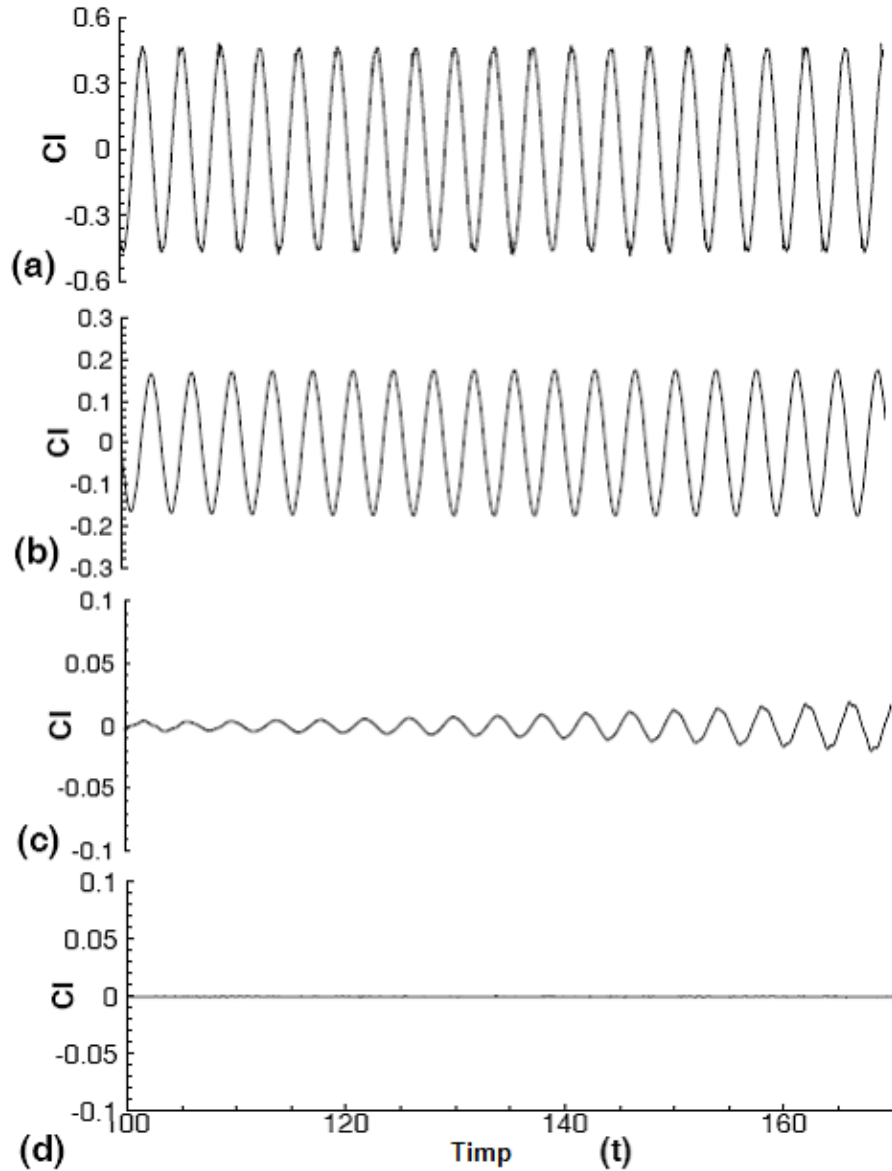


Fig.3.21. Variația coeficientul de portanță (C_l) după paralelipipedul aval pentru $Re=150$ și $l_s=3,0d$ (a) $SR=0,6$, (b) $SR=0,8$, (c) $SR=1,0$ și (d) $SR=1,2$.

Semnalele pentru coeficienții de portanță (C_l) corespunzător celor patru cazuri sunt prezentați în figurile 3.22(a)- (d). Coeficientul de portanță pentru fiecare paralelipiped poate fi scris sub formă de presiune așa cum se prezintă în relația:

$$C_l = \frac{\int_{\text{suprafata inf erioara}} p dldz - \int_{\text{suprafata superioara}} p dldz}{1/2 \rho u_m^2 A} = \int_{\text{suprafata inf erioara}} \bar{p} d\bar{l} - \int_{\text{suprafata superioara}} \bar{p} d\bar{l} \quad (3.68)$$

Figura 3.21 arată variația coeficienților rezistenței la înaintare (C_{d1} și C_{d2}) cu valoarea SR pe paralelipipedul amonte, respectiv aval pentru $Re=150$ și $Is=3,0d$. Coeficientul de rezistență pe cele două paralelipede devine:

$$C_d = \frac{\int_{\text{suprafata frontala}} p dldz - \int_{\text{suprafata poserioara}} p dldz}{1/2 \rho u_m^2 A} = \int_{\text{suprafata frontala}} \bar{p} d\bar{l} - \int_{\text{suprafata posterioara}} \bar{p} d\bar{l} \quad (3.69)$$

Unde, $\bar{p} = \frac{p}{1/2 \rho u_m^2}$; $\bar{l} = \frac{l}{d}$, conform figurii 3.13

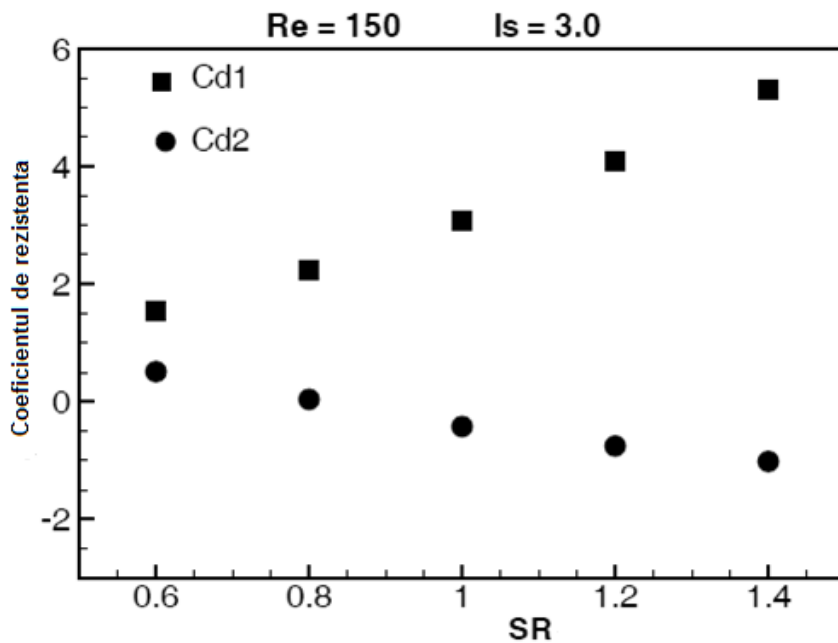


Fig.3.22. Variația coeficientul de rezistență pentru ambele paralelipede în funcție de SR pentru $Re=150$ și $Is=3,0d$

Rezistența de frecare cu peretele este neglijabilă față de rezistența la înaintare generată de variația de presiune pentru toate cazurile. Creșterea valorii parametrului SR duce la creșterea rezistenței pe paralelipipedul amonte și descreșterea acesteia pe cel aval.

Figurile 3.23 (a)-(d) prezintă efectul parametrului l_s asupra câmpului hidrodinamic instantaneu și structura liniilor de curent în vecinătatea ambelor paralelipede pentru patru valori l_s diferite. Liniile de curent corespund câmpului hidrodinamic pentru numărul Reynolds constant $Re=150$ și raport dimensional constant, $SR=1,0$.

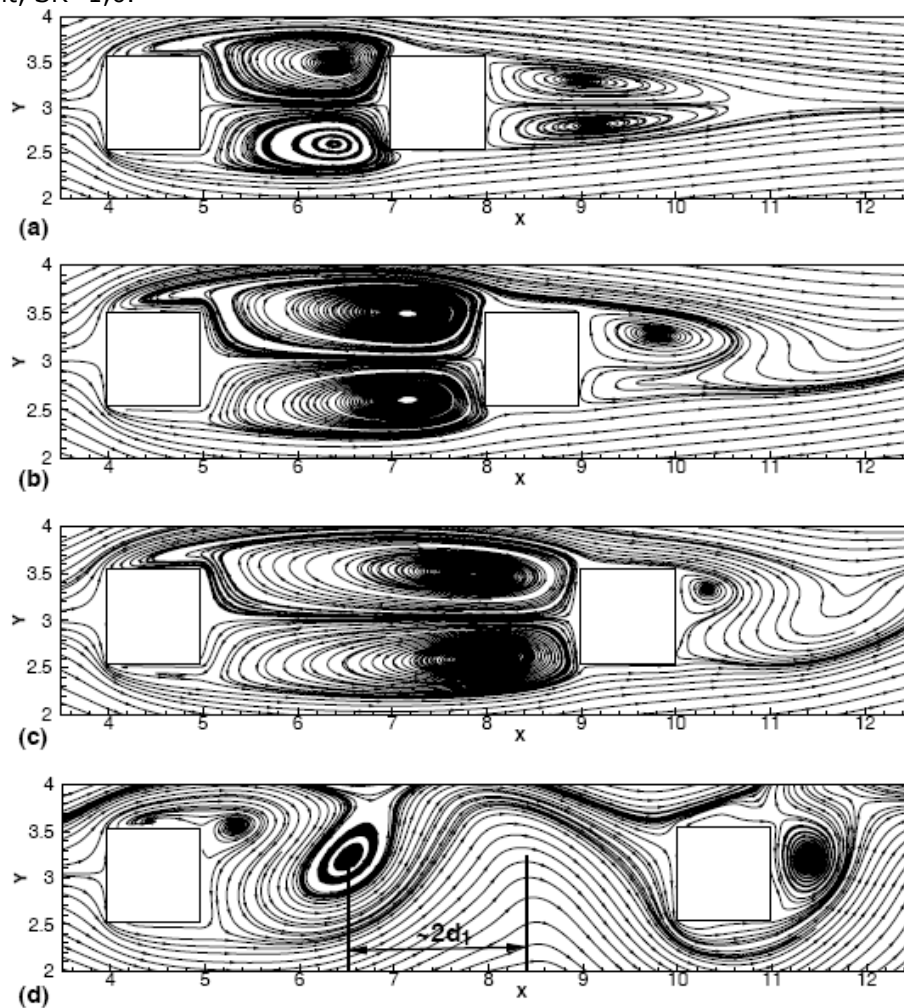


Figura 3.23. Liniile de curent pentru câmpul instantaneu ($t=250$) arătând curentul pentru $Re=150$, $SR=1,0$ și diferite distanțe între paralelipede: (a) $l_s=2,0d$, (b) $l_s=3,0d$, (c) $l_s=4,0$ și (d) $l_s=5,0d$

Figura pune în evidență influența majoră a distanței dintre paralelipede. Conform fig.3.23 (a), la distanțe mici nu are loc desprinderea vârtejurilor, paralelipedele se comportă ca un singur obstacol. Pentru valori mai mari ale parametrului $l_s = 3,0$,

4,0 se observă desprinderea în curentul de după paralelipipedul aval. Pentru valori l_s peste 5,0 are loc desprinderea vârtejurilor în aval de ambele paralelipede.

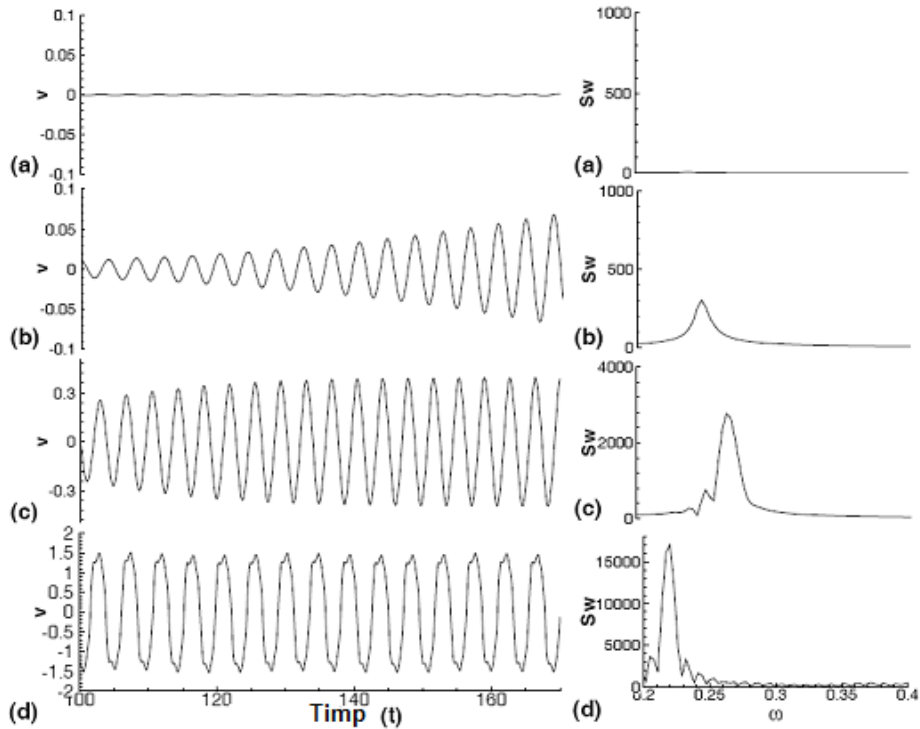


Fig.3.24. Semnalul de timp al vitezei transversale în curentul după al doilea paraleliped și spectrul său Fourier pentru $Re=150$ și $SR=1.0$, (a) $l_s=2,0d$, (b) $l_s=3,0d$, (c) $l_s=4,0$ și (d) $l_s=5,0d$, Sw -frecvența

Se observă că creșterea distanței duce la creșterea amplitudinii semnalului vitezei. Pentru $l_s=4,0d$ frecvența Strouhal este ceva mai mare decât pentru $l_s=3,0d$. Pentru distanțe mai mari, această frecvență scade. Aceasta se explică prin aceea că la separații mai mari nu mai are loc „depozitarea” vârtejurilor în spațiul dintre cilindrii, iar la desprinderea vârtejurilor este generată mai degrabă pe suprafețele din spatele paralelipedelor.

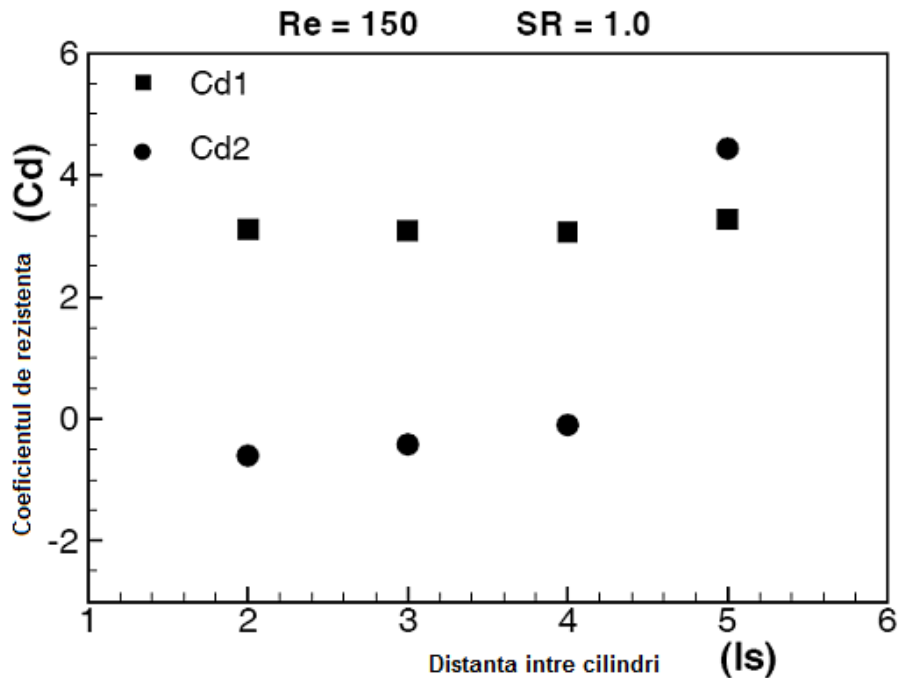


Fig.3.25 Variația coeficientului de rezistență pentru ambele paralelipede în funcție de l_s pentru $Re=150$ și $SR=1,0$

Rezultatele indică faptul că pentru paralelipedul amonte, coeficientul de rezistență rămâne aproape constant cu creșterea distanței între cele două paralelipede. Acest fapt este de așteptat deoarece creșterea distanței nu are efecte semnificative înspre amonte. Pe de altă parte pentru paralelipedul aval coeficientul de rezistență crește considerabil cu creșterea distanței.

Figurile 3.26 (a)-(d) prezintă semnalul vitezei transversale și spectrul Fourier al unei particule de fluid dispusă în curentul paralelipedului aval pentru $l_s=3,0d$, $SR=1,0$ și patru valori diferite ale numărului Reynolds: $Re=100$, 150 , 200 și 250 .

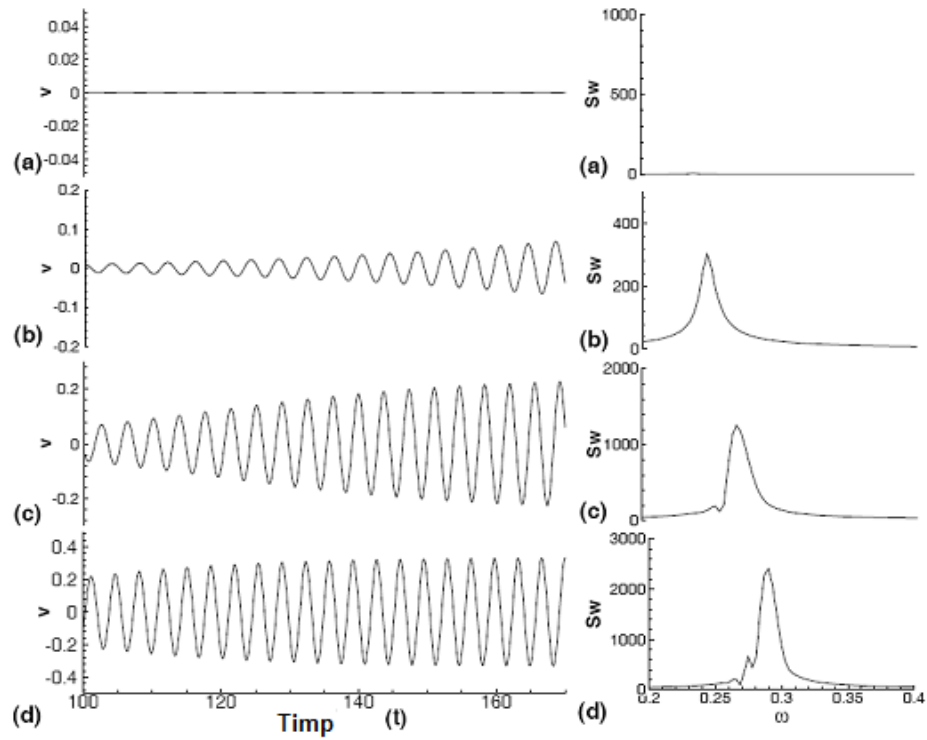


Figura 3.2. Semnalul de timp al vitezei transversale în curentul celui de-al doilea paralelipiped și spectrul Fourier pentru $SR=1,0$ și $Is=3,0d$; (a) $Re=100$, (b) $Re=150$, (c) $Re=200$ și (d) $Re=250$.

Se observă că creșterea numărului Reynolds duce la creșterea amplitudinii și frecvenței semnalului vitezei. Spectrul Fourier indică foarte clar prezența unei singure frecvențe dominante care crește cu creșterea numărului Reynolds.

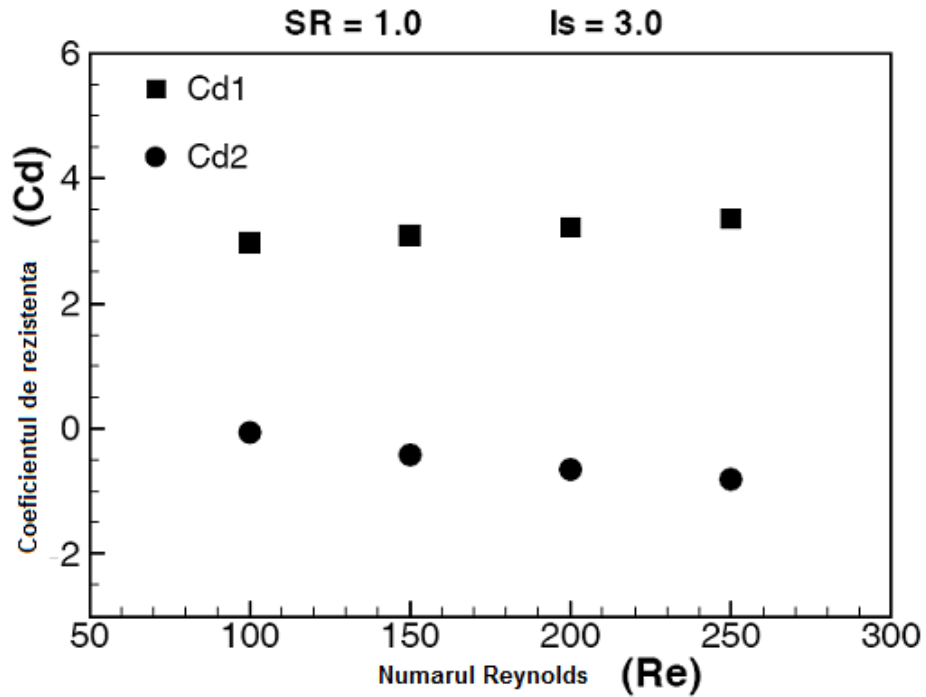


Figura 3.27. Variația coeficientului de rezistență a ambelor paralelipede în funcție de Re pentru $ls=3,0d$ și $SR=1,0$

Figura 3.27 arată variația coeficienților de rezistență în funcție de numărul Reynolds pentru $SR=1,0$ și $ls=3,0d$. Cu creșterea lui Re, rezistența în direcția curentului crește datorită creșterii căderii de presiune în curentul după primul paraleliped. Pe de altă parte, cu creșterea lui Re, rezistența pentru paralelipedul aval scade și devine negativă.

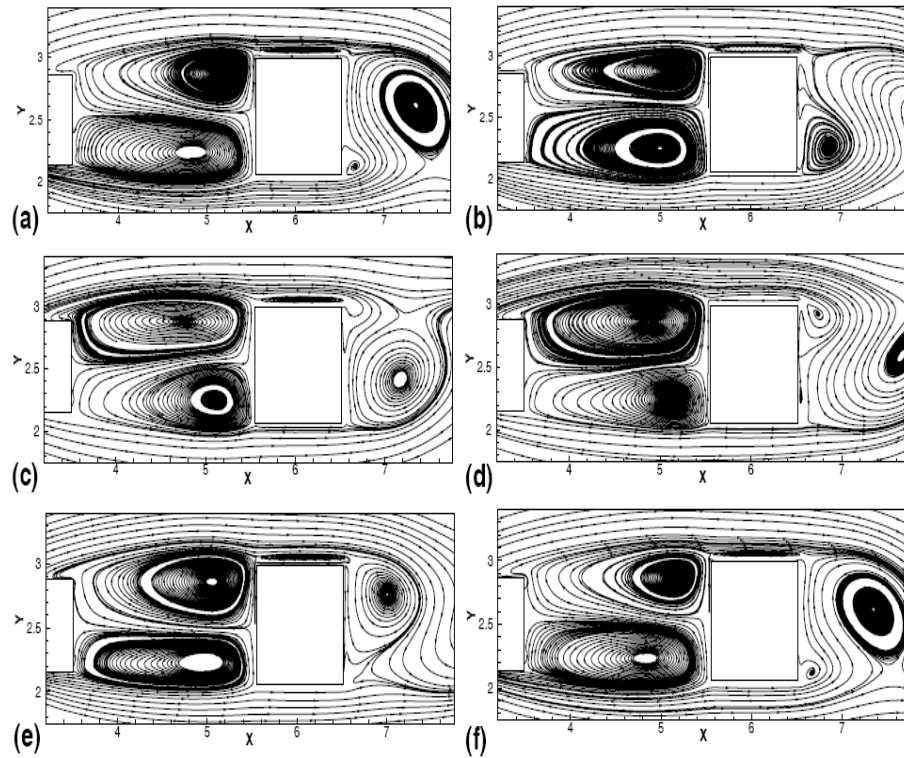


Figura 3.28. Evoluția în timp a curentului în lungul unei perioade de desprindere a vârtejului după al doilea paralelipiped pentru $SR=0,6$, $Re=150$ și $ls=2,0d$; (a) $t=150$, (b) $t=150,655$, (c) $t=151,31$, (d) $t=151,965$, (e) $t=152,62$ și (f) $t=153,275$ (perioada de timp a formării/desprinderii vârtejului $T=3.275$)

Figurile 3.28 (a)-(f) prezintă evoluția temporală a curentului nestaționar cuplat pentru ambele paralelipede pentru $ls=2,0d$, $Re=200$ și $SR=0,6$ pentru timpul egal cu perioada de desprindere a vârtejului.

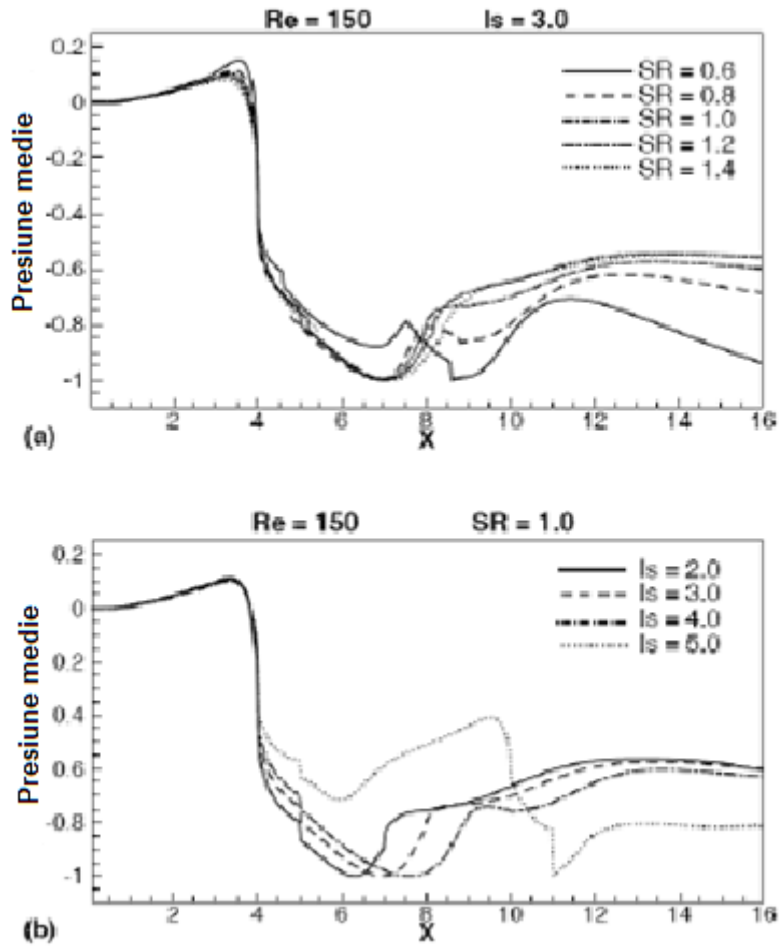


Figura 3.29 Variația presiunii medii în lungul canalului la: (a) diferite rapoarte dimensionale (SR) pentru $Re=150$ și $ls=3,0d$ și (b) diferite valori ale distanței ls pentru $Re=150$ și $SR=1,0$

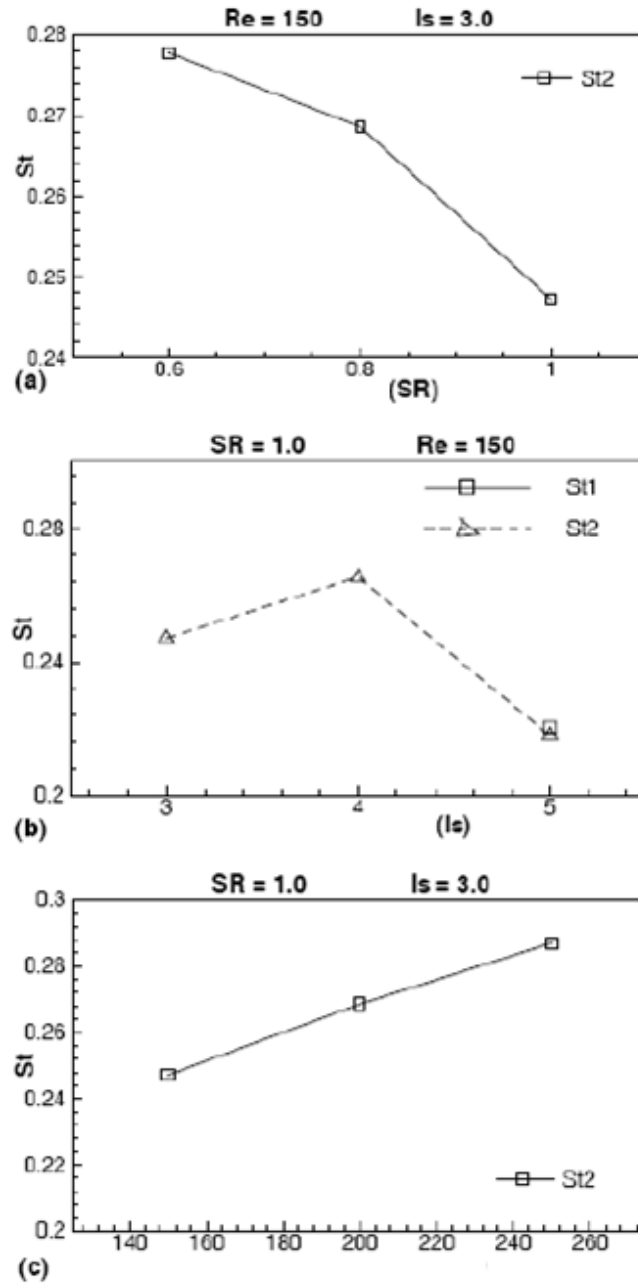


Figura 3.30 Variația numerelor Strouhal (St_1 și St_2): (a) în funcție de raportul dimensional pentru $Re=150$ și $ls=2,0d$, (b) în funcție de distanța ls pentru pentru $SR=1,0$ și $Re=150$ și (c) în funcție de numărul Reynolds Re pentru $SR=1,0$ și $ls=3,0d$

Metoda prezentată constituie o abordare bidimensională a curgerii în canale deschise în prezența unor obstacole paralelipedice, dar fără ca acestea să fie în

contact cu peretele. În cazul canalelor concepute pentru corecția torenților, obstacolele sunt de formă paralelipipedică, dar prinse de peretele canalului (v. partea experimentală). Abordarea prezentată mai sus este aplicabilă doar cu unele modificări. Practic, în cadrul prezentei teze pentru modelarea matematică s-a folosit programul FLUENT.

3.3.3. Curgerea turbulentă în canalele torențiale în prezența unor obstacole adiacente peretelui canalului

În cazurile reale, curgerea în sistemele de corectare ale torenților care sunt canale deschise - este turbulentă. Așa cum s-a menționat, curgerea în canale deschise prezintă particularitatea existenței unei suprafețe libere.

1. Efectele suprafeței libere asupra turbulenței:

Atunci când se compară planul de simetrie a unui curent, există două efecte principale ale suprafeței libere asupra fenomenelor asociate turbulenței.

- Reducerea lungimii de transport a energiei vârtejurilor
- Redistribuirea energiei turbulente influențează tensorul Reynolds. Se pot considera două cazuri distincte:

A. Cazul 1

Efectul suprafeței libere este similar cu cel al unui perete solid, în acest caz mișcarea de atenuare a tensiunilor turbulente fluctuante amplifică oscilațiile longitudinale și transversale.

Se consideră:

- Derivata vitezei tangențiale este nulă, deci nu există tensiuni tangențiale.
- Câmpul mediu de viteze nu este nul.

Interacțiunea dintre transportul energiei vârtejurilor și suprafața liberă duce la reducerea „lungimii” acestor vârtejuri și la distorsionarea suprafeței libere precum și la o creștere locală a presiunii hidrostatice, acest mecanism duce la reducerea vâscozității turbulente a suprafeței libere. În zona suprafeței libere este valabilă legea de atenuare Hunt.

$$\frac{w}{u^*} = 1.34 \left(\frac{\varepsilon h}{u^*} \right)^{1/3} (1 - \xi)^{1/3} \quad (3.70)$$

Unde u^* - viteza de frecare, ξ - variabilă externă

Suprafața liberă reduce dislocarea verticală. Pentru a evalua valorile fluctuațiilor în vecinătatea suprafeței libere, mai întâi se determină K și ε cu formula CELIK și RODI.

$$\varepsilon_s = \frac{k^{3/2}}{\alpha h} \quad (3.71)$$

Unde: α este un coeficient determinat empiric, h este adâncimea apei.

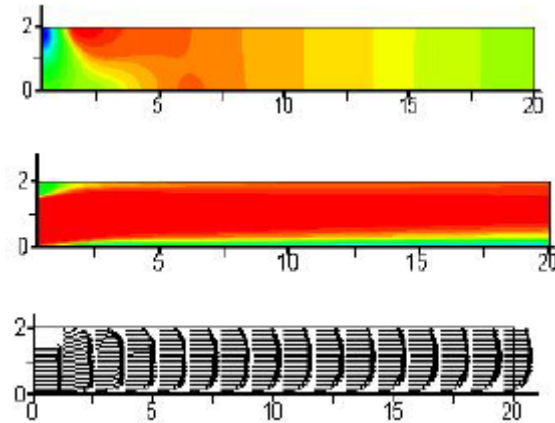


Fig. 3.31. Variația în timp a presiunii într-un canal fără obstacol

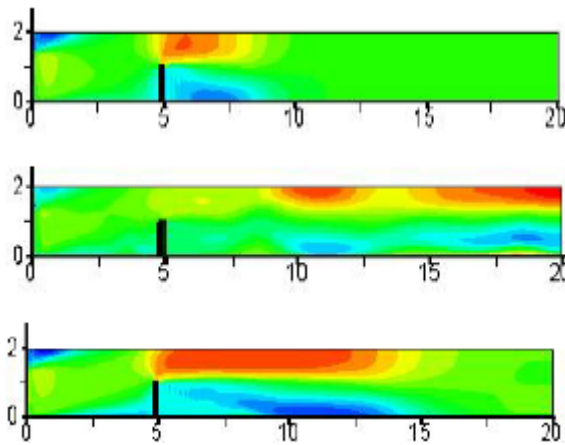


Fig. 3.32 Variația în timp câmpului de viteze într-un canal cu obstacol

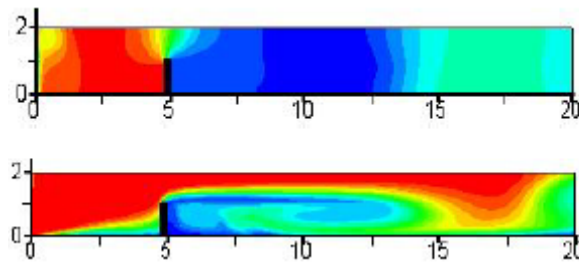


Fig. 3.33 Variația în timp presiunii și energiei cinetice în canalul cu obstacol

B. Cazul 2

Suprafața liberă este considerată interfața dintre două volume de control (volumul de control aferent apei și volumul de control aferent aerului), deci volumul nu mai este un „set de particule de apă”, ci un volum de apă și un volum de aer supuse la presiune atmosferică – se efectuează calculele în rețelele aferente fiecăruia și la fiecare iterație se determină fracțiunea de apă și cea de aer.

Principiul acestei metode constă în definirea unei funcții caracteristice $c(x, y, z, t)$ a curgerii:

$C(x, y, z, t) = 0$ dacă celula este umplută cu aer

$C(x, y, z, t) = 1$ dacă celula este umplută cu apă.

$$\rho = C(x, y, z, t)\rho_{apa} + (1 - C(x, y, z, t))\rho_{aer} \quad (3.72)$$

Se rezolvă sistemul de ecuații:

$$\overline{NVS} + k + \varepsilon \quad (3.73)$$

Apoi transpunem ecuația pe „fracțiunea de volum”.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{u}\nabla c = 0 \quad (3.74)$$

Această abordare asigură o precizie multumitoare a rezultatelor.

2. Legile pereților

Curgerea în zona pereților este complexă și trebuie considerată și teoria stratului limită. În cazurile uzuale, grosimea stratului limită este foarte redusă comparativ cu scara la care are loc fenomenul curgerii.

Legile curgerii la perete reflectă proprietățile de similitudine ale componentelor vitezei și tensiunilor Reynolds a curenților turbulenți tangențiali în vecinătatea peretelui, într-o zonă în care fenomenul curgerii este guvernat de parametrii caracteristici ai peretelui (viteză, frecare, vâscozitate și rugozitate). Formularea legii peretelui are rol dublu:

- Conferă posibilitatea determinării frecării cu peretele și a unei rugozități echivalente din vitezele măsurate în vecinătatea peretelui.
- Prezintă avantajul de a simplifica selecția condițiilor de frontieră (condițiilor la limită) în modelele de turbulență generate pe baze statistice.

$$u_{moyp} = u_{\tau} u^+ \quad (3.75)$$

În care:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}$$

$$\text{Cu } \tau_p = \mu \frac{\partial \gamma_p}{\partial t} = \mu \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Unde R este raza hidraulică.

$$u^+ = 5 \ln y^+ - 3.05 \quad (3.76)$$

$$V_{moyp} = W_{moyp} = 0 \quad \varepsilon_p = \frac{c_u^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p} \quad (3.77)$$

3. Ecuațiile curgerii turbulente

Sunt valabile ecuațiile Reynolds

$$\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho} u^2 + \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho} uv + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho} uw = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho} u' u' - \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho} u' v' - \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho} u' w' + \rho g_x \quad (3.78)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho uv} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho v^2} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho vw} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho u'v'} - \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho v'v'} - \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho u'w'} + \rho g_y \quad (3.79)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho w}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho uw} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho vw} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho w^2} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{\rho u'w'} - \frac{\partial}{\partial y} \bar{\rho v'w'} - \frac{\partial}{\partial z} \bar{\rho w'w'} + \rho g_z \quad (3.80)$$

Se consideră ecuația conservării masei:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.81)$$

Pentru modelarea turbulenței se folosește modelul k-ε

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \cdot \text{grad} k = \text{div}(\text{grad} k) + P - \varepsilon \quad (3.83)$$

Pentru care: $P = u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v} \cdot \text{grad} \varepsilon = \text{div} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} p - c_{\varepsilon 2} p) \quad (3.84)$$

Rezultă

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\Phi u_j)}_1 = \underbrace{\partial(\tau_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_j})}_2 + \underbrace{s_\Phi}_3 \quad (3.85)$$

1- termeni convectivi, 2- termeni difuzivi, 3- termeni sursă

Ecuatiile vor fi rezolvate impunând condiții inițiale și condiții la limită, folosind un program de calcul bazat pe metoda volumelor finite.

Ecuatia presiunii:

Ecuatia presiunii se poate scrie sub forma:

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.86)$$

Pentru rezolvarea se pot impune următoarele condiții limită și de frontieră:

- Pentru cazul 1- condiția de tip Neumann
- Folosirea legilor empirice
- Fără modelarea stratului limită

Utilizând un program de calcul numeric bazat pe metoda volumelor finite, se pot determina diferite mărimi caracteristice curgerii în absența și prezența unui obstacol adiacent peretelui.

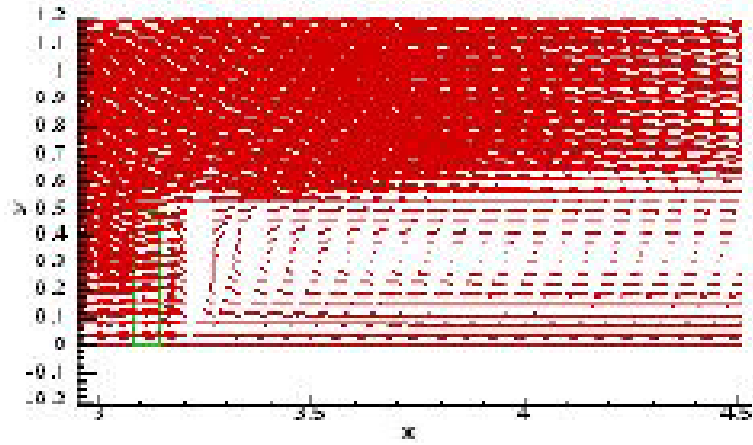


Fig. 3.34. Distribuția vitezelor în canalul cu obstacol

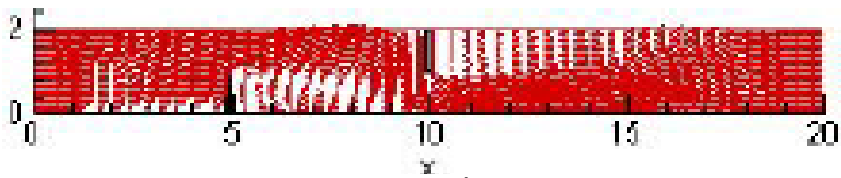


Fig. 3.35 Distribuția vitezei în canalul cu 2 obstacole

CAPITOLUL 4. STAȚIUNEA EXPERIMENTALĂ

4.1. Prezentarea generală a stațiunii experimentale

Pentru a modela fizic în condiții de laborator condițiile din teren am vizitat numeroase locuri unde sunt amplasate sisteme de corectare a torenților. În urma acestor vizite și în urma studiului din literatura de specialitate am ajuns la concluzia că majoritatea sistemelor de corectarea torenților au dimensiuni fixe.

Referitor la forma acestor amenajări, acestea sunt de obicei canale din beton, de formă trapezoidală, în partea inferioară având obstacole pentru corectarea torenților. Canalele au de obicei înălțimi de 1, 2, 3, 4, 5 m și lățimi la bază proporționale cu aceasta (așa cum se indică și în capitolul 1).[22]

De aceea, la alegerea dimensiunilor ștandului experimental, s-a optat pentru un canal trapezoidal, cu înălțime de 10 cm, cu baza de 10 cm, așa cum se reprezintă în figura 4.1. Deși într-un canal optim raportul dintre lățime și înălțime ar fi 0,82, în acest caz am optat pentru un raport mai mare (egal cu 1) pentru a compensa depunerea de aluviuni și formarea vegetației.

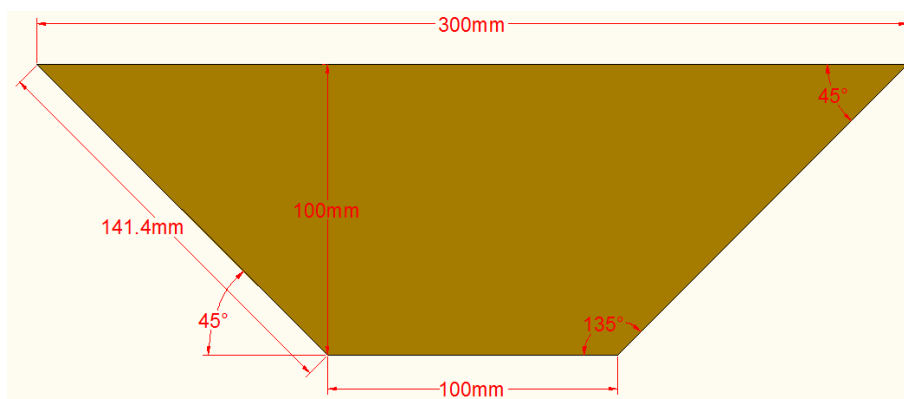


Fig. 4.1. Secțiune transversală a canalului din ștandul experimental

Din măsurătorile efectuate în diverse zone, s-a putut concluziona că majoritatea canalelor au o lungime de aproximativ 20 m, de aceea pentru ștandul experimental s-a ales lungimea de 2,5 m (2 m până la obstacole) figura 4.2.. La distanța de 0,5 m de capătul aval al canalului s-au amplasat obstacolele destinate disipării energiei hidraulice a torenților.

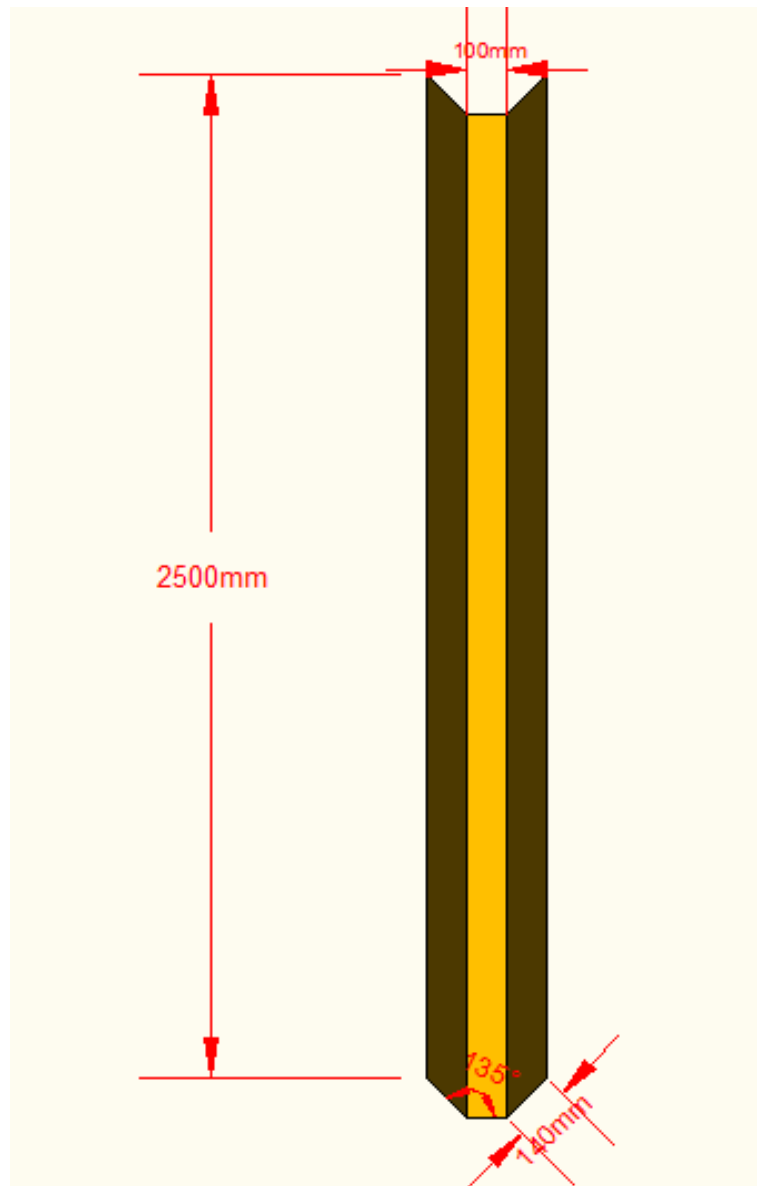


Fig. 4.2. Vedere de sus a ștandului experimental

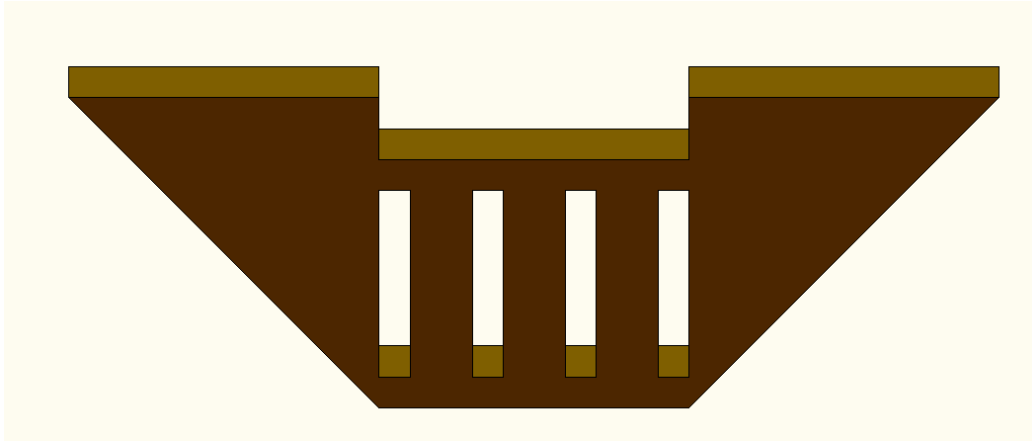


Fig. 4.3. Obstacol clasic de tip „baraj” de corectare a torenților utilizate în prezent

În momentul de față majoritatea barajelor de corectare a torenților din zonele studiate (în județele Caraș-Severin, Gorj, Vâlcea, Hunedoara etc.) au practic aceeași formă figura 4.3, ceea ce confirmă faptul că în ultimul timp preocupările de cercetare în acest domeniu au fost minime.

De aceea în ștandul experimental s-au conceput alte trei sisteme de disipatoare de energie care au fost măsurate comparativ cu sistemul „clasic”, utilizat în prezent pentru a determina dacă este cazul ca pe viitor în soluția constructivă a acestor sisteme să fie făcute schimbări majore.

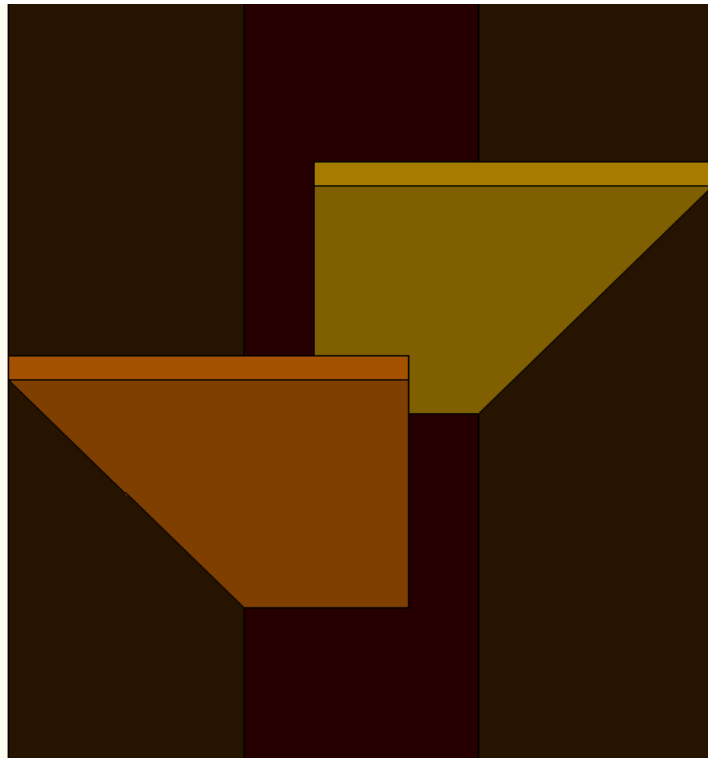


Fig. 4.4. a

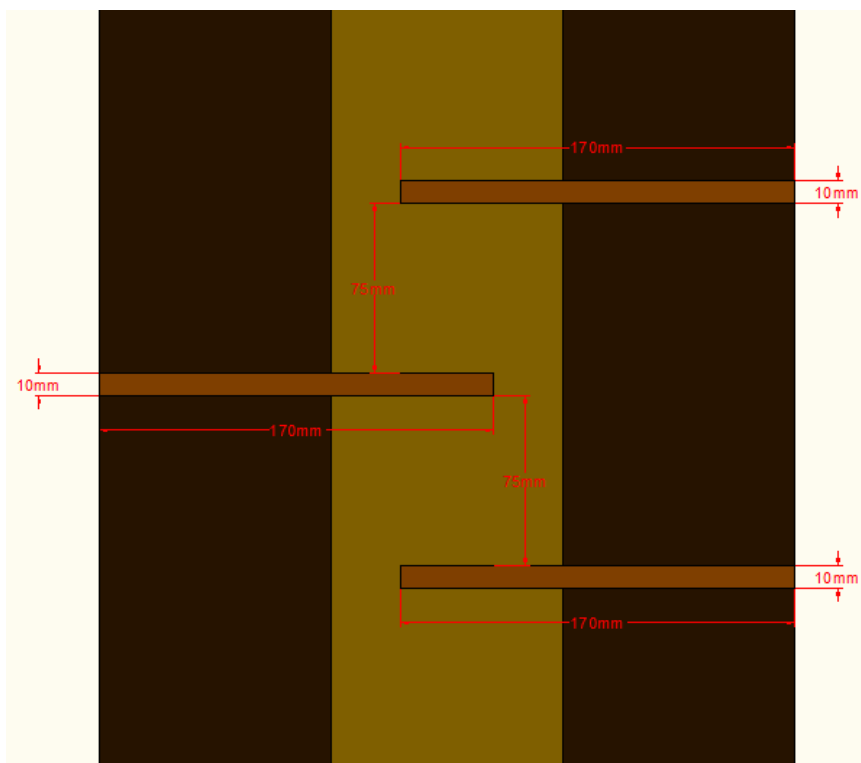


Fig. 4.4.b

Fig. 4.4. Obstacole de tipul "Două baraje disipatoare" amplasate lateral pe canal

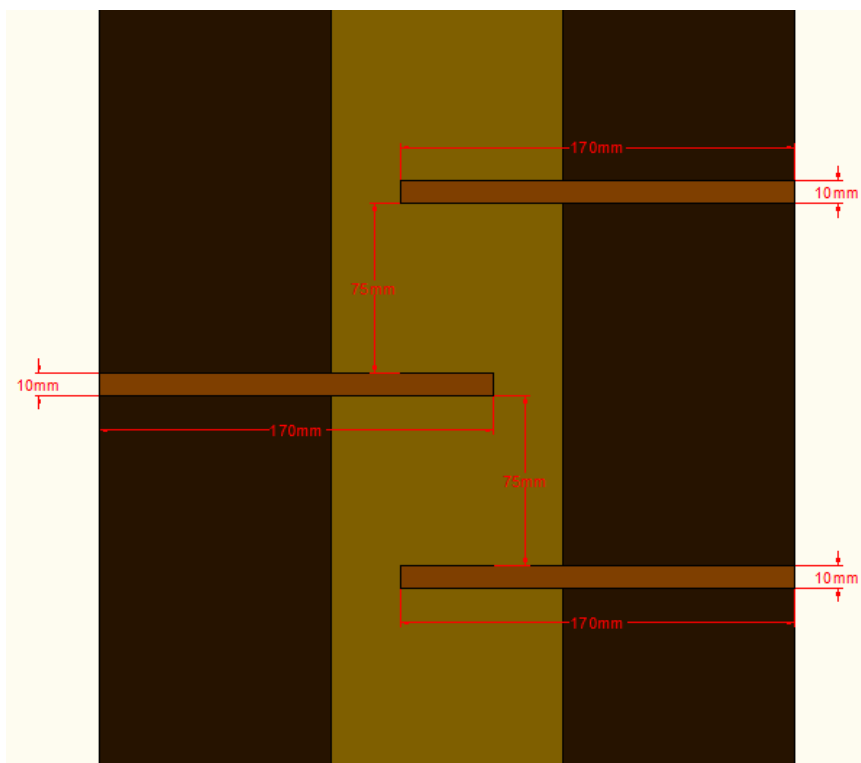


Fig. 4.5.a

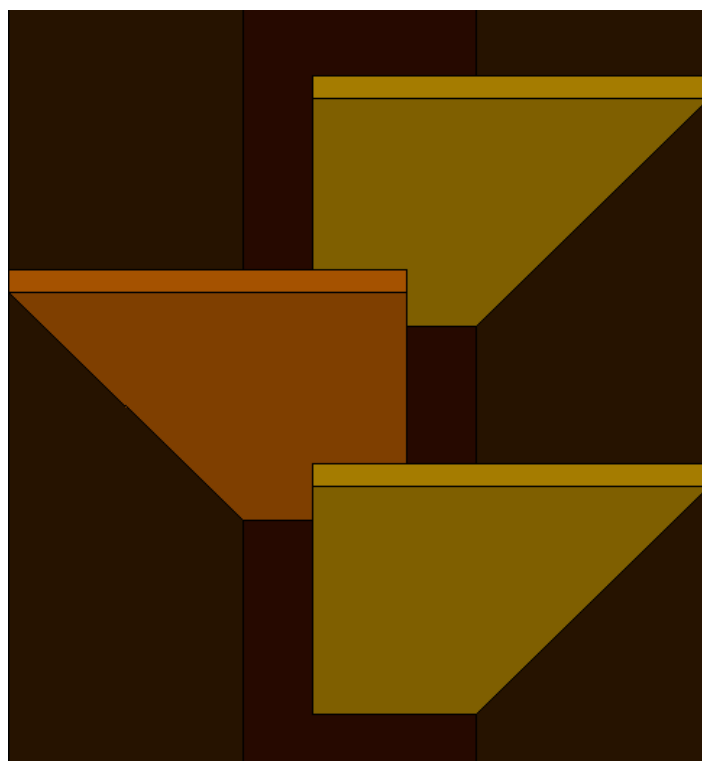


Fig. 4.5. b

Fig. 4.5. Obstacole de tipul „Trei baraje disipatoare” amplasate lateral pe canal

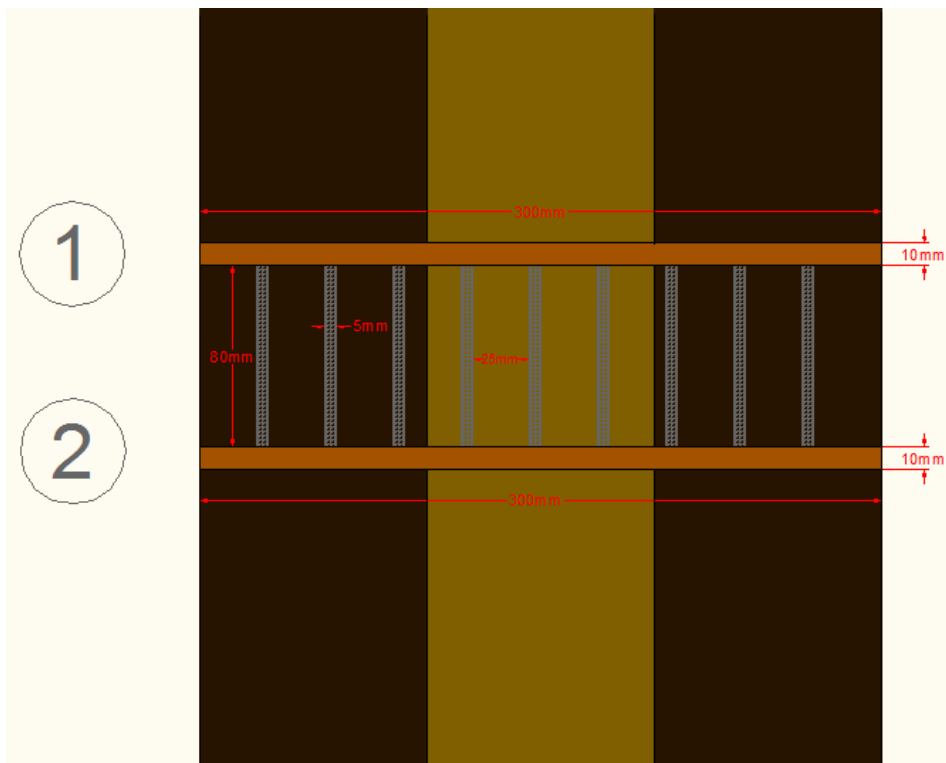


Fig. 4.6.a

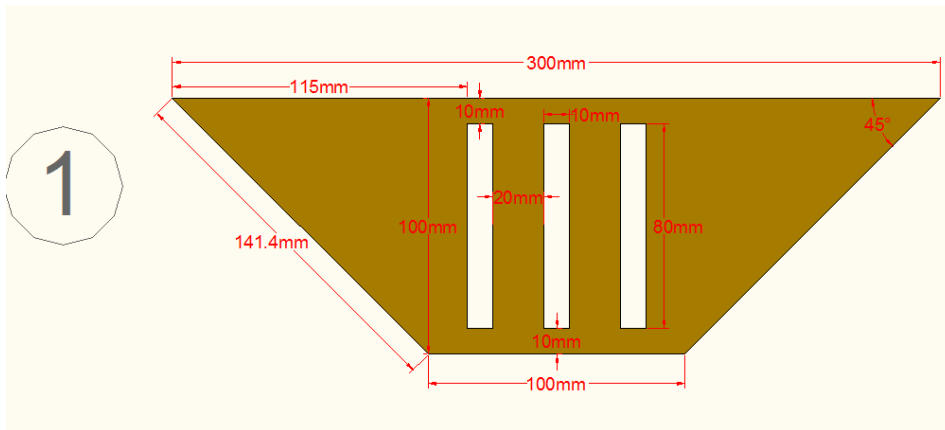


Fig. 4.7. b

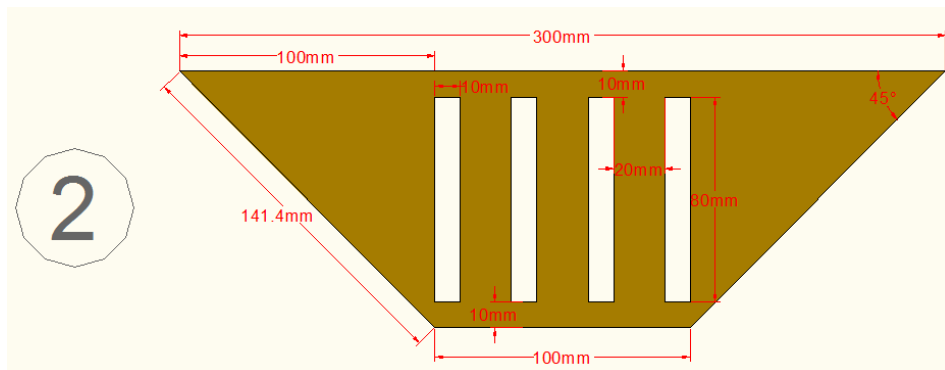


Fig. 4.7. c

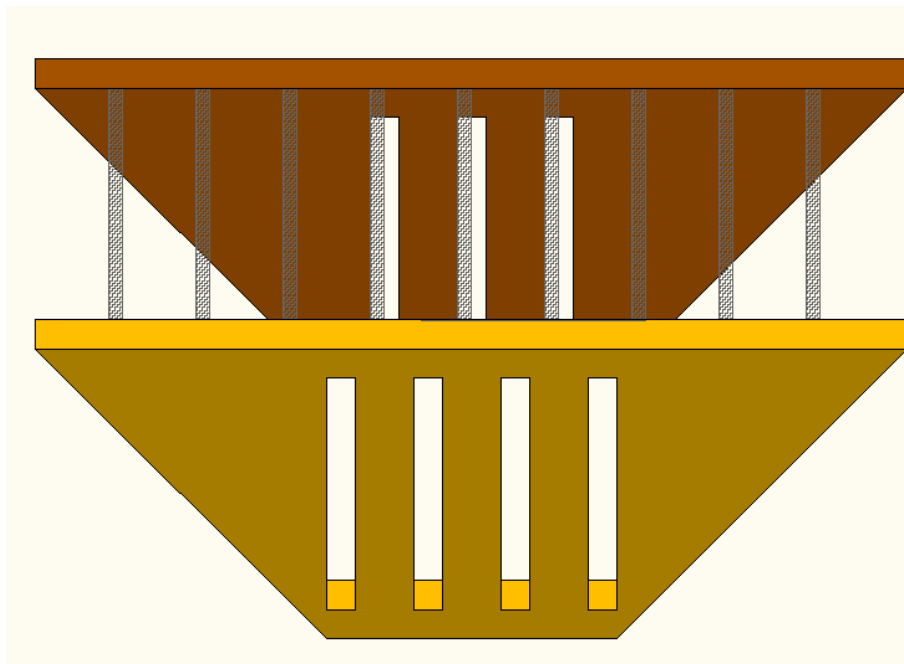


Fig. 4.6.d
Fig.4.6. Priza tiroleză

Priza tiroleză este un sistem cunoscut, utilizat pentru captările secundare ale lacurilor de acumulate, care însă până acum nu au fost utilizate în corectarea torenților. Pentru ștandul experimental s-a optat, spre deosebire de prizele tiroleze clasice, utilizarea a 2 obstacole „baraj” clasice folosite în corectarea torenților.

4.2. Condițiile și metodele de măsurare

Date fiind condițiile diferite din zonele unde se amplasează sistemele de corectarea torenților s-a optat pentru unghiuri variabile ale pantei, cuprinse între 5 și 55°. Pentru fiecare unghi s-au amplasat consecutiv obstacolele disipatoare de corectare a torenților, un set de măsurători s-a făcut cu canalul fără obstacol pentru a fi folosit ca referință.

Așa cum a rezultat din capitolul 2 a fost esențială măsurarea vitezei în canalul de curgere, variația acestui parametru fiind o măsură cantitativă și calitativă semnificativă pentru evaluarea capacității de disipare a fiecărui obstacol în parte. Măsurarea vitezei s-a realizat global, la ieșirea din canalul ștandului experimental, determinând debitul efluent în absența, respectiv prezența fiecărui obstacol disipator modelat fizic și montat. Măsurătorile s-au efectuat folosind în principiu metoda volumetrică, având în vedere faptul că la unghiuri de înclinare ale canalului care au depășit 5° nu s-a putut folosi morișca hidrometrică, deoarece înălțimea vânei de lichid nu a mai fost suficientă pentru a asigura condițiile de măsurare.

4.2.1. Metoda volumetrică

Metoda volumetrică, cea mai simplă, dar totodată sigură metodă pentru măsurarea debitelor mici, este cu atât mai exactă cu cât volumul folosit și deci timpul de calcul sunt mai mari. Debitmetrul cu rezervor calibrat volumic, este compus dintr-un rezervor etalonat volumic, un cronometru, un nivelmetru, un dispozitiv de deviere a vânei de lichid și de un sincronizator ce cuplează cronometrul cu dispozitivul de deviere a vânei de lichid. [25]

Precizia măsurătorii depinde de precizia de măsurare a volumului lichidului și a timpului (a nivelelor și a duratelor). Citirea nivelelor se poate face direct, dar și prin amplificatori mecanici (vernier), optici (lupa) sau prin modificatori cu plutitor cu piezometru sau cu traducător mecano-electrici. Erorile curente se pot micșora prin creșterea volumelor și duratelor[26].

În ștandul experimental s-a utilizat un vas cu volumul de 65 de litri.

4.2.2. Morişca hidrometrică

Morișca hidrometrică este dispozitivul cel mai larg răspândit pentru măsurarea vitezei curentului de apă în canale deschise. Ea permite determinarea cu destulă precizie a vitezei punctuale a apei la diferite adâncimi. Moriştile sunt de fapt microturbine ce exploatează dependența între viteza curentului și turația (viteza unghiulară) rotorului la turbomașini. În metrologie se folosesc microturbine tangențiale sau axiale într-un regim apropiat de ambalare. Acestea determină viteza medie corespunzătoare ariei transversale măturate de rotor. Intervalul de măsurare uzual este de (0,03;10) m/s.

Ecuția dinamică a aparatelor cu rotor se determină pornind de la teorema momentului cantității de mișcare aplicată elementelor rotitoare și cu buna aproximație este de forma:

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = s * v \quad (4.1)$$

Măsurarea vitezei curenților fluizi cu aparate cu rotor implică măsurarea turației. Aceasta se poate face determinând numărul de impulsuri în unitatea de timp sau a turației pe principii mecanice, optice sau magnetice, analogică sau digitală.[27]

Domeniile de utilizare a acestui tip de aparat sunt: metrologia, ventilația și hidroenergetica. Cu aparatele cu rotor se măsoară viteza locală (punctuală) sau medie în aproximați tehnică în funcție de raportul ariei transversale a rotorului aparatului față de aria transversala a curențului fluid măsurat.

Morișca hidrometrică este alcătuită din trei părți principale: elicea (rotorul), corpul și aripa (coadă sau ampenajul). Poate dispune și de unele accesorii: *dispozitiv de sonorizare* (optică sau sonoră), *cablu electric*, *tijă gradată* pentru introducerea moriștii în apă la adâncimile dorite, *cronometru*, *baterie electrică* ș.a.

Observații:

- Aparatul cu rotor tangențial nu este sensibil la direcția curențului fluid în planul transversal al rotorului dar măsoară numai componenta vitezei curențului în acest plan.
- Aparatul cu rotor axial trebuie poziționat cu axa sa pe direcția curențului fluid înainte de a efectua măsurarea.

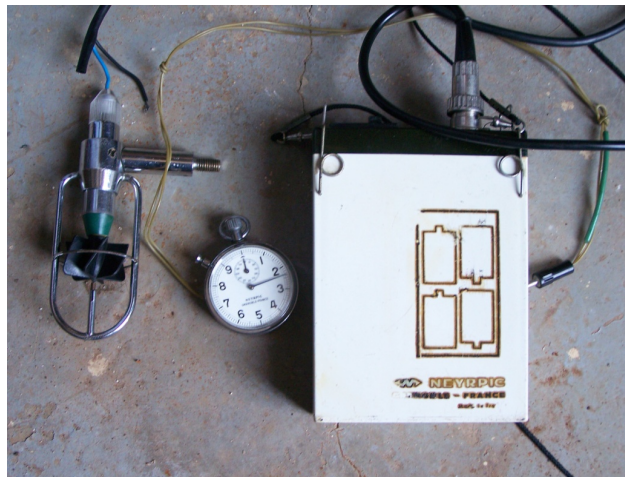


Fig. 4.6. Morișca hidrometrică

4.3. Efectuarea măsurătorilor

Pentru a asigura acuratețea măsurătorilor a fost necesar ca debitul să nu se modifice de la o măsurătoare la alta pentru un unghi de înclinare fix al canalului și fiecare obstacol-disipator analizat. De aceea s-a folosit un bazin cu nivel constant.

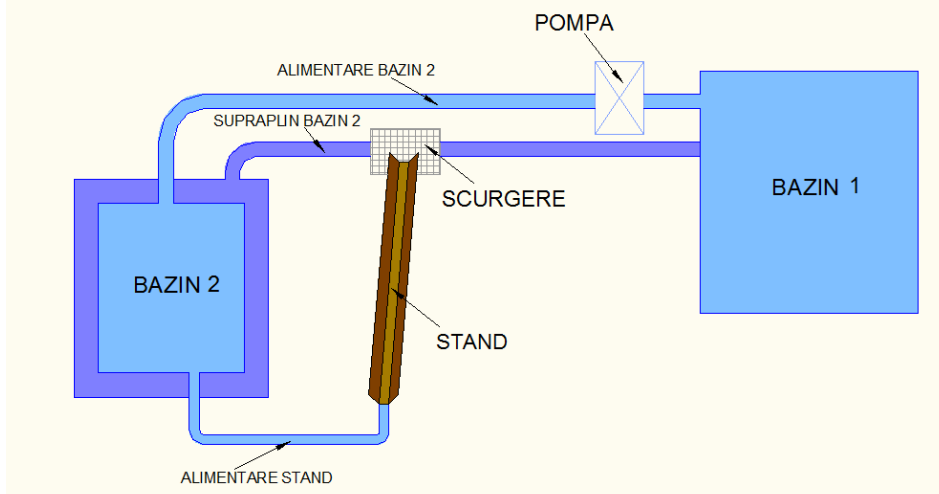


Fig. 4.7. Circuitul de apă din cadrul stațiunii experimentale

Măsurătorile au fost făcute pentru fiecare unghi și obstacol-disipator în parte. Pentru aceasta, pentru toate unghiurile s-au realizat câte 50 măsurători (câte 10 pentru fiecare tip de disipator). Rezultatele obținute au fost trecute în foi de măsurare pentru fiecare unghi în parte, în scopul simplificării prelucrării datelor obținute.

Pentru prelucrarea rezultatelor măsurătorilor s-au folosit relațiile:

$$Q = V / t \quad (4.2)$$

Termenii din relația (4.1) au semnificațiile fizice: Q reprezintă debitul volumetric (în l/s) care se acumulează în vasul etalon de volum V (65 l) în timpul măsurat t (s).

Viteza este dată de relația:

$$v = Q/S \quad (4.3)$$

Termenii din relația (4.2) semnifică: v = viteza medie a curentului de fluid într-o secțiune a canalului, Q = debitul volumic, iar S = aria suprafeței de trecere a curentului de fluid.

În continuare se prezintă geometria realizată, rezultatele experimentale obținute precum și graficele timp de umplere funcție de obstacol pentru diferitele unghiuri de înclinare ale canalului

Tabelul 4.2. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0,4538	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0,01305	m ²
Raza hidraulică Rh	0,028757	m
Volumul vasului etalon	0,065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.3:

Tabelul 4.3. Valori calculate -canal înclinat la 5⁰ față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	15,24	17,27	18,85	19,15	17,35
Debit	l/s	4,27	3,76	3,45	3,39	3,75
Viteza	m/s	0,33	0,29	0,26	0,26	0,29
Red. Vit	%		11,75%	19,15%	20,42%	12,16%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a cărei mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.9.

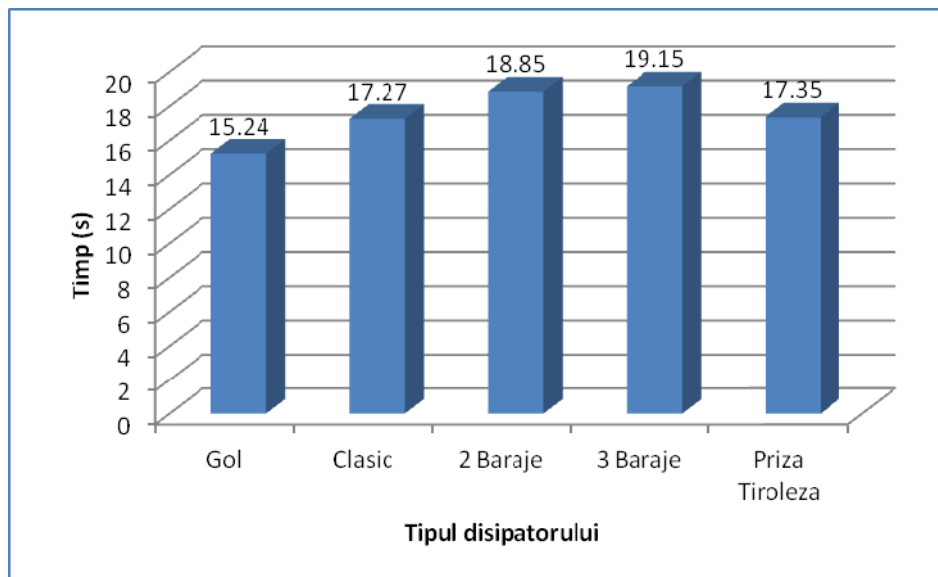


Fig.4.9. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 5⁰ față de orizontală

Unghiul de 15 grade

Geometria modelului experimental:

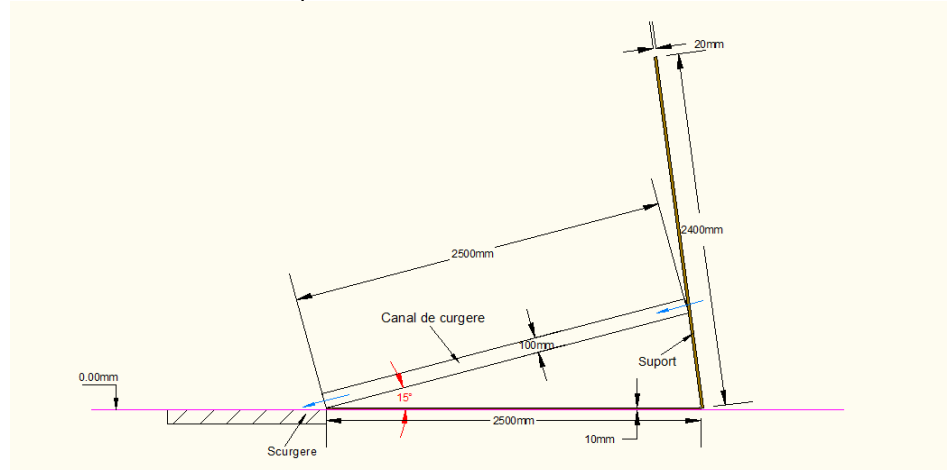


Fig.4.10. Canalul dispus la 15° față de orizontală

Rezultatele măsurătorilor sunt date în tabelul 4.4

Tabelul 4.4. Rezultate primare ale măsurătorilor pentru canal înclinat la 15°.

15°.											Timp (s)	
Nr. crt	Obstacol	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Media
1	Canal liber	34.02	34.15	34.04	34.17	33.97	33.9	34.24	34.1	34.05	34.06	34.07
2	Clasic	37.28	37.18	37.36	37.37	37.17	37.1	37.44	37.3	37.25	37.26	37.27
3	2 disipat.	38.95	39.02	38.84	39.04	38.84	38.77	39.11	38.97	38.92	38.93	38.94
4	3 disipat.	39.27	39.15	39.18	39.3	39.1	39.03	39.37	39.23	39.18	39.19	39.2
5	Priza tiroleză	37.52	37.25	37.24	37.44	37.24	37.17	37.51	37.37	37.32	37.33	37.34

Constantele pentru acest regim de măsurare au fost cele din tabelul 4.5:

Tabelul 4.5. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0.3269	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0.005513	m ²
Raza hidraulică Rh	0.016863	m
Volumul vasului etalon	0.065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.6:

Tabelul 4.6. Valori calculate -canal înclinat la 15⁰ față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	34.07	37.27	38.94	39.2	37.34
Debit	l/s	1.907837	1.74403	1.669235	1.658163	1.740760578
Viteza	m/s	0.346093	0.316377	0.302809	0.300801	0.315784232
Red. Vit	%		8.59%	12.51%	13.09%	8.76%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a căru mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.12.

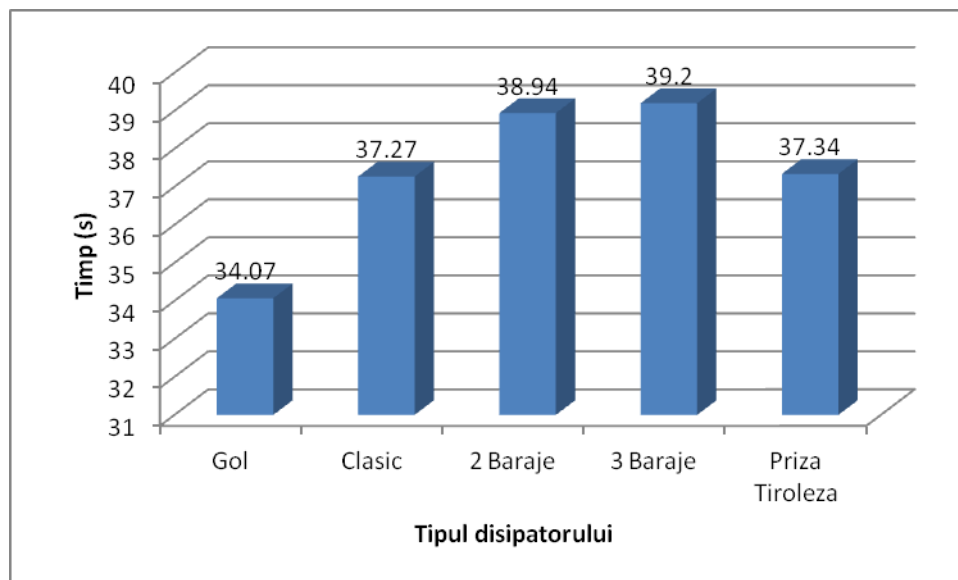


Fig.4.12. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 15⁰ față de orizontală

Unghiul de 25 grade

Geometria modelului experimental:

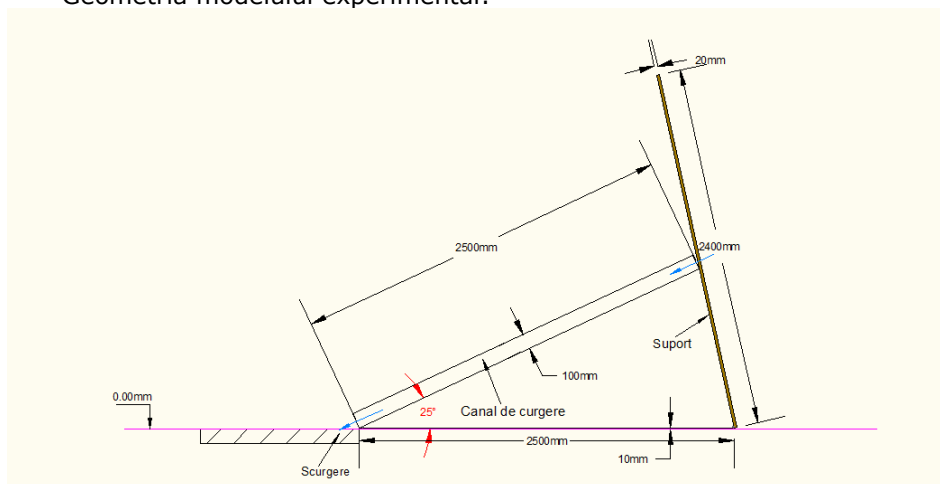


Fig.4.13. Canalul dispus la 15° față de orizontală

Rezultatele măsurătorilor sunt date în tabelul 4.7

Tabelul 4.7 Rezultate primare ale măsurătorilor pentru canal înclinat la 25°.

25°.											Timp (s)	
Nr. crt	Obstacol	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Media
1	Canal liber	50.72	50.69	50.55	50.75	50.55	50.48	50.82	50.68	50.63	50.64	50.65
2	Clasic	51.8	51.95	52.06	52.04	51.84	51.77	52.11	51.97	51.92	51.93	51.94
3	2 disipat.	52.45	52.31	52.38	52.48	52.28	52.21	52.55	52.41	52.36	52.37	52.38
4	3 disipat.	54.75	54.64	54.65	54.78	54.58	54.51	54.85	54.71	54.66	54.67	54.68
5	Priza tiroleză	51.8	52.01	51.85	51.99	51.79	51.72	52.06	51.92	51.87	51.88	51.89

Constantele pentru acest regim de măsurare au fost cele din tabelul 4.8:

Tabelul 4.8. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0.2846	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0.00345	m ²
Raza hidraulică Rh	0.012122	m
Volumul vasului etalon	0.065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.9:

Tabelul 4.9. Valori calculate -canal înclinat la 25⁰ față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	50.65	51.94	52.38	54.68	51.89
Debit	l/s	1.283317	1.251444	1.240932	1.188734	1.25265
Viteza	m/s	0.371976	0.362737	0.35969	0.344561	0.363087
Red. Vit	%		2.48%	3.30%	7.37%	2.39%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a cărei mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.14.

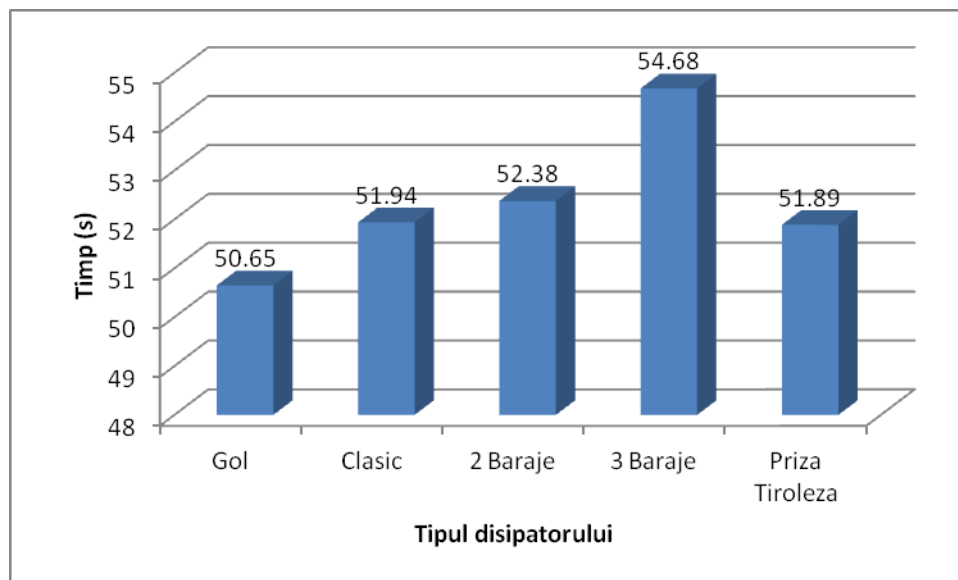


Fig.4.14. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 25⁰ față de orizontală

Tabelul 4.11. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0.2564	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0.0022	m ²
Raza hidraulică Rh	0.00858	m
Volumul vasului etalon	0.065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.12:

Tabelul 4.12. Valori calculate -canal înclinat la 35° față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	64.83	68.08	70.41	72.08	67.83
Debit	l/s	1.002622	0.954759	0.923164	0.901776	0.958278
Viteza	m/s	0.455737	0.433981	0.41962	0.409898	0.435581
Red. Vit	%		4.77%	7.93%	10.06%	4.42%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a căruia mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.16.

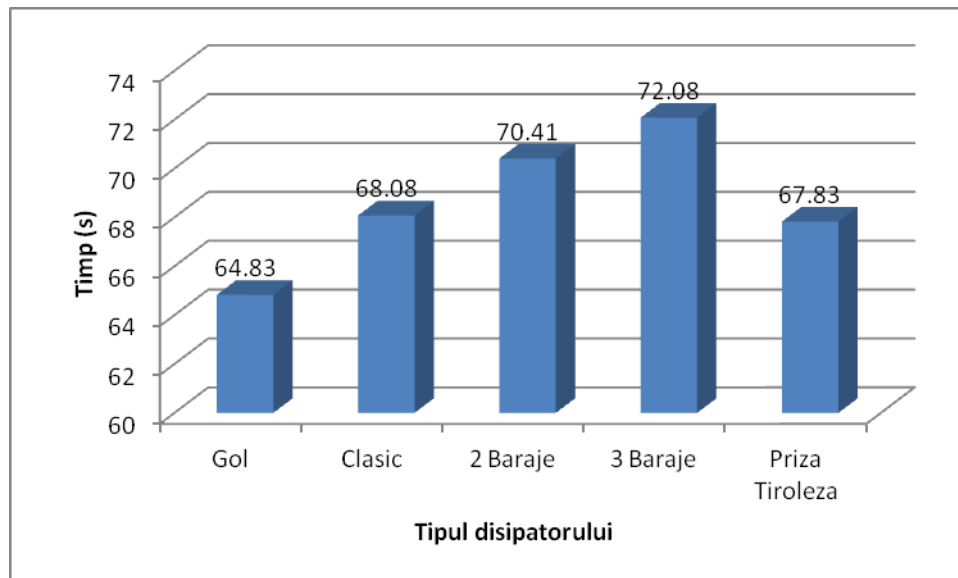


Fig.4.16. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 35° față de orizontală

Unghiul de 45 grade

Geometria modelului experimental:

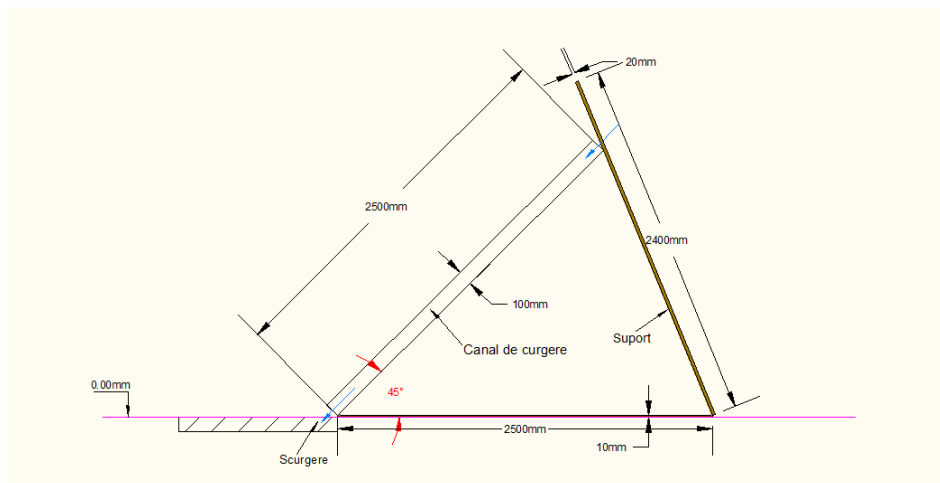


Fig.4.17. Canalul dispus la 45° față de orizontală

Rezultatele măsurătorilor sunt date în tabelul 4.13

Tabelul 4.13 Rezultate primare ale măsurătorilor pentru canal înclinat la 45°.

45°.											Timp (s)	
Nr. crt	Obstacol	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Media
1	Canal liber	84.03	84.08	84.15	84.19	83.99	83.92	84.26	84.12	84.07	84.08	84.09
2	Clasic	87	87.13	87.11	87.18	86.98	86.91	87.25	87.11	87.06	87.07	87.08
3	2 disipat.	87.9	87.5	87.95	87.88	87.68	87.61	87.95	87.81	87.76	87.77	87.78
4	3 disipat.	88.25	88.17	88.21	88.31	88.11	88.04	88.38	88.24	88.19	88.2	88.21
5	Priza tiroleză	86.98	86.15	86.04	86.49	86.29	86.22	86.56	86.42	86.37	86.38	86.39

Constantele pentru acest regim de măsurare au fost cele din tabelul 4.14:

Tabelul 4.14. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0.6824	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0.001613	m ²
Raza hidraulică Rh	0.002363	m
Volumul vasului etalon	0.065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.15:

Tabelul 4.15. Valori calculate -canal înclinat la 45° față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	84.09	87.08	87.78	88.21	86.39
Debit	l/s	0.772981	0.74644	0.740488	0.736878	0.752402
Viteza	m/s	0.479368	0.462909	0.459217	0.456979	0.466606
Red. Vit	%		3.43%	4.20%	4.67%	2.66%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a cărei mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.18.

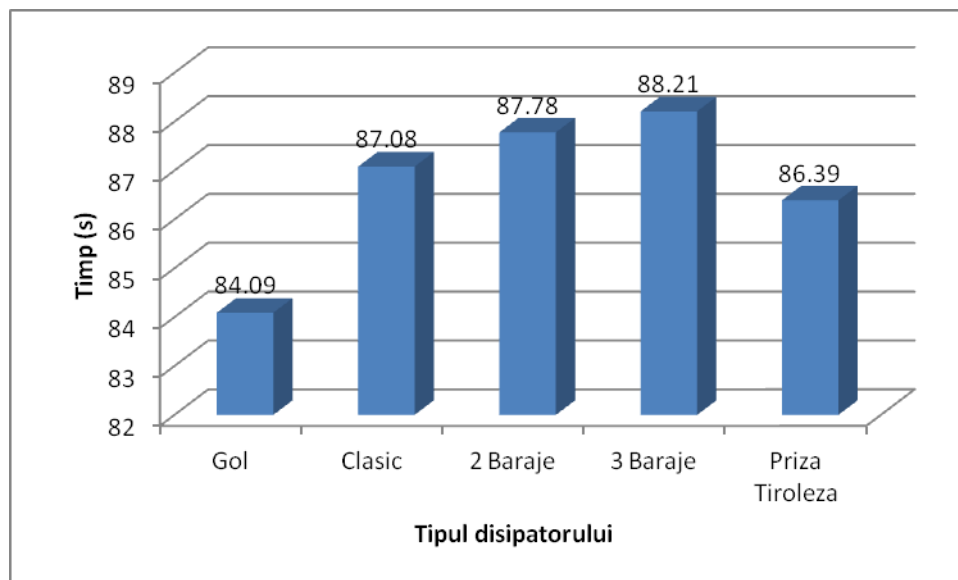


Fig.4.18. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 45° față de orizontală

Unghiul de 55 grade

Geometria modelului experimental:

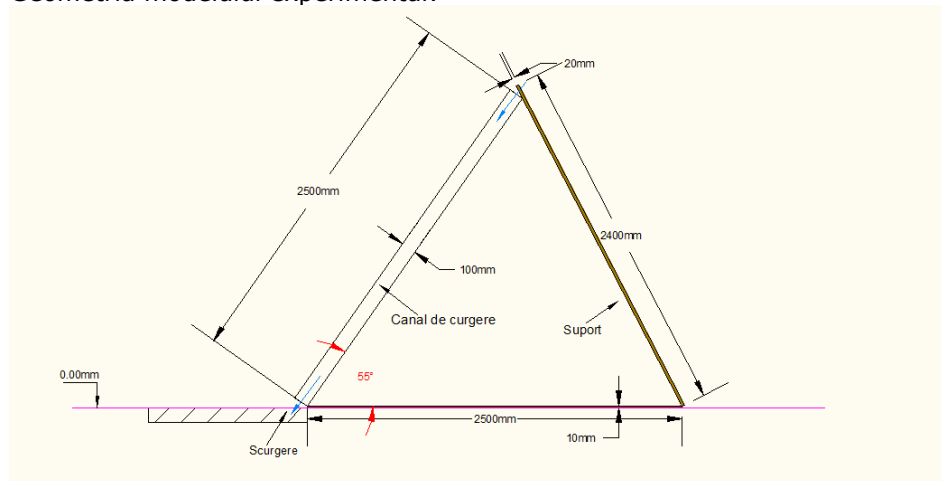


Fig.4.20. Canalul dispus la 55° față de orizontală

Rezultatele măsurătorilor sunt date în tabelul 4.16

Tabelul 4.16 Rezultate primare ale măsurătorilor pentru canal înclinat la 55°.

55°.												Timp (s)
Nr. crt	Obstacol	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Media
1	Canal liber	106.2	106.35	106.36	106.43	106.23	106.16	106.5	106.36	106.31	106.32	106.33
2	Clasic	107.6	107.3	107.39	107.53	107.33	107.26	107.6	107.46	107.41	107.42	107.43
3	2 disipat.	113.01	112.15	112.19	112.55	112.35	112.28	112.62	112.48	112.43	112.44	112.45
4	3 disipat.	114.54	114.27	114.36	114.49	114.29	114.22	114.56	114.42	114.37	114.38	114.39
5	Priza tiroleză	111.31	111.02	111.35	111.33	111.13	111.06	111.4	111.26	111.21	111.22	111.23

Constantele pentru acest regim de măsurare au fost cele din tabelul 4.17:

Tabelul 4.17. Constante de calcul

Parametru	Valoare	Unitate de măsură
Perimetrul udat	0.2282	m
Aria de trecere a curentului de fluid	0.00105	m ²
Raza hidraulică Rh	0.460123	m
Volumul vasului etalon	0.065	m ³

După prelucrarea rezultatelor au rezultat valorile din tabelul 4.18:

Tabelul 4.18. Valori calculate -canal înclinat la 55° față de planul orizontal

	U.M.	Gol	Clasic	2 disipatoare	3 disipatoare	Priza Tiroleza
Timp	s	106.33	107.43	112.45	114.39	111.23
Debit	l/s	0.611304	0.605045	0.578035	0.568231	0.584374719
Viteza	m/s	0.582195	0.576233	0.550509	0.541173	0.556547351
Red. Vit	%		1.02%	5.44%	7.05%	4.41%

Reprezentând grafic timpul de umplere al vasului etalon (a căruia mărime este direct proporțională cu eficiența elementului disipator folosit) se obține graficul din figura 4.20.

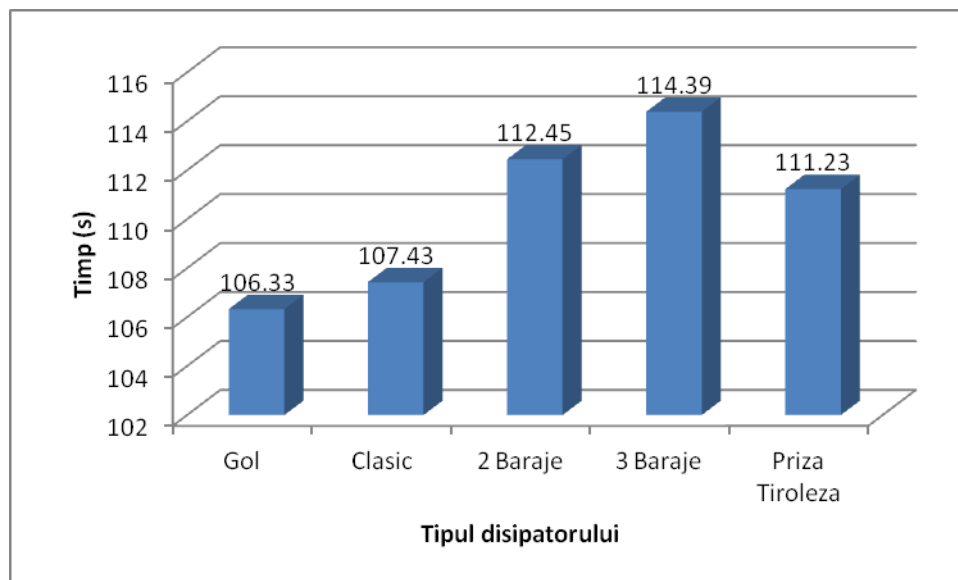


Fig.4.20. Timpul de scurgere pentru canalul dispus la 55° față de orizontală

CAPITOLUL 5. SIMULAREA NUMERICĂ

În ultimele două decade, calculatoarele s-au impus ca o unealtă indispensabilă în toate ramurile ingineresti, conducând la apariția unor noi direcții de cercetare. Cunoscută în literatura internațională sub titulatura de **Computational Fluid Dynamics** (CFD) aceasta nouă direcție de cercetare se găsește la confluența matematicilor aplicate, calculatoarelor și dinamicii fluidelor, permițând modelarea numerică a curgerii fluidelor. În noile condiții, calculele pot oferi o descriere amănunțită a câmpului de curgere cu o precizie neașteptată, capabilități ce provin dintr-o continuă rafinare a algoritmilor de calcul, precum și dintr-o incredibilă dezvoltare a calculatoarelor digitale moderne.

Din anii '60 a început să se contureze o nouă tehnică de studiu a sistemelor - **simularea**, care se bazează pe procedeele de similitudine, de analiză cu ajutorul machetelor și de calcul *analogic*. Primele domenii în care s-a utilizat această tehnică au fost: proiectarea construcțiilor hidrotehnice și aerospațiale, respectiv cercetarea fenomenelor din hidro-gazo-dinamica subterană.

Simularea este un domeniu de investigare aflat la confluența matematicii, teoriei sistemelor și informaticii, cu o *metodologie proprie* (bazată pe identificarea proceselor, modelarea sistemelor și teoria algoritmilor) și cu *mijloace specifice* (oferite de echipamentul de calcul automat, de aparatura electronică de măsură, de prelevare a datelor și de valorificare a rezultatelor),

Deoarece simularea își are originea în studiul sistemelor, se definește noțiunea de sistem, într-o formulare mai largă: o colecție de elemente diferite în interacțiune, cuprinzând oameni și mașini, integrate pentru îndeplinirea unui obiectiv dorit, prin manipularea și controlul materialelor, informației, energiei și activității umane. Cu alte cuvinte, numim sistem colecția de elemente capabile de interacțiune într-un astfel de mod încât să fie realizat programul dat. Metoda de studiu recomandată este de a efectua experimentările direct pe sistemul original (dacă ele sunt posibile). Din păcate, **nu** orice sistem poate suporta sau admite încercările directe; dacă experimentările de acest fel pot "vătăma" ireversibil sistemul, în sensul modificării stării reale, duratei, rezultatelor în timp util, și preciziei informatice necesare, ș.a.m.d., atunci singura cale de studiu și analiză a sistemului este simularea.

Pentru a realiza o simulare, trebuie ca în prealabil să se stabilească un model al sistemului studiat, ce se obține prin tehnica identificării proceselor din sistemul analizat (prin așa-numita modelare). *Modelarea* se definește ca o procedură a analizei de sistem, ce se realizează prin idealizarea matematică a întregului sistem sau a unor părți de sistem. Rezultatul ei este elaborarea modelului sistemului, sub forma unei reprezentări matematice a relațiilor din sistem. La studierea unui fenomen fizic se face o abstractizare și se stabilește o legătură esențială, reproductibilă și necesară între mărimile care guvernează fenomenul. Această legătură reprezintă legea de desfășurare a fenomenului. În cazul fenomenelor fizice, legile se exprimă cu ajutorul unor relații matematice denumite **modele matematice**. Studiul modelelor matematice conduce la rezultate care desigur, trebuie să fie verificate în practică.

5.1. Etape în rezolvarea problemelor prin simulare numerică

Inventarea calculatoarelor digitale și introducerea lor în lumea științei și tehnologiei a impus apariția **conceptului de aproximare discretă**. Acesta cuprinde teoria aproximării numerice a unui set de ecuații, luând modelul matematic al unui sistem fizic. De asemenea, noțiunea de aproximare implică definirea modelului matematic în raport cu complexitatea lumii fizice.

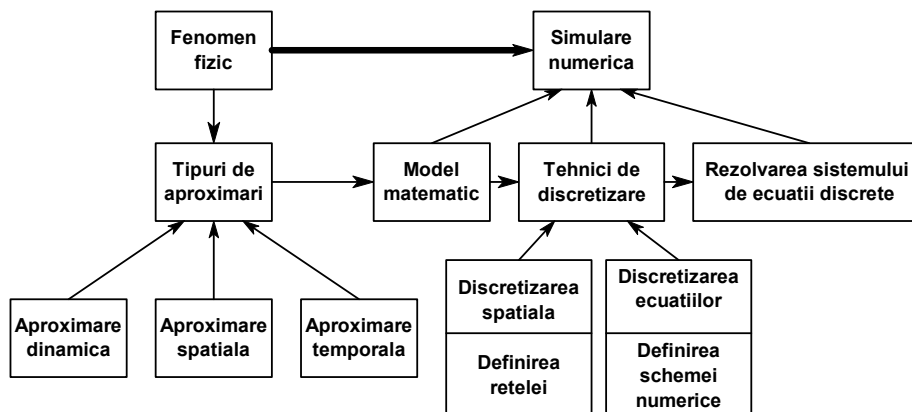


Fig. 5.1 Construirea unui model de simulare numerică, Hirsch, 1988[28]

Datorită complexității fenomenelor, se introduc ipoteze simplificatoare care ne conduc la modele matematice, cu considerarea **nivelului de aproximare** impus pentru a atinge o **precizie acceptabilă**, considerând un **set de variabile dependente și independente** (setul conține variabilele primare necesare să descrie complet sistemul considerat precum și alte variabile care caracterizează comportamentul lor). Odată cu evoluția tehnologiei calculatoarelor, ipotezele simplificatoare sunt eliminate treptat, conducând la simulări numerice care redau din ce în ce mai fidel fenomenul real.

Pentru a stabili modelul matematic trebuie să fixăm nivelul "scării reale", cu alte cuvinte dimensiunea caracteristică (subatomică, atomică, microscopică, macroscopică și până la astronomică). Fiecărui "nivel al scării reale" îi putem asocia un set de variabile fundamentale (primare) din care se deduc celelalte variabile (caracteristice).

Întâlnim următoarele tipuri de aproximări:

Aproximarea temporală implică estimarea diferitelor variabile și coeficienți dependente de timp și alegerea pasului de timp cel mai mic considerat în modelare.

Aproximarea spațială definește numărul de variabile spațiale utilizate în modelare. La acest nivel se stabilește dacă descrierea monodimensională (1D) sau cea bidimensională (2D), ca alternative la cea tridimensională (3D), va furniza suficientă precizie. Deoarece procesele de mediere implică o pierdere de informație în procesul de aproximare, această informație în cele mai multe cazuri va fi disponibilă din exteriorul modelului; de exemplu, din datele empirice. Este evident că modelele simple (de exemplu descrierea curgerii 1D) necesită mai multe date de

intrare empirice sau externe decât o curgere 3D vâscoasă, dacă contribuțiile 3D sunt luate în calcul.

Aproximarea dinamică este legată de estimarea influenței relative a diferitelor forțe și a componentelor lor asupra comportării sistemului. Evoluția dinamică a sistemului de curgere este determinată de echilibrul diferitelor forțe ce acționează asupra lui, dar rareori toate componentele forțelor ce acționează au importanță egală. De aceea, unul dintre primii pași pentru estimarea modelelor matematice ce descriu sistemul, este realizarea evaluării componentelor forțelor ce acționează, pentru a simplifica modelul cât mai mult posibil.

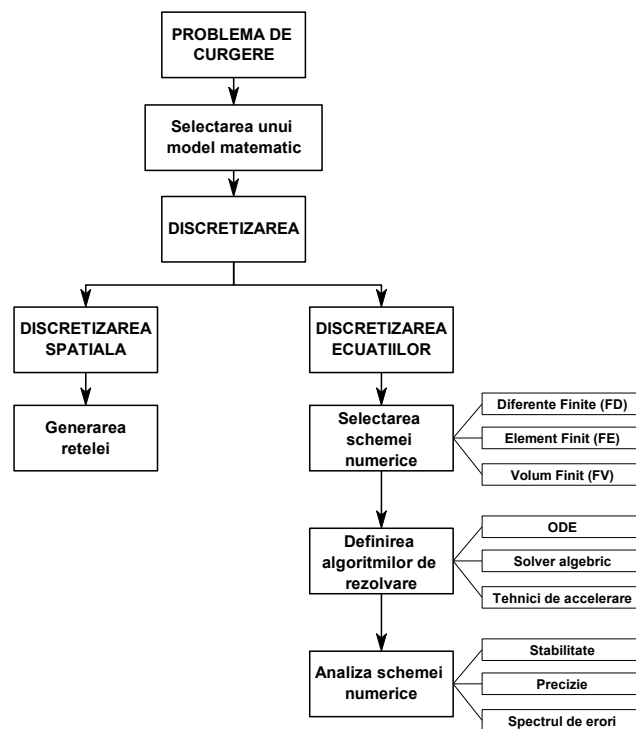


Fig. 5.2 Structura unei simulări numerice, Hirsch, 1988 [28]

Curgerea torențială este o curgere turbulentă, care constituie o provocare ce menține activă o largă comunitate de cercetători, care încearcă să găsească modele cât mai apropiate de realitatea fizică. Din studiile efectuate, s-a constatat că aceste curgeri sunt: nestaționare (implică fluctuații în timp atât ale vitezei cât și a mărimilor scalare), 3D și conțin o mare distribuție de vorticitate. Propagarea vârtejurilor este unul din principalele mecanisme prin care este crescută intensitatea turbulentă.

Deoarece în practică majoritatea curgerilor sunt turbulente, este util să se introducă o clasificare a modelelor turbulente. După Bardina există 6 clase, fiecare din ele putându-se împărți în subclase. [29]

- prima implică utilizarea corelațiilor astfel ca factorul de frecare să fie o funcție de numărul Reynolds. Această metodă este foarte utilă, dar este limitată la tipurile simple de curgeri;

- a doua utilizează ecuațiile integrale care pot fi obținute din ecuațiile de mișcare prin integrarea după una sau mai multe direcții de coordonate. De obicei acestea reduc problema la una sau mai multe ecuații diferențiale ordinare care nu ridică probleme în rezolvare;
 - a treia se bazează pe ecuațiile obținute din medierea ecuațiilor de mișcare în timp (dacă curgerea este statistic stabilă), după o coordonată în care curgerea nu variază. Această aproximare este numită închidere într-un punct și conduce la un set de ecuații cu derivate parțiale numit ecuațiile Navier-Stokes mediate Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes ≡ RANS). Cum aceste ecuații nu formează un set închis, metoda implică introducerea aproximațiilor de tipul modelelor turbulente;
 - a patra clasă de metode se numește închidere în două puncte și utilizează ecuații pentru corelarea componentelor vitezelor în două puncte distincte sau mai des transformata Fourier a acestor ecuații. Aceste metode sunt rareori utilizate;
 - a cincea este **modelarea structurilor macroscopice (Large Eddy Simulation ≡ LES)** care rezolvă mișcarea pentru scările cele mai mari, în timp ce mișcarea la scările cele mai mici este modelată. Ea poate fi privită ca un compromis între modelele într-un punct și simularea numerică directă;
 - în final, există simularea numerică directă (**Direct Numerical Simulation ≡ DNS**) în care mișcarea este rezolvată pentru toate scările din curgere.
- Ultimele metode sunt cele mai exacte dar timpul de calcul crește considerabil. Dificultatea majoră în curgerile turbulente se datorează domeniului mult mai mare a scărilor de timp și lungime decât în curgerile laminare. Astfel, chiar dacă sunt ecuații similare între curgerile laminare și cele turbulente sunt mult mai dezvoltate în rezolvare.

Soluționarea problemelor utilizând simularea numerică necesită parcurgerea următoarelor etape:

- PREProcesare** - generarea geometriei și rețelei de discretizare spațiale;
- Procesare** - rezolvarea problemei;
- POSTProcesare** - vizualizarea datelor și interpretarea rezultatelor.

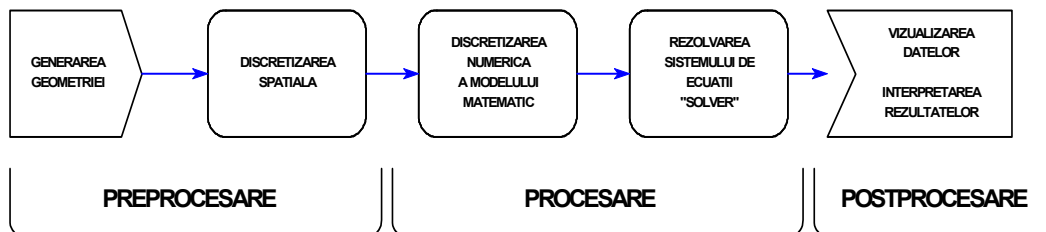


Fig.5.3 Schema unei simulări numerice.

În cadrul acestei teze de doctorat, pentru simularea numerică a ștandului experimental au fost utilizate 2 programe specializate.

GAMBIT var.2.4 este preprocesorul FLUENT-ului și este utilizat pentru importul sau crearea geometriei și discretizarea acesteia. Utilizând unelte software intuitive și maleabile, programul asigură controlul deplin al generării și verificării grilei de discretizare.

Cu ajutorul acestui program s-a creat geometria canalului ce urma să fie studiat.

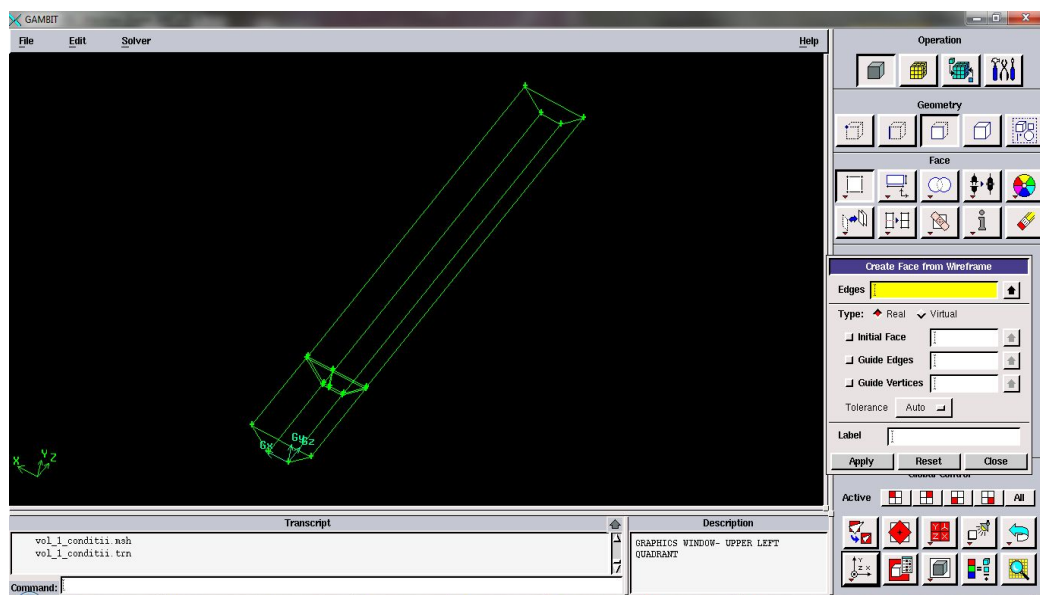


Fig. 5.4. Crearea geometriei canalului în Gambit

În urma creării geometriei a urmat discretizarea acesteia cu ajutorul funcției *MESH*. Pentru scurtarea timpului de procesare la început s-a utilizat un Mesh gros care ulterior a fost micșorat pentru a crește precizia modelării.

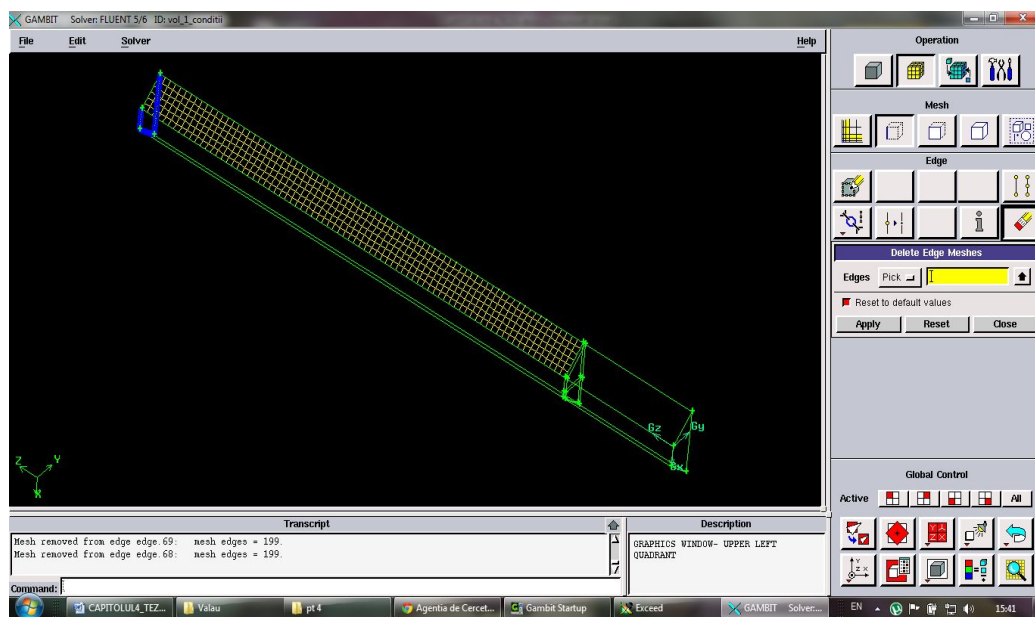


Fig. 5.5. Crearea Meshului

După crearea Meshului este necesară verificarea acestuia, prin identificarea celui mai slab element al meshului.

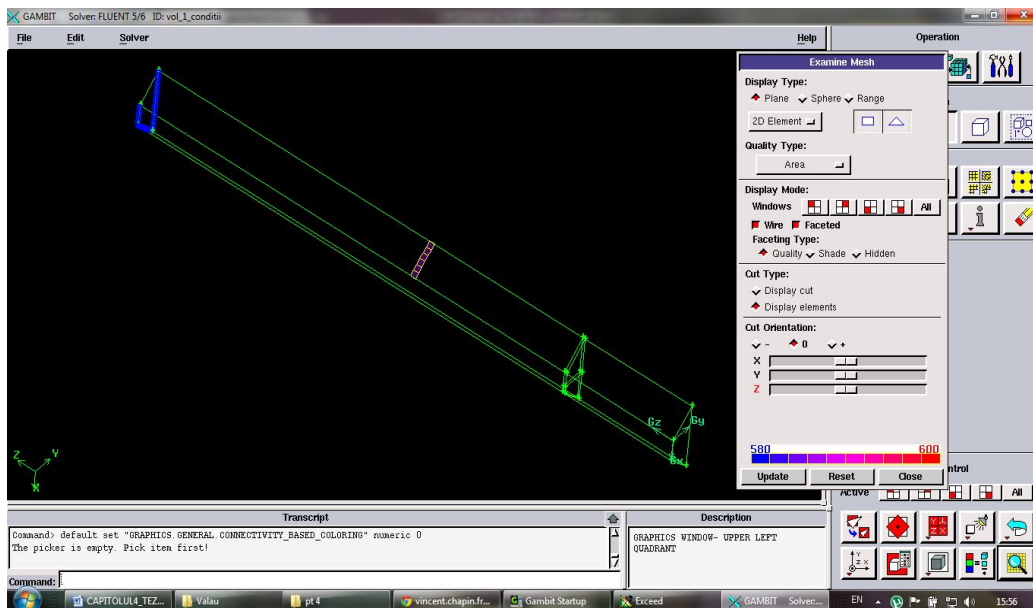


Fig. 5.6. Verificarea Meshului

După ce au fost finalizați toți pașii necesari în Gambit, se selectează un program pentru simularea efectivă, în cazul de față am ales programul *FLUENT 6.3*.

FLUENT 6.3 este un solver CFD pentru analiza și simularea dinamicii fluidelor, utilizabil pentru curgeri complexe, în regimuri incompresibile (subsonice), ușor compresibile (transonice) și chiar puternic compresibile (supersonice și hipersonice), acesta fiind o variantă fiabilă de rezolvare pe cale numerică a ecuațiilor ce descriu curgerea unui fluid și de manipulare, prin intermediul instrumentelor de postprocesare furnizate, a rezultatelor (grafice, animații, etc.).

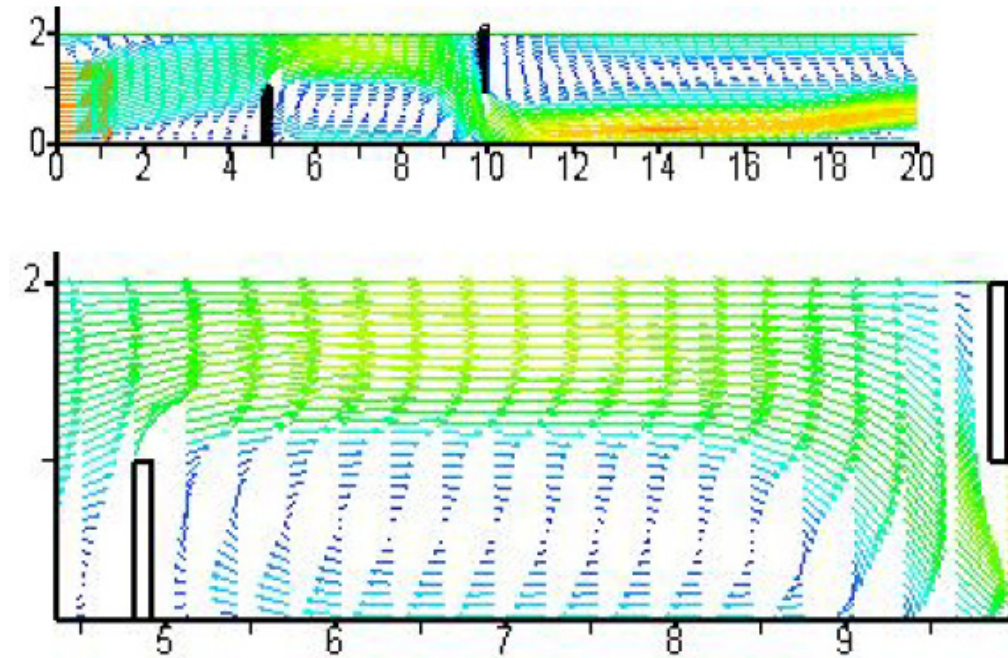


Fig. 5.7. Distribuția vitezei între două obstacole

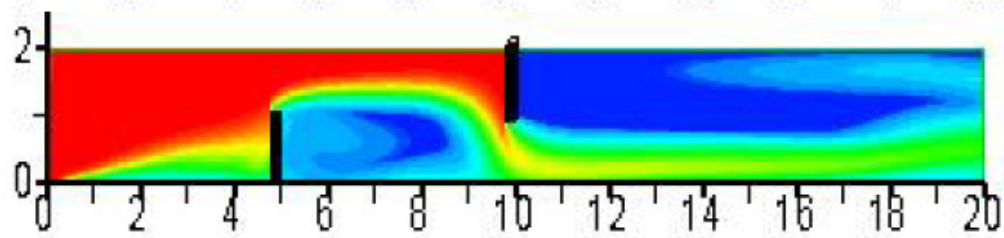


Fig. 5.8. Distribuția presiunii între obstacole

Vitezele obținute din FLUENT pentru vitezele apei au fost similare celor obținute în stațiunea experimentală, deci măsurătorile efectuate în cadrul capitolului 3 pot fi considerate valide.

CAPITOLUL 6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Înțelegerea dinamicii geomorfologice în sistemele torențiale presupune o bună cunoaștere a torenților sub raport morfologic, morfometric și hidrologic. Toreniții sunt rezultatul bilanțului hidro-geomorfologic, regimul precipitațiilor și relieful reprezentând factorii de prim rang a căror asociere creează contextul favorabil producerii scurgerilor de suprafață și a concentrării rapide a apelor în albiile torențiale, declanșând fenomenele torențiale. Diferența de nivel dictează amploarea evoluției și dezvoltării unui torent, reducerea diferenței de potențial conducând la autoanihilarea acestuia. Toreniții au o tendință permanentă spre realizarea echilibrului dinamic, dezechilibrele existente tinzând spre o nouă stare de echilibru, chiar în timpul creșterii formațiunii.

Amenajarea bazinelor hidrografice torențiale, prin multiplele sale efecte benefice (economice, sociale etc.), reprezintă o verigă în lanțul ce conduce spre o dezvoltare durabilă la nivelul întregii unități studiate. Reintegrarea funcțională a terenurilor afectate de torențialitate în mediu depinde de realizarea combinată și completă a lucrărilor, astfel încât rezultatul final să fie unul maxim, dar cu eforturi financiare cât mai mici.

În prezenta teză de doctorat am tratat complexitatea funcționării sistemelor de corectarea torenților sub aspectul bifazic, în prezența diverselor materiale în suspensie, adică aluviuni de mici dimensiuni (cum este pietrișul și noroiul) cât și aluviuni de mari dimensiuni, cum ar fi materialul lemnos și pietrele respectiv bolovanii. De s-au luat în calcul diferite modele analitice și numerice pentru descrierea funcționării disipatoarelor de energie torențială.

S-au efectuat calcule numerice bidimensionale folosind un program de calcul creat pentru studiul câmpului hidrodinamic al curentului nestaționat pentru curgerea în jurul a două paralelipede de secțiune pătrată dispuse în linie și amplasate într-un canal. Metoda a permis determinarea influenței

- raportului dimensional al celor două paralelipede
- distanței între paralelipede
- numărului Reynolds

asupra câmpului hidrodinamic, analizându-se variația presiunii mediate, liniile de curent și formarea și desprinderea vârtejurilor generate de obstacole și pereții canalului.

Se observă că desprinderea vârtejurilor după paralelipedul aval dispăre pentru rapoarte dimensionale mai mari ($SR > 1,0$). Coeficientul de rezistență pentru paralelipedul amonte rămâne pozitiv și crește cu creșterea SR . Coeficientul rezistenței pentru paralelipedul aval devine negativ cu creșterea valorii SR . Efectul creșterii distanței între paralelipede se manifestă mai întâi în creșterea frecvenței Strouhal și apoi în descreșterea acesteia după paralelipedul aval.

Pentru distanțe între paralelipede mai mici decât $2d$ ($l_s < 2d$) nu se observă desprinderi de vârtejuri după nici un paraleliped. Cu creșterea l_s de la $3d$ la $4d$ influența cuplării straturilor tangențiale duce la creșterea numărului Strouhal. Pentru $l_s = 5d$ are loc desprinderea independentă a vârtejurilor în ambii curenți și numărul Strouhal pentru paralelipedul aval descrește din nou. Coeficientul de rezistență

pentru paralelipipedul amonte rămâne aproape constant cu creșterea distanței între paralelipede.

Coeficientul de rezistență pentru paralelipipedul aval descrește încet pentru $2d < l_s < 4d$ și apoi drastic la $l_s = 5d$.

Pentru verificarea experimentală a relațiilor teoretice s-a proiectat, construit o stațiune experimentală în care s-au făcut măsurători ale mărimilor caracteristice pentru disiparea energiei în sistemele de corectarea torenților.

Din măsurătorile efectuate în stațiunea experimentală se poate deduce că toate curgerile, sub aspectul criteriului Froude sunt curgeri subcritice.

Panta canalului	V	H=x	Dm	Fr
[⁰]	[m/s]	[m]	[m]	[-]
5	0.33	0.035	0.097	0.339
15	0.346	0.03	0.097	0.354
25	0.372	0.025	0.098	0.380
35	0.455	0.02	0.098	0.464
45	0.479	0.015	0.099	0.487
55	0.582	0.01	0.099	0.591

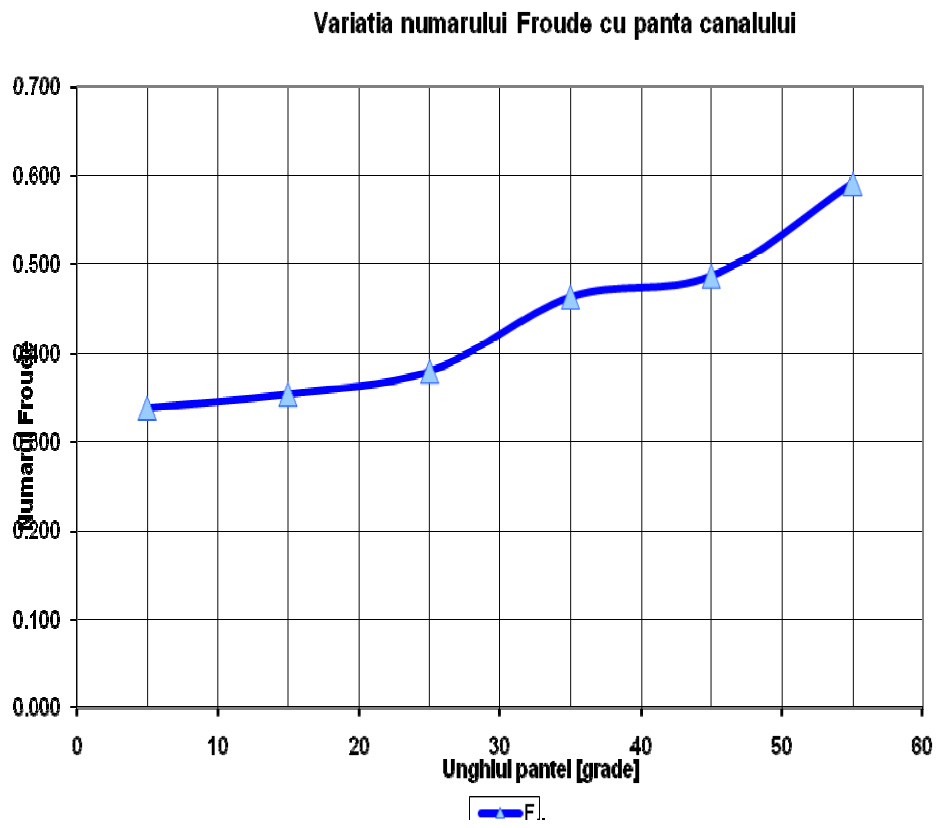


Fig. 5.1. Variația numărului Froude în funcție de panta canalului

Pentru a putea aprecia calitativ sistemele de corectarea torenților încercate în stațiunea experimentală pentru fiecare unghi putem utiliza următorul tabel:

Nr. curent	Unghi	Cel mai eficient sistem	Reducerea vitezei celui mai eficient sistem (%)	Reducerea vitezei sistemului clasic (%)	Diferența (%)
1	5°	3 disipatoare	20.42	11.75	8.67
2	15°	3 disipatoare	13.09	8.52	4.57
3	25°	3 disipatoare	7.37	2.48	4.89
4	35°	3 disipatoare	10.06	4.77	5.29
5	45°	3 disipatoare	4.67	3.43	1.24
6	55°	3 disipatoare	7.05	1.02	6.03

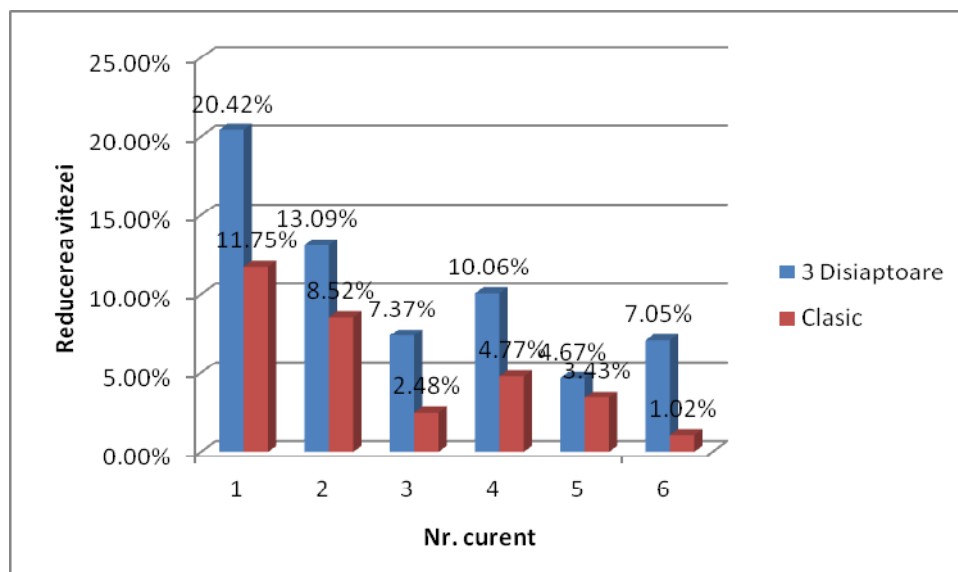


Fig. 5.2.Compararea reducerii vitezei curentului pentru sistemul clasic și cel cu 3 disipatoare față de canalul fără obstacole

Toate măsurătorile efectuate în stațiunea experimentală se încadrează în limita de toleranță $\pm 1\%$.

Observând aceste diferențe mari de eficiență dintre sistemele de corectarea torenților utilizate în prezent și cel mai eficient sistem încercat putem deci spune că din punct de vedere al eficienței de disipare, sistemele de corectarea torenților ar trebui regândite.

Pentru a putea însă cuantifica rezultatele obținute din măsurători este necesară realizarea unui calcul tehnico – economic.

Luând în calcul aceste aspecte voi compara și sub aspectul financiar cele două sisteme de corectarea torenților (cel utilizat în prezent și cel cu trei baraje – disipatoare de energie). Pentru acestea, am utilizat prețul mediu al betonului B150 de 245 lei / mc.

Disipator	Volum	Preț
Clasic	0,84 mc	205.8 lei
3 disipatoare	1,5 mc	367, 5 lei

Data fiind diferența mare de volum între cele 2 sisteme de corectarea torenților, se observă o diferență mare de preț din punct de vedere al materialelor pentru construcția acestora.

Privind acest aspect și analizând celelalte sisteme încercate (cel cu 2 disipatoare și priza tiroleză), trebuie găsit raportul optim între eficiența disipării energiei și cheltuielile aferente.

La majoritatea pantelor, așa cum se poate observa din capitolul 3 diferența de eficiență între sistemul cu 2 disipatoare și cel cu trei disipatoare este foarte mică, pentru aceste unghiuri recomand a se utiliza sistemul format din 2 disipatoare, reducerea costurilor justificând pierderea minimă a eficienței.

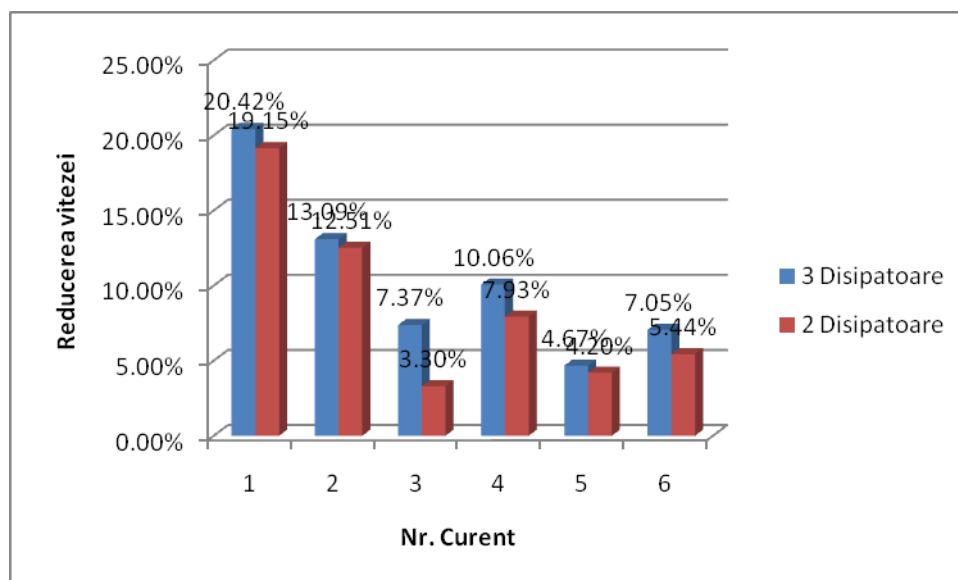


Fig. 5.3. Compararea reducerii vitezei curentului pentru sistemul cu 3 disipatoare și cel cu 2 disipatoare față de canalul fără obstacole

În următorul tabel sunt prezentate cheltuielile pentru 3 sisteme de corectarea torenților, cele cu 3 respectiv cu 2 disipatoare și cel clasic.

Disipator	Volum	Preț
3 disipatoare	1,5 mc	367, 5 lei
2 disipatoare	1 mc	245 lei
Clasic	0,84 mc	205.8 lei

Prin urmare, analizând datele de mai sus recomand utilizarea sistemelor de corectarea torenților formate din două disipatoare dispuse alternativ, pentru acestea raportul dintre eficiență și cheltuieli fiind optim. Totuși în unele cazuri speciale, cum ar fi zonele cu risc ridicat de inundații se impune instalarea sistemelor de corectarea torenților formate din 3 baraje disipatoare, care deși mai scumpe asigură o protecție mai bună a obiectivelor periclitate de viiturile torențiale.

Cele mai importante contribuții aduse prin prezenta teză sunt:

- ✓ o privire de ansamblu asupra problematicei corectării torenților sub aspectul mecanicii fluidelor
- ✓ o sistematizare a problematicei curgerii bifazice în torenți și canale torențiale
- ✓ proiectarea și executarea unei stațiuni experimentale pentru încercări în domeniul curgerii în canale torențiale
- ✓ un criteriu de calitate în ceea ce privește sistemele de corectarea torenților din punct de vedere al hidrodinamicii
- ✓ o soluție tehnică de sistem de corectarea torenților mai eficient din punct de vedere al disipării energiei decât cele utilizate în prezent
- ✓ un calcul tehnico – economic pentru o soluție optimă a disipării energiei torențiale.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. I.Clinciu, N.Lazar, LUCRARI DE AMENAJARE A BAZINELOR HIRDRGRAFICE TORENTIALE, Ed. Silvica, 2000
- [2]. A.Kiss, I Clinciu, Gh. Ghitea STUDII DE TEREN HIDROLOGICE SI TOPOHIDROGRAFICE, Ed. Silvica, 1994
- [3]. A. Bicov , AMENAJAREA HIDROTEHNICA ANTIEROZIONALA A VERSANTILOR, Ed. Mirton, 1996
- [4]. Ion Miulescu, Igor Tabara, AMELIORAREA TERENURILOR DEGRADATE SI CORECTAREA TORENTILOR, Ed. Mirton, 1998
- [5]. A. Wehry, H. Panțu, AMENAJĂRI HIDROAMELIORATIVE, VOL. I, Ed. Aprilia Print, Timișoara, 2008
- [6]. S. Hâncu, M. Popescu, D. Duma, P. Dan, E. Rus, E. Zaharescu, A Danchiv, A. Constantinescu, HIDRAULICA APLICATĂ, SIMULAREA NUMERICĂ A MIȘCĂRII NEPERMANENTE A FLUIDELOR, Ed. Tehnică, București, 1985
- [7]. C. Mateescu, HIDRAULICA, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1963
- [8]. P.G. Kiselev, ÎNDREPTAR PENTRU CALCULE HIDRAULICE, Ed. Tehnică, București, 1988
- [9]. I. Florescu, MECANICA FLUIDELOR, NOTE DE CURS, Bacau, 2007
- [10]. M. Bărglăzan, A. Iosif, MODELAREA CURENTULUI LICHID LA TRECEREA PRIN GRĂTARUL UNEI AMENAJĂRI HIDROENERGETICE, Buletinul științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, 1999
- [11]. R. Resiga, COMPLEMENTE DE MECANICA FLUIDELOR ȘI TEHNICI DE SOLUȚIONARE NUMERICĂ, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- [12]. P.P. Pratih, Shaligram Tiwari, NUMERICAL INVESTIGATION OF LAMINAR UNSTEADY WAKES BEHIND TWO INLINE SQUARE CYLINDERS CONFINED IN A CHANNEL, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 3, Nr. 3, 2009
- [13]. M.M. Zdravkovich FLOW INDUCED OSCILLATIONS OF TWO INTERFERING CIRCULAR CYLINDERS. Journal of Sound and Vibration, 1985
- [14]. R. Franke, W. Rodi, B. Schönung, NUMERICAL CALCULATION OF LAMINAR VORTEX SHEDDING FLOW PAST CYLINDERS, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990
- [15]. A.S. Ramamurthy, P.M. Lee (1973). WALL EFFECTS ON FLOW PAST BLUFF BODIES. Journal of Sound Vibration, 1973
- [16]. J. Courchesne, A. Laneville, A COMPARISON OF CORRECTION METHODS USED IN THE EVALUATION OF DRAG COEFFICIENT MEASUREMENTS FOR TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDERS. Journal of Fluids Engineering, 1979
- [17]. K.Schneider, M. Farge, NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSIENT FLOW BEHAVIOR IN TUBE BUNDLES USING A VOLUME PENALIZATION METHOD, Journal of Fluids and Structures, 2005
- [18]. G. Xu, Y. Zhou, STROUHAL NUMBERS IN THE WAKE OF TWO INLINE CYLINDERS. *Experiments in Fluids*, 2005
- [19]. C.W. Hirt, J.L. Cook, CALCULATING THREE- DIMENSIONAL FLOWS AROUND STRUCTURES AND OVER ROUGH TERRAIN, Journal of Computational Physics, 1972
- [20]. M. Breuer, J. Bernsdorf, T. Zeister, F. Durst, ACCURATE COMPUTATIONS OF THE LAMINAR FLOW PAST A SQUARE CYLINDER BASED ON TWO DIFFERENT METHODS: LATTICE-BOLTZMAN AND FINITE-VOLUME. *International Journal of Heat and Flow*, Vol. 4, 2000

- [21]. R. Prişcu, CONSTRUCŢII HIDROTEHNICE, VOL. I, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1973
- [22]. R. Prişcu, CONSTRUCŢII HIDROTEHNICE, VOL. II, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1973
- [23]. A. Bărglăzan, CERCETAREA UNOR DISTRUGĂTORI DE ENERGIE, Comunicări Științifice tehnice, Anul I, Vol. I, Timișoara, 1956
- [24]. M. Bărglăzan, DETERMINATION OF DYNAMIC QUALITIES OF TURBOFLOWMETERS, Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic Timișoara, Timișoara, 1984
- [25]. V.P. Preobrajenski, MĂSURĂRI SI APARATE DE MĂSURAT TERMOTEHNICE, Editura tehnică, București, 1960.
- [26]. P. Popescu, T. Mihordea, MĂSURAREA DEBITULUI ÎN TEHNICĂ, Editura tehnică, București, 1969
- [27]. M. Bărglăzan, MĂSURĂTORI HIDRAULICE ȘI PNEUMATICE, Ed. UTT, Timișoara, 1992
- [28]. C. Hirsch, NUMERICAL COMPUTATION OF INTERNAL AND EXTERNAL FLOWS, vol. I+II, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York, Brisbane Toronto, Singapore, 1988
- [29]. J. Bardina, J.H. Ferziger, W.C. Reynolds, IMPROVED SUBGRID MODELS FOR LARGE EDDY SIMULATION, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980
- [30]. I. Clinciu, CORECTAREA TORENȚILOR, Ed. Univ. Transilvania, Brașov, 2001
- [31]. K. Bergmeister, SCHUTZBAUWERKE GEGEN WILDBACHGEFAHREN, Ed. Ernst und Sohn, Berlin, 2009
- [32]. V. Ancușa, MECANICA FLUIDELOR ȘI MAȘINI HIDRAULICE, Institutul Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1979
- [33]. N. Vasiliu, Daniela Vasiliu, I. Seteanu, Victorița Rădulescu, MECANICA FLUIDELOR ȘI SISTEME HIDRAULICE, Editura Tehnică Universitară, 1999
- [34]. A. Rutherford, VECTORS, TENSORS AND THE BASIC EQUATIONS OF FLUID MECHANICS, Dover Publications, New York, 1989
- [35]. G.K. Batchelor, AN INTRODUCTION TO FLUID DYNAMICS, Cambridge at the University Press, New York, 1967
- [36]. A. Boll, WILDBACH UND HANGVERBAU, Berichte der Eidgenossischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft nr. 343, Birmensdorf
- [37]. F. Czerny, WILDBACHSPERREN- KONSTRUKTIONSFORMEN, BELASTUNG, BERECHNUNG BETON- UND STAHLBETONBAU. Ed. Ernst und Sohn, Berlin, 2000
- [38]. Gridan Maria-Roberta, Jianu S. F., Grecea Carmen, " Implication of forestry cadastre in the national strategy of environmental protection", International Workshop „Global and Regional Environmental Protection“- GLOREP 2010, Timisoara, Romania, Editura: Politehnica, ISBN: 978-606-554-210-5, Vol. 2 ISBN: 978-606-554-212-9, 209
- [39]. Dragomir P.I., Jianu S. F., Visoiu Dagmar, Hernea Cornelia, „Improvement works in Steierdorf perimeter to increase of ecological value of degraded lands“, Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology, ISSN: 2066-1797, Editura: Agroprint Timisoara, Timisoara, Romania, Vol. 13, mai 2009, pp. 171
- [40]. Jianu S. F., Dragomir P. I., „Using WEPP- Software in order to help preserving forest biodiversity in Romania“, Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology, ISSN: 2066-1797, Editura: Agroprint Timisoara, Timisoara, Romania, Vol. 13, mai 2009, pp. 512
- [41]. Gridan Maria-Roberta, Jianu S. F., „Application of the elements of forestry

- and cadaster for setting up the topographic and cadastral documentation for design a forest road", Conferinta Internationala „Zilele Tehnice Studentesti” editia a XIV-a, **ZTS**, Timisoara, Romania, ISSN: 2066-3617, mai 2010, pp.425
- [42]. P. Gotthamseder, BAUTYPEN DER GESCHIEBEBEWIRTSCHAFTUNG, Wildbach und Lavinenverbau, Revista nr.163, 1998
- [43]. Ch. Hegg, ZUR ERFASSUNG UND MODELLIERUNG VON GEFÄHRLICHEN PROZESSEN IN STEILEN WILDBACHEINZUGSGEBIETEN, Ed. Insitutului Geografic al Universității Berna, Berna, 1996
- [44]. G. Holzinger, J. Hubl, H. Wehrmann, KLASSIFIKATION VON WILDBACHSPERREN, Revista Wildbach und Lavinenverbau Nr. 154, 2006
- [45]. T. Cebeci, P. Bradshaw, MOMENTUM TRANSFER IN BOUNDARY LAYERS, Hemisphere Publishing Corporation, 1977
- [46]. I. G. Curry, FUNDAMENTAL MECHANICS OF FLUIDS, Mc Grow- Hill, 1993
- [47]. C. A. J. Fletcher, COMPUTATIONAL TECHNIQS FOR FLUID DYNAMICS 1. FUNDAMENTAL AND GENERAL TECHNIQUES, Springer-Verlag, 1991
- [48]. Șt. Mărușter, METODE NUMERICE ÎN REZOLVAREA ECUAȚIILOR NELINIARE, Editura Tehnică, București, 1981
- [49]. W. Kettl, VOM VERBAUUNGSZIEL ZUR BAUTYPENTWICKLUNG – WILDBACHVERBAUUNG IM UMBRUCH, Wildbach und Lavinenverbau, Revista speciala, 1984
- [50]. E. Langer, DIE ENTWICKLUNG DER WILBACHVERBAUUNGSTÄTIGKEIT DER WLW IN ÖSTERREICH MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER ERHALTUNGSARBEITEN UND DER LEBENSDAUER DER VERBAUUNG, Wildbach und Lavinenverbau, Revista 39, 1999
- [51]. R. Luzian, WILDBÄCHE UND MUREN, EINE WILDBACHKUNDE MIT EINER ÜBERSICHT VON SCHUTZMAßNAHMEN DER ÄRA AULITYKZ; Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Innsbruck, 2002
- [52]. D. Montgomery, J.D. Buffington, CHANNEL-REACH MORPHOLOGY IN MOUNTAIN DRAINAGE BASSINS, GSA Bulletin nr. 5, 1997
- [53]. G. Molin, KLASSIFIKATIONSVORSCHLAG FÜR WILDBACHSPERREN; Universität für Bodenkultur Wien, Viena, 1997
- [54]. G. Offner, SCHADENSURSACHE: TALZUSCHUB; Wildbach und Lavinenverbau, Revista 1, 1977
- [55]. H. Romang, WIRKSAMKEIT UND KOSTEN VON WILDBACH-SCHUTZMAßNAHMEN, Ed. Insitutului Geografic al Universității Berna, Berna, 2004
- [56]. F. Rudolf-Micklauf, UNTERSUCHUNG AN KOHESIONSLOSEN SEDIMENTEN IM KALKALPINEN WILDBÄCHEN IN DER STEIERMARK; Teză de Doctorat, Universitatea de Științe ale Solului, Viena, 2001
- [57]. H. Schiechtl, R. Stern, HANDBUCH FÜR NATURNAHEN WASSERBAU; Ed. Agrara, Viena, 1994
- [58]. J. Suda, J. Hubl, SCHÄDEN UND SCHADENSMECHANISMEN AN SCHUTZBAUWERKEN DER WILDBACHVERBAUUNG, Wildbach und Lavinenverbau, Revista nr. 155, 2007
- [59]. D. Zollinger, WILDBACHSPERREN: KLASSIFIKATION UND DEFINITIONEN, Wildbach und Lavinenverbau, Revista nr 105, 1986
- [60]. K. Bergmeister, J. Suda, F. Rudolf-Miklau, SCHUTZBAUWERKE GEGEN WILDBACHGEFAHREN, Ed. Ernst und Sohn, Berlin, 2008
- [61]. A. Boll, W. Gerber, F. Graf, Ch. Rickly, HOLZKONSTRUKTIONEN IM WILDBACH, HANG UND RUNSENVERBAU; Eidgenossischen Forschungsanstalt

- fur Wald, Schnee und Landschaft; Birmensdorf; 1999
- [62]. K.F. Riley, M. P. Hobson, S.J. Bence, MATHEMATICAL METHODS FOR PHYSIKS AND ENGINEERING, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [63]. A. Nichici, LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE, CONCEPERE, REDACTARE, COMUNICARE, Ed. Politehnica, Timișoara, 2008
- [64]. I. David, HIDRAULICA, Editura Tehnică, Timișoara, 1990
- [65]. I. David, I Șumălan, R. Belicci, C. Achim, HIDRAULICA APLICATĂ. TEME EXPERIMENTALE. PRTEA I, Ed. Politehnica, Timișoara, 2008
- [66]. I. David, I Șumălan, R. Belicci, C. Achim, HIDRAULICA APLICATĂ. TEME EXPERIMENTALE. PRTEA II, Ed. Politehnica, Timișoara, 2008
- [67]. S. Dănilă, I.R. Pârâianu, SISTEMUL DE MANAGEMENT ECOLOGIC ISO 14001 ȘI PREVENIREA POLUĂRII, AL VII-lea Simpozion UPB, București, 1998
- [68]. J. Florea, D. Robescu, HIDRODINAMICA INSTALĂȚIILOR DE TRANSPORT HIDROPNEUMATIC ȘI DE DEPOLUARE A APEI ȘI AERULUI, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983
- [69]. R. Müller, THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER FLUSS- UND WILDBACHVERBAUUNGEN, Teză de Doctorat, Universitatea Zürich, 1943
- [70]. O. Iordache, O. Simigelschi, ECUAȚIILE FENOMENELOR DE TRANSFER DE MASĂ ȘI CĂLDURĂ, Ed. Tehnică, București, 1981
- [71]. D. Pavel, MAȘINI HIDRAULICE, Ed. Energetică de Stat, București, 1955
- [72]. D. Robescu, T. Petrovici, I. Constantinescu, Sz. Lanyi, LE ROLE DE LA TURBULENCE MECANIQUE INDUITE SUR LE TRANSFER DE MASSE A L'INTERFACE GAZ - LIQUID, Congresul XVIII IAHR, 1979
- [73]. E. M. Coiado, V.E. Diniz, TWO-PHASE (SOLID-LIQUID) FLOW IN INCLINED PIPES, Journal of Mechanical Sciences, Vol. 23, Nr.3 Rio De Janeiro, 2001
- [74]. M. Dinu, TEORIA ROTĂȚIEI SISTEMELOR FLUIDE, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1983
- [75]. CH. Kittel, MECANICA, Editura Tehnică, București, 1984
- [76]. A. Ciurea, V. Cartaș, C. Stanciu, M. Popescu, MANAGEMENTUL MEDIULUI, Ed. E.D.P., București, 2005
- [77]. L. Dragoș, PRINCIPIILE MECANICII MEDIILOR CONTINUE, Ed. Tehnică, București, 1983
- [78]. R. E. Mayer, THEORY OF DIPERSED MULTIPHASE FLOW, Academic Press, New York, 1983
- [79]. V. Rojanschi, ELEMENTE DE ECONOMIA ȘI MANAGEMENTUL MEDIULUI, Ed. ASE, București, 2004
- [80]. V. Rojanschi, Florina Bran, POLITICI ȘI STRATEGII DE MEDIU, Ed. Economică, București, 2002
- [81]. H. Rouse, ENGINEERING HYDRAULICS, Ed. John Wiley, Ney York, 1985
- [82]. V.L. Streeter, HANDBOOK OF FLUID DYNAMICS, Ed. Mc Grow Hill, Ney York, 1961
- [83]. J. Alle, SCALE MODELS IN HYDRAULIC ENGINEERING, Ed. Green&Co, New York, 1952
- [84]. C.B. Brown, SEDIMENT TRANSPORTATION. ENGINEERING HYDRAULICS, Ed. John Wiley, New York, 1950
- [85]. N. Braue, GRUNDLAGEN DER EINPHASEN- UND MEHRPHASENSTRÖHMUNGEN, Ed. Sauerlänier, Aaran und Frankfurt am Main, 1971
- [86]. E. Carafoli, V.N. Constantinescu, DINAMICA FLUIDELOR INCOMPRESIBILE, București: Editura Academiei, 1981
- [87]. D. Cioc, HIDRAULICA, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983

- [88]. E.L. Cussler, DIFFUSION. MASS TRANSFER IN FLUID SYSTEMS, Cambridge University Press, Cambridge, 1984
- [89]. S. Dumitriu, M. Drăgoicea, C. Lupu, MODELARE ȘI SIMULARE, ÎNDRUMAR DE LABORATOR, Ed. Printech, București, 2003
- [90]. V. Anton, M. Popoviciu, I. Fitero, MECANICA FLUIDELOR ȘI MAȘINI HIDRAULICE, Lito I.P. Timișoara, 1979
- [91]. K. A. Hoffmann, T. Chang, Shannon Siddiqui, Papadakis, FUNDAMENTAL EQUATIONS OF FLUID MECHANICS, Wichita, KS: Engineering Education System™, 1996
- [92]. J. W. Duncan, A. S. Thom, A. D. Ianc, MECHANICS OF FLUIDS, Ed. Edward Arnold, Londra, 1981
- [93]. M. Falcon, THEORETICAL DESCRIPTION OF FREE SURFACE. TWO-PHASE FLOW OVER A WANY BED, Vol. XVIII IAHR, Kyoto, 1979
- [94]. J. Florea, W. Panaitescu, MECANICA FLUIDELOR, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1969
- [95]. J. Florea, D. Robescu, TRANSPORTUL HIDRAULIC ȘI PNEUMATIC (LITOGRAFIAT), Institutul Politehnic București, 1979
- [96]. J. Florea, D. Robescu, T. Petrovici, MATHEMATICAL MODELLING OF THE THE HYDRODINAMIC PROCESS OF THE BIPHASIC FLUIDS GAS-LIQUID FLOW APLICATION IN THE CALCULUS OF THE TURBULENT DIFFUSITIVITY, Vol. I. al Congresului al XX-lea IAHR, Moscova, 1983
- [97]. A. Georgescu, TEORIA STABILITĂȚII HIDRODINAMICE, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1976
- [98]. O. Iacob, MECANICĂ TEORETICĂ, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980
- [99]. C. Iacob, Gh. Ștefan, M. Soare, L. Dragoș, DICȚIONAR DE MECANICĂ, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1970
- [100]. C. Iamandi, V. Petrescu, MECANICA FLUIDELOR, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978
- [101]. Gh. D. Ionescu, P. Matu, A. Todicescu, V. Ancușa, M. Buculei, MECANICA FLUIDELOR ȘI MAȘINI HIDRAULICE, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983
- [102]. M. Ishil, THERMO-FLUID DYNAMIC THEORY OF TWO-PHASE FLOW, Ed. Byrolles, Paris, 1975
- [103]. M. Roșculeț, M. Craiu, ECUAȚII DIFERENȚIALE APLICATIVE, Ed. Academiei, București, 1979
- [104]. H. Rouse, ENGINEERING HYDRAULICS, Ed. John Wiley, New York, 1980
- [105]. St. M. Săvulescu, Tranziția de la curgere laminară la cea turbulentă, Ed. Academiei, București, 1968
- [106]. L. Vilkinson, NONNEWTONIAN FLUIDE, Ed. Pergamon Press, New York, 1960
- [107]. E. Carafoli, V.N. Constantinescu, DINAMICA FLUIDELOR COMPRESIBILE, București: Editura Academiei RSR, 1986
- [108]. D. Lazăr - MECANICA FLUIDELOR, Editura Academiei, București, 1999
- [109]. *** MANUALUL INGINERULUI HIDROTEHNICIAN, Ed. Tehnică, București, 1970
- [110]. *** MANUALUL INGINERULUI FORESTIER, Ed. Tehnică, București, 1982
- [111]. *** Surse internet

- 120 - Bibliografie

<http://studiacrescent.com/research/grants/gis-torenti-pluviali-apuseni>

http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/integraler_wildbachschutz/index.htm

http://www.wwaro.bayern.de/fluesse_und_seen/nutzungen_und_einfluesse/flussbau/index.htm