

II 40.610



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS" DIN GALAȚI



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE

TEZA DE DOCTORAT

REZUMAT

Conducător științific:
Prof.dr.ing. Eugen RUSU

Doctorand:
Angela - Stela (IVAN) ANDREESCU

2013

T 40.619



UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN
GALAȚI

Facultatea de Mecanică
Departamentul de Mecanică Aplicată



TEZĂ DE DOCTORAT

STUDIUL PROCESELOR COSTIERE DE LA GURILE DUNĂRII ȘI EVALUAREA IMPACTULUI ACESTORA ASUPRA ACTIVITĂȚILOR UMANE

REZUMAT

Conducător științific:
Prof. dr. ing. Eugen RUSU



Doctorand:
Angela – Stela (IVAN) ANDREESCU



Galați 2013



DECIZIA

nr. 243 / 5.02.2013

În conformitate cu prevederile Legii Educației Naționale nr. 1/05.01.2011, ale Codului studiilor universitare de doctorat și ale Regulamentului instituțional privind organizarea și desfășurarea studiilor universitare de doctorat;

în baza referatului conducătorului științific Prof.univ.dr.ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU; conform aprobării Consiliului școlii doctorale din data de 28.01.2013;

în baza Ordinului Ministrului Educației, Cercetării, Tineretului și Sportului nr. 3288/20.02.2012 privind numirea rectorului;

RECTORUL UNIVERSITĂȚII

decide:

Art. 1. Se numește comisia pentru evaluarea și susținerea publică a tezei de doctorat de către doctorandul(a) ing. ANDREESCU I. ANGELIA-STELA(IVAN), Domeniul de doctorat - Inginerie mecanică, în următoarea componență:

1. Președinte:

Prof.univ.dr.ing. Elena MEREUȚĂ
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

2. Conducător de doctorat:

Prof.univ.dr.ing. Eugen-Victor-Cristian RUSU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

3. Referent oficial:

Prof.univ.dr.ing. Mircea DEGERATU
Universitatea Tehnică de Construcții București

4. Referent oficial:

Conf.univ.dr.ing. Ichinur OMER
Universitatea "Ovidius" din Constanța

5. Referent oficial:

Prof.univ.dr.ing. Polidor-Paul BRATU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Art. 2. Școala doctorală, Secretariatul-Docent, Compartimentul-Salarizare și Biroul Financiar vor aduce la îndeplinire prevederile prezentei decizii.



Prof.univ.dr.ing. Iulian Constantin IVAN

MULȚUMIRI

Primul gând de mulțumire și recunoștință se îndreaptă către profesorul Eugen Rusu, care prin încrederea și sprijinul acordat, a contribuit decisiv la finalizarea acestei teze de doctorat și la deschiderea cercetării acestui domeniu atât de interesant și important.

Domnului dr. ing. Constantin Bondar, cercetător principal la GeoEcoMar, cel mai bun și fin cunoscător al specificului dinamicii Deltei Dunării, toată recunoștința pentru primii pași de îndrumare în drumul greu al strângerii informațiilor și datelor documentare.

D-lui dr. Răzvan Mateescu și întregului colectiv de cercetători de la Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare Marină "Grigore Antipa", le mulțumesc pentru imensul sprijin și îndrumarea acordată pe tot parcursul pregătirii tezei, dar mai ales pentru sprijinul privind realizarea experimentelor "in situ".

Dnei. conferențiar dr. Liliana Celia Rusu, toată admirația și recunoștința pentru răbdarea, înțelegerea și dăruirea, pe care le-a dovedit pe parcursul întregului stadiu de elaborare a tezei.

Direcției Hidrografice Maritime Române le adresez de asemenea mulțumiri pentru sprijinul acordat în strângerea și corelarea multiplelor date necesare elaborării acestei teze.

Și nu în ultimul rând, doresc să le mulțumesc membrilor comisiilor de îndrumare și evaluare a tezei de doctorat pentru efortul și timpul alocat.

Familiei, tuturor colegilor și prietenilor, le mulțumesc pentru înțelegerea și sprijinul afectiv acordate pe parcursul ultimilor 5 ani, dedicați elaborării acestei teze de doctorat.

Tututor, le mulțumesc și le sunt recunoscătoare!

Angela Ivan

Galați 2013

Cuprins

CAPITOLUL 1 INTRODUCERE	1
1.1 Obiectivele, metodologia și contextul general al temei propuse în cadrul lucrării de doctorat	1
1.2. Structura și caracterul multidisciplinar al lucrării.....	3
CAPITOLUL 2 ANALIZA MATRICEI FACTORILOR DE MEDIU ÎN ZONA DE VĂRSARE A DUNĂRII	6
2.1. Caracterizare generală a zonei de vărsare a Dunării în Marea Neagră	6
2.2. Analiza dinamicii costiere. Regimul vânturilor și al valurilor.....	7
2.2.1. Regimul eolian din vestul Mării Negre.....	7
2.2.2. Regimul nivelurilor Mării Negre.....	10
2.2.3. Regimul valurilor în zona analizată.....	12
2.3. Analiza regimului de curenți specifici zonei analizate	15
2.3.1. Caracteristici generale	15
2.3.2. Curenții fluviali	16
2.3.3. Curenții de vânt	17
2.3.4. Schema curenților.....	17
2.4. Caracteristicile dinamicii costiere.....	17
CAPITOLUL 3 MODELAREA VALURILOR ȘI A INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI	18
3.1. Fenomene asociate cu generarea și propagarea valurilor	18
3.1.1. Generarea și propagarea valurilor în apă adâncă	18
3.1.2. Propagarea valurilor în apă puțin adâncă	19
3.1.3. Refracția	20
3.1.4. Difracția.....	21
3.1.5. Refracție - Difracție combinate	21
3.1.6. Reflexia	21
3.1.7. Spargerea valurilor	23
3.2. Modelul spectral al valului marin.....	24
3.3. Interacțiunea dintre valuri și curenți.....	24
3.4. Modelul spectral in medie de fază SWAN.....	26
CAPITOLUL 4 REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND INTERACȚIUNEA DINTRE VALURI ȘI CURENȚI	27
4.1. Analiza unor rezultate experimentale.....	27
4.1.1 Procedura experimentală.....	28
4.1.2 Analiza datelor spectrale	31
4.2. Simulări numerice.....	34

4.2.1. Modelare numerică cu SWAN	34
4.2.2. Analiza rezultatelor	35
4.3. Concluzii	38
CAPITOLUL 5 MODELAREA INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI ÎN ZONA DE VĂRSARE A DUNĂRII	39
5.1. Modelarea valurilor în Marea Neagră.....	39
5.2. Focalizarea sistemului de predicție către coasta de vest a Mării.....	43
5.3. Modelarea interacțiunilor dintre valuri și curenți în zona de la gurile Dunării.....	47
5.4. Analiza unor studii de caz.....	51
5.4.1. Cazul I – Vânt foarte slab.....	52
5.4.2. Cazul II – Vânt puternic care bate dinspre nord-est.....	52
5.4.3. Cazul III – Vânt care bate dinspre vest	54
5.4.4. Cazul IV – Situație energetică extremă.....	54
5.5. Discuție privind rezultatele modelării proceselor hidrodinamice de la gurile Dunării	57
5.6. Evaluarea riscului de apariție a valurilor anormale.....	58
5.7. Simulări de înaltă rezoluție la bara Sulina.....	60
CAPITOLUL 6 EXPERIMENTE ÎN TEREN PENTRU STUDIUL INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI ÎN ZONA GURILOR DE VĂRSARE ALE DUNĂRII ..	66
6.1. Metodologia măsurătorilor de curenți.....	67
6.1.1. Echipamentul utilizat la măsurători.....	67
6.2. Metodologia măsurătorilor de valuri.....	70
6.2.1. Măsurarea valurilor cu perspectometrul naval și geamandurile de semnalizare ..	71
6.2.2. Rezultate și interpretări ale experimentelor de teren.....	71
6.3. Observații asupra răspunsului costier	79
6.4. Concluzii	81
CAPITOLUL 7 CONSIDERAȚII FINALE.....	83
7.1. Discuții asupra rezultatelor obținute în cadrul tezei de doctorat ...	83
7.2. Contribuții originale și direcții pentru cercetarea viitoare	85
BIBLIOGRAFIE selectivă.....	89
Listă publicații	96

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1 Obiectivele, metodologia și contextul general al temei propuse în cadrul lucrării de doctorat

Obiectivul principal al lucrării este studierea fenomenelor hidrodinamice care au loc în zona de vărsare a Dunării în mare și mai ales la nivelul Canalului Sulina, unde traficul naval este deosebit de intens și unde o cât mai bună cunoaștere a acestor fenomene este deosebit de importantă. Întrucât cel mai semnificativ fenomen hidrodinamic îl reprezintă interacțiunile dintre valuri și curenții induși de Fluviul Dunărea, acestea sunt studiate în amănunt și sub aspect teoretic.

Metodologia considerată pentru a atinge obiectivele propuse, se bazează în principal pe realizarea de simulări numerice cu ajutorul modelelor numerice spectrale pentru valuri și, în mod concret, a modelului SWAN (acronim pentru Simulating Waves Nearshore, Booij și alții 1999).

Acest model a fost implementat și validat la nivelul întregului bazin al Mării Negre (Rusu și alții, 2006, Rusu 2009 și Rusu 2010) și apoi a fost focalizat către zona de vărsare a Dunării, realizând astfel un sistem de modelare numerică a valurilor cu mai multe nivele. Deși pentru toate nivelele este utilizat SWAN, fizica modelului este diferită de la un nivel la altul, punându-se accentul pe fenomenele caracteristice fiecărei zone. Astfel, pentru nivelul de generare, care corespunde întregului bazin al Mării Negre, procesele dominante sunt reprezentate de către transferul energie de la vânt la valuri, interacțiunile neliniare dintre valuri de tip *cuadruplet* și disiparea prin înspumare (*whitecapping*).

Un al doilea nivel de modelare îl constituie zona de transformare a valurilor, care este reprezentată în teză de zona economică românească, respectiv zona vestică a Mării Negre. În acest caz, procesele dominante sunt refracția datorită scăderii adâncimii apei, interacțiunile neliniare de tip *triadă* și alte fenomene specifice zonelor costiere. Cel de-al treilea domeniu de modelare îl constituie zona costieră de la gurile Dunării, unde procesul dominant îl reprezintă interacțiunile dintre valuri și curenții generați de vărsarea fluviului în mare. Aceste trei nivele de modelare au fost implementate utilizând sistemul de coordonate sferice (latitudine-longitudine). Deoarece în cazul unor procese, cum ar fi de exemplu difracția sau ridicarea apei indusă de valuri, coordonatele carteziene sunt mai potrivite, a mai fost implementat și un al patrulea nivel de modelare cu rezoluție foarte mare (de 50m), care este focalizat doar pe zona de la bara Sulina și în care sunt utilizate acest tip de coordonate. De altfel, utilizarea coordonatelor carteziene în acest ultim caz permite și o mai bună cuplare cu alte modele numerice cum ar fi modelele de circulație costieră și modelele de val, care rezolvă faza

(bazate pe conceptul de impuls) și care au fost proiectate, în general, pentru acest tip de coordonate.

Pentru a valida rezultatele furnizate de modelele numerice au fost efectuate comparații cu diverse măsurători dar, în final, a fost realizat și un experiment de sine stătător.

O primă reprezentare a impactului pe care îl au interacțiunile dintre valuri și curenți la gurile Dunării este ilustrată în Figura 1.1, care prezintă o imagine de satelit focalizată pe zona de la bara Sulina. Această figură sugerează destul de clar dimensiunea proceselor hidrodinamice care au loc în acest mediu costier.



Figura 1-1 Imagine din satelit de la vărsarea Dunării în mare la Canalul Sulina (figura procesată de pe Google Earth).

În afară de obiectivul principal al tezei de doctorat și de metodologia considerată pentru atingerea lui ar mai trebui subliniate, în această parte introductivă, contextul general și importanța temei propuse. Astfel, sectorul corespunzător intrării în Canalul Sulina este extrem de important pentru navigație, fiind intrarea principală într-o importantă cale de navigație interioară. Acesta este reprezentată de sistemul de canale Rin-Main-Dunăre, care reprezintă Coridorul Pan European de transport numărul VII și este, de fapt, cel mai important sistem de navigație interioară din Europa. Canalul Rin-Main-Dunăre asigură o legătură directă de la est, de-a lungul Europei Centrale, legând porturile mari de pe Rin cu cele de pe Dunăre, iar mărfurile intrate prin gurile Dunării, ajung pe această cale la Rotterdam și Amsterdam, pe un traseu fluvial de 3.600km, în loc de 6.500km cât este ruta maritimă. Legătura Dunării de Elba, asigură o comunicație directă între porturile Mării Negre cu Hamburg și Szczecin, așa încât distanța Galați-Hamburg se reduce de la 7.000km pe ruta maritimă la 3.000km pe ruta fluvială. Este deci extrem de importantă îmbunătățirea condițiilor de navigație maritimă prin unul din brațele Deltei Dunării, în vederea accesului din Marea Neagră pe Dunăre și invers.

În acest context, studiul interacțiunii dintre valuri și curenți din zona de vărsare a Dunării, fenomen care conduce la o creștere substanțială a înălțimii valurilor și chiar la apariția așa numitelor valuri anormale, deosebit de periculoase pentru navigația costieră, prezintă o importanță deosebită pentru creșterea siguranței navigației costiere. Aceasta cu atât mai mult cu cât navele fluviale sunt mai mici și mai puțin stabile decât navele proiectate să navigheze pe mări și oceane și deci există un risc crescut de accidente pentru aceste nave în condițiile deosebit de complexe din apropierea Dunării.

În afară de principalul obiectiv relaționat cu creșterea siguranței navigației în zona de vărsare a Dunării în mare, studiile care sunt realizate în cadrul prezentei teze de doctorat furnizează informații valoroase privind dinamica costieră și transportul sedimentelor în condițiile schimbărilor climatice globale. Aceasta cu atât mai mult cu cât depunerea sedimentelor aduse de Fluviul Dunărea a generat în ultimele decenii un proces aluvionar deosebit de intens, care a dus la nașterea sistemului insular Sacalin. Acesta are în prezent o suprafață de 21.410 hectare și este în continuă dezvoltare. Sistemul de modelare implementat reprezintă deci un instrument care poate fi foarte util în evaluarea tendințelor pe termen mediu și lung pentru procesele costiere din zonă, procese care, așa cum arată evoluțiile din ultimii ani, au un caracter deosebit de dinamic.

În finalul acestui prim subcapitol ar mai trebui precizat și caracterul multidisciplinar al lucrării de doctorat care tratează, în principal, o problemă de mecanica fluidelor, respectiv interacțiunea dintre valuri și curenți în mediul marin și deci se încadrează în domeniul ingineriei mecanice. Rezultatele cercetării însă sunt importante și pentru alte domenii, cum ar fi cele ale transporturilor și ingineria mediului.

1.2. Structura și caracterul multidisciplinar al lucrării

Prezenta teză de doctorat precizează mai întâi, în *Capitolul 1*, importanța temei propuse definind și principala metodologie considerată care constă în utilizarea modelelor spectrale în medie de fază (în mod concret modelul SWAN).

În *Capitolul 2* se efectuează o analiză detaliată a matricei de mediu din zona țintă a studiului. Delta Dunării este un sistem complex, care a fost supus în ultimele perioade de timp la transformări semnificative. Acest lucru se datorează în principal unei dinamici foarte active a matricei de mediu corelată și cu modificările globale ale climei, care au indus modificări semnificative în profilul coastelor marine. Aceste modificări, cât și importanța economică a zonei țintă, respectiv Canalul Sulina, necesită studiul evoluției recente a matricei de mediu. Principalii parametri luați în considerație și analizați sunt regimul curenților induși de Fluviul Dunărea, regimul valurilor și vânturilor, precum și transportul sedimentelor.

Capitolul 3 are un caracter teoretic și tratează modelarea valurilor, dar și a interacțiunii dintre valuri și curenți. Astfel, sunt mai întâi trecute în revistă fenomenele asociate cu generarea și propagarea valurilor, incluzând generarea și propagarea valurilor în apă adâncă, dar și propagarea valurilor în apă puțin adâncă, cu fenomenele care însoțesc această trecere, cum ar fi fenomenul de shoaling, refracția, difracția, reflexia și spargerea valurilor. Sunt discutate apoi modelul spectral al valului marin și interacțiunea dintre valuri și curenți, pentru

ca în finalul capitolului să se facă câteva precizări privind modelul spectral în medie de fază SWAN.

Capitolul 4 are ca obiectiv analiza unor rezultate experimentale privind modelarea interacțiunii dintre valuri și curenți. Au fost considerate în acest studiu date experimentale înregistrate în bazinul de valuri aparținând Institutului de Hidraulică din Danemarca (DHI), unde curenții sunt generați în mod artificial. În paralel, au fost realizate simulări cu modelul SWAN pentru a evalua performanțele modelului. Au fost urmărite în mod special cazurile asemănătoare cu cele întâlnite la vărsarea Dunării în mare, punând accent pe situația în care valurile se propagă în prezența unor curenți opuși puternici, care măresc considerabil înălțimile de val. Rezultatele prezentate în acest capitol arată că, în general, modelul SWAN poate oferi o bună reprezentare a proceselor complexe de interacțiuni val-curent care au loc la intrarea în Delta Dunării și, în consecință, SWAN poate fi folosit ca un instrument eficient pentru a evalua transformările puternice ale valurilor din această zonă.

Capitolul 5 se concentrează asupra studiului interacțiunii dintre valuri și curenți la vărsarea Fluviului Dunărea în Marea Neagră. Acest sector costier este supus unui important trafic naval iar, așa cum a fost arătat anterior, Canalul Sulina reprezintă de fapt principala poartă de intrare în una din cele mai importante căi de transport fluvial transeuropean care unește Marea Neagră cu Marea Nordului și are o lungime de aproximativ 3.500km.

Sunt discutate mai întâi câteva aspecte mai importante privind predicția valurilor în apă adâncă și focalizarea costieră a unui sistem numeric de previziune (forecast) a condițiilor de val, care este bazat în întregime pe modelul SWAN. Procesul de disipare prin înșpumare (whitecapping) reprezintă veriga cea mai sensibilă în legătură cu modelarea generării și propagării valurilor în apă adâncă. Așa cum arată rezultatele obținute prin compararea simulărilor cu măsurători înregistrate de diverse sisteme 'in situ', se pare că pentru bazinul Mării Negre cea mai viabilă formulare ar fi cea bazată pe parametrizarea Komen.

Trei studii de caz au fost considerate în domeniul de calcul de înaltă rezoluție. Ele corespund la condițiile cele mai semnificative din punct de vedere al configurației matricei condițiilor de mediu (valuri, vânt și curenți) din sectorul costier considerat. Aceste trei cazuri ilustrează de fapt niște situații reale care sunt reprezentative pentru zona de vărsare a Dunării în mare. Este totuși adevărat și faptul că ele nu pot acoperi întreaga scală a combinațiilor posibile pentru elementele principale care constituie matricea de mediu.

Așa cum s-a ilustrat în capitolul 5, efectul curenților asupra valurilor la gurile Dunării este într-adevăr relevant și conduce uneori la creșteri ale înălțimii semnificative a valurilor mai mari de un metru (aceasta mai ales la intrarea în Brațul Sfântu Gheorghe). Rezultatele obținute în acest capitol, scot în evidență faptul că prezența curenților opuși de intensitate mare, produce creșteri considerabile în câmpul de înălțimi semnificative, dar și în ceea ce privește lungimile și direcțiile valurilor.

Întrucât cel mai important sector din aria țintă considerată este evident cel de la intrarea în Canalul Sulina, fenomenele din această zonă au fost studiate și prin implementarea unui domeniu de calcul de înaltă rezoluție. Rezultatele simulărilor arată că există un risc ridicat de apariție a valurilor anormale, fapt care este indicat de valorile relativ mari ale indicelui BFI.

Capitolul 6 prezintă rezultate experimentale privind măsurarea valurilor și curenților în zona de la vărsarea Dunării în mare, mai ales la nivelul Brațelor Sfântul Gheorghe și Sulina. Au fost utilizate mai multe dispozitive de măsurare *in situ* dar cele mai importante sunt cele de tip ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), care permit măsurarea simultană a valurilor și curenților. Din analiza rezultatelor acestor măsurători trebuie menționat faptul că rezultatele furnizate de sistemul de modelare numerică implementat în cadrul tezei sunt în general confirmate.

În final, **Capitolul 7** sintetizează rezultatele tezei de doctorat precizând mai întâi elementele de originalitate care pot fi structurate pe patru direcții mai importante:

- a) analiza matricei de mediu și a dinamicii ei din zona țintă (vărsarea Dunării în mare);
- b) validarea reprezentării interacțiunii dintre valuri și curenți în cadrul modelului SWAN prin comparații cu rezultatele experimentale de la Institutului de Hidraulică din Danemarca;
- c) implementarea unui sistem de modelare complex și cu mai multe nivele de calcul, bazat pe modelul spectral în medie de fază SWAN, care este focalizat, în general, pe zona costieră de la gurile Dunării și în mod special pe intrarea în Brațul Sulina;
- d) experimente realizate de doctorandă în zona țintă prin efectuarea de măsurători locale pentru valuri și curenți.

Sunt precizate apoi și câteva direcții viitoare de cercetare, dar și lucrările publicate în timpul elaborării tezei care cuprind: trei lucrări ISI (două deja publicate și una acceptată spre publicare), două publicate în volumele unor conferințe cotate ISI, o monografie în Editura AGIR, dar și participările cu lucrări la mai multe conferințe internaționale de prestigiu cum ar fi IMAM 2009, Black Sea 2010 și SGEM 2012.

CAPITOLUL 2

ANALIZA MATRICEI

FACTORILOR DE MEDIU ÎN

ZONA DE VĂRSARE A DUNĂRII

2.1. Caracterizare generală a zonei de vărsare a Dunării în Marea Neagră

Delta Dunării, rezultat complex al interacțiunii dintre Dunăre și Mare Neagră, se găsește în prezent, în cea mai mare măsură, sub influența activității fluviului.

Delta Dunării este situată în partea de est a României și la extremitatea sud-vestică a Ucrainei și se prezintă în forma clasică a literei delta, având forma unui con plat cu vârful în punctul de separare a brațelor fluviului în zona strâmtorilor dintre Orlovka și Isaccea. La est de acest punct, valea se lărgeste marcând delta propriu-zisă care, înainte ca fluviul să se verse în Marea Neagră, se extinde pe o suprafață de 100km lungime x 100km lățime, iar de aici se continuă în interiorul mării pe o distanță de aproximativ 10-15km.

Între limitele prezentate, Delta Dunării (inclusiv zonele lacustre periferice) are o suprafață de aproximativ 564.000 ha dintre care 442.300 ha pe teritoriul României și 124.000 ha pe teritoriul Ucrainei.

Fluviul se desparte în trei brațe principale de la nord spre sud, după cum urmează: Brațul Chilia, Brațul Sulina, și Brațul Sf. Gheorghe. La nivel scăzut al fluviului, acestea transportă 60%, 21%, și respectiv 19% din apele Dunării, iar la nivel ridicat, 72%, 11% și 17% .

Având o asemenea suprafață, Delta Dunării este, ca mărime, a doua din Europa după Delta Volgăi (18.000km²), fiind urmată de cea a Padului (1.500km²).

a. Caracterizarea morfo-hidrografică generală.

Zona de vărsare a Dunării este alcătuită din patru mari subunități:

1. Delta propriu zisă, între zona lacustră Ialpug-Catlabug-Chitai și complexul lagunar Razelm-Sinoe (383 000 ha).
2. Zona lacustră Ialpug-Catalpug-Chitai, la nord de brațul Chilia (86 000 ha).
3. Complexul lagunar Razelm-Sinoe, inclusiv grindul Chituc (95 000 ha).Sectorul maritim din fața Deltei.

Cele mai adânci, dispuse de asemenea dispersat, se întălnesc în anafoarele de pe brațele principale. Astfel, pe Brațul Chilia patul albiei coboară la -36m, pe Brațul Tulcea la -34m, pe Sulina -18m, iar pe Brațul Sf. Gheorghe sub -26m.

b. Elementele morfo-hidrografice.

Delta Dunării (Figura 2-1) este un adevărat mozaic de elemente morfo-hidrografice. În cadrul acestora se deosebesc următoarele mari categorii: grindurile fluviale, cordoanele litorale, grindurile maritime complexe, litoralul deltei. Rețeaua hidrografică principală este constituită din brațele fluviale. Brațele principale sunt Chilia, Sulina și Sf. Gheorghe.



Figura 2-1 Delta Dunării (www.infoghidromania.ro)

2.2. Analiza dinamicii costiere. Regimul vânturilor și al valurilor.

Pe baza fondului de informații existente astăzi în România, se prezintă caracteristicile principalelor factori dinamici din zona costieră a litoralului românesc la Marea Neagră. Pentru evaluarea cât mai corectă a dinamicii costiere, este necesară cunoașterea factorilor cauzali ai proceselor hidromorfologice și efectele determinate de ele. Se vor analiza principalele caracteristici ai acestor factori.

2.2.1. Regimul eolian din vestul Mării Negre.

Sunt prezentate principalele caracteristici ale vânturilor rezultate din observațiile și măsurătorile costiere de la Sulina, Sfântu Gheorghe, Portița, Constanța, Mangalia și din largul mării la Insula Șerpilor și la Platforma de foraj marin Gloria.

a) Geneza vânturilor în vestul Mării Negre.

Vânturile sunt un produs climatic regional dependent de circulația generală a atmosferei la altitudine. În zona Mării Negre, aceasta este dirijată de la vest la est (Banu 1961). Vântul este principalul factor cauzal al producerii diverselor efecte cum sunt valurile, curenții și nivelări ale oglinzii apei în zona costieră.

Analiza de lungă durată a regimului vânturilor este reprezentată în Figura 2-2, iar în Figura 2-3 sunt evidențiate frecvențele și vitezele medii anuale înregistrate la Sulina, în intervalul 1941-2003.

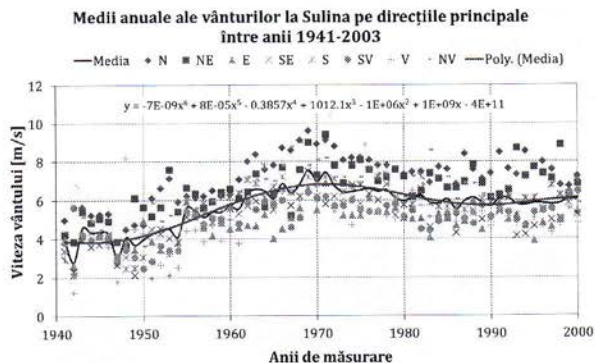


Figura 2-2 Regimul vânturilor la Sulina pentru anii 1941-2003

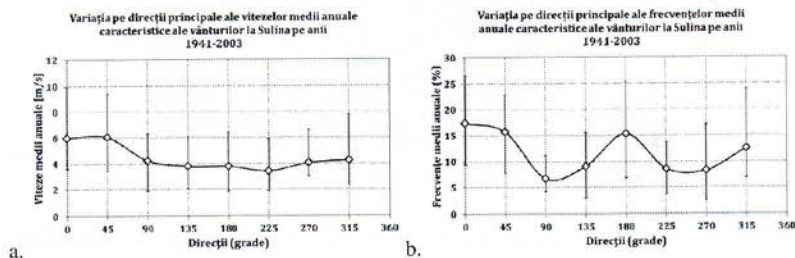


Figura 2-3 Frecvențele și vitezele medii anuale de la Sulina pentru anii 1941-2003

Analiza de lungă durată a regimului vânturilor pentru Constanța este reprezentată în Figura 2-4, iar în Figura 2-5 sunt evidențiate frecvențele și vitezele medii anuale de la Constanța pe anii 1941-1999.

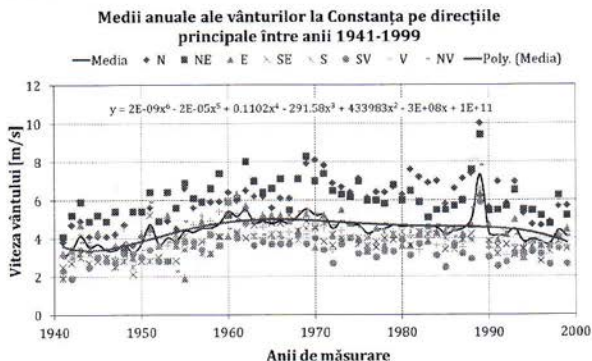


Figura 2-4 Regimul vânturilor la Constanța pentru anii 1941-1999

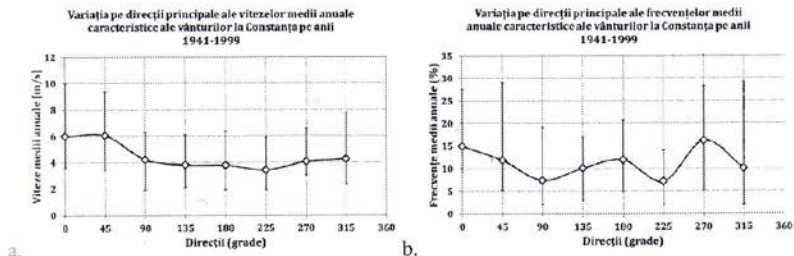


Figura 2-5 Frecvențele și vitezele medii anuale de la Constanța pentru anii 1941-1999

Analiza structurii statistice a direcțiilor vânturilor pe trepte de viteze este prezentată în Figura 2-6, unde sunt marcate valorile medii multianuale ale acestora. În vestul Mării Negre dominante ca direcții și viteze sunt vânturile din sectorul nord-estic.

b) Caracteristicile regimului vânturilor

Date statistice mai detaliate privind frecvențele anuale ale vânturilor pe trepte de viteze, sunt prezentate în punctele costiere (Figura 2-6) Sulina pe anii 1980-2007, Sfântu Gheorghe pe anii 1984-1999, Portița pe anii 1984-1999, Constanța pe anii 1981-1999 și Mangalia pe anii 1984-1999, precum și în largul Mării Negre la Platforma de foraj petrolier marin Gloria pe intervalele de ani 1977-1999.

c) Spectrul statistic mediu anual al frecvenței direcțiilor vânturilor pe trepte de viteze.

Din analiza datelor statistice prezentate în Figura 2-6 rezultă că cele mai reprezentative sunt informațiile de vânturi de la stațiile meteorologice Sulina, Portița, Insula Șerpilor și Platforma de foraj marin Gloria. Celelalte stații costiere sunt influențate de obturări cu construcții înalte, fapt pentru care vitezele medii sunt mai mici. Cum era de așteptat, cele mai intense vânturi au loc în largul mării. La Insula Șerpilor și la Platforma Gloria s-au înregistrat în mod curent viteze maxime de peste 28m/s pe direcțiile V, NV, N și NE. La stația meteorologică Sulina, amplasată în marea deschisă pe digul de sud al gurii Canalului Sulina, s-au înregistrat, la fel, viteze maxime mai mari de 28m/s pe direcțiile SV, V,E, SE și S.

Datele de frecvențe anuale pe trepte de viteze ale vânturilor au fost introduse în studiu pe motiv că oferă informații prețioase pentru calculul valurilor, curenților și evaluarea proceselor hidromorfologice de coastă (Bondar 2006).

d) Furtunile marine.

O trăsătură importantă a vânturilor tari în zona costieră a litoralului românesc la Marea Neagră, o constituie furtunile marine, cu vânturi a căror viteze depășesc 10m/s. Durata furtunilor din NE atinge în medie 107 ore, din care durata de intensificare este de circa 47 ore cu viteze la apogeu de peste 28m/s (Bondar 2006). În timpul furtunilor marine, vitezele vânturilor ating valori de peste 30m/s, cu efecte de producere de valuri mari, curenți puternici și avarii ale construcțiilor și instalațiilor tehnologice de coastă și de larg.

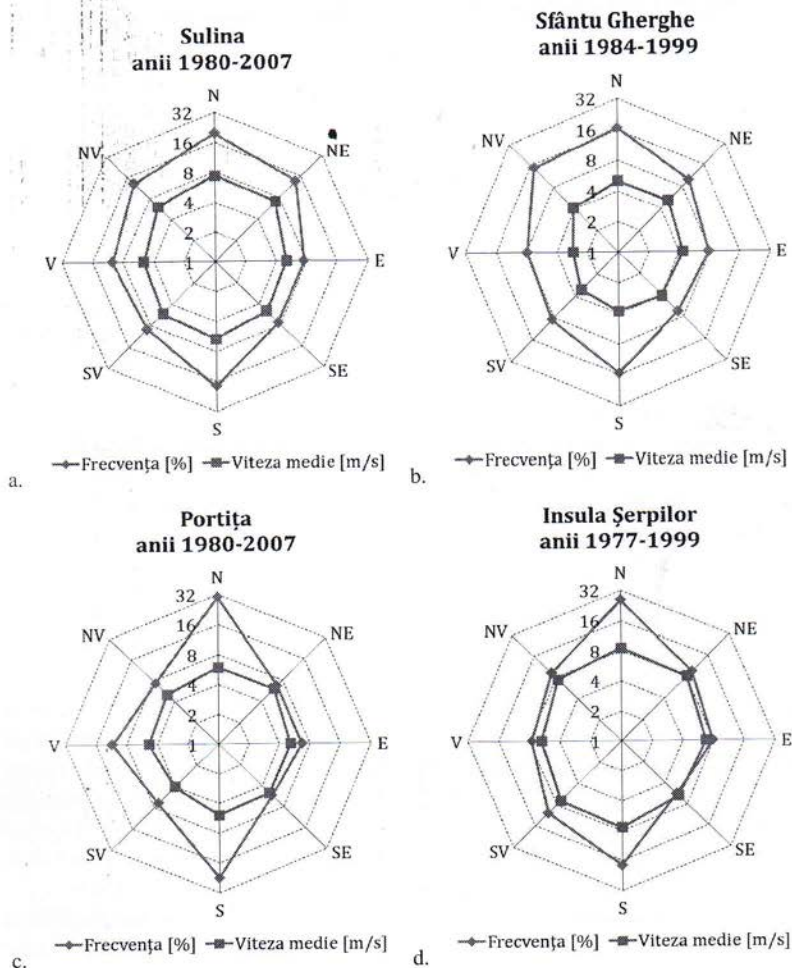


Figura 2-6 Structura statistică ale direcțiilor vânturilor pe trepte de viteze

2.2.2. Regimul nivelurilor Mării Negre.

Din studiile elaborate se prezintă principalele caracteristici ale nivelurilor Mării Negre rezultate din observațiile și măsurătorile de la Sulina, Constanța și din alte puncte costiere ale Mării Negre.

Mai departe, cercetările științifice au stabilit limitele de întindere pe harta continentului european a bazinul hidrografic al Mării Negre cu rețeaua de râuri de pe care este drenată apa

respectivă. În *Figura 2-7* sunt marcate cu diverse hașuri și culori suprafețele de relief cu diferite altitudini (Bondar 1993).

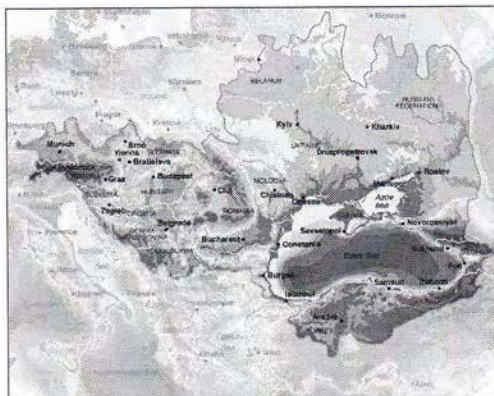


Figura 2-7 Harta bazinului hidrografic al cuvei Mării Negre

Pe baza acestor informații istorice se expun în continuare principalele caracteristici ale regimului nivelurilor Mării Negre, luând în considerație bilanțul hidric al cuvei Mării Negre.

a. Bilanțul hidric mediu multianual al cuvei Mării Negre.

Regimul variației nivelurilor Mării Negre sunt dependente de rezultanta bilanțului de apă intrată și ieșită din cuveta Mării Negre (*Figura 2-8*).

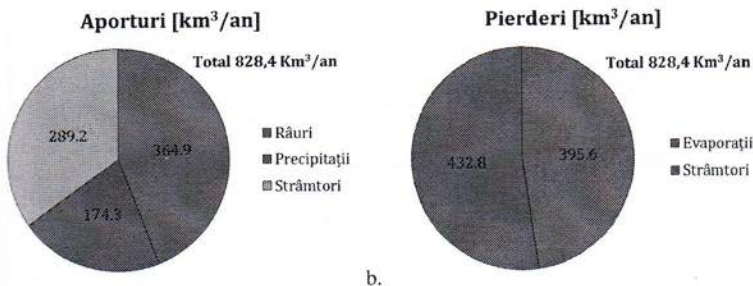


Figura 2-8 Bilanțul hidric: a. Aporturi; b. Pierderi

Bilanțul hidric (*Figura 2-8*) depinde de aportul fluvial (364.9 km^3), asigurat în proporție de 78% de râurile din nord - vest, din care Dunărea are o contribuție importantă, după care urmează aportul râurilor de pe țărmul caucazian (12%), de pe țărmul Anatoției (7%), și de pe țărmul de sud vest (3%) (Bondar 1993).

Precipitațiile (174.3 km^3) și evaporația (395.6 km^3), componente ale bilanțului hidric reflectă condițiile climatului temperat - continental, fiind destul de inegale cantitativ.

Principala componentă a bilanțului de apă o constituie aportul de apă vărsat în cuveța Mării Negre de râurile tributare (Figura 2-9 b).

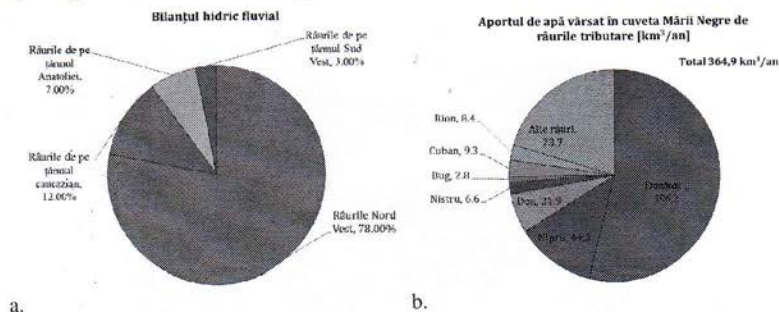


Figura 2-9 a. Bilanțul hidric fluvial; b. Aportul de apă vărsat în cuveța Mării Negre de râurile tributare.

Din Figura 2-9 (a) rezultă concluzia că fluviul Dunărea are ponderea cea mai mare de influență asupra variațiilor în timp ale nivelului Mării Negre (Bondar 1993).

b. Variațiile sezoniere ale nivelurilor medii lunare.

Variația în timp a nivelurilor Mării Negre este practic sincronă cu variația vărsărilor de apă ale râurilor tributare. Acest sincronism rezultă din graficele cronologice ale nivelurilor medii anuale și ale debitelor medii anuale de apă ale Dunării la vărsare (Figura 2-10).

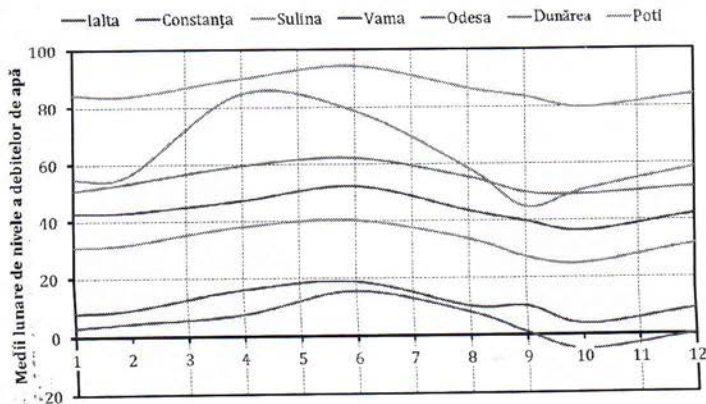


Figura 2-10 Valorile numerice ale denivelărilor oglinzii apei Mării Negre pe coasta românească.

2.2.3. Regimul valorilor în zona analizată.

Din studiile elaborate se vor prezenta principalele caracteristici ale valorilor rezultate din observațiile și măsurătorile costiere de la Sulina, Sfântu Gheorghe, Portița, Constanța, Mangalia și din largul mării la Platforma de foraj marin Gloria:

Sub acțiunea acestor vânturi se produc valuri de vânt și de hulă (rămase după diminuarea sau încetarea acțiunii vânturilor) în zona litorală românească. Calmul stării Mării Negre în zona litorală românească este în medie de circa 1,9% pe an, restul de timp fiind valuri de vânt circa 50,7%, valuri de hulă circa 20,1% și valuri combinate (de vânt și de hulă), circa 27,3% (Figura 2-11).

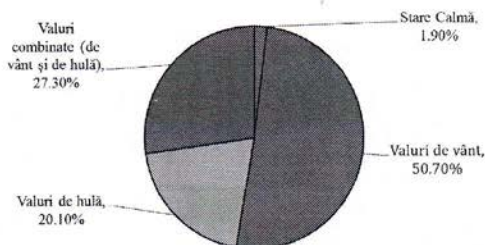


Figura 2-11 Tipuri de valuri pe an

În aceste condiții de adâncime și relief, valurile formate în largul mării (la adâncimi mai mari de 30m), înainte de a ajunge în apropierea malului trec peste funduri puțin adânci, pe spații foarte întinse. Astfel, elementele valurilor se modifică pe măsura propagării lor spre mal, producându-se în același timp (în funcție de relieful fundului) fenomene de refracție, până când frontul valurilor devine aproape paralel cu linia țărmului.

Din cele arătate mai sus, reiese că factorul hotărâtor în formarea și dezvoltarea valurilor îl constituie vântul (Figura 2-12 a. și b).

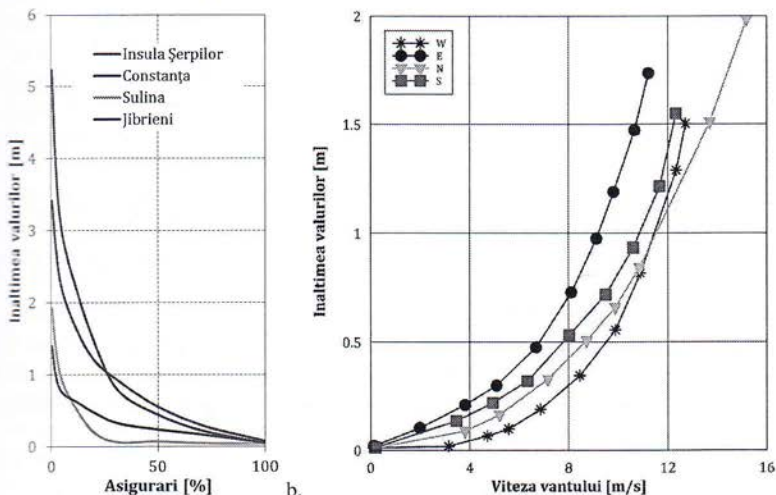


Figura 2-12 a. Curbele de asigurare a înălțimii valurilor în punctele: Insula Șerpilor, Constanța, Sulina și Jibreni; b. Corelații între înălțimea valurilor și viteza vântului la Jibreni.

De o deosebită importanță pentru calculele privind valurile este stabilirea corelațiilor dintre vitezele vânturilor și înălțimea valurilor. În acest sens, au fost luate în considerare numai valurile în stadiu de dezvoltare.

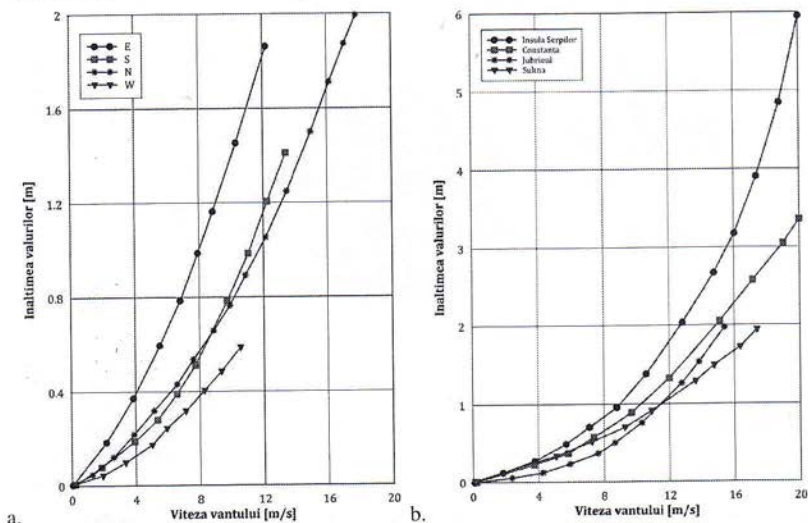


Figura 2-13 a. Corelații între înălțimea valurilor și viteza vântului la gura Sulina; b. Curbe comparative ale corelațiilor dintre înălțimea valurilor și viteza vântului (pe direcția Nord) în punctele: Insula Șerpilor, Constanța, Sulina și Jirieni.

O problemă majoră a cercetării regimului hidrologic al valurilor a constituit-o cunoașterea dependenței elementelor valurilor de vânt de tăria (viteza) vânturilor pe direcțiile de suflu în zona litorală românească, la coastă și în larg. Acest deziderat are o mare importanță științifică și mai ales practică, întrucât valurile influențează activitățile economice desfășurate pe mare (transporturile, pescuitul, extracția petrolieră, alte activități costiere, etc.) (Banu 1961). Pe de altă parte, necesitățile de evaluare a potențialului puterii și energiei valurilor, a efectelor distrugătoare pe care le produc valurile în zona de coastă, precum și necesitatea elaborării metodelor de predicție a valurilor, toate aceste cerințe au impus studiul și determinarea prin modelare matematică a funcțiilor empirice de dependență a elementelor valurilor de vânturile generatoare.

Se prezintă în Figura 2-14 valorile maxime și medii ale înălțimii reprezentative și ale perioadei medii ale valurilor măsurate în 13 puncte din zona costieră a României la Marea Neagră. Din Figura 2-14 rezultă că în intervalul anilor 1977-2007, în zona costieră a României, s-au înregistrat valuri cu înălțimi reprezentative maxime de până la 10,25m și cu perioade medii maxime de până la 11,0 secunde.

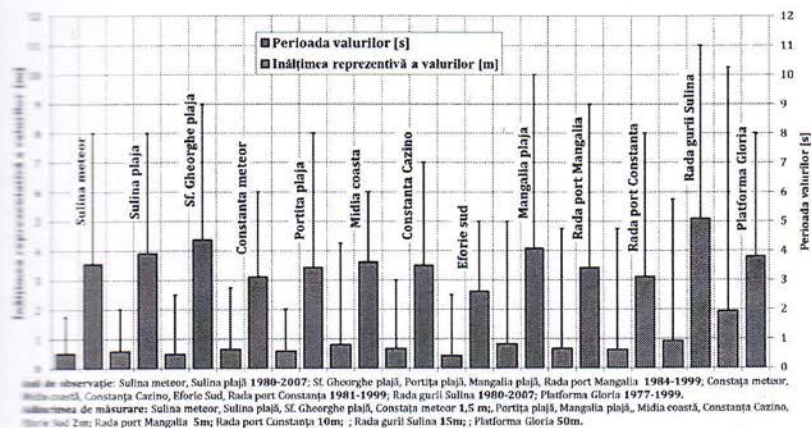


Figura 2-14 Valorile maxime și medii ale înălțimii reprezentative și ale perioadei medii ale valurilor măsurate

Valurile reprezintă cel mai important factor în evoluția zonei costiere. Principala cauză a formării valurilor o reprezintă mișcările maselor de aer, ce transferă energia lor apei, formând valurile. Importanță pentru formarea valurilor este și mărimea suprafeței de apă deasupra căreia masele de aer au caracteristici constante (fetch).

Curenții formați de valuri, de-a lungul și perpendicular pe țărm, transportă sedimentele ce alcătuiesc plaja determinând retragerea sau avansarea acesteia. În același timp, datorită mobilității foarte mari, valurile sunt relativ greu de măsurat și de calculat.

Pe litoralul românesc datele de valuri măsurate sunt puține și au precizie scăzută, datorită estimării vizuale a înălțimii și direcției. Înregistrările sunt întrerupte în timpul evenimentelor extreme (furtuni etc.) datorită vizibilității scăzute, în acest fel datele cele mai importante pentru dinamica zonei costiere lipsind.

2.3. Analiza regimului de curenți specifici zonei analizate

2.3.1. Caracteristici generale

În general vânturile, prin frecarea aerului pe suprafața mării, antrenează în direcția lor de suflu masele de apă superficiale sub formă de curenți de vânt sau curenți de derivă. Acești curenți, la rândul lor, sunt influențați de mișcarea de rotație a Pământului, prin intermediul accelerației Coriolis, care în emisfera nordică abate direcția curenților de vânt spre dreapta.

În zona de coastă a Deltei Dunării curenții sunt influențați și de curenții fluviali de la gurile de vărsare în mare a Dunării.

2.3.2. Curenții fluviali

Destul de intens este curentul fluvial al gurii Brațului Sulina, unde dinamica firelor de curent se produce în condiții deosebite. La gura Canalului Sulina sunt construite diguri artificiale a căror lungime a crescut neîntrerupt în decursul anilor. În prezent, lungimea lor depășește 7km. Pentru micșorarea aluvionării șenalului navigabil cu aluviunile Brațului Stambulul Vechi, digurile au fost curbate în direcția est-sud-est.

Pentru asigurarea trecerii marilor nave maritime, bara este adâncită în mod artificial prin dragaje, menținându-se o adâncime de circa 8m. Astfel, spre deosebire de celelalte brațe ale Deltei, la gura Brațului Sulina bara aproape lipsește, iar porțiunea marină din imediata apropiere a gurii este destul de adâncă.

Spre deosebire de celelalte brațe mari, unde barele împiedică pătrunderea apelor salină în albia lor, la gura Sulinei pana de apă sărată din orizonturile de fund, în condițiile vânturilor dinspre larg (NE, E, SE) , se întinde mult în amonte. Din cauza adâncimilor mari (7-8m), curentul fluvial al gurii Sulina nu își cheltuiește energia la depășirea barei și, de aceea, atenuarea vitezelor se produce mult mai lent față de celelalte guri (Figura 2-15).

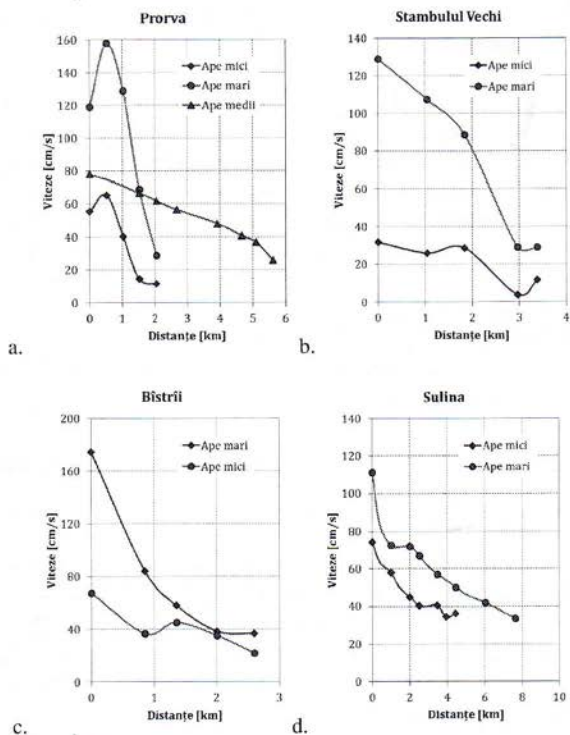


Figura 2-15 Variația curenților fluviali la gurile brațelor: Prorva, Potapov, Bistrii și Sulina

În concluzie, trebuie precizat că cele arătate mai sus despre circulația maselor de apă între brațele Deltei sunt valabile numai în condiții de vânturi slabe. În condițiile intensificării vânturilor, spectrul circulației se schimbă brusc. În larg încep să predomine curenții de derivă. Chiar firele curenților fluviali puternici, provocate de vărsările marilor brațe ale Deltei, sunt supuse unor importante schimbări în ceea ce privește direcția lor cât și limita întinderii lor.

2.3.3. Curenții de vânt

Toți cercetătorii, care s-au ocupat cu studiul curenților din sectorul litoral al Deltei Dunării sau din zona de larg a mării aferente Deltei, se referă la existența în această parte a Mării Negre a curenților constanți.

2.3.4. Schema curenților

Vânturile puțin stabile din est și din vest, având în același timp și o mică frecvență, nu creează un sistem de curenți de sine stătător în sectorul maritim al Deltei Dunării. Acest fapt permite ca ilustrarea curenților stabili, dominanți în sectorul maritim al Deltei Dunării, să se limiteze la două scheme:

- pentru vânturi din sectorul nordic;
- pentru vânturi din sectorul sudic.

2.4. Caracteristicile dinamicii costiere

Țărnul mării este supus impactului factorilor dinamici naturali ai mării și influențelor antropice. Dintre factorii dinamici naturali ai mării un rol principal îl au valurile, curenții și nivelurile. Se prezintă în continuare câteva din caracteristicile impactului factorilor dinamici.

Pentru explicarea schimbărilor de regim morfologic costier produse în ultimii 150 de ani se vor prezenta în continuare factorii antropici care au influențat regimul dinamic costier. Exemple privind situația dinamicii țărmului între Sulina și Sud Chituc (Vadu) sunt prezentate în Figura 2-16, cu precizarea vitezelor medii de deplasare, în raport cu anul 1962, a liniei țărmului Deltei Dunării (între Sulina și sud Chituc - în anii 1971, 1975, 1978, 1986, 1991, 1993 și 1997.

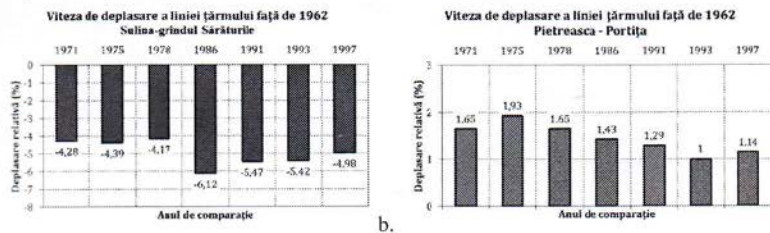


Figura 2-16 Situația dinamicii țărmului



CAPITOLUL 3

MODELAREA VALURILOR ȘI A INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI

3.1. Fenomene asociate cu generarea și propagarea valurilor

3.1.1. Generarea și propagarea valurilor în apă adâncă

Este important să se facă diferențierea între cele două tipuri de valuri generate de vânt, și anume: *seas* (valuri de vânt) și *swells* (valuri de hulă). Valurile de vânt sunt generate de vântul local, au un aspect neregulate, cu creste scurte și perioade cuprinse între 0,25 și 10 s. Valurile de hulă sunt valurile care s-au deplasat în afara ariei de generare, au o formă mai regulată cu creste mai lungi și bine definite, iar perioadele sunt cuprinse între 10 și 30 s

Generarea valurilor depinde de viteza vântului, de durata și de întinderea pe care acesta suflă, numită *fetch*. Dezvoltarea valurilor sub influența vântului nu este nelimitată! Momentul când valurile se opresc din creștere reprezintă atingerea *condiției de mare complet dezvoltată* și corespunde situației în care valurile au devenit mai lungi și cu o formă rotunjită, ele au ajuns la o mărime maximă și se deplasează cu o viteză apropiată de cea a vântului. O reprezentare schematică a generării valurilor pe măsură ce primesc energie de la vânt este ilustrată în *Figura 3-1* unde pot fi identificate momentele importante ale generării valurilor, și anume: valurile încep să se formeze în zona 1, sunt complet dezvoltate în zona 2, iar în zona 3 se transformă în valuri de hulă.

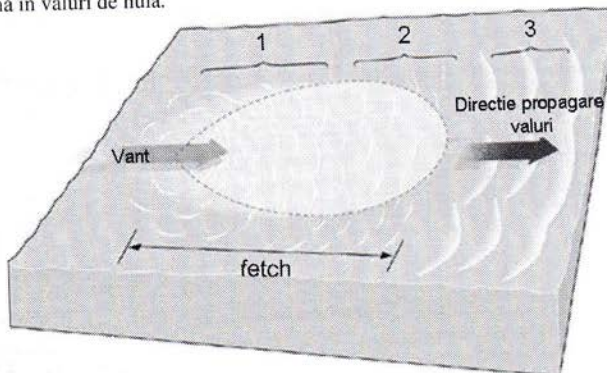


Figura 3-1 Generarea valurilor sub influența vântului, (Rusu și Ivan, 2011).

3.1.2. Propagarea valurilor în apă puțin adâncă

Pe măsură ce valurile se apropie de țărm ele intră într-o zonă de tranziție a adâncimii apei, în care mișcarea valurilor este afectată de fundul mării. Aceste efecte includ modificarea amplitudinii și direcției valurilor. Fenomenul de variație a valurilor în direcția lor de propagare datorită modificării vitezei de grup indusă de adâncimea apei poartă numele de *shoaling* (transformarea profilului valului când se propagă spre țărm). *Figura 3-2* ilustrează transformarea formei valurilor o dată cu scăderea adâncimii.

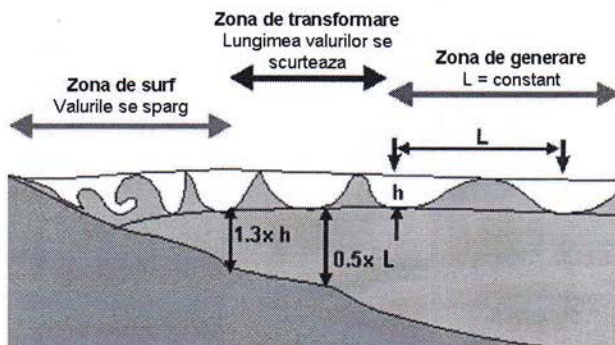


Figura 3-2 Transformarea formei valurilor o dată cu scăderea adâncimii apei, (Rusu și Ivan, 2011).

Procesele suferite de valurile de vânt pot fi separate în trei etape care corespund ariilor de: generare, transformare și locală (*Figura 2-3*).

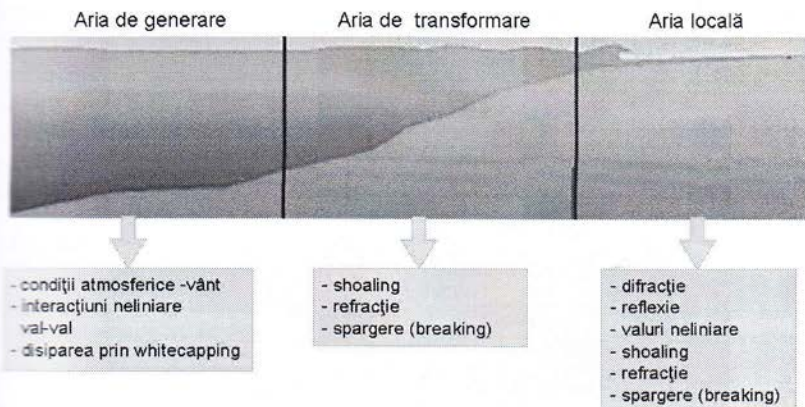


Figura 3-3 Etapele proceselor de transformare a valurilor și enumerarea fenomenelor importante din fiecare zonă, (Rusu și Ivan, 2011).

Tabelul 1 Importanța relativă a diverselor procese care afectează evoluția valurilor în apele oceanice și costiere, (Battjes, 1994)

Procesul	Ape oceanice	Ape costiere		
		Platforma mărilor	Lângă coastă	Port
Generarea valurilor de vânt	●●●●	●●●●	●	○
Interacțiuni între patru valuri (cuadrupele)	●●●●	●●●●	●	○
Disipare prin whitecapping	●●●●	●●●●	●	○
Frecare cu fundul mării	○	●●	●●	○
Refracția datorită curentului/focalizarea energiei	○/●	●	●●	○
Refracția datorită fundului mării / shoaling	○	●●	●●●●	●●
Spargerea valurilor (indusă de adâncime, surf)	○	●	●●●●	○
Interacțiuni între trei valuri (triade)	○	○	●●	●
Reflexia valurilor	○	○	● / ●●	●●●●
Difracția	○	○	●	●●●●

●●●● - dominant; ●● - semnificativ dar nu dominant; ● - de importanță minoră;
○ - neglijabil

3.1.3. Refracția

Când valurile se propagă într-o regiune în care adâncimea apei este variabilă și suficient de mică încât valurile să interacționeze cu fundul apei au loc diverse fenomene fizice, cum ar fi: viteza de fază (celeritatea) C și viteza de grup c_g se modifică, de asemenea lungimea valului. Variația vitezei valului produce modificarea direcției de mișcare a valului, fenomenul purtând numele de *refracție* (Figura 3-4).

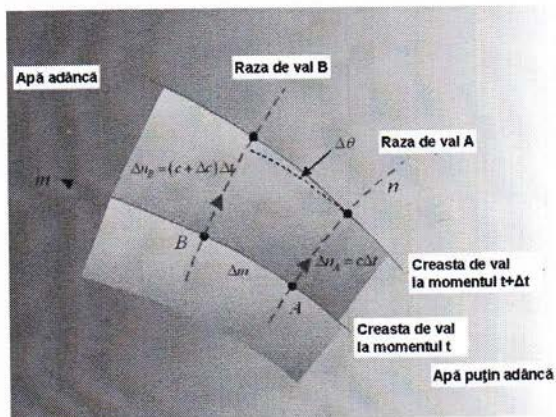


Figura 3-4 Efectul de rotire a crestei de val către regiunea cu viteză de fază mai mică (adică către apă puțin adâncă), (Holthuijsen, 2007).

3.1.4. Difracția

Procesul prin care energia valului se propagă lateral, perpendicular pe direcția de propagare a valurilor poartă numele de *difracție*. Pentru a introduce fenomenul de difracție se consideră un val armonic, cu creste lungi, călătorind în apă cu adâncime constantă, în jurul unui promontoriu (limbă sau cap de pământ care intră în mare) sau a unui dig de spargere a valurilor (Figura 3-5).

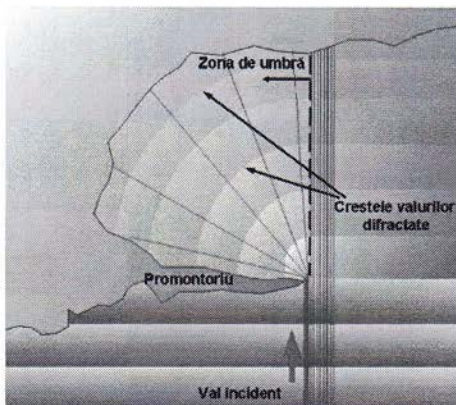


Figura 3-5 Difracția în jurul unui promontoriu cu o traiectorie circulară în zona de umbră (adâncime constantă, fără reflexie), (Holthuijsen, 2007).

În absența refracției (deoarece fundul apei este orizontal), valurile vor călători în zona de umbră a obstacolului, crestele de val urmând un traseu circular cu o diminuare rapidă a amplitudinilor. Datorită efectului de ecranare produs de promontoriu, variații largi ale amplitudinii vor avea loc dincolo de linia geometrică de umbră a capului. Dacă difracția era ignorată, valul ar fi trebuit să se propage de-a lungul unei linii drepte (deoarece adâncimea apei este constantă), energia nu ar traversa linia de umbră și valurile nu ar penetra aria de umbră din spatele promontoriului. Luând însă în considerare difracția, razele de val (definite ca perpendiculare la crestele de val) virează în zona de umbră din spatele capului de pământ.

3.1.5. Refracție - Difracție combinate

Dacă valurile se propagă în apă puțin adâncă peste o batimetrie neregulată, cu variații spațiale rapide ale valului în amplitudine, trebuie să fie considerate în calcule atât refracția cât și difracția. Conceptual, aceasta este ușor de obținut prin combinarea efectelor variației adâncimii apei și modificarea amplitudinii în calculul razelor de val.

3.1.6. Reflexia

Valurile care se propagă spre un obiect solid (cum ar fi dig, țărm stâncos sau o plajă înclinată) sunt reflectate, astfel că valul reflectat are aceeași fază dar direcție opusă și efectiv aceeași amplitudine ca valul incident. De asemenea, reflexia poate apărea când valurile intră

într-un port sau estuar. Aceasta poate duce la fenomenul de *rezonanță* când valurile sunt amplificate.

În cazul unei structuri verticale, partea de energie reflectată poate fi mare. Reflexia va fi mult mai mică pentru structuri permeabile sau o plajă cu pantă lină. Când valul incident face un unghi α cu normala la o frontieră verticală, atunci valul reflectat va fi într-o direcție α pe partea opusă a normalei. Acest lucru este ilustrat în *Figura 3-6*. Mișcarea rezultantă a valului este complexă, dar în esență are forma unei grile romboidale definită de grupurile de creste de val care se mișcă paralel la frontieră. Crestele se formează la intersecția valurilor reflectat și incident. O descriere detaliată a acestor mișcări poate fi găsită în Silvester (1974). Acestea pot avea consecințe severe asupra transportului de sedimente.

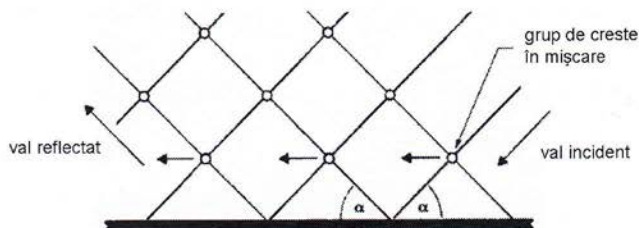


Figura 3-6 Vedere plană a valurilor reflectat, (Rusu și Ivan, 2011).

Un val care lovește o suprafață aspră, cum ar fi un recif, o stâncă sau faleză stâncoasă, pierde cea mai mare parte a energiei sale la impact prin formarea unui nor cu stropi de apă (*Figura 3-7*). Un val care întâlnește o suprafață verticală netedă, cum ar fi peretele unui port, deseori sare fără să-și piardă energia.

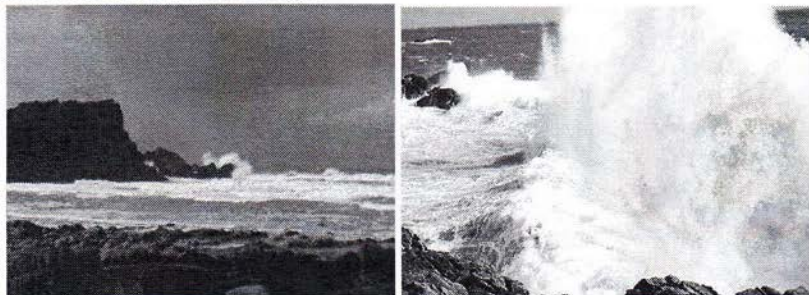


Figura 3-7 Impactul valurilor cu suprafețe aspre

În următoarea figură sunt prezentate schematic fenomenele discutate până în prezent (*Figura 3-8*). Acolo unde liniile valurilor (liniile albastre) care vin și ale celor reflectate, care pleacă, se intersectează, înălțimea valului este aproape dublă iar golul alăturat este mai adânc decât în mod normal. Adesea valurile care se intersectează se sparg într-un vârf ascuțit (marcat cu stele albe în diagramă). Pe lângă faptul că sunt reflectate, valurile pot fi și

refractate sau difractate într-o curbă. Difracția și refracția sunt motivele pentru care valurile se apropie de plajă paralel cu țărmul, necontând direcția pe care o au valurile în larg.

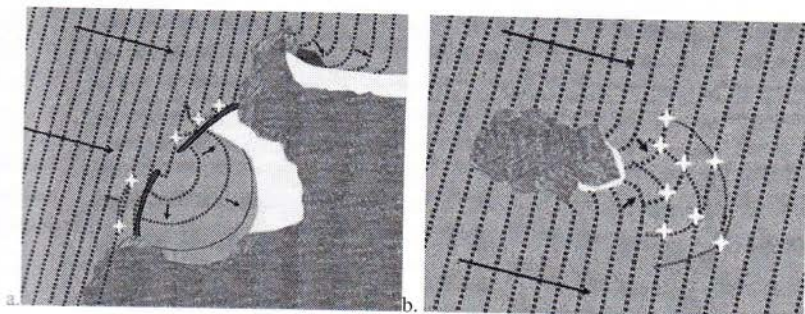


Figura 3-8 Refracția, difracția și reflexia valurilor, (Rusu și Ivan, 2011).

3.1.7. Spargerea valurilor

La o adâncime oarecare, un val cu anumite caracteristici va deveni instabil și se va sparge, disipând energia sub forma unei turbulențe și propagându-se împotriva frecării cu fundul. În timpul spargerii valurilor acestea devin mai înalte și mai înguste o dată cu micșorarea adâncimii. Datorită frecării cu plaja, partea inferioară a valului se mișcă mai încet decât creasta și valul se sparge. Valurile cu pantă mică sunt bune pentru practicarea surfului. Când se construiește o structură în zona de surf este necesar să se stabilească unde este localizată linia de spargere a valurilor. În Figura 3-29 sunt prezentate cele patru tipuri de spargeri ale valurilor.

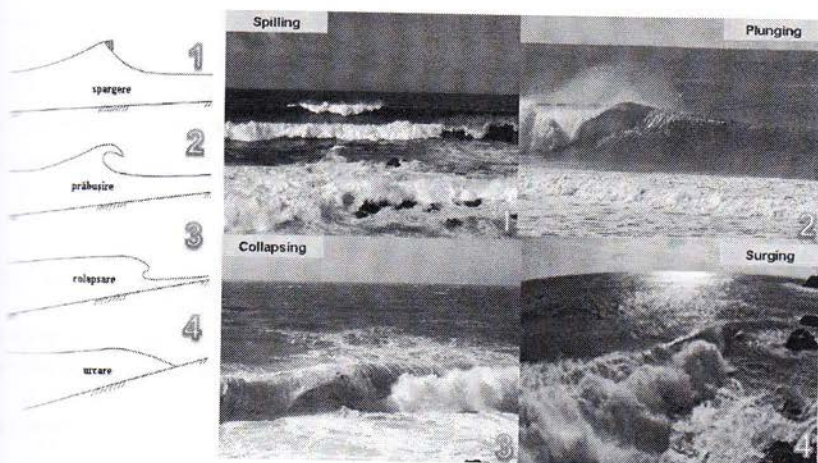


Figura 3-9 Imagini ilustrând cele patru tipuri de spargere a valurilor

3.2. Modelul spectral al valului marin

Descrierea valurilor marine printr-un spectru nu are ca țintă să descrie în amănunt o observație a suprafeței mării (adică o înregistrare a valului în timp), ci mai curând să descrie suprafața mării ca un proces stocastic, adică să caracterizeze toate observațiile posibile (înregistrări în timp) care ar putea fi făcute în condițiile prezentei observații. Astfel, o observație este tratată ca o realizare a unui proces stocastic.

O descriere mai completă a proprietăților valului este obținută prin aproximarea unei înregistrări în timp a ridicării suprafeței apei ca o sumă a unui număr mare de valori sinusoidale, independente statistic. Acest concept este numit *modelul fază/amplitudine-aleatoare* (random-phase/amplitude model), care duce la spectrul de val - cea mai importantă formă în care sunt descrise valurile mării (Holthuijsen, 2007).

3.3. Interacțiunea dintre valuri și curenți

În multe zone costiere sunt prezenți curenți puternici ca rezultat al efectului mareelor, al debitului râurilor sau doar datorită schimbării abrupte de topografie. Când acest lucru are loc în apropierea porturilor și în zonele în care sunt dezvoltate activități costiere sau offshore, modificarea câmpurilor de val datorită curenților necesită să fie prezisă pentru a se evalua impactul asupra navelor sau a structurilor costiere.

Când raportăm această soluție pentru un sistem fix este necesar să fie considerat că:

- lungimea valului este aceeași în ambele sisteme
- perioada T_a relativă la un sistem de referință staționar este în relație cu perioada T_r relativă la sistemul de referință care se mișcă cu un curent U , prin

$$T_a = \frac{T_r}{1 + U/c_r} = T_r \left(1 - \frac{U}{c_a} \right) \quad (3.1)$$

unde c_r este viteza relativ la observatorul mobil

- viteza totală a particulelor apei este $U + u_w$, unde u_w este componenta indusă de val. În situația unei adâncimi arbitrare pentru T și h date, este necesar să se rezolve lungimea de val din ecuația (3.1) prin metode iterative.

3.3.1. Refracția valurilor în prezența curenților

Metodele de calcul ale refracției valului datorită variației adâncimii apei sunt bine stabilite. Două noi caracteristici importante apar atunci când un curent este prezent:

- energia valului se propagă după o direcție rezultată din suma vectorilor vitezei curent și vitezei relativă de grup, astfel încât energia nu este transmisă la un unghi drept cu creșterea valului.
- energia valului nu este conservată chiar dacă frecarea este absentă, deci există un transfer de energie între valuri și curenți.

3.3.1.1. Spargerea valurilor datorită curenților

Așa după cum a fost menționat anterior, în realitate valurile nu ating o amplitudine infinită, ele se sparg când ating o anumită pantă critică ka . Valoarea propusă de Longuet-Higgins (1969) este $ka = 1/2$, alți autori au găsit valori care variază de la 0,15 până la 0,36 dacă curentul este prezent (Wu și Yao, 2004), dar pentru simplitate aici a fost menținută valoarea de 0,5. Momentul la care valurile se sparg, amplitudinea valului și de asemenea distribuția energiei disipate depind de viteza curentului, dar și de numărul de val inițial k_0 și amplitudinea inițială a_0 . Raportul $E/E_0 = (a/a_0)^2$ descrie energia valului pentru o valoarea a vitezei curentului și este reprezentat grafic în Figura 3-.

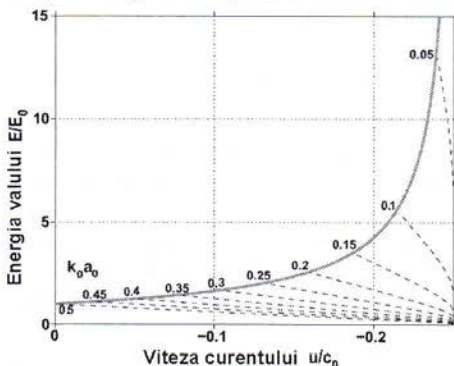


Figura 3-10 Energia valului funcție de viteza curentului. Viteza curentului și amplitudinea sunt la valori pentru un mediu în repaus ($U = 0$), Baschek (2005).

Când viteza curentului egalează sau depășește viteza de grup negativă $U/c_0 \geq -1/4$ (așa cum rezultă din ecuația 3.131), valurile nu mai pot continua să înainteze împotriva curentului și vor sparge în zona de convergență, reprezentată grafic în Figura 3- prin curba gri.

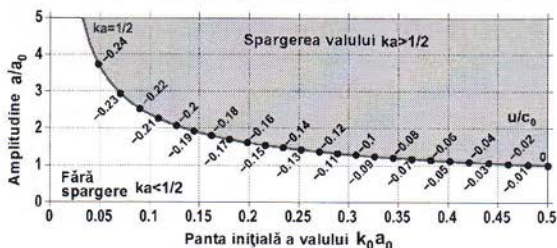


Figura 3-11 Modificarea relativă a amplitudinii a/a_0 a unui val care se sparge, funcție de panta inițială a valului, Baschek (2005).

Ea arată situația pentru un val care se propagă din apă liniștită (dreapta) spre o zonă cu un curent opus (stânga). Viteza corespunzătoare a curentului U/c_0 este indicată prin puncte gri și numere. Amplitudinea la care valul se sparge depinde numai de panta lui inițială,

amplitudinea crescând cu descreșterea raportului $k_0 a_0$. Ea tinde spre infinit pe măsură ce $k_0 a_0$ tinde către zero.

3.3.1.2. Transformarea spectrului de val datorită prezenței curenților

Forma spectrului în frecvență propus de Huang și alții (1972) în care s-a considerat influența curențului este:

$$\frac{E(\omega, U)}{E(\omega)} = \frac{4}{\left[1 + \sqrt{1 + \frac{4U\omega}{g}}\right]^2 \sqrt{1 + \frac{4U\omega}{g}}}, \quad (3.2)$$

3.4. Modelul spectral în medie de fază SWAN

Modelele numerice sunt utilizate din ce în ce mai mult pentru realizarea de previziuni oceanografice. În general, pentru previziunile la scară oceanică sunt utilizate modele de valuri precum WAM (WAMDI Group, 1988) sau WAVE-WATCH 3 (Tolman, 1999). Acestea sunt modele de valuri din generația a treia și se bazează pe ecuația de conservare a acțiunii. Pentru aria de transformare, unde procesele fizice sunt mai complexe, au fost concepute alte modele spectrale în medie de fază bazate tot pe ecuația de conservare a acțiunii, cum ar fi modelul SWAN (Booij și alții, 1999) sau STWAVE (Smith și alții, 2001). Fizica lor este mult mai elaborată pentru a putea descrie mai bine procesele specifice mediului costier, cum ar fi refracția, shoaling, spargerea valurilor sau interacțiunea dintre trei valuri (triade). Totuși, despre SWAN (acronimul de la Simulating WAVes Nearshore) trebuie menționat faptul că, ultimele versiuni ale modelului depășesc cu mult condiția unui model destinat doar pentru modelarea proceselor din aria de transformare, gama lui de aplicare fiind extinsă aproape la scală oceanică.

Acest lucru permite implementarea în Marea Neagră a unui sistem de predicție a valurilor bazat în întregime pe modelul SWAN, prin efectuarea de simulări la diferite nivele. Primul nivel ar fi reprezentat de aria de generare care include întregul bazin al Mării Negre. Simulările realizate la acest nivel vor furniza condițiile de frontieră pentru zona de transformare, care corespunde litoralului românesc. Domenii de rezoluție mai mare pot fi ulterior introduse în aria de transformare pentru a focaliza sistemul către arii locale de interes, cum ar fi zonele portuare. Deși același model ar fi utilizat pentru toate nivelele, parametrizările fizice considerate vor fi diferite de la un nivel de calcul la altul.

În SWAN sunt implementate următoarele procese de propagare: propagarea în spațiul geografic, refracția datorită variației curențului și batimetriei, fenomenul de shoaling, blocarea și reflexia datorită opoziției curenților și obstacolelor. Pe de altă parte sunt considerate și efectele generării și disipării valurilor: redistribuirea energiei din spectrul de val datorită interacțiunilor neliniare între valuri, generarea valurilor de vânt, disiparea prin whitecapping, disiparea prin spargerea valurilor datorită scăderii adâncimii sau prin frecarea cu fundul mării.

CAPITOLUL 4

REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND INTERACȚIUNEA DINTRE VALURI ȘI CURENȚI

În timp ce rezultatele previziunilor realizate cu modelele de valuri au fost comparate și validate cu măsurători înregistrate de balize (sau alte dispozitive), în general măsurători simultane ale valurilor și curenților la aceeași locație nu sunt disponibile și astfel este mai dificil să se valideze pe deplin sistemul de predicție a valurilor atunci când este prezent și un câmp de curenți semnificativ. În acest caz validarea modelelor numerice a fost realizată prin compararea simulărilor cu date experimentale, astfel fiind posibilă studiarea interacțiunilor dintre valuri și curenți care au fost produse într-un bazin de valuri offshore.

Modelul SWAN este capabil de a simula numeroase interacțiuni complicate și transformări ale valurilor care se propagă prin diverse spații geografice. Capacitatea acestui model de a furniza previziuni fiabile a fost validată prin compararea simulărilor cu măsurători. Câteva exemple relevante sunt studiile efectuate de către Rusu și alții (2008, 2011a,b) și Rusu și Guedes Soares (2009) în zona costieră din Oceanul Atlantic (coasta de vest a peninsulei iberice) și de studiile efectuate în mări închise în care climatul de val este destul de diferit (Rusu, 2009, 2011; Rusu și Ivan, 2010).

Un alt aspect foarte important este să se cunoască în ce măsură modelele numerice sunt capabile de a simula corect fenomenele legate de influența curenților asupra valurilor. În acest sens, studiile prezentate în acest capitol le continuă pe acelea realizate de către Rusu și Guedes Soares (2011) prin evaluarea fiabilității sistemului de modelare a valurilor bazat pe SWAN, în acest caz aplicat la gurile Dunării unde de obicei sunt prezenți curenți puternici care au o direcție opusă propagării valurilor. Ei au ales stări ale mării caracterizate prin condiții de hulă extremă care sunt utilizate în general în proiectare, în timp ce actualele stări ale mării se referă în totalitate la valori ale înălțimilor semnificative mai mici decât 5 m, valori care sunt mult mai apropiate de condițiile de val întâlnite la gurile Dunării.

4.1. Analiza unor rezultate experimentale

Alegerea de a studia rezultate experimentale se datorează faptului că astfel de experimente sunt în general esențiale când se evaluează gradul de modificare a principalelor caracteristici ale valurilor datorită prezenței curenților.

Datele care vor fi analizate în continuare provin din experimentul realizat în cadrul proiectului european 'Interaction of Wave Spectra with Currents', care a avut ca obiectiv investigarea mecanismelor interacțiunii dintre valuri și curenți, precum și cuantificarea

modului în care modelele spectrale teoretice pot reprezenta corect toate fenomenele relaționate cu aceste interacțiuni.

4.1.1 Procedura experimentală

Toate datele utilizate în acest studiu provin de la teste realizate în bazinul de valuri offshore al Institutului de Hidraulică din Danemarca (Danish Hydraulic Institute - DHI), ale cărui dimensiuni sunt: 30m lungime, 20m lățime și 3m adâncime. Experimentul a fost realizat la o scară de 1:75, deci adâncimea reală a apei este 225m.

Valurile pot fi generate de 61 de palete individuale controlate și sunt absorbite de un absorbant de valuri parabolic lung de 6m, situat în cealaltă parte a bazinului. În bazin este posibil să fie creat un curent prin pomparea apei prin duze de presiune prinse pe un postament situat în fața generatoarelor de valuri (zona de testare situându-se între generatorul de valuri și postamentul cu duzele care generează curentul). Prin ajustarea fluxului duzelor se poate obține o valoare definită anticipat pentru curentul din aria de testare. Sensul curentului poate fi schimbat prin modificarea poziției postamentului, permițând astfel crearea unui câmp de curenți cu direcții diferite în raport cu direcția de propagare a valurilor. Înregistrările valurilor sunt prelevate la intervale de timp de $\Delta t = 0,216506$ secunde, iar majoritatea fișierelor conțin un număr de $N = 24001$ înregistrări.

În *Figura 4-1* poate fi identificată zona de testare, considerată a fi cea mai stabilă zonă din tanc. De asemenea, poate fi identificată traiectoria curenților induși, observându-se totodată faptul că aceasta nu este cea mai adecvată traiectorie deoarece produce modificări ale curentului în locurile unde sunt amplasați senzorii, astfel curentul devenind neuniform în de-a lungul zonei de testare (Guedes Soares și de Pablo, 2006).

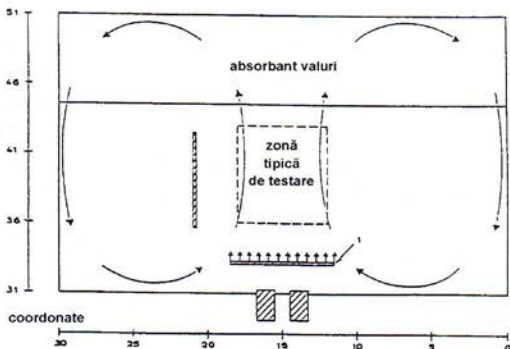


Figura 4-1 Circulația curentului în bazinul de valuri

Pentru a măsura caracteristicile spațiale ale câmpului de valuri au fost utilizate nouă instrumente de măsură (senzori), fiecare dintre acestea măsurând deplasarea suprafeței apei pentru diverse condiții ale mării. Senzorii au fost fixați pe o structură metalică în centrul tancului, structura având forma unui pentagon cu laturile de 60cm (vârfurile pentagonului sunt notate cu 3, 4, 5, 6, 7). Ceilalți senzori formează un triunghi echilateral cu laturile de 4m. Cel

de-al optulea senzor este amplasat în centrul pentagonului, în mijlocul laturii triunghiului echilateral, la distanța de 7 m de la generatorul de valuri. Pozițiile instrumentelor de măsură sunt prezentate în *Figura 4-*. Se poate observa că senzorul 2 este cel mai apropiat de generatorul de valuri, în timp ce senzorul 9 este cel mai apropiat de generatorul de curent.

Zona tipică de testare prezentată în *Figura 4-1* este situată în zona cea mai stabilă din bazin. Traectoria curentului indus nu este cea mai indicată deoarece induce modificări ale direcției curentului în părțile laterale ale rezervorului. De asemenea, curentul nu este uniform de-a lungul coloanei verticale de apă deoarece există și un flux invers stratificat, în unele locații (Guedes Soares și de Pablo, 2006). Generarea stărilor mării a fost realizată pentru un sistem de valuri neregulat urmând tipul de spectru JONSWAP.

Au fost considerate doar următoarele combinații ale parametrilor de val (scara reală): înălțimea semnificativă (H_s) de 2,3 3,6 și 4,6 m cu perioade ale vârfului spectral (T_p) de 7, 10, 14 și 20 secunde. În testele analizate direcția curentului este opusă propagării valurilor, cu viteze de 1,0 și 1,5 m/s. O descriere mai precisă a celor 32 de teste luate în considerare aici este prezentată în *Tabelul 2*, unde în plus față de înălțimile semnificative ale valurilor și a perioadelor vârfului spectral ale sistemelor de val, de asemenea este indicată direcția propagării valurilor precum și direcția și viteza curentului. În timpul testelor viteza curentului a fost măsurată numai la sonda 8 și valorile sunt indicate în *Tabelul 2*.

Așa cum a fost menționat anterior, datele provin din experimentul realizat în cadrul proiectului 'Interaction of Wave Spectra with Currents', care a avut ca obiectiv studiarea interacțiunii dintre valuri și curenți. Rezultatele aceluiași teste au fost utilizate și de către Guedes Soares și de Pablo (2006), pentru a studia influența curenților asupra spectrelor de val, dar ei nu au făcut nici o comparație cu simulări numerice. Din acest motiv, în acest capitol sunt analizate și prezentate doar observații suplimentare cu privire la datele experimentale.

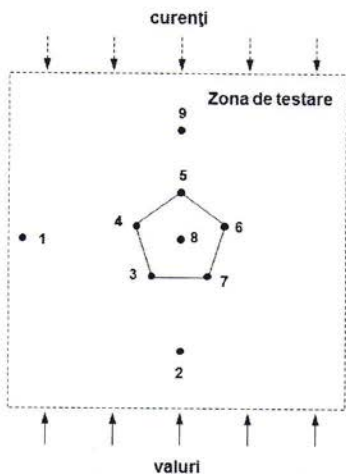


Figura 4-2 Schema de amplasare a instrumentelor de măsură în bazinul DHI

REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND INTERACȚIUNEA DINTRE VALURI ȘI
CURENȚI

Tabelul 2 Descrierea sistemelor de val utilizate în acest studiu

Test N	H_s (m)	T_p (s)	Direcția valului (deg)	Direcția curentului (deg)	Viteza curentului (m/s)	Viteza curentului măs. (m/s)
1	3,6	7	0	-	-	-
2	3,6	10	0	-	-	-
3	3,6	14	0	-	-	-
4	3,6	20	0	-	-	-
5	4,6	7	0	-	-	-
6	4,6	14	0	-	-	-
7	4,6	20	0	-	-	-
8	2,3	7	0	-	-	-
9	2,3	14	0	-	-	-
10	2,3	20	0	-	-	-
11	3,6	7	30	-	-	-
12	3,6	14	30	-	-	-
13	4,6	14	30	-	-	-
14	2,3	14	30	-	-	-
25	3,6	7	0	180	1,5	1,33
26	3,6	10	0	180	1,5	1,25
27	3,6	14	0	180	1,5	1,35
28	3,6	20	0	180	1,5	1,32
29	4,6	7	0	180	1,5	1,33
30	4,6	14	0	180	1,5	1,27
31	4,6	20	0	180	1,5	1,23
32	2,3	7	0	180	1,5	1,30
33	2,3	14	0	180	1,5	1,35
34	2,3	20	0	180	1,5	1,30
39	3,6	7	30	180	1,5	1,29
40	3,6	14	30	180	1,5	1,34
41	4,6	14	30	180	1,5	1,40
42	2,3	14	30	180	1,5	1,32
47	3,6	7	0	180	1	0,89
48	3,6	14	0	180	1	0,86
49	4,6	14	0	180	1	0,88
50	2,3	14	0	180	1	0,96

În primele zece teste au fost considerate doar sisteme de val fără curent, reprezentând diferite combinații între înălțimile semnificative ale valurilor cu patru perioade de vârf spectral. Următoarele patru stări ale mării sunt alese dintre cele anterioare, dar direcția de propagare a valului face un unghi de 30° cu axa longitudinală a bazinului. Următoarele paisprezece teste le repetă pe primele (aceleași combinații de H_s și T_p și direcții de propagare), dar considerând existența unui curent opus cu viteza de 1,5m/s. Ultimele patru teste consideră diferite combinații de H_s și T_p (incluzând toate valorile care au apărut anterior), considerând

existența unui curent opus cu viteza de 1m/s. Această varietate mare de combinații permite investigații eficiente privind influența curenților asupra formei spectrului de val.

Calibrarea curentului și a condițiilor de val a fost realizată înainte de teste. Cu toate acestea, în timpul testelor au apărut unele inexactități. În timpul experimentului s-au realizat măsurători ale vitezei curentului doar la sonda 8, situată în zona de testare, așa după cum a fost prezentat de Guedes Soares și de Pablo (2006), rezultatele măsurătorilor indicând faptul că, curentul generat nu a fost întotdeauna stabil.

4.1.2 Analiza datelor spectrale

Datele măsurate de la cele nouă sonde (ridicarea suprafeței libere a apei) au fost prelucrate cu ajutorul unui program special dezvoltat la DHI, în scopul de a obține spectre 1D. Folosind același program a fost realizată o primă evaluare a testelor efectuate fără curenți. Acest lucru se face prin compararea rezultatelor obținute atunci când spectrul JONSWAP este utilizat ca dată de intrare. Din această primă analiză s-a constatat că testele cu cele mai slabe rezultate (prin similitudine cu spectrul JONSWAP) sunt cele în care au fost considerate valori scăzute pentru perioadele de val. *Figura 4-* prezintă valorile înălțimilor semnificative ale valurilor calculate pentru spectrul măsurat la toate cele nouă sonde, ambele teste fiind realizate cu $T_p = 7s$, dar cu H_s diferit.

Prin compararea valorilor luate în considerare ca date de intrare în generarea sistemului de val (care este $H_s = 3,6m$ pentru Test 1 și $H_s = 2,3m$ pentru Test 8) și valorile măsurate la cele nouă sonde se observă că apar diferențe semnificative. Acest lucru indică faptul că, câmpul de val generat este destul de neuniform. Din analiza rezultatelor tuturor testelor efectuate fără curenți rezultă că măsurătorile de la sonda 8 prezintă de fapt cea mai mare precizie dintre toate sondele.

În ceea ce privește rezultatele experimentale corespunzătoare cazurilor în care curentul este opus direcției de propagare a valurilor, neomogenitățile câmpului de curent din bazin produce diferențe (uneori semnificative) între H_s măsurat la cele nouă sonde. Un astfel de exemplu este ilustrat în *Figura 4- (a)*. Valoarea măsurată la sonda 8 este aproximativ egală cu valoarea medie măsurată la cele 5 sonde situate în vârfurile pentagonului. Pe de altă parte, se poate observa că pe direcția de propagare a curentului (axa longitudinală reprezentată cu linie roșie în *Figura 4- (a)*), H_s scade pe măsură ce distanța este mai mare față zona în care este generat curentul. Deși sunt prezentate doar valorile obținute într-un singur test realizat în prezența curenților, totuși observațiile sunt valabile pentru majoritatea testelor efectuate în condiții similare. *Figura 4- (b)* prezintă o comparație între spectrele 1D măsurate în zona de testare pe axa longitudinală. Se observă că există diferențe privind energia spectrală care apare în domeniul de frecvențe mai mari decât frecvența de corespunzătoare vârfului spectral.

Influența mărimii vitezei curentului asupra energiei spectrale a valurilor (implicit supra mărimii H_s), poate fi observată mai vizibil prin reprezentarea în același grafic a spectrelor 1D măsurate la sonda 8 pentru stări ale mării generate cu aceeași parametri de val, fără curent și cu curent având viteze diferite. Fiecare grup de grafice din *Figura 4-* prezintă stadii ale mării generate cu aceeași perioadă T_p , dar cu diverse valori ale lui H_s (de la stânga la dreapta H_s crește).

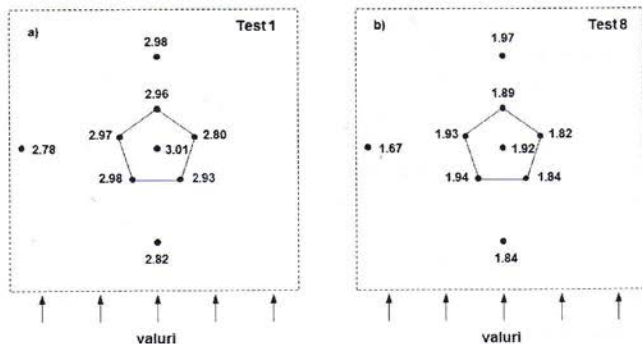


Figura 4-3 Evaluarea lui H_s măsurat la cele nouă sonde, pentru testele realizate cu $T_p = 7s$: a) Test 1, $H_s = 3,6m$; b) Test 8, $H_s = 2,3m$.

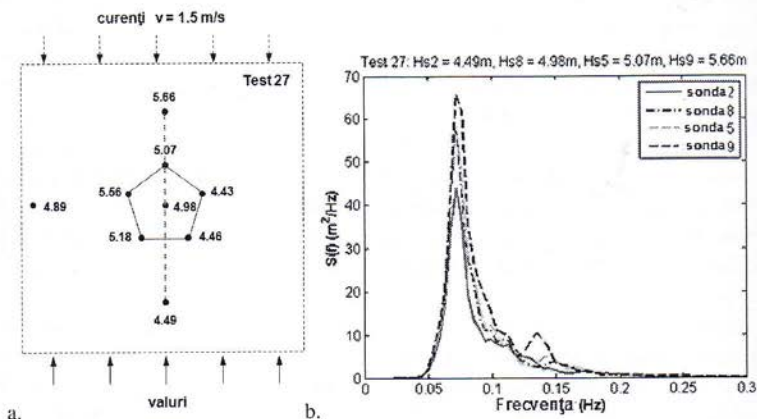


Figura 4-4 a. Evaluarea lui H_s măsurat ca cele nouă sonde în Test 27 ($H_s = 3,6m$, $T_p = 14s$). b. Comparare între spectrele ID măsurate pe direcția de propagare a curentului marcată cu linie roșie în partea din stânga.

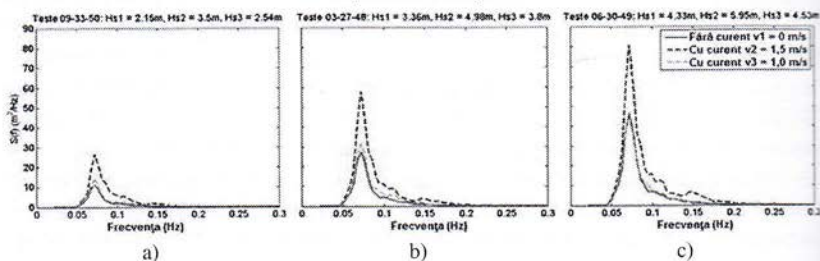


Figura 4-5 Comparare între spectrele ID măsurate la sonda 8 pentru stadii ale mării generate fără current și cu current având diferite viteze. Toate testele au aceeași perioadă a vârfului spectral ($T_p = 14s$) și diferite înălțimi semnificative: a. $H_s = 2,3m$; b. $H_s = 3,6m$; c. $H_s = 4,6m$.

Din analiza valorilor lui H_s , rezultă că prezența unui curent opus produce o creștere a energiei spectrale, care devine mai pronunțată pentru valori mai mari ale vitezei curentului. Pentru cazul stadiilor mării generate cu parametrii de val $H_s = 2,3\text{m}$ și $T_p = 14\text{s}$, un curent de aproximativ 1m/s produce o creștere de aproximativ 18%, în timp ce pentru o viteză a curentului de $1,5\text{m/s}$ creșterea este de aproximativ 63%. Pentru cele trei stadii ale mării generate cu diferite valori ale lui H_s în prezența unui curent de $1,5\text{m/s}$ se poate observa că pe măsură ce H_s crește, influența curentului scade.

În Figura 4-6 sunt comparate înălțimile semnificative măsurate la cele nouă sonde, pentru testele realizate cu $H_s = 3,6\text{m}$, cu sau fără curent. Din compararea înălțimilor semnificative măsurate în testele realizate fără curent (graficul cu linie roșie) cu H_s considerat în generarea spectrului JONSWAP (valoarea marcată de linia neagră) se observă că înălțimile semnificative măsurate sunt în general mai mici decât valoarea standard. Diferența se reduce pe măsură ce T_p crește de la 7s (Test 1) la 20s (Test 4).

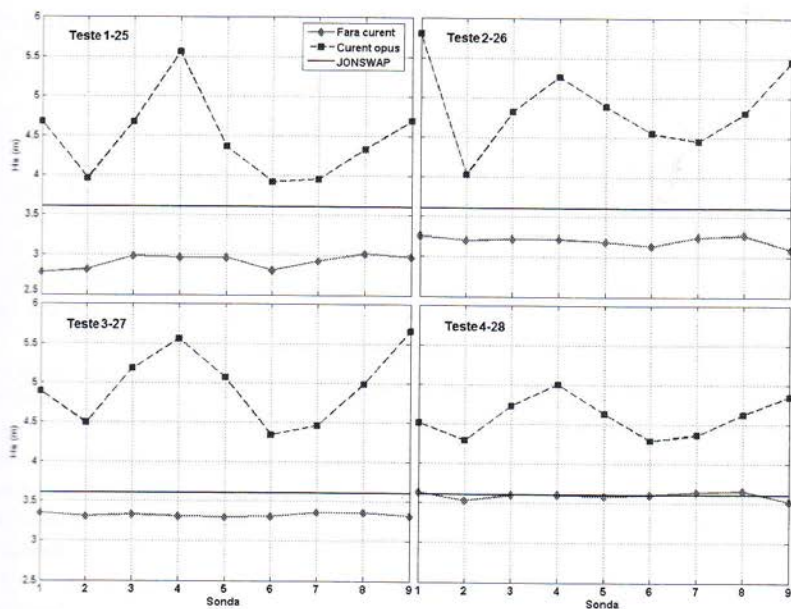


Figura 4-6 Compararea înălțimilor semnificative măsurate la cele nouă sonde, pentru testele realizate cu $H_s = 3,6\text{ m}$.

În cazul sondelor 9 și 2 o explicație poate fi găsită în poziționarea acestora față de generatorul de curent. Astfel, la sonda 9 viteza curentului este probabil mai mare fiind cea mai apropiată de generatorul de curent, în timp ce la sonda 2 aceasta este mai redusă fiind cea mai depărtată, amândouă sondele situându-se pe axa longitudinală care trece prin mijlocul bazinului. Pe axa transversală se pare că viteza curentului generat fost de asemenea neuniform determinând valori mai mari de H_s la sondele 4 și 3, față de cele măsurate la sondele 7 și 6. Se

observă de asemenea că valorile lui H_s măsurate la sonda 8 se mențin în jurul unei valori medii. Înălțimile semnificative ale valurilor înregistrate de senzorul 8 pentru toate testele considerate sunt prezentate în *Figura 4-7*.

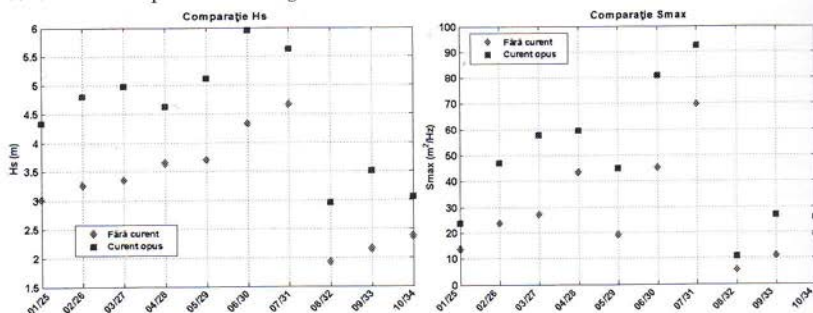


Figura 4-7 Compararea înălțimilor semnificative măsurate la sonda 8 în testele realizate fără, și cu curent având viteza de 1,5m/s (pe axa orizontală este indicat numărul testelor).

4.2. Simulări numerice

4.2.1. Modelare numerică cu SWAN

Modelarea propagării valurilor în bazinul DHI, cu și fără curenți, a fost realizată utilizând modelul spectral în medie de fază SWAN. Acest model este capabil să simuleze interacțiuni complicate și transformări ale valurilor care se propagă prin spații geografice variate, fiind utilizat cu succes în modelarea propagării valurilor atât în apă adâncă, cât și în zonele costiere. De aceea, pare o alegere bună utilizarea acestui model pentru realizarea acestui studiu în care rezultatele simulărilor sunt comparate cu date experimentale.

Pentru implementarea modelului SWAN a fost adoptată aceeași procedură ca aceea utilizată de Rusu și Guedes Soares (2011). Modelul este aplicat în coordonate carteziene, ca date de intrare în SWAN fiind utilizată geometria bazinului de valuri la scară reală, cu o plajă absorbantă la capătul bazinului pentru reducerea reflexiei. Spectrul 1D măsurat în fiecare test fără curenți la sonda numărul 2 (care este cea mai apropiată de generatorul de valuri) a fost utilizat pentru forțarea modelului în testele realizate. Valorile înălțimilor semnificative calculate din spectrele 1D utilizate pentru forțarea modelului sunt prezentate în *Tabelul 3* (coloana BC - condiția la frontieră).

Câmpurile de curenți considerate în simulările cu modelul SWAN au valoarea de 1,5m/s sau 1m/s în zona de testare. Ca date de ieșire ale modelului SWAN este spectrul de la sonda de referință, și anume sonda 8.

Simulările au fost realizate în modul staționar, care presupune că variațiile în timp ale condițiilor de frontieră sunt mult mai mici decât timpul cât valurile rămân în aria de calcul. Pentru experimentele în bazine de valuri acest lucru este cu certitudine adevărat. Având în vedere că în experiment nu a fost considerat vântul, opțiunile privind creșterea valurilor datorită vântului și disiparea prin înspumare au fost deconectate din SWAN. De asemenea, nu

au fost considerate interacțiunile între patru valuri deoarece această opțiune poate fi activată doar când este considerat vântul în datele de input.

Tabelul 3 Rezultatele simulărilor pentru fiecare stare a mării

Test N	Sistemele de valuri		BC	Curent opus		
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	H_{mas} (m)	H_{SWAN} (m)	I_a
25	3,6	7	2,82	4,33	4,19	0,951
26	3,6	10	3,21	4,8	4,36	0,969
27	3,6	14	3,30	4,98	4,09	0,943
28	3,6	20	3,52	4,29	4,14	0,997
29	4,6	7	3,68	5,11	4,91	0,859
30	4,6	14	4,25	5,95	5,27	0,976
31	4,6	20	4,51	5,63	5,31	0,995
32	2,3	7	1,84	2,95	2,89	0,979
33	2,3	14	2,10	3,05	2,63	0,957
34	2,3	20	2,29	3,06	2,69	0,987
39	3,6	7	2,24	3,40	3,21	0,972
40	3,6	14	3,33	4,60	4,08	0,942
41	4,6	14	4,30	5,83	5,26	0,951
42	2,3	14	2,07	2,72	2,56	0,964
47	3,6	7	2,82	3,73	3,66	0,978
48	3,6	14	3,30	3,80	3,76	0,999
49	4,6	14	4,25	4,56	4,75	0,997
50	2,3	14	2,10	2,54	2,47	0,997

4.2.2. Analiza rezultatelor

Simulările cu modelul SWAN au fost realizate pentru fiecare stare a mării, având parametrii de val principali prezentați în *Tabelul 2*. Pentru fiecare stare de referință a mării sunt prezentate în *Tabelul 3* valorile înălțimilor semnificative corespunzând spectrului măsurat la sonda 2 și utilizat pentru forțarea modelului SWAN (coloana BC). Înălțimea semnificativă a valului măsurată la sonda 8 (H_{mas}), împreună cu valoarea înălțimii semnificative care a rezultat din simulările cu modelul SWAN în locația corespunzătoare sondei 8 (H_{SWAN}), sunt prezentate de asemenea în *Tabelul 3*.

Numai comparația dintre valorile măsurate și simulate ale înălțimilor semnificative nu este totuși suficientă pentru evaluarea rezultatelor obținute din simulările numerice. Din acest motiv a fost efectuată și o comparație între spectrele măsurate la sonda 8 (simulări cu curent) și spectrele furnizate de modelul SWAN în aceeași locație. Pentru evaluarea calității estimărilor a fost utilizat un indice de concordanță I_a :

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4.1)$$

unde \bar{O} este media valorilor observate iar O_i și P_i sunt valorile observate și prezise ale ordonatelor spectrale. I_a poate avea valori între 0 și 1, unde 1 indică o concordanță perfectă între observații și previziuni, iar 0 este cazul opus. *Tablelul 3* centralizează valorile indicilor de concordanță care au fost obținuți în cazurile studiate.

Din analiza valorilor lui I_a , se poate observa că din cele 18 teste efectuate cu curenți, doar pentru trei teste valorile indicelui sunt mai mici decât 0,95. Cel mai slab rezultat este de 0,859 și aceasta este de fapt unica valoare a lui I_a mai mică decât 0,94. Această valoare scăzută a lui I_a este obținută pentru testul numărul 29 (sisteme de val cu $H_s = 4,6\text{m}$ și $T_p = 7\text{s}$) unde valoarea lui H_s calculată din spectrul de frecvențe de intrare SWAN (3,68m) este mult mai mică decât valoarea de referință, care este de 4,6 m. După cum se menționează în ultimul paragraf, testele efectuate în cazurile cu perioade mici prezintă unele inexactități și testul numărul 29 este unul dintre ele. De asemenea, trebuie remarcat faptul că pentru acest test valorile lui H_{mas} și H_{SWAN} sunt foarte apropiate, respectiv 5,11m și 4,91m.

În testele efectuate cu curenți opus de 1,5m/s cele mai bune rezultate au fost obținute pentru sistemele de val cu perioade de 20s. Toate cele 4 teste realizate în prezența unui curenți opus cu viteza de 1m/s prezintă valori foarte bune pentru indicele de concordanță, de exemplu pentru testele în care $T_p = 14\text{s}$ valoarea acestui indice este de 0,99. În același timp, gradul de concordanță dintre cele două spectre poate fi evaluat și grafic în figurile următoare. Spectrul măsurat (reprezentat cu linie roșie continuă) și acela simulat de SWAN (reprezentat cu linie albastră punctată) care corespund fiecărui test sunt ilustrate în același grafic.

Pentru o evaluare mai rapidă a diferențelor de energie care apar între cele două spectre, din energia spectrului măsurat care corespunde unei frecvențe se extrage energia spectrului simulat pentru aceeași frecvență. O diferență pozitivă este reprezentată în figuri cu linie neagră, în timp ce o diferență negativă cu albastru deschis. În *Figura 4-8* sunt comparate spectrele măsurate și simulate care corespund testelor cu valori similare de H_s , dar perioade T_p diferite. Pentru $T_p = 20\text{s}$, concordanța dintre spectrele măsurate și simulate devine mai bună, iar pe măsură ce H_s crește de la valoarea de la 3,6m (*Figura 4-8 b*), la 4,6 m (*Figura 4-9b*). Îmbunătățirea se observă atât din graficele prezentate în figurile menționate mai sus, cât și din valorile indicelui. Ținând cont și de observațiile făcute de către Rusu și Guedes Soares (2011), pentru testul 30 au fost efectuate simulări suplimentare în care viteza curențului a fost mărită cu un factor de 1,2. Acest lucru a condus la o îmbunătățire a rezultatelor, așa cum se poate observa din *Figura 4-10*. De asemenea, valoarea indicelui de concordanță a fost îmbunătățită de la 0,976 la 0,985.

REZULTATE EXPERIMENTALE PRIVIND INTERACȚIUNEA DINTRE VALURI ȘI CURENȚI

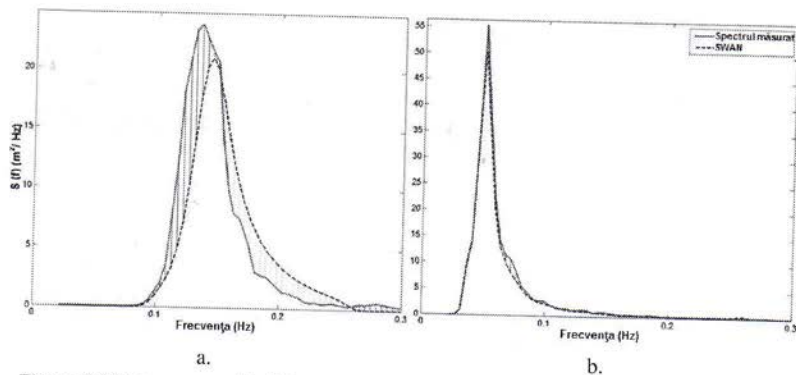


Figura 4-8 Teste cu aceeași înălțime semnificativă a valului ($H_s = 3.6m$) și diferite perioade ale vârfului spectral, viteza curentului 1,5m/s: a. Test 25 cu $T_p = 7s$; b. Test 28 cu $T_p = 20s$.

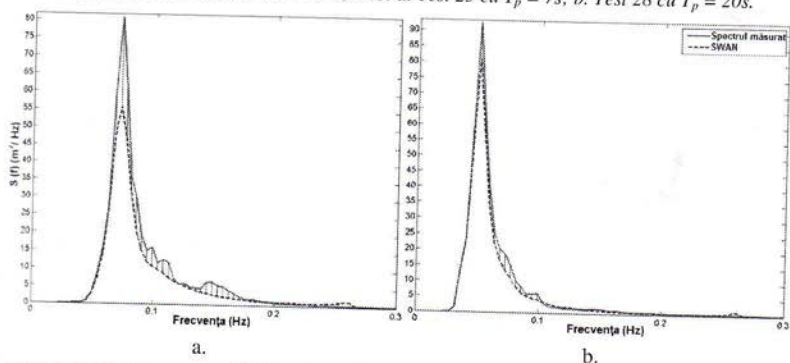


Figura 4-9 Teste cu aceeași înălțime semnificativă a valului ($H_s = 4.6m$) și diferite perioade ale vârfului spectral, viteza curentului 1,5m/s: a. Test 30 cu $T_p = 14s$; b. Test 31 cu $T_p = 20s$

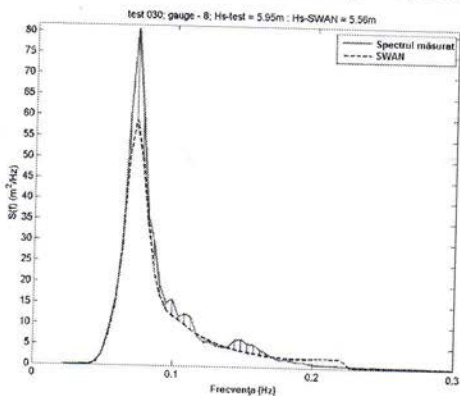


Figura 4-10 Test 30 cu viteza curentului modificată.

Pentru cazul simulărilor efectuate cu curent opus de 1 m/s, rezultatele sunt foarte bune. Acest lucru este indicat de valorile ridicate ale indicelui de concordanță, și de asemenea confirmat de comparația grafică a spectrelor de val prezentată în *Figura 0-1*. De asemenea, rezultatele simulărilor pentru care direcția de propagare a valurilor face un unghi de 30° cu axa longitudinală a bazinului (în aceste condiții unghiul dintre valuri și curenți este de 150°) sunt rezonabile.

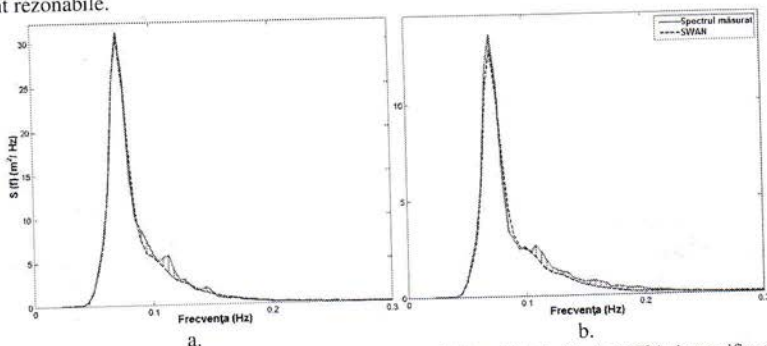


Figura 0-1 Teste cu aceeași perioadă a vârfului spectral ($T_p = 14s$) și diferite înălțimi semnificative ale valului, viteza curentului 1m/s: a. Test 48 cu $H_s = 3.6m$; b. Test 50 cu $H_s = 2.3m$.

4.3. Concluzii

Un sistem bazat pe modelul SWAN este implementat la gurile Dunării, în scopul de a evalua influența curenților asupra valurilor, în acest mediu foarte complicat, care este supus unui trafic maritim ridicat pe de o parte, precum și unui risc de mediu ridicat. Din acest motiv, au fost considerate în acest studiu date experimentale înregistrate într-un bazin de valuri aparținând Institutului de Hidraulică din Danemarca (DHI), unde curenții sunt generați în mod artificial. În paralel, simulările cu modelul SWAN sunt, de asemenea, efectuate pentru a evalua performanțele modelului, în cazul în care valurile se propagă în prezența unor curenți opuși puternici, care măresc considerabil înălțimile de val.

De asemenea, trebuie subliniat faptul că diferențele care apar între spectrele 1D simulate de modelul SWAN și cele măsurate în ceea ce privește armonicile de ordin superior, se datorează faptului că SWAN este un model în medie de fază și nu conține toate mecanismele fizice prezente într-un model care rezolvă faza. Luând în considerare faptul că în timpul testelor poate să apară o variație pe verticală a curentului, care din păcate este necunoscută, acest lucru poate influența rezultatele măsurătorile, dar nu poate fi luat în calcul de SWAN (modelul SWAN consideră că, curentul este uniform pe verticală). Așa cum s-a menționat de către Holthuijsen (2007), de asemenea poate să apară și fenomenul de *bunching energy* (concentrare de energie) indus de curent.

Rezultatele arată că, în general, modelul SWAN poate oferi o bună reprezentare a proceselor complexe de interacțiuni val-curent care au loc la intrarea în Delta Dunării și, în consecință, SWAN poate fi folosit ca un instrument eficient pentru a evalua transformările puternice ale valurilor din această zonă.

CAPITOLUL 5

MODELAREA INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI ÎN ZONA DE VĂRSARE A DUNĂRII

În acest capitol se vor evalua interacțiunile dintre valuri și curenți în Marea Neagră la gurile Dunării prin analizarea rezultatelor unor simulări numerice efectuate cu modelul spectral în medie de fază SWAN (Booj și alții, 1999). Regiunea costieră considerată este caracterizată, în general, prin condiții de vânt și valuri destul de ridicate, iar în același timp, datorită vărsării Dunării în mare, este indus în zonă un sistem de curenți, generându-se astfel uneori interacțiuni semnificative între valuri și curenți.

Această zonă costieră este supusă unui trafic de navigație destul de intens și, în afară de navele maritime mari, sunt întâlnite aici și nave fluviale care sunt mult mai sensibile la condițiile create de interacțiunile dintre valuri și curenți. Din această perspectivă, cunoașterea efectelor acestor interacțiuni în zona de vărsare a Dunării reprezintă deci un element deosebit de important pentru siguranța navigației în zonă și pentru prevenția unor accidente care ar putea avea consecințe dramatice asupra mediului.

Pe de altă parte, așa cum a mai fost menționat în lucrarea de față, o evaluare cât mai corectă a proceselor care au loc în această zonă de la intrarea în Delta Dunării este importantă și pentru a putea anticipa mai bine procesele care afectează dinamica costieră, procese care sunt foarte intense aici. Așa cum este cunoscut, la intrarea în Deltă, Dunărea se desparte în trei brațe: Chilia, Sulina și Sfântu Gheorghe. Ultimele două formează brațul Tulcea care continuă ca un singur braț pentru câțiva kilometri după separarea de brațul Chilia. La gurile fiecărui braț au loc importante procese aluvionare, ca un semn că Delta își continuă expansiunea.

Din această perspectivă, în acest capitol sunt prezentate rezultatele simulărilor făcute cu modelele numerice în zona maritimă de la gurile Dunării. Strategia de modelare avută în vedere, recomandă utilizarea unui sistem de predicție a valurilor bazat pe modelul SWAN care a fost implementat la nivelul întregului bazin al Mării Negre (Rusu și alții, 2006) și apoi focalizat spre zona litoralului românesc. Rezultatele cercetărilor descrise în acest capitol au fost publicate de doctorandă în mai multe lucrări științifice relevante, cum ar fi: Ivan și Rusu (2009), Ivan și Diaconu (2010), Ivan și Rusu (2011), Rusu și Ivan (2010 și 2011), Ivan și Rusu (2012a și 2012b) și Ivan și alții (2012).

5.1. Modelarea valurilor în Marea Neagră

Prima implementare a unui sistem de predicție a valurilor în Marea Neagră, bazat exclusiv pe modelul spectral în medie de fază SWAN, se datorează lui Rusu și alții (2006)

care au prezentat validări în raport cu date de balize focalizate pe coasta de est a mării, unde astfel de date erau disponibile. Ulterior, sistemul a fost validat și pentru coasta de vest în raport cu date măsurate la Platforma Gloria (Rusu, 2009) sau cu date de satelit (Rusu, 2010a). Apoi, același sistem a fost utilizat pentru a realiza scenarii privind capacitatea de a furniza sprijinul în cazul alertelor ecologice generate de accidente care ar putea avea loc în mediul marin, iar câteva rezultate în acest sens sunt prezentate în Rusu (2010b).

Sistemul implementat se bazează integral pe modelul SWAN, făcând mai întâi simulări pe un domeniu de calcul care acoperă întreg bazinul Mării Negre și apoi focalizându-se către diverse zone costiere. Metodologia adoptată prezintă avantajul că un singur model acoperă întreaga scală a procesului de modelare a valurilor, deși, în mod evident, fizica și parametrizările sunt destul de diferite de la un nivel de rezoluție la altul. Mai mult, modelul SWAN este mult mai flexibil și poate fi calibrat cu mai multă ușurință decât clasicele modele oceanice. Așa cum s-a menționat, în legătură cu măsurătorile 'in situ', calibrarea sistemului și testele de validare s-au realizat considerând în principal trei surse de date. Acestea sunt în primul rând balizele direcționale Gelendzhik (37,98E / 44,51N) și Hopa (41,38E / 41,42N). Ambele sunt localizate în zona de est a Mării Negre în apă adâncă la 85m și respectiv 100m adâncime. De asemenea, au fost utilizate date măsurate la platforma petrolieră Gloria care operează în zona litoralului românesc al Mării Negre, la aproximativ 50m adâncime.

Utilizarea datelor de satelit în validarea modelelor numerice pentru valuri și curenți, dar și pentru analiza datelor de mediu pe regiuni întinse, a devenit în ultimul timp tot mai frecventă și aceasta datorită faptului că, în ultimii ani, au devenit disponibile în domeniul public date de satelit tot mai precise care sunt acum disponibile pe diverse site-uri de internet (cum ar fi de exemplu <http://as.avisio.oceanobs.com>, care a fost principala sursă în lucrările menționate anterior). Un nod de altimetru dă, pentru fiecare zi la ora zero, în timp aproape real, date de tipul *multi-mission*. Acestea sunt date combinate provenite de la măsurătorile simultane de la mai multi sateliți. Mărimile considerate sunt înălțimea semnificativă a valurilor (H_s), viteza vântului (V_w) și viteza curentului. Acestea sunt valori mediate în timp (pentru 48 de ore) și spațiu (pentru pătrate cu latura de 1° centrate în nod).

În ceea ce privește măsurarea valurilor marine, estimările sunt obținute utilizând modelele empirice derivate din analiza datelor de altimetru. Algoritmul utilizat pentru a deduce înălțimea semnificativă se bazează pe rezultatele inițiale ale lui Gaspar și alții (1998), la care se adaugă modelul parametric al lui Labroue și alții (2002). Pentru o înălțime semnificativă tipică de 2m, eroarea este de aproximativ 1-2cm, adică între 0,5% și 1%.

În cadrul studiilor efectuate anterior, s-au folosit diverse câmpuri de vânt. Astfel, au fost considerate în primul rând câmpurile furnizate de NCEP (acronym de la US National Center for Environmental Predictions), cu o rezoluție spațială de 1,875° și cele de la ECMRWF (acronim de la European Centre for Medium Range Weather Forecasts), cu o rezoluție spațială de 1,5°, rezoluția temporală fiind de 6 ore pentru ambele câmpuri. Alt câmp de vânt utilizat în lucrările menționate, care va fi considerat și în studiul care urmează, este cel de rezoluție înaltă 0,25° și cu pas de timp de o oră furnizat în cadrul proiectului HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe), care dă câmpuri de vânt de reanaliză pentru 44 de ani, între 1958 și 2001 (Guedes Soares, 2008).

Pomind de la observația conform căreia unele procese din apă adâncă au o dinamică diferită într-o mare închisă, cum este Marea Neagră, în comparație cu cazul oceanului, o atenție deosebită a fost acordată procesului de disipare prin înspumare (whitecapping). Acest proces este încă considerat ca fiind una dintre verigile slabe în ceea ce privește modelarea valurilor în apă adâncă. În modelele de generația a treia care operează în prezent (cum ar fi SWAN, WAM sau WW3), acest proces a fost implementat strâns legat de procesul de generare a valurilor de către vânt. Testele de validare efectuate au arătat că sistemul dezvoltat poate furniza rezultate credibile privind condițiile de val din Marea Neagră (desigur în anumite limite de rezonabilitate).

Din această perspectivă, trei seturi diferite de simulări au fost făcute considerând trei parametrizări diferite disponibile în modelul SWAN pentru modelarea transferului energiei de la vânt la valuri și disiparea prin înspumare. Aceste procese, deși sunt în modelul SWAN reprezentate prin termeni sursă diferiți, sunt totuși cuplate. Cele trei parametrizări care au fost considerate sunt Komen (Komen și alții, 1984), Janssen (Janssen, 1991) și Metoda pasului cumulativ (Cumulative Steepness Method – CSM, Hurdle și Van Vledder, 2004). Procesul de înspumare (whitecapping) este controlat în primul rând de panta valurilor. În modelele spectrale din generația a treia (cum este și SWAN) formulările pentru acest proces se bazează pe modelul pulsatoriu al lui Hasselmann (1974), adaptat după WAMDI group (1988), astfel încât să fie aplicabil și în apă de adâncime finită.

Totuși valorile standard ale parametrilor reglabili disponibili pentru fiecare caz în parte au fost găsite prea mari în condițiile din Marea Neagră și după efectuarea a diverse teste de calibrare acești coeficienți au fost setați la următoarele valori: pentru formularea Komen $C_{ds}=1,2 \times 10^{-5}$, pentru formularea Janssen $C_{ds1}=1,1$ iar pentru formularea CSM $C_{wc}^{st}=0,1$. Aceste modificări au ca efect reducerea disipării prin înspumare și conduc la o creștere a înălțimilor de val rezultând valori mai apropiate de măsurători. Pentru a verifica eficiența celor trei parametrizări diferite au fost efectuate simulări pentru întreg bazinul Mării Negre pentru perioada 1 Noiembrie 1996 – 6 Februarie 1997.

Ca punct de referință și verificare a fost considerată baliza Gelendzhik care era localizată în partea de nord-est a Mării Negre (37.98°E / 44.51°N), în acea locație adâncimea apei este de 85 de metri. Poziția balizei este indicată în *Figura 5-1* unde este ilustrată și harta batimetrică a Mării Negre (cuprinde și Marea Azov). Pentru toate cele trei parametrizări, comparațiile directe indică în general rezultate bune în ceea ce privește înălțimile semnificative și perioadele vârfului spectral, dar unele diferențe apar în ceea ce privește direcțiile medii ale valurilor. Totuși, chiar și în acest caz tendințele principale au fost reprezentate destul de corect de către model. Trebuie menționat și faptul că nu s-au observat diferențe semnificative între timpii de calcul necesari în cele trei cazuri diferite considerate.

Tabelul 4 prezintă rezultatele statistice corespunzătoare simulărilor efectuate în perioada considerată (1 Noiembrie 1996 – 6 Februarie 1997) pentru cele trei parametrizări diferite: Komen, Janssen și CSM. Rezultatele prezentate în acest tabel arată că formularea Komen apare ca cea mai viabilă pentru bazinul Mării Negre pentru toți cei trei parametri analizați (înălțimea semnificativă - H_s , perioada vârfului spectral - T_p și direcția medie a valurilor - Dir). În acest caz toți indicatorii analizați (*Bias*, *RMSE* – eroarea pătratică medie, *SI* – indicele

de împrăștiere și r – Coeficientul de corelare sau coeficientul Pearson) au valori mai bune. Mai mult, aceasta a fost parametrizarea pentru a fost necesară cea mai mică modificare a coeficienților variabili.

Tabelul 4 Statistica valorilor privind parametrizarea procesului de înspumare (whitecapping), (simulări pentru intervalul 1996.11.01h00-1997.02.06h00).

$n = 660$	Bias	RMSE	SI	r	Caz
H_s (m)	-0,008	0,386	0,384	0,871	K
T_p (s)	0,369	1,420	0,253	0,651	O
Dir ($^\circ$)	8,580	53,50	0,250	0,470	M
H_s (m)	-0,022	0,432	0,430	0,837	J
T_p (s)	0,100	1,516	0,270	0,562	N
Dir ($^\circ$)	-8,400	68,10	0,315	0,330	S
H_s (m)	-0,099	0,407	0,405	0,865	C
T_p (s)	-0,197	1,430	0,255	0,629	S
Dir ($^\circ$)	-5,830	66,65	0,308	0,403	M

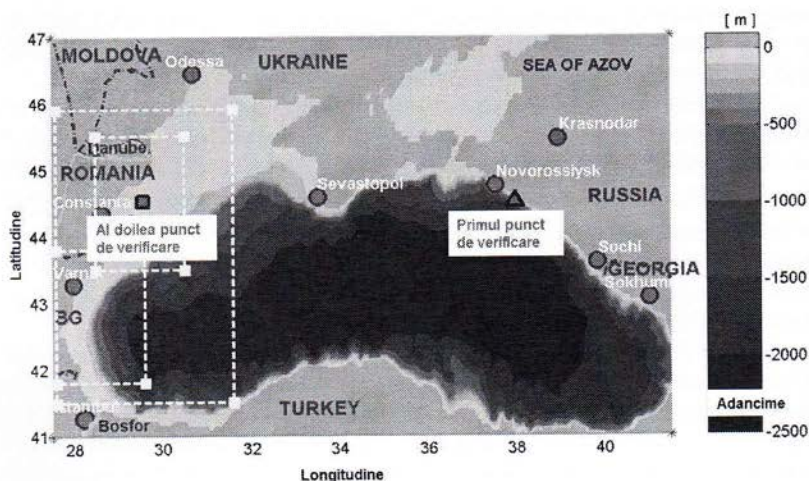


Figura 5-1 Harta batimetrică a Mării Negre, localizarea punctelor de verificare și domeniile costiere definite pentru coasta de vest a mării.

Rezultatele au fost comparate cu cele furnizate de modelul WAM pentru aceiași perioadă de la sfârșitul anului 1996 și începutul lui 1997, care a utilizat exact același câmp de vânt și care au fost prezentate de Cherneva și alții (2008). Așa cum este cunoscut, pentru parametrii bias, RMSE și SI rezultatele sunt mai bune când acești parametrii au valori mai mici, iar coeficientul de corelație este mai bun cu cât are valori mai apropiate de unitate. Din această perspectivă, trebuie menționat că rezultatele date de SWAN sunt superioare față de cele

furnizate de WAM și acest lucru este valabil pentru oricare dintre cele trei parametrizări considerate în SWAN.

Astfel, în ceea ce privește eroarea pătratică medie (*RMSE*), valorile date de WAM sunt 0,53 pentru H_s ; 1,74 pentru T_p și 92,7 pentru parametrul *Dir*, ceea ce înseamnă valori considerabil mai mari (și deci inferioare din punct de vedere calitativ), cel puțin pentru parametrii H_s și *Dir*. În ceea ce privește indicele de împrăștiere (*SI*), rezultatele date de modelul WAM sunt 0,68 pentru H_s , 0,34 pentru T_p și 0,46 pentru *Dir*, ceea ce înseamnă de asemenea că rezultatele date SWAN sunt superioare. În sfârșit coeficienții de corelație care au rezultat din simulările cu modelul WAM au valorile 0,73 pentru H_s ; 0,55 pentru T_p și 0,36 pentru parametrul *Dir*. Aceasta înseamnă că rezultatele furnizate de modelul SWAN sunt mai bine corelate.

5.2. Focalizarea sistemului de predicție către coasta de vest a Mării

Până în prezent a fost analizată eficiența sistemului de predicție a condițiilor de val care a fost implementat în Marea Neagră și care este bazat pe modelul spectral în medie de fază SWAN. Au fost analizate procesele din apă adâncă atât în ceea ce privește eficiența lor privind timpul de calcul, dar și al acurateții rezultatelor furnizate de diverse opțiuni pentru parametrizările existente în model. Pentru a obține însă rezultate credibile în zonele costiere sunt necesare domenii de calcul adiționale cu rezoluție mai mare, în care fizica modelului să se focalizeze pe procesele caracteristice ale zonelor de transformare și nu ale zonelor de generare.

Astfel, câteva domenii adiționale au fost incluse pentru a focaliza sistemul de predicție către coasta de vest și spațiile geografice aferente și sunt indicate în *Figura 5-1*. Așa cum se observă și din figură, a fost definită mai întâi o arie care acoperă întreaga arie costieră de vest a Mării Negre și care utilizează condiții de frontieră de la aria globală. Această arie va fi numită în continuare aria costieră. La rândul ei această arie furnizează condiții de frontieră pentru alte două domenii de calcul cu rezoluție mai mare care acoperă zona economică românească și respectiv zona economică bulgărească. Caracteristicile domeniilor de calcul definite sunt prezentate în *Tabelul 5*.

Parametrizările generale ale modelului au fost menținute și în ariile costiere de la acest nivel. Totuși, în timp ce în ariile globală și regională a fost utilizată schema numerică de calcul S&L (Stelling și Leenderse, 1992), în celelalte două arii a fost utilizată schema numerică numită BSBT (backward space, backward time), care este mai indicată pentru domeniile de rezoluție mai înaltă și, de asemenea, au fost activate în fizica modelului procese caracteristice zonelor costiere, cum ar fi interacțiunile neliniare dintre valuri de tip triadă.

Simulări au fost realizate utilizând schema definită, considerând diverse intervale de timp în perioada 2001-2005 și, de asemenea, utilizând diverse câmpuri de vânt. Câteva rezultate vor fi prezentate în continuare pentru intervalul de timp 2002.02.01h00-2002.02.28h18, considerând câmpul de vânt NCEP cu o rezoluție spațială de 1.875° și o rezoluție temporală

de 6 ore. Ca punct de referință s-a considerat, din nou, platforma Gloria care operează pe coasta de vest la o adâncime de aproximativ 50 m.

Comparațiile directe realizate pentru principalii parametri de val (înălțime semnificativă H_s , perioada medie T_m și direcția medie Dir) sunt prezentate în *Figura 5-2*, în timp ce *Tabelul 6* prezintă rezultatele privind statistica valorilor. Analiza rezultatelor statistice arată că modelul SWAN subestimează, în general, parametrii de val (bias pozitiv). Pentru înălțimea semnificativă, această diferență este destul de mică (0,035m), din diagrama de împrăștiere prezentată în *Figura 5-3* se poate observa, de asemenea, că modelul subestimează în general înălțimile semnificative cele mai mari. Valori bune pentru coeficienții de corelație se pot observa de asemenea (0,837), în timp ce RMSE și SI nu au valori foarte bune. În ceea ce privește perioadele medii, așa cum s-a arătat în Rusu și alții (2008), formularea Komen subestimează valorile acestui parametru. În ceea ce privește direcția medie, rezultatele nu sunt întotdeauna bune și acest lucru este relaționat probabil cu rezoluția destul de scăzută a câmpurilor de vânt utilizate în acest studiu.

Tabelul 5 Grilele de calcul pentru simulările cu modelul SWAN

Grile	$\Delta x \times \Delta y$ (°)	Δt (min)	nf	$n\theta$	$ngx \times ngy = np$
Globală	$0,08^\circ \times 0,08^\circ$	20	30	24	$176 \times 76 = 13376$
Coasta de vest	$0,04^\circ \times 0,04^\circ$	20	30	24	$101 \times 111 = 11211$
Zona românească	$0,02^\circ \times 0,02^\circ$	20	35	36	$101 \times 101 = 10201$
Zona bulgărească	$0,02^\circ \times 0,02^\circ$	20	35	36	$101 \times 101 = 10201$

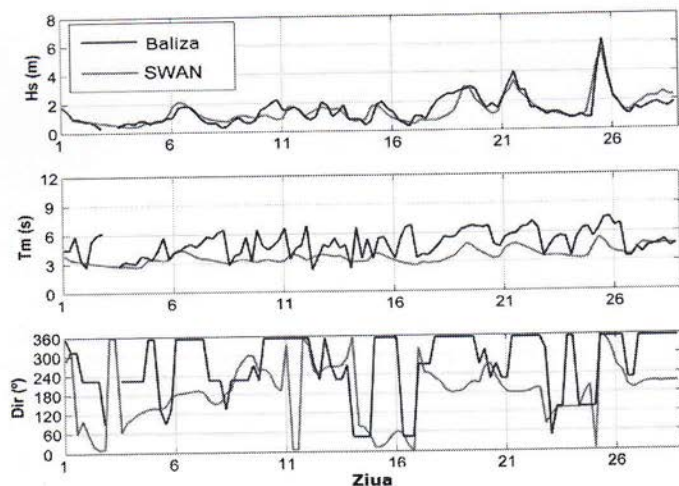


Figura 5-2 Comparație Baliză - SWAN, pentru parametrii H_s , T_m and Dir , 110 puncte de date

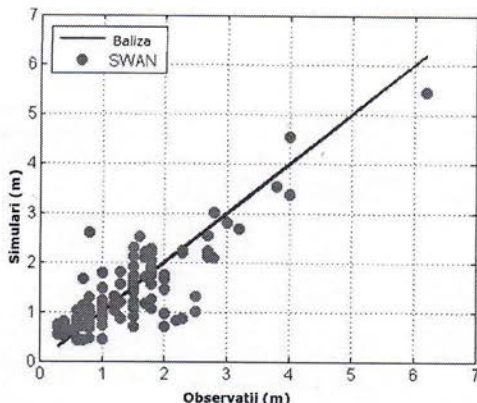


Figura 5-3 Diagrama de împrăștiere pentru parametrul H_s (axa x – observații la baliză, axa y – simulari cu modelul SWAN)

Tabelul 6 Statistica valorilor considerând câmpul de vânt NCEP

$n = 110$	Bias	RMSE	SI	r
H_s (m)	0,035	0,500	0,347	0,837
T_m (s)	1,346	1,812	0,365	0,295
Dir (°)	94,31	111,3	0,406	0,313

Câteva reprezentări spațiale corespunzând vârfului energetic din 25 Februarie 2002 sunt prezentate în Figura 5-4 și Figura 5-5. În Figura 5-4, unde sunt prezentate câmpurile de H_s și direcțiile medii, se poate observa că vârful energetic este localizat în partea de vest a Mării Negre, cu un maxim de 7,05m (marcat în figură cu un cerc negru). Această valoare maximă este relaționată cu viteza vântului, care era 24,88m/s și localizat în partea de vest. Deși ar fi fost de așteptat ca în zona economică românească (Figura 5-5a.) și în zona economică bulgărească (Figura 5-5b.) valorile cele mai mari pentru parametrul H_s să apară atunci când vântul bate dinspre est fiindcă distanța de generare a valurilor (fetch) este mai mare, s-a constatat că înălțimi mari apar totuși și când vântul bate dinspre nord și aceasta se datorează, în principal, faptului că din această direcție bat vânturi foarte puternice.

Câteva considerații vor încheia această secțiune. Au fost deci analizate, în prima parte a acestui capitol, rezultatele unei implementări globale la nivelul întregului bazin al Mării Negre, prin extinderea rezultatelor anterioare publicate de Rusu și alții (2006), Rusu (2009) și Rusu (2010a și 2010b). Un element deosebit de important al studiilor efectuate la acest nivel l-a constituit analiza efectului termenilor sursă relaționați cu procesele din apă adâncă (transferul energetic de la vânt la valuri, înspumarea și interacțiunile neliniare de tip cuadruplet). Dintre acestea, procesul de înspumare reprezintă încă veriga slabă în modelarea valurilor în apă adâncă și rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat arată că pentru mările închise, cum este și Marea Neagră, acest proces este întrucâtva diferit decât în ocean. Din

acest motiv este de fapt necesară o modificare mai mare a coeficienților reglabili. Ca rezultat al acestor studii modelul SWAN apare ca un model destul de eficace la nivelul întregii mări.

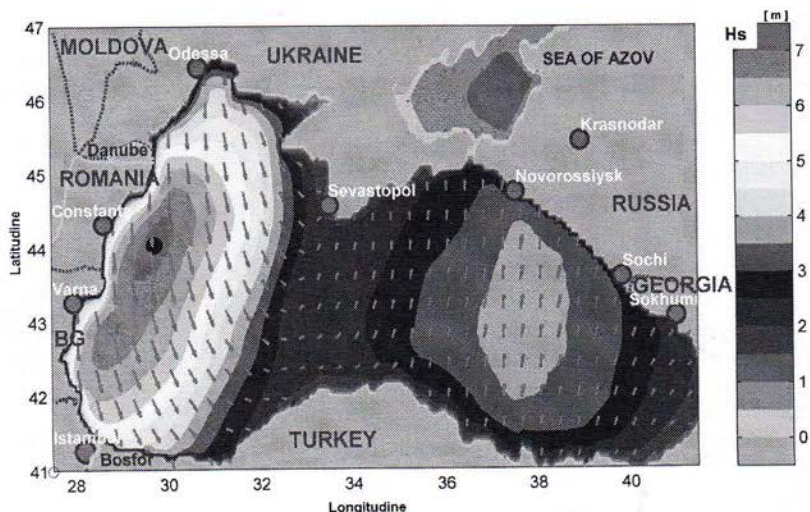


Figura 5-4 Câmpuri de înălțimi semnificative (H_s) și vectorii de val pentru vârful energetic din data 2002.02.25-06h

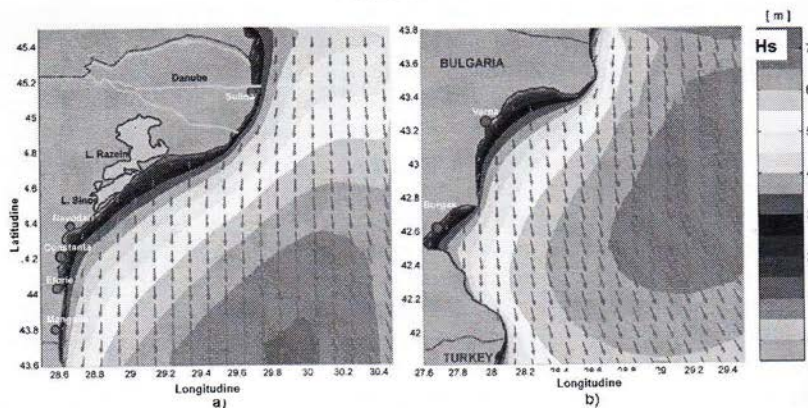


Figura 5-5 Câmpuri de înălțimi semnificative (H_s) și vectorii de val în arile costiere pentru vârful energetic din data 2002.02.25-06h

După simulările și validările efectuate la nivelul întregului bazin al Mării Negre, care au fost făcute în prima parte a acestui capitol, în partea a doua au fost introduse două noi arii, una regională (pentru întreaga parte de vest a mării) și două zone (una pentru litoralul românesc și cealaltă pentru cel bulgăresc). Pentru aceste ultim nivel, deși parametrizarea de bază au fost

menținute, crescând doar rezoluția în spațiul geografic, sunt totuși și unele diferențe. Astfel, la nivel local a fost activată schema BSBT, care este mai potrivită pentru domeniile geografice de rezoluție mai mare.

Rezultatele obținute până acum arată că, cu anumite limitări, sistemul de predicție a valurilor bazat pe modelul spectral SWAN poate furniza informații credibile privind climatul de valuri din Marea Neagră, mai ales în ceea ce privește H_s , care este principalul parametru care caracterizează valurile, x și pentru care rezultatele statistice sunt destul de bune. De altfel, aceste rezultate sunt în concordanță cu cele prezentate de Moeini și Etemad (2009) sau de Lin și alții (2002), care arată că acuratețea rezultatelor modelului SWAN este în general mai bună pentru înălțimile semnificative decât în cazul perioadelor. O direcție importantă de studiu ar reprezentat-o evaluarea mai atentă a capacității modelului de a furniza predicții cât mai realiste în cadrul furtunilor puternice, care reprezintă una din amenințările cele mai mari pentru navigație. Așa cum arată rezultatele obținute până acum, modelul dă rezultate rezonabile pentru situațiile de energie medie, dar are tendința de a subestima uneori vârfurile energetice.

Principalele modalități care ar putea fi folosite pentru îmbunătățirea rezultatelor ar fi utilizarea unor câmpuri de vânt cu rezoluție mai mare, care reprezintă o direcție foarte importantă de îmbunătățire a rezultatelor predicțiilor cu modelul SWAN în bazinul Mării Negre. O altă direcție ar fi proiectarea de parametrizări diferite în cadrul modelului pentru diverse configurații ale matricei de mediu. Acest lucru se bazează pe faptul că multe procese au o comportare dinamică și deci modificarea drastică a condițiilor de mediu ar impune o modificare adecvată în parametri care sunt asociați cu diverse procese fizice.

5.3. Modelarea interacțiunilor dintre valuri și curenți în zona de la gurile Dunării

Se poate concluziona, din studiile prezentate în secțiunile anterioare ale acestui capitol, că metodologia propusă poate furniza predicții în general bune pentru regimul valurilor din zona costieră de la Delta Dunării.

Pornind deci de la studiile prezentate, s-a focalizat acum sistemul către aria de țintă, adică aria costieră de la gurile Dunării. Caracteristicile domeniilor de calcul considerate în această focalizare sunt prezentate în *Tabelul 77*. Pentru acest caz s-au considerat trei nivele de calcul diferite. Astfel, Nivelul I denumit în *Tabelul 7* și ca nivelul global, se referă la aria de generare și cuprinde simulări cu modelul SWAN pentru întregul bazin al Mării Negre. Nivelul II reprezintă nivelul transformărilor costiere ale valurilor și fizica sa este concentrată mai ales pe procesele specifice acestor transformări. În sfârșit, Nivelul III este nivelul local în care se introduce efectul interacțiunii dintre valuri și curenții generați de vărsarea Dunării în mare. Evident, alături de aceștia vor fi luați în considerare și curenții care provin din acțiunea vântului local și care pot avea uneori o contribuție substanțială în circulația costieră. În acest tabel Δx și Δy reprezintă rezoluția în spațiul geografic, Δt este rezoluția temporală, n_f indică numărul de frecvențe în spațiul spectral, n_θ este numărul de direcții în spațiul spectral, ng_x

este numărul de puncte ale grilei în direcția x (longitudine), n_y este numărul de puncte ale grilei în direcția y (latitudine) și n_p indică numărul total de puncte ale grilei.

Pentru nivelele II și III, Rusu (2010 a) prezintă o validare utilizând date de satelit provenite de la sistemul *multimission* care furnizează date neinterpolate provenite simultan de la cel puțin doi sateliți și care deci prezintă o acuratețe sporită (<http://las.avis.oceanobs.com>).

Tabelul 7 Grile de calcul utilizate în simulările cu modelul SWAN

Nivel	$\Delta x \times \Delta y$	Δt min	nf	$n\theta$	$n_x \times n_y = n_p$
Global	$0,08^\circ \times 0,08^\circ$	20 non-stat	35	24	$176 \times 76 = 13376$
Coastier	$0,02^\circ \times 0,02^\circ$	20 non-stat	35	36	$141 \times 141 = 19881$
Local	$0,005^\circ \times 0,005^\circ$	20 non-stat 180 stat	35	36	$141 \times 121 = 17061$

Batimetrile de la primul și al doilea nivel de calcul (ilustrate în *Figura 5-6*) au fost obținute de pe internet, pagina Biroului Oceanografic Naval din Statele Unite ale Americii (US Naval Oceanographic Office), în timp ce batimetria de la nivelul al treilea s-a obținut prin digitalizarea unei hărți hidrografice de înaltă rezoluție editată de Direcția Hidrografică Română. În sectorul Sulina o batimetrie cu o rezoluție foarte mare (de câțiva metri) obținută cu sistemul de măsurare *multi-beam* de către AFDJ Galați (Administrația Fluvială a Dunării de Jos), a fost de asemenea utilizată și combinată cu datele digitalizate.

Așa cum s-a arătat mai sus, de la un nivel la altul variază nu numai rezoluția barimetrică dar și fizica și setările modelului. Astfel, luând în considerare rezultatele prezentate în capitolele anterioare, dar și cele obținute de Rusu și alții, (2006) și Rusu (2009), formularea Komen a fost considerată ca fiind cea mai adecvată pentru simulările efectuate la nivelele I și II. Câmpul de vânt care reprezintă principalul element care influențează condițiile de val din domeniile corespunzătoare nivelelor I și II este ilustrat în *Figura 5-6 (a și b)*.

Pentru cel de-al treilea nivel al simulărilor, accentul a fost pus pe procesele locale, iar dintre acestea cel mai relevant pentru cazul de față îl reprezintă interacțiunea dintre valuri și curenți. Așa cum s-a arătat în capitolele anterioare, în condiții hidrologice normale, curenții induși de fluviul Dunăre în mare variază de obicei de la 1,2 m/s la gura fluviului, până la aproximativ 0,3 m/s la o distanță de șapte kilometri spre larg (Almazov și alții, 1963).

În general deci, influența fluviului se manifestă până la aproximativ 10 km spre larg după care devine relativ nesemnificativă. Pe măsură ce curenții se deplasează spre larg, componenta indusă de vânt poate deveni de asemenea semnificativă și se combină cu curenții generat de fluviu. Câmpul de curenți induși de fluviu în mare a fost construit pe baza rezultatelor prezentate în capitolele precedente și corespunde unor condiții de curgere medii spre ridicate și este prezentat în *Figura 5-6c*. Pentru cazul când curenții induși de vânt devin relevanți, efectul lor a fost de asemenea introdus. Efectul curenților costieri induși de valuri nu a fost luat în considerare la nivelul prezentului studiu, dar în schimb efectul curenților de derivă Stokes a fost inclus.

În ceea ce privește modelarea interacțiunii dintre valuri și curenți cu SWAN, dacă în model este prezent câmpul de curenți, atunci se inițiază un proces iterativ pentru a realiza propagarea în spațiul spectral (refracția indusă de curenți și modificarea frecvenței prin efect Doppler). Fluxurile din spațiul spectral nu sunt approximate cu schema de ordinul I de tip *upwind* întrucât aceasta se dovedește a fi foarte difuzivă pentru frecvențele din vecinătatea frecvenței de blocare (adică atunci când valurile sunt blocate de curenții opuși). Se poate observa și că, în absența unui curent mediu, nu se produc modificări în domeniul frecvențelor. Modelul SWAN nu estimează curenții induși de valuri (respectiv deriva Stokes în apă adâncă și curenții costieri generați de spargerea valurilor) și deci, dacă aceste tipuri de curenți au o contribuție relevantă, ei trebuie incluși în câmpul de curent. Acest lucru s-a și realizat pentru deriva Stokes, însă în ceea ce privește curenții costieri generați de valuri efectul lor nu a fost luat în considerare întrucât pentru zonele costiere considerate (zonele de deltă și estuar) acțiunea acestor curenți nu este relevantă.

Modelul SWAN nu ia în calcul propagarea valurilor pentru condiții de curgeri supracritice, adică atunci când viteza de curgere a curenților este mai mare decât viteza locală a grupului de valuri în același sens de propagare. Deci, dacă o astfel de curgere este întâlnită în timpul calculelor atunci curentul este redus în mod local la o curgere subcritică. Din acest motiv în SWAN a fost introdus un parametru *frouddmax* (cu valoarea standard 0,8). Astfel, dacă viteza curentului este relativ mare, adică numărul Froude este mai mare decât *frouddmax*, el va fi redus la valoarea *frouddmax*.

O altă opțiune disponibilă în modelul SWAN, care este relaționată cu interacțiunea dintre valuri și curenți, se referă la posibilitatea ca să se schimbe schema numerică pentru refracție, de la o schemă centrală care este caracterizată prin cea mai mare acuratețe (difuzie zero) - dar calculul poate genera mai ușor fluctuații numerice, la o schemă de tip *upwind* de ordinul întâi, care este mai difuzivă și de aceea preferabilă dacă sunt prezenți gradientii puternici în ceea ce privește curenții sau batimetria. În simulările efectuate în prezentul studiu, parametrul *frouddmax* a fost setat la valoarea 0,9 (în loc de 0,8) iar parametrul *CDD* la valoarea 1, aceasta schimbând schema de calcul de la una centrală care are difuzie scăzută la una *upwind* de ordinul întâi, care este mai difuzivă și de aceea preferabilă în situația în care apar variații mari în câmpul de curenți. *Figura 5-7* ilustrează focalizarea costieră a sistemului de predicție a valurilor bazat pe modelul SWAN. Cazul prezentat corespunde momentului de timp 2002/02/04/h18 și reflectă o situație energetică, dar nu extremă. Condițiile de vânt și de curenți sunt cele indicate în *Figura 5-6*. Astfel, *Figura 5-7(a)* prezintă simularea la nivelul global care corespunde întregului bazin al Mării Negre, pe fundal este prezentat câmpul vânturilor semnificative, iar în prim plan sunt reprezentați vectorii de undă (cu săgeți negre). Pentru aceste simulări câmpul de vânt global NCEP a fost utilizat pentru a furniza condiții de intrare modelului atmosferic regional REMO. Rezoluția spațială a vântului utilizat a fost 2.5° iar pasul de timp de o oră.

Figura 5-7(b) ilustrează rezultatele simulărilor la nivel costier iar *Figura 5-7(c)* ilustrează rezultatele simulărilor corespunzătoare nivelului local fără a lua în considerare însă efectul curenților. În mod alternativ, pentru a se observa mai bine efectul acestor curenți în *Figura 5-7(d)* sunt ilustrate rezultatele obținute atunci când câmpul de curenți este introdus. Se

observă comparând *Figura 5-7(c)* cu *Figura 5-7(d)* că prezența curenților de la gurile Dunării modifică local dar considerabil înălțimile semnificative. Acest lucru se observă cu precădere la Brațele Sulina și Sfântul Gheorghe.

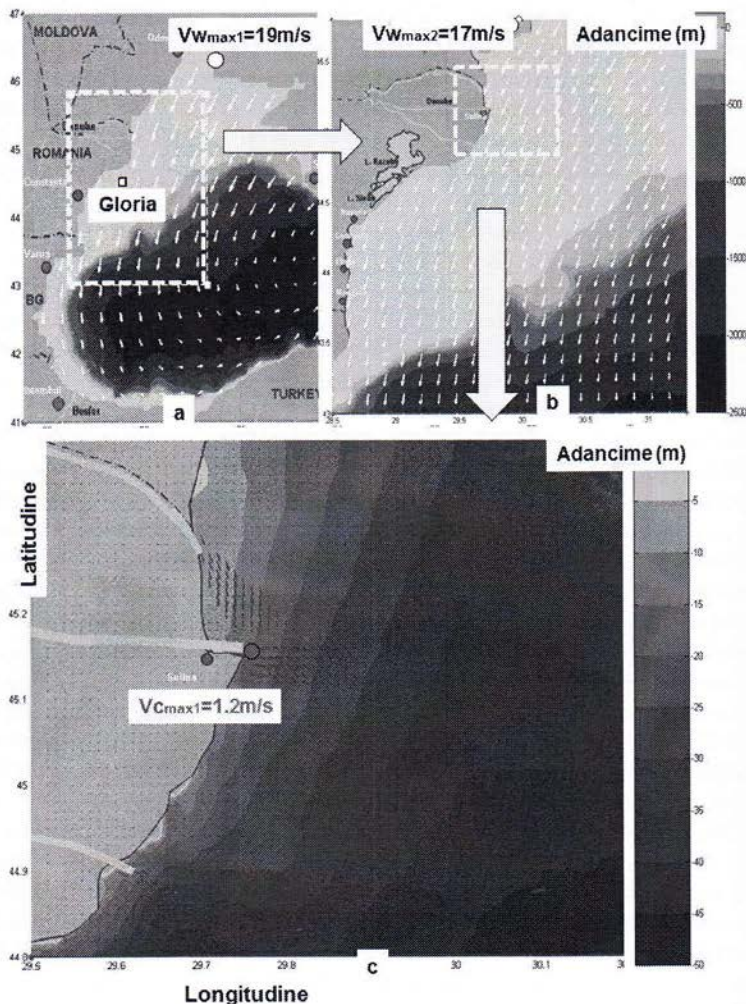


Figura 5-6 Focalizarea sistemului de predicție a valurilor către Delta Dunării; a) Nivelul I – aria de generare, b) Nivelul II – transformarea costieră; c) Nivelul III – simularea efectelor locale (curenții induși de vărsarea fluviului Dunărea). Pe fundal este reprezentată harta barometrică a domeniilor de calcul în prim plan pentru nielele I și II, vectorii de vânt corespunzător momentului de timp 2002/02/04/h18 (săgeți albe), și pentru nivelul III curenții de la gurile Dunării. Valorile maxime și locațiile lor în cadrul domeniilor de calcul sunt marcate cu cercuri.

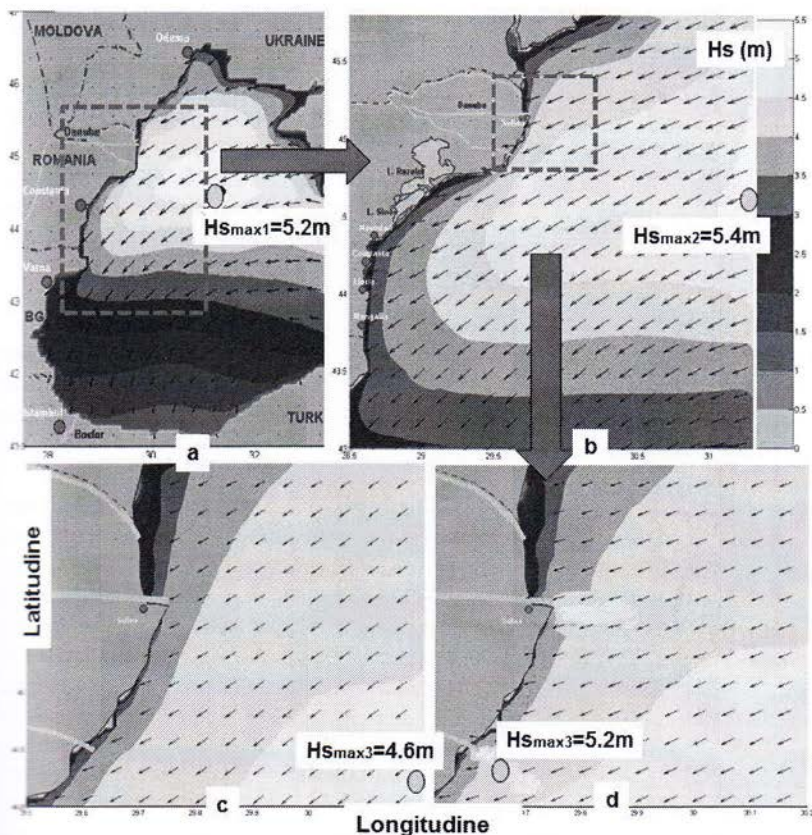


Figura 5-7 Focalizarea sistemului de predicție a valurilor către Delta Dunării, corespunzătoare momentului de timp 2002/02/04/h18; a) Nivelul I – aria de generare, simulări pentru întregul bazin al Mării Negre, b) Nivelul II – transformarea costieră; c) Nivelul III – aria locală fără a lua în considerare curenții induși de vărsarea Fluviului Dunăre; d) Nivelul III – aria locală luând în considerare; simularea efectelor locale (curenții induși de vărsarea Fluviului Dunăre). Pe fundal sunt reprezentate câmpurile de înălțime semnificativă iar în prim plan vectorii de val (săgeți negre), valorile înălțimilor maxime din domeniile de calcul sunt de asemenea indicate iar locațiile lor sunt marcate cu cercuri.

5.4. Analiza unor studii de caz

Întrucât viteza medie a vântului ca și perioadele de calm au un pronunțat caracter ciclic în Marea Neagră, vor fi analizate în continuare câteva studii de caz care pot fi considerate definitorii. Astfel, pentru a evalua interacțiunile dintre valuri și curenți la intrarea în Delta Dunării vor fi considerate trei studii de caz. Acestea corespund unor condiții de mediu care

pot fi considerate printre cele mai semnificative în ceea ce privește condițiile medii sau chiar mai înalt energetice din aria țintă.

Așa cum s-a arătat, obiectivul acestui capitol este să se studieze interacțiunea dintre valuri și curenți de la gurile Dunării în diverse condiții energetice pentru a putea cuantifica influența acestor procese în navigația costieră. Trebuie totuși menționat că, deși înalt energetice, cazurile analizate nu reprezintă evenimente extreme și nici măcar vârfuri ale furtunilor. Aceasta deoarece, în astfel de condiții extreme, navigația la gurile Dunării este în general închisă, în timp ce evident că prezintă interes real pentru studiu situațiile când navigația, deși mai dificilă, este totuși încă permisă.

5.4.1. Cazul I – Vânt foarte slab

Primul studiu de caz considerat se referă la situația reală care a fost întâlnită la momentul de timp 2002/04/16/h22. Această situație este caracterizată prin condiții de val de intensitate medie și vânt foarte slab. Deși sectorul costier considerat este în general caracterizat prin vânturi destul de puternice, situația vântului slab reprezintă totuși un caz semnificativ. În această situație curenții luați în considerare sunt doar aceia generați de fluviu.

Simulările realizate în aria de înaltă rezoluție sunt ilustrate în *Figura 5-8 (a și b)*. Astfel *Figura 5-8(a)* prezintă câmpul scalar al înălțimilor semnificative și vectorii de undă corespunzând simulărilor realizate fără a considera câmpul de curenți, iar *Figura 5-8(b)* prezintă rezultatele simulărilor realizate în aceleași condiții dar având inclus și câmpul de curenți. *Figura 5-99(a)* ilustrează câmpul variațiilor înălțimilor semnificative datorită curenților, variația fiind calculată: înălțimea semnificativă rezultată din simulările în care este inclus câmpul de curenți din care a fost scăzută înălțimea semnificativă rezultată în urma simulărilor efectuate fără a include câmpul de curenți. Câmpul de curenți este figurat de asemenea (cu săgeți de culoare roșie). În *Figura 5-9(a)* sunt marcate de asemenea punctele în care variația acestui parametru (H_s) are valori maxime. Aceste puncte au fost notate cu PR1 (punctul de referință 1), care este localizat în fața Brațului Sfântu Gheorghe și PR2 (punctul de referință 2), în fața Canalului Sulina. Spectrele 1D pentru cele două puncte de referință corespunzând celor două situații considerate (respectiv fără și cu curenți) sunt ilustrate în *Figura 5-1(a și b)*. În *Figura 5-11(a)* sunt prezentate spectrele 2D în punctul PR1 în situația fără curenți în timp ce *Figura 5-11(b)* ilustrează spectrele 2D pentru aceleași puncte, dar pentru situația când câmpul de curenți a fost inclus în simulările cu modelul SWAN.

5.4.2. Cazul II – Vânt puternic care bate dinspre nord-est

Cel de-al doilea studiu de caz se referă la situația întâlnită la data 2002/02/04/h09, și care este caracterizată prin condiții de val puternice și vânt care suflă de la nord-est. Aceasta este de fapt situația înalt energetică cea mai comună pentru zona respectivă. În astfel de condiții curentul generat de vântul local nu mai poate fi neglijat și trebuie adăugat la curenții generați de vărsarea fluvialului în mare. Pentru aceasta a fost implementat un model care permite estimarea rapidă a contribuției vântului, dar și a curenților induși de valuri în zonele din spre larg. Simulările realizate în aria de înaltă rezoluție sunt ilustrate în *Figura 5-8(c și d)*. Astfel, *Figura 5-8(c)* prezintă câmpul scalar al înălțimilor semnificative și vectorii de undă

corespunzând simulărilor realizate fără a considera câmpul de curenți, iar *Figura 5-8(d)* incluzând curenții. *Figura 5-9(b)* prezintă câmpul variațiilor înălțimilor semnificative datorită curenților corespunzător acestui studiu de caz. Spectrele 1D pentru cele două puncte de referință corespunzând celor două situații considerate sunt ilustrate în *Figura 5-1(c și d)*. În *Figura 5-11(c)* este prezentat spectrul 2D în PR1, pentru situația fără curenți, în timp ce și *Figura 5-11(d)* ilustrează spectrul 2D pentru aceleași punct, dar pentru situația când câmpul de curenți a fost inclus.

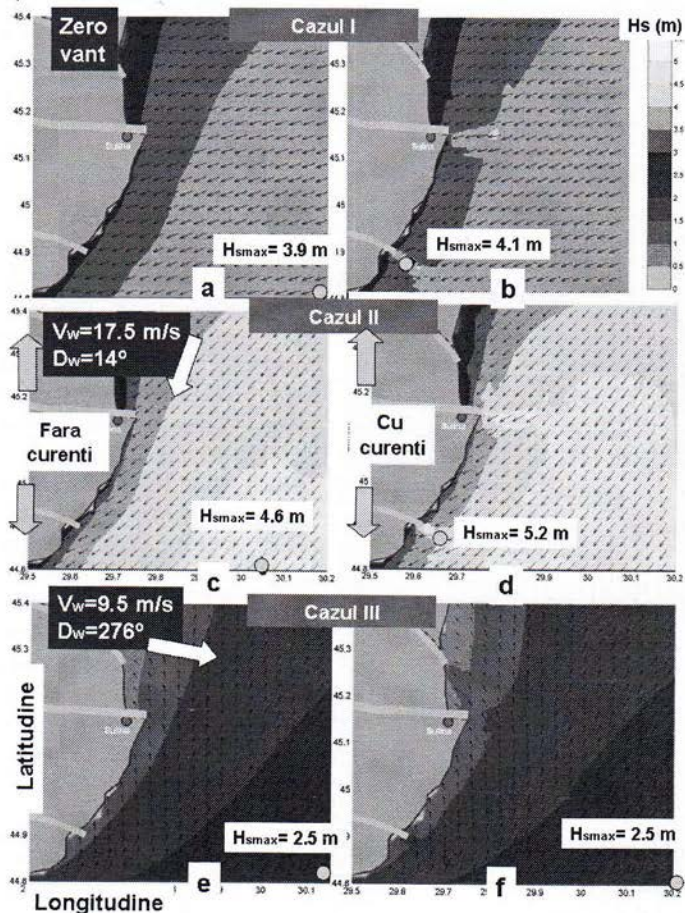


Figura 5-8 Studii privind efectul curenților asupra valurilor în zona ținta. Cazul I – 2002/04/16/h22 condiții de val medii fără vânt; a) simulări fără curenți; b) simulări cu curenți, Cazul II – 2002/02/04/h09 condiții de val medii spre înalte asociate cu vânt puternic bătând din spre nord est; c) simulări fără curenți; d) simulări cu curenți, Cazul III – 2002/04/18/h15 condiții de val medii asociate cu vânt care bate din spre vest; e) simulări fără curenți; f) simulări cu curenți.

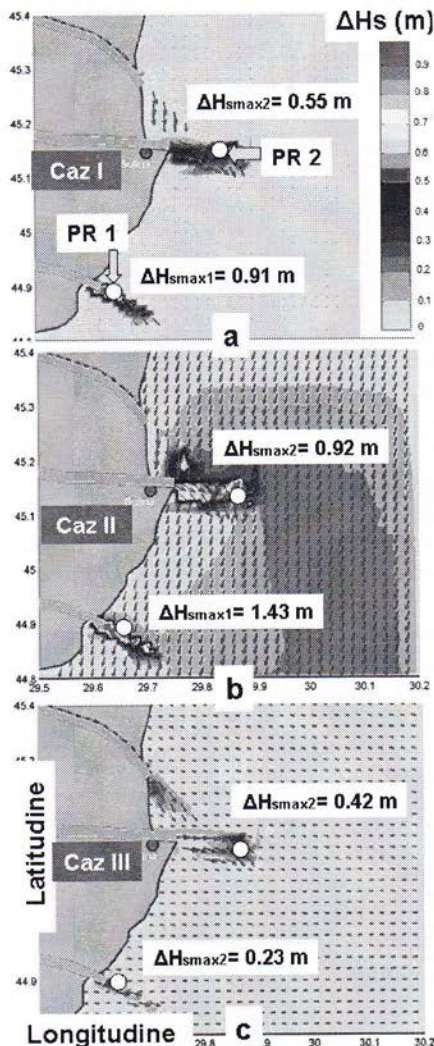


Figura 5-9 Influența curenților asupra înălțimii semnificative. Pe fundal este reprezentată variația înălțimii semnificative iar în prim plan câmpul de curenți este ilustrat cu săgeți roșii. a) Cazul I – 2002/04/16/h22; b) Cazul II – 2002/02/04/h09; c) Cazul III – 2002/04/18/h15.

5.4.3. Cazul III – Vânt care bate dinspre vest

Cel de-al treilea studiu de caz analizat se referă la situația întâlnită la data 2002/04/18/h15, care este caracterizată prin condiții energetice medii de val și vânt care bate din spre vest. Deși o astfel de situație nu poate fi considerată ca fiind cea mai probabilă, totuși poate fi întâlnită aproximativ 20% din timpul total anual. În acest caz, intensitatea curenților generați de vărsarea fluviului este crescută datorită efectului vântului.

Rezultatele simulărilor efectuate cu modelul SWAN pentru acest al treilea caz sunt ilustrate în Figura 5-8(e și f). Astfel, Figura 5-8(e) prezintă câmpurile scalare de înălțime semnificativă și vectorii de undă corespunzând simulărilor fără curenți, iar în Figura 5-8(f) sunt prezentate rezultatele simulărilor în care câmpul de curenți a fost inclus. Figura 5-9(c) prezintă câmpul variațiilor înălțimilor semnificative datorită curenților corespunzător acestui studiu de caz. Spectrele 1D pentru cele două puncte de referință corespunzând celor două situații considerate sunt ilustrate în Figura 5-1(e și f). În Figura 5-11(e) sunt prezentate spectrele 2D pentru PR1 considerate în situația fără curenți în timp ce Figura 5-11(f) ilustrează spectrul 2D pentru aceleași punct dar pentru situația când câmpul de curenți a fost inclus.

5.4.4. Cazul IV – Situație energetică extremă

Întrucât obiectivul prezentei teze de doctorat se referă la cele mai importante situații care se pot întâlni în zona de la vărsarea Dunării în mare, lucrarea nu ar fi completă dacă nu s-ar analiza și evenimentele extreme.

În consecință, un al patrulea studiu de caz a fost considerat, în încheierea acestei secțiuni care se referă la condițiile extreme care pot fi așteptate în zona costieră de la gurile Dunării. Acesta a fost numit studiul de caz IV și corespunde momentului de timp 2007/03/24/h03. Rezultatele studiului de caz sunt prezentate în *Figura 5-12*. Partea superioară (*Figura 5-12a*) prezintă câmpul de curenți corespunzător acestei situații, iar partea inferioară (*Figura 5-12b*) câmpul de înălțimi semnificative și vectorii de undă corespunzători. Așa cum rezultă din figura și în această situație prezența curenților induce variații mari în ceea ce privește înălțimile semnificative.

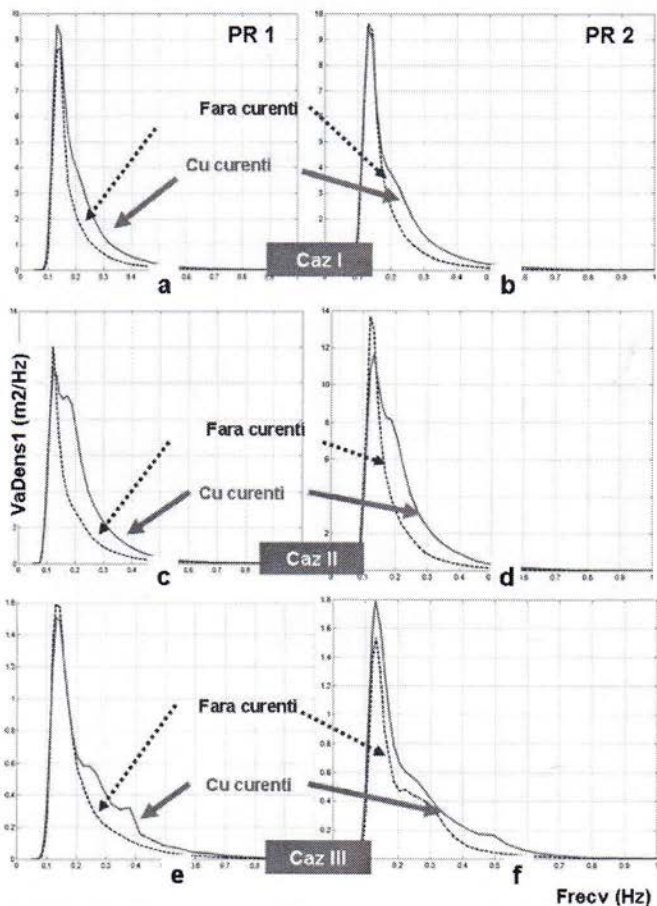


Figura 5-10 Analiza spectrala 1D în cele 2 puncte de referință (PR1 la intrarea în Brațul Sf. Gheorghe și PR2 la intrarea în Brațul Sulina). Comparații ale spectrelor 1D rezultate în urma simulărilor fără curenți și respectiv cu curenți a) Cazul I – 2002/04/16/h22; b) Cazul II – 2002/02/04/h09; c) Cazul III – 2002/04/18/h15.

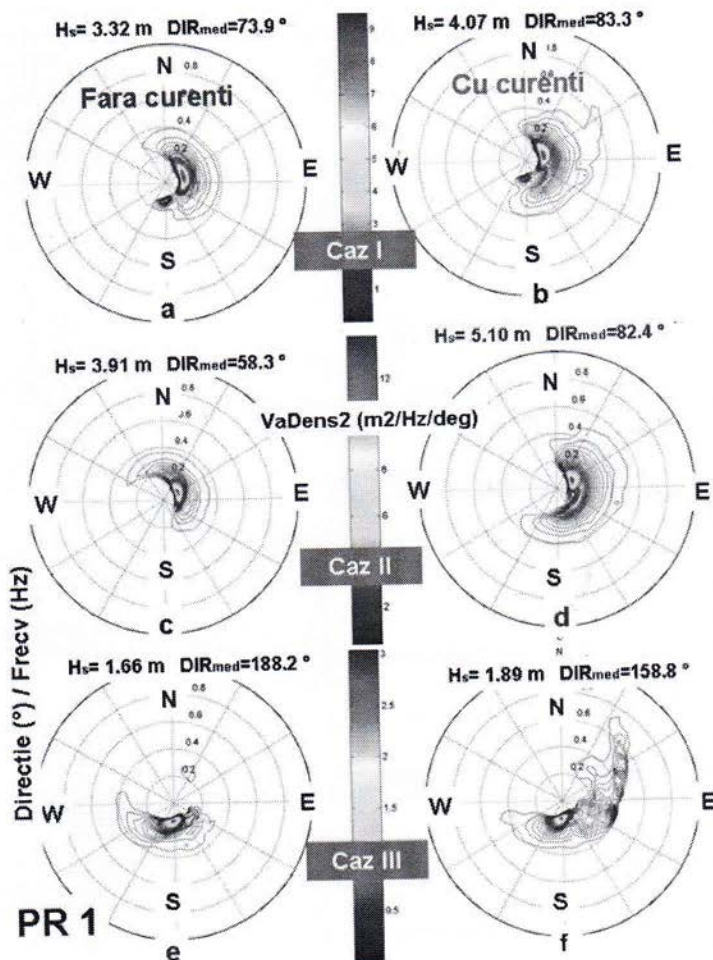


Figura 5-11 Analiza spectrala 2D în PR1. Reprezentarea spectrului bidimensional rezultat în urma simulărilor fără curenți și respectiv cu câmpul de curenți inclus. a) Cazul I – fără curenți; b) Cazul I – cu curenți; c) Cazul II – fără curenți; d) Cazul II – cu curenți; e) Cazul III – fără curenți; f) Cazul III – cu curenți.

Doău linii care urmăresc creșterile cele mai mari ale valurilor sunt de asemenea figurate, iar pe aceste linii sunt indicate punctele de referință care reprezintă punctele în care se întâlnesc cele mai mari variații locale ale înălțimilor semnificative. Astfel variațiile maxime absolute apar din nou la Brațul Sfântul Gheorghe unde $\Delta H_{s1} = 1,72$ m în timp ce la Brațul Sulina variația cea mai mare este $\Delta H_{s2} = 1,16$ m.

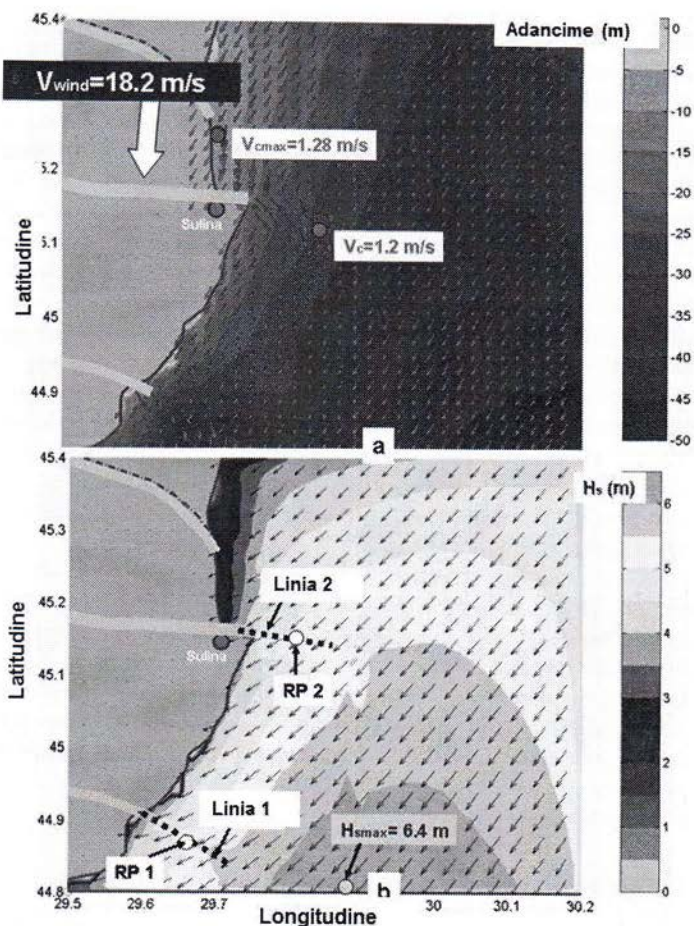


Figura 5-12 CS IV, situație energetică extremă corespunzătoare momentului de timp 2007/03/24/h03. a) în fundal este reprezentată harta barometrică în timp ce în prim plan câmpul de curenți considerat; b) în prim plan sunt figurați vectorii de undă iar pe fundal câmpurile scalare de înălțime semnificativă. Dinău linii care urmăresc direcțiile principale ale curenților sunt reprezentate și pe fiecare linie este indicată poziția punctelor de referință considerate.

5.5. Discuție privind rezultatele modelării proceselor hidro dinamice de la gurile Dunării

Din analiza celor patru studii de caz considerate se pot trage niște concluzii privind efectele interacțiunii dintre valuri și curenți la vărsarea Dunării în mare, așa cum sunt ele reflectate de rezultatele simulărilor cu modelele numerice. Aceste efecte reprezintă de fapt

principalul factor care antrenează procesul aluvionar deosebit de dinamic din zona costieră considerată, dar influențează de asemenea în mod semnificativ și navigația costieră, care este și ea foarte importantă fiindcă zona respectivă este, în general, supusă unor condiții de intens trafic naval. Dintre cele trei Brațe ale Dunării, Chilia, Sulina, și Sfântu Gheorghe, se poate considera că efectul vărsării prin Brațul nordic Chilia este probabil cel mai ne semnificativ. Datorită acestor particularități, în această zonă interacțiunile dintre valuri și curenți nu produc de obicei modificări notabile în câmpul de valuri. Așa cum arată rezultatele, cele mai puternice interacțiuni dintre valuri și curenți au loc la vărsarea Brațului Sfântu Gheorghe, în sud. De altfel, în această zonă procesul aluvionar este și cel mai activ și a condus la apariția sistemului insular Sacalin. În ceea ce privește navigația, importanța cea mai mare o au evident efectele interacțiunii dintre valuri și curenți de la intrarea în Canalul Sulina, care reprezintă principala poartă de intrare în coridorul VII Pan-European de transport.

Au fost considerate inițial trei studii de caz, care corespund la trei situații reale și care acoperă întrucâtva trăsăturile cele mai reprezentative ale matricii de mediu din această zonă. A fost realizată de asemenea o analiză cantitativă a valorilor parametrilor locali în regiunile cele mai afectate de interacțiunea dintre valuri și curenți, respectiv punctul de referință 1 (PR1) localizat în fața Brațului Sfântu Gheorghe și punctul de referință 2 (PR2) localizat în dreptul vărsării Brațului Sulina.

Așa cum arată rezultatele obținute pentru studiile de caz I, II și IV pentru situațiile înalt energetice au loc creșteri mai mari ale înălțimii semnificative la Brațul Sfântul Gheorghe și aceste creșteri sunt cu atât mai mari atât în valoare absolută dar și în termeni relativi cu cât înălțimile semnificative sunt mai mari. Aceiași tendință apare și la Bara Sulina, dar creșterile sunt mai mici în termeni relativi. Studiul de caz II se referă la o situație cu energie medie (dar și la o direcție medie a valurilor diferită), și în acest caz se observă o creștere a înălțimii semnificative însă în termeni relativi influența curențului este mai mare la intrarea în Brațul Sulina, unde creșterea relativă este de 37%, în comparație cu cea de la Brațul Sfântul Gheorghe, care este de 16%.

5.6. Evaluarea riscului de apariție a valurilor anormale

În acest punct se va explora pe scurt și o altă direcție deosebit de importantă privind modul cum sunt afectate valurile de interacțiunea cu curenții trecând în acest fel de la modelarea statistică a valurilor, la modelarea lor probabilistică. Aceasta înseamnă că datorită curenților opuși, înălțimile valurilor nu mai pot fi considerate ca având o distribuție Rayleigh și ca urmare înălțimea maximă a valurilor devine mai mare decât dublul înălțimii semnificative. Astfel de valuri cu înălțimi mult mai mari decât media se numesc valuri anormale (*Freak waves* sau *Rogue waves* în literatura de limbă engleză). Astfel de valuri sunt, evident, foarte periculoase pentru navigația costieră și studiul mecanismelor care provoacă aceste valuri nu este încă complet elucidat. Totuși, experiența a arătat că una din principalele cauze care generează acest tip de valuri sunt interacțiunile dintre valuri și curenții opuși.

În acest context, probabilitatea de apariție a unor astfel de valuri în zona de la gurile Dunării a fost de asemenea evaluată. În teoria spectrală probabilitatea apariției acestor valuri

se cuantifică cu indicele *BFI* (Benjamin-Feir Index). Această mărime a fost introdusă de Janssen (2003) și este definită ca:

$$BFI = \sqrt{2\pi} St \cdot Q_p \quad (5.1)$$

în care *St* reprezintă o mărime integrală care exprimă panta valului și este calculată ca raportul dintre înălțimea semnificativă și lungimea valului, iar Q_p caracterizează forma vârfului spectral

Rezultatele experimentale ale lui Onorato și alții (2009) arată că pentru un indice $BFI = 0,2$ înălțimea de val maximă este bine descrisă de distribuția Rayleigh în timp ce pentru valori ale indicelui *BFI* între 0,9 și 1,2 raportul H_{max}/H_s este subestimat substanțial de distribuția Rayleigh. Pentru a da deci o imagine mai completă a interacțiunii dintre valuri și curenți în zona de la gurile Dunării, a fost evaluată variația indicelui *BFI* în trei puncte diferite. Astfel, *Figura 5-13* prezintă variația acestui indice în domeniul de calcul de la Delta Dunării pentru simulări corespunzătoare intervalului de trei luni de la începutul anului 2007.

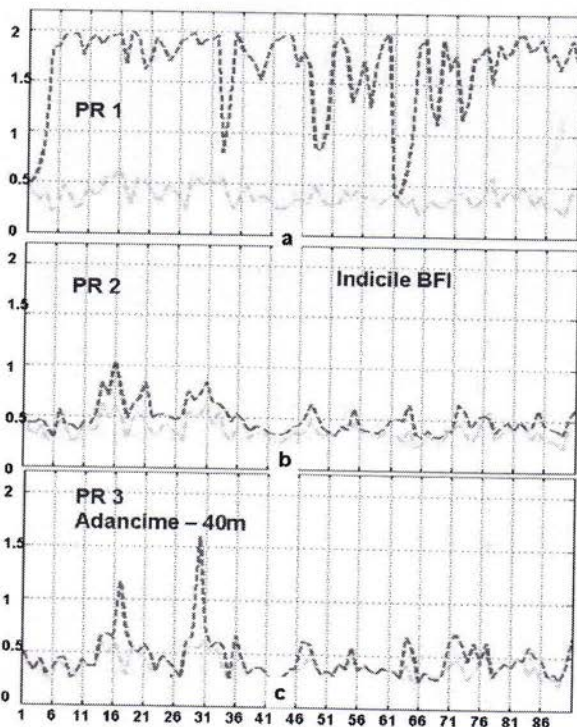


Figura 5-13 Variația indicelui *BFI* pentru intervalul de timp (2007/01/01 – 2007/03/31). a) PR1 (în față la canalul Sfântu Gheorghe); b) PR2 (în față la canalul Sulina); a) PR3, punctual de referința 3 de coordonate 30°E / 45°N, corespunzător la o adâncime medie (40m).

Trei puncte de referință au fost considerate *Figura 5-13*. Punctele PR1 și PR2 la intrările în Brațele Sfântu Gheorghe și Sulina (așa cum au fost definite în secțiunile anterioare) și un alt punct notat cu PR3, care este situat în apă de adâncime medie (40m), în afara influenței curenților generați de fluviu, dar unde acționează curenții generați de vânt și deriva Stokes. *Figura 5-13(a)* ilustrează foarte clar faptul că interacțiunea dintre valuri și curenți induce în sectorul din fața Canalului Sfântu Gheorghe un risc înalt de apariție al valurilor anormale, ceea ce înseamnă că raportul dintre înălțimea maximă și cea semnificativă este mai mare decât 1,86, așa cum rezultă din distribuția Rayleigh. Pe de altă parte, în punctul PR2, deși viteza curentului este relativ mare (0,68m/s), *Figura 5-13(b)* ilustrează creșteri mai mici ale indicelui *BFI* și variații în general mai mici ale acestui parametru. O altă concluzie ar fi și că, chiar și un curent relativ mic în intensitate poate genera o creștere substanțială a indicelui *BFI* așa cum se poate observa din *Figura 5-13(c)*.

Se poate deci concluziona faptul că în zona costieră de la intrarea în Delta Dunării, care reprezintă de fapt o zonă costieră neconvențională și care este supusă în general unui intens trafic de navigație și unor procese sedimentare active, interacțiunea dintre valuri și curenți reprezintă cel mai relevant proces hidrodinamic. Aceste interacțiuni conduc la creșteri însemnate în câmpurile de înălțimi semnificative, dar și la modificarea distribuției înălțimilor de val și la apariția înălțimilor de val anormale, care reprezintă un pericol deosebit pentru navigație.

5.7. Simulări de înaltă rezoluție la bara Sulina

Predicțiile modelului SWAN arată că modelul reprezintă, în general, corect efectul curenților asupra valurilor. Totuși așa cum rezultă din capitolul patru, pentru o cât mai bună reprezentare a efectului acțiunii curenților asupra valurilor apare ca necesară o rezoluție mai mare în spațiul geografic. Pentru aceasta, a fost definit un nou domeniu de calcul pentru modelul SWAN cu rezoluție de 50m (ceea ce înseamnă de zece ori mai mare decât domeniul considerat anterior), care este focalizat doar de zona de la bara Sulina. O batimetrie cu o rezoluție de câțiva metri furnizată de către AFDJ Galați (Administrația Fluvială a Dunării de Jos) a fost de utilizată pentru a genera acest nou domeniu de calcul. Harta batimetrică a acestei arii este ilustrată în *Figura 5-14* împreună cu curenții induși de Dunăre. Principalele caracteristici ale domeniului considerat pentru simulările cu modelul SWAN, împreună cu câmpurile de input și principalele procese fizice activate în cadrul modelului, sunt prezentate în *Tabelul 8*.

Tabelul 8 Caracteristici ale domeniului de calcul definit pentru simulările cu modelul SWAN.

SWAN	Coord		$\Delta x \times \Delta y$	$\Delta \theta$	<i>md</i>	<i>nf</i>	<i>nθ</i>	$ngx \times ngy = np$				
			(m)	(°)								
	Cartezian		50 × 50	5	stat	35	36	135×216 = 29160				
Input/ Proces	Wv	Wi	T	C	G	W	Qd	Tri	Dif	Bf	Set	Br
	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X

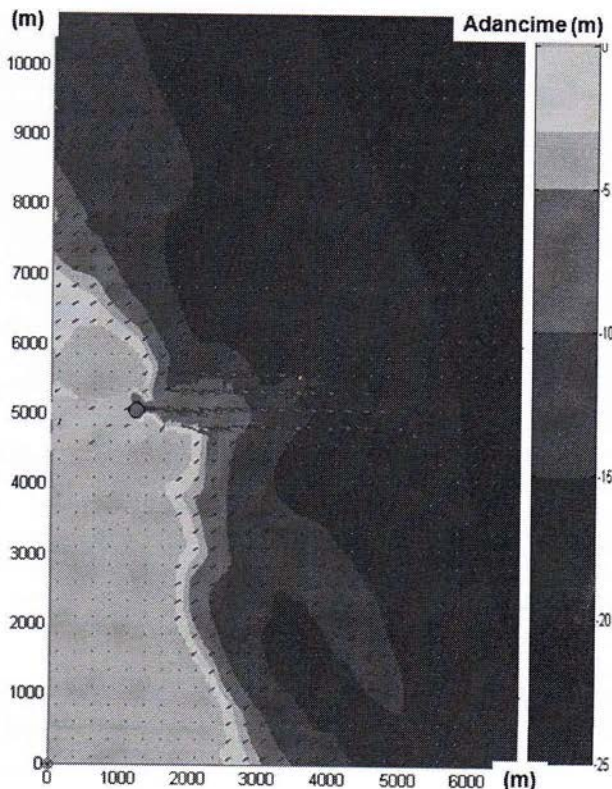


Figura 5-14 Harta batimetrică a domeniului de calcul de înaltă rezoluție și curenții induși de Dunăre la Brațul Sulina

Câmpurile de input și procesele fizice activate sunt de asemenea indicate. Astfel, W_v – reprezintă forțarea prin valuri pe frontiera externă, T – reprezintă nivelul de maree, W_i – este vântul, C – reprezintă curenții, G – indică generarea prin vânt, W – reprezintă activarea procesului de înșumare, Q_d – indică interacțiunile neliniare de tip cuadruplet, Tri – indică interacțiunile neliniare de tip triadă, Dif – indică activarea procesului de difracție, Bf – reprezintă frecarea cu fundul mării, Set – este înălțarea apei datorită valurilor, Br – reprezintă spargerea valurilor indusă de scăderea adâncimii. În plus, de data aceasta a fost utilizat sistemul de coordonate cartezian care este mai potrivit pentru simularea unor procese costiere cum ar fi difracția și creșterea nivelului apei datorită valurilor.

Din analiza condițiilor de val și curent prezentate în secțiunile și, respectiv, capitolele anterioare, au fost definite principalele caracteristici ale valurilor și curenților considerate în această parte finală a studiului. Astfel curenții induși în mare variază, în general, de la 1,2m/s la gurile Dunării, la 0,3m/s în spre larg. Cea mai definitorie trăsătură a valurilor este că

acestea vin în mare proporție din spre nord est, dar totuși valuri venind din est sau din sud est sunt de asemenea întâlnite. Din acest motiv, gama direcțională considerată este în intervalul $30^\circ - 150^\circ$ în convenția Nautică. În ceea ce privește înălțimile semnificative (H_s) intervalul considerat este între 1m și 5m. Simulări cu modelul SWAN au fost realizate în intervalele definite pentru parametrii H_s și direcția medie a valurilor cu un pas de 0,5m pentru H_s și 10° pentru direcția valurilor. În acest fel, sunt acoperite cele mai multe dintre situațiile care pot apărea în zona costieră considerată. Câmpurile de val din care rezultă efectele curenților asupra valurilor corespunzând la condiții înalt energetice (înălțime semnificativă de 5m pe frontiera externă) sunt ilustrate în *Figura 5-15*, în timp ce pentru condiții energetice medii (înălțime semnificativă de 2m pe frontiera externă) sunt ilustrate în *Figura 5-16*. Astfel, în cele două figuri, trei direcții de propagare sunt considerate pentru valurile care ajung pe frontiera externă (din spre partea de est). Acestea corespund la direcțiile 60° , 90° și respectiv 120° . Așa cum se poate observa foarte clar din aceste două figuri, curenții produși de fluviul Dunărea induc în zona de impact cu valurile incidente creșteri relevante ale înălțimilor semnificative și acestea sunt mai mari atunci când direcția valurilor este din spre est sau sud est. Analizele din spațiul geografic prezentate în sunt continuate de analize în spațiul spectral.

Astfel, transformarea unui spectru bidimensional JONSWAP este ilustrată în *Figura 5-17* pentru înălțimea semnificativă de 2m și pentru direcția valurilor pe frontiera externă venind din spre est. Aceste situații privind direcția valurilor din spre est au rezultat ca fiind cele mai relevante din punct de vedere al modificării formei și parametrilor spectrali. Așa cum se poate observa din figură prezența curenților modifică considerabil forma spectrului mai ales prin dispersia energiei valurilor către domeniul de înaltă frecvență.

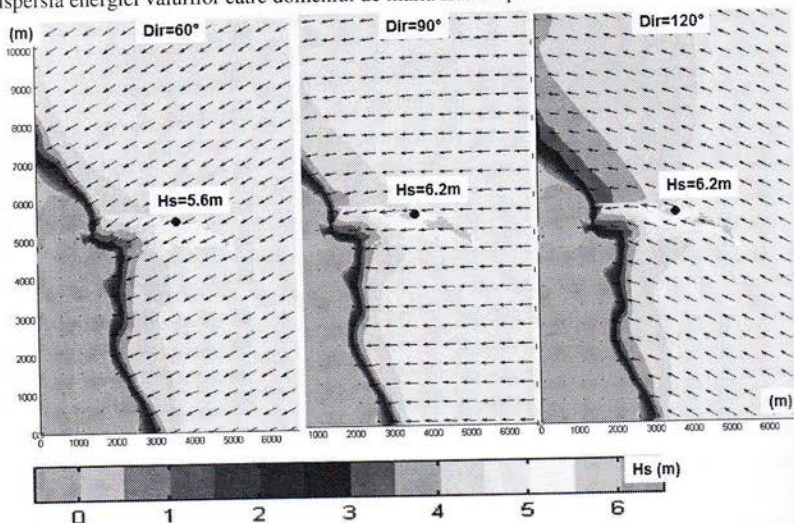


Figura 5-15 Câmpuri de înălțimi semnificative (H_s) și vectori de val pentru o situație de energie înaltă. Condiții de frontieră inițiale, $H_s = 5m$ și Dir (direcția medie a valurilor) 60° , 90° și 120° .

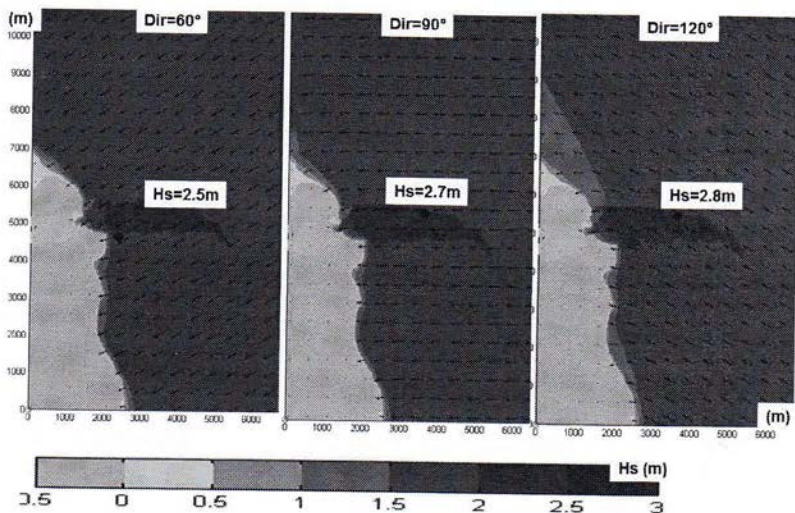


Figura 5-16 Câmpuri de înălțimi semnificative (H_s) și vectori de val pentru o situație de energie medie. Condiții de frontieră inițiale, $H_s = 2m$ și Dir (direcția medie a valurilor) 60° , 90° și 120° .

Ultima etapă a acestui studiu se referă la evaluarea posibilității apariției valurilor anormale așa cum rezultă din simulările cu modelul SWAN din domeniul de calcul cu rezoluție înaltă. Astfel, Tabelul 9 prezintă valorile maxime ale lui H_s (H_{smax}), dar și valorile indicelui BFI (I_{BFI}) pentru cele mai relevante cazuri considerate în simulările efectuate cu modelul SWAN în intervalele de înălțimi semnificative și direcții considerate.

Tabelul 9 Valorile maxime ale lui H_s (H_{smax}) și valorile indicelui BFI (I_{BFI}).

$H_s(m)/$ Dir ($^\circ$)	1		2		3		4		5	
	H_{smax}	I_{BFI}	H_{smax}	I_{BFI}	H_{smax}	I_{BFI}	H_{smax}	I_{BFI}	H_{smax}	I_{BFI}
30	1.23	0.73	2.35	1.25	3.33	1.22	4.33	1.14	5.3	0.91
60	1.30	0.78	2.50	1.47	3.56	1.6	4.60	1.50	5.64	1.40
90	1.38	0.87	2.73	1.75	4.01	1.87	5.20	1.83	6.17	1.67
120	1.42	0.94	2.77	1.40	4.06	1.71	5.27	1.67	6.21	1.52
150	1.38	0.85	2.55	1.27	3.62	1.38	4.71	1.38	5.68	1.29

Valorile cele mai mari ale indicelui BFI indică faptul că, datorită curenților, valurile nu se mai încadrează în procesele de bandă îngustă și deci nu mai pot fi approximate printr-o distribuție Rayleigh. Aceasta înseamnă că raportul H_{smax}/H_s , care în cazul distribuției Rayleigh are o valoare apropiată de 1,86, poate avea valori mult mai mari datorită interacțiunilor dintre valuri și curenți, având ca și consecință faptul că valuri cu înălțimi foarte mari pot apărea în această zonă.

Așa cum s-a văzut în secțiunile anterioare, existența curenților crește în mod substanțial înălțimile semnificative ale valurilor, dar valorile ridicate ale indicelui BFI arată faptul că prezența curenților opuși mărește nu numai înălțimile semnificative, dar chiar raportul dintre

înălțimea maximă a valurilor și înălțimea semnificativă devine, în acest caz, mai mare ceea ce conduce la producerea așa numitelor valuri anormale (la care raportul dintre înălțimea maximă și înălțimea semnificativă este mai mare decât doi).

Din Tabelul 9 rezultă că cele mai mari valori ale indicelui BFI, apar în general când valurile se apropie din direcție aproximativ normală la linia țărmului ($Dir=90^\circ$). În ceea ce privește valorile lui H_s , valoarea maximă a indicelui BFI apare pentru $H_s=3m$ ($I_{BFI} = 1,87$).

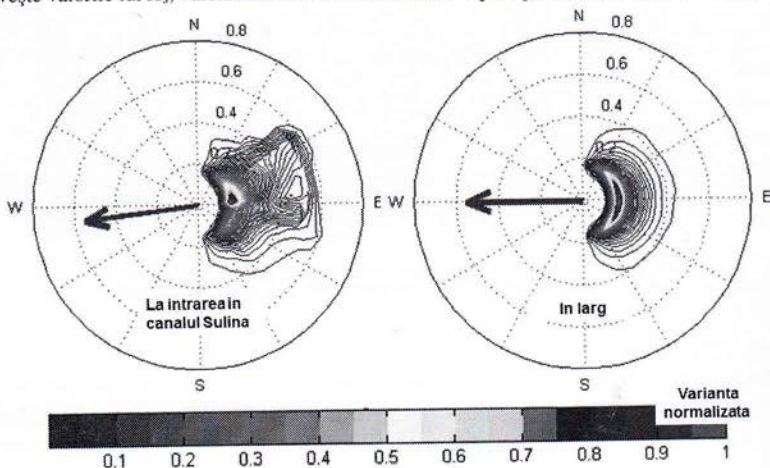


Figura 5-17 Transformarea unui spectru de val JONSWAP 2D dinspre larg la intrarea în canalul Sulina, pentru condiții mediu energetice $H_s = 2m$, $Dir = 90^\circ$.

În încheierea acestui capitol, care se referă la modelarea valurilor în Marea Neagră și mai ales în zona costieră de la gurile Dunării unde procesul dominant este reprezentat de interacțiunea dintre valuri și curenți, câteva aspecte considerate mai importante vor fi subliniate. Procesele fizice dominante au fost studiate la diverse scări. Astfel, la scara întregului bazin al Mării Negre accentul a fost pus pe influența proceselor din apă adâncă, respectiv transferul de energie de la vânt la valuri, disiparea prin înșpumare și interacțiunile neliniare dintre valuri de tip cuadruplet. Sistemul a fost focalizat apoi spre coasta de vest și rezultatele din două arii succesive care acoperă întreaga coastă de vest și, respectiv, arile litorale românească și bulgărească. Prezența curenților a fost considerată în două arii cu rezoluții diferite iar rezultatele au fost analizate în ambele cazuri, atât în spațiile geografice, cât și spectrale. Prima arie a fost definită în coordonate sferice (latitudine, longitudine), având rezoluția în spațiul geografic de aproximativ 500 m și acoperind întreaga zonă de la gurile Dunării. Studiul a diverse situații reale a arătat că prezența curenților de la vărsarea Dunării în mare conduce la o creștere considerabilă a înălțimilor semnificative.

Rezultatele simulărilor cu modelele numerice arată că pentru situațiile înalt energetice zona cea mai sensibilă este cea de la vărsarea Brațului Sfântul Gheorghe, această tendință

indicată de model este de altfel confirmată și de realitate, întrucât procesul aluvionar cel mai activ are loc la sud de Brațul Sfântul Gheorghe. Pentru înălțimi semnificative cu valori medii și direcții ale valurilor din spre sud est, zona de la intrarea în Brațul Sulina apare cu variații mai mari în ceea ce privește înălțimea semnificativă. Rezultatele de la acest nivel de calcul, arată și că în zona de la Brațul Sfântul Gheorghe există riscuri mari de apariție a valurilor anormale la care raportul dintre înălțimea semnificativă și înălțimea medie este în general mai mare decât doi.

Ultima arie, este o un domeniu de calcul de înaltă rezoluție definit în sistemul de coordonate cartezian și care acoperă doar intrarea de la Brațul Sulina. Și aceste rezultate arată că influența curenților conduce la creșteri relevante ale înălțimilor semnificative, dar și al înălțimilor maxime.

Un rezultat interesant apare la analiza în spațiul spectral, când se compară rezultatele din ultimele două nivele de simulare. Astfel, dacă la nivelul cu rezoluție mai joasă, care acoperă întreaga zonă de la gurile Dunării, apare o împrăștiere vizibilă în înspre țărm a spectrului în direcție, la nivelul de calcul cu rezoluție înaltă apare o împrăștiere mai mare a spectrului în domeniul direcțiilor.

În focalizarea către gurile Dunării, sistemul bazat pe modele numerice a fost validat la diverse nivele. Acestea sunt nivelul I al întregului bazin al Mării Negre și nivelul II al focalizării regionale. Comparațiile cu măsurători de baliză și date de satelit arată că sistemul poate realiza predicții care sunt în general destul de precise.

Deși nu au existat măsurători în aria țintă care să permită o validare directă în ariile cu rezoluție înaltă, așa cum s-a arătat în capitolul anterior, comparații cu rezultatele experimentale din bazinul de încercări au fost realizate considerând influența curenților asupra valurilor. Acestea au fost efectuate în condiții similare cu cele care sunt întâlnite de obicei la gurile Dunării și indică faptul că modelul SWAN are capacitatea de modela efectul interacțiunilor dintre valuri și curenți și deci și sub acest aspect rezultatele simulărilor prezentate în acest capitol apar foarte credibile. Credibilitatea rezultatelor modelului este dată și de faptul că simulările indică tendințe confirmate și de realitate, cum ar fi faptul ca procesele cele mai intense au loc la gura Brațului Sfântul Gheorghe.

În completare la aceste simulări și pentru a furniza în afară de validarea indirectă și o validare directă a rezultatelor prezentate în acest capitol, în capitolul următor vor fi prezentate și rezultatele unor măsurători și experimente efectuate de doctorandă chiar în aria țintă.

CAPITOLUL 6

EXPERIMENTE ÎN TEREN

PENTRU STUDIUL

INTERACȚIUNII DINTRE VALURI

ȘI CURENȚI ÎN ZONA GURILOR

DE VĂRSARE ALE DUNĂRII

Regimul curenților din zona marină românească prezintă în general un caracter nepermanent datorită direcției dominante a vântului în Bazinul Nord-vestic al Mării Negre, dar și deversării fluviului Dunărea prin cele trei brațe principale ale sale, în cadrul determinat de curentul dominant al Mării Negre (curentul dominant Rim), care are o direcție sudică în zona aferentă țărmului românesc, fiind indus de forța Coriolis la nivelul întregului bazin, precum și de stratificația transversală a maselor de apă foarte puternică și stabilă în Marea Neagră. Corelația curenților de suprafață cu parametrii meteorologici de influență, respectiv între viteza vântului și viteza curentului pentru diferite direcții de acțiune ale vântului, relevă faptul că, preponderent, curenții de suprafață se intensifică în funcție de viteza vântului în direcțiile de nord și scad în intensitate atunci când direcția vântului se schimbă spre sud.

Regimul hidrologic al Dunării determină în zonele adiacente gurilor de vărsare, în situații de calm ale regimului marin, curenți orientați spre sud, având intensitatea medie pe coloana de apă cuprinsă între 30 și 50cm/s. Limita de separare a curenților pe coloana de apă în aceste zone apare în stratul saltului de densitate a apei, inducând circulației maselor de apă puternice mișcări transversale, care se evidențiază în reprezentările grafice prin înclinarea transversală a izoliniiilor de densitate, temperatură și salinitate, deosebit de puternică în zonele de vărsare.

Pentru apele costiere intens modificate din punct de vedere al intervenției antropice, sunt resimțite influențele orientării curentului general de la nord la sud, respectiv a orientării liniei țărmului și curbelor batimetrice, care induc o asimetrie considerabilă în distribuția direcțiilor de propagare a valurilor și curenților în zonele de mică adâncime din apropierea malului, prin reducerea fetch-urilor pentru vânturile de vest, precum și prin efectul refracției valurilor la apropierea de mal, care face ca crestele valurilor să devină paralele cu linia țărmului. Sunt induse astfel valori semnificative ale curenților longitudinali aferenți predominanței acestor valuri incidente, care se propagă, în 90% din cazuri, pe cele cinci direcții cuprinse între nord-est și sud-est, având magnitudini cuprinse în intervalul 30 - 150cm/s, cu efecte semnificative

asupra dinamicii apelor costiere, dar și sistemului costier pe ansamblu. Astfel, datorită intensificării rapide a vântului de NE, depășind uneori în rafale viteza de 50km/h, în perioada 15-18.01.2009 au eșuat în zona Sulina două nave cargo sub pavilion georgian: Turgut S și Jupiter (Figura 6-1).

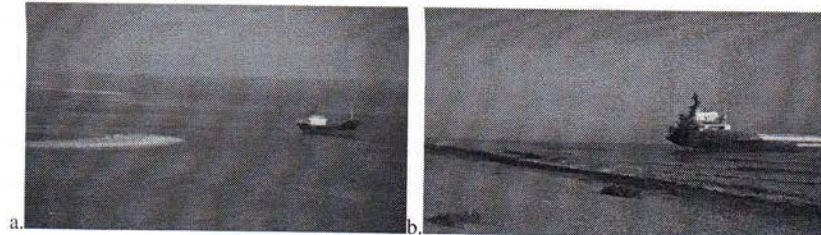


Figura 6-1 a. Nava Jupiter eșuată la sud de Plaja Sulina; b. Nava Turgut S eșuată la nord de Canalul Sulina

În situațiile menționate pe larg în cadrul părții introductive a lucrării prezente, s-a evidențiat necesitatea investigației proceselor hidrodinamice în zone adiacente gurilor de vărsare ale Dunării, și au relevat importanța măsurătorilor de teren în studiile de analiza și validare a modelelor numerice.

6.1. Metodologia măsurătorilor de curenți

Cunoașterea regimului hidrologic marin în diferite zone vulnerabile și/sau cu o dinamică deosebită, în zone adiacente RBDD este primordială în stabilirea metodelor de conservare regionale, sectoriale și locale; existența unor obstacole naturale sau rezultate în urma intervenției omului influențează semnificativ curgerea și, implicit, evoluția hidro-morfologică și comportarea proceselor hidromorfologice costiere.

6.1.1. Echipamentul utilizat la măsurători

- curentmetru cu efect Doppler: ADCP RDI Teledine WH600;
- curentmetru electromagnetic digital/ECM, model 808 Valeport;
- ambarcațiuni ușoare cu motor tip Bombard și/sau vapor;
- sisteme de poziționare DGPS: ProXH și GeoXH (precizie orizontală PPK: 10-30cm);
- soft specializat de colectare date survey, programe de calcul/software de procesare, modelare, cartare și analiză spațială/GIS/prelucrare și analiză date de teledetecție.

Măsurătorile hidrologice (măsurătorile de profile de curenți/debite în puncte și secțiuni transversale reprezentative) au fost efectuate prin două metode:

- curentmetrul RDI Workhorse Sentinel 600KHz (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler) dispus în plan lateral pe barca bombard, pentru domeniul de adâncime 4-30m,
- curentmetrul electromagnetic ECM Valeport 808, pentru măsurători în puncte/stații.

S-a urmărit înregistrarea vitezelor orizontale și verticale pe profile transversale caracteristice în funcție de adâncime, prin folosirea curentmetrului Doppler în diferite

regimuri hidrologice ale Dunării, în vederea construirii unei imagini clare vs. influența penei de apă dulce asupra zonelor învecinate gurilor de vărsare (curba de corelație între debit și aria influențată/cota apelor și debitul de apă scurs în diferite secțiuni, calcularea bilanțului hidric/cuantificarea parametrilor mișcării maselor de apă în vecinătatea țărmlui, etc.); pentru înregistrarea vitezei absolute a curentului față de patul solid al mării, ADCP-urile sunt dotate cu un modul adițional specific, Bottom track/modul de urmărire a vitezei absolute față de fund. Astfel, curenții marini/costieri, respectiv debitele la locațiile rețelei de monitorizare alese, au fost măsurate în diferite domenii de adâncime, folosind ambarcațiuni specifice, dotate cu suportți laterali de prindere verticală a traductorilor acustici Doppler, confecționați din material nemagnetic, setați pe intervale verticale de măsurare de 0,5m, pentru ca astfel software-ul intern al ADCP-ului să reconstituie profilul de curent în întreaga coloana de apă la o rezoluție verticală și temporală mare, la viteze diferite (cca 1 MN, sau maxim de 2.5km/h), știindu-se faptul că ADCP-ul produce viteze eronate în prezenta bulelor de aer, la viteze mari ale navei/bărcii. Datele de viteză/debit, adâncime, temperatura și poziția au fost colectate și prelucrate cu ajutorul soft-ului RDI Teledyne, WinRiver.

Datele de poziționare în teren au fost asigurate de un sistem DGPS Trimble GeoXH cu precizie decimetrică în varianta PPK (postprocesare), și au fost integrate de software-ul furnizat de RD Instruments, instalat pe un laptop. Astfel, măsurătorile efectuate pe intervale regulate de timp și spațiu în întreaga coloană de apă furnizează un profilul de curent, pe secțiuni longitudinale sau transversale de cca. 200m-2km, în funcție de dispunerea obstacolelor marine existente în zona de măsurare. DGPS urile folosite au furnizat date georeferențiale în funcție de viteza medie a bărcii la intervale predefinite (în general, de o secundă), dar și de efectul variabilitatea naturală a obstacolelor și starea mării, urmând transecțiuni predefinite, care asigură o acoperire corespunzătoare a zonelor de interes/în regim modificat de prezența gurilor de vărsare (Figura 6-2). Datele ADCP/măsurătorile curenților/debitelor de curgere au fost prezentate ca seturi de vectori, profile de viteză, profile intensitate backscatter și date numerice/text, care au fost ulterior reprezentate în softuri dedicate cartografiei digitale – aferente pachetului de programe ArcGIS.

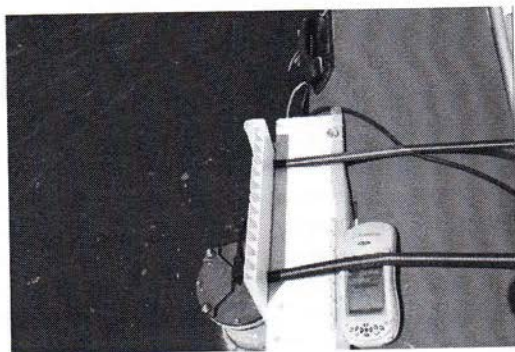


Figura 6-2 ADCP montat lateral pentru efectuarea măsurătorilor de curenți în zona costieră

Datele colectate în teren au fost de tip cantitativ și calitativ. Cele cantitative s-au determinat cu aparatură oceanografică, fiind apoi codificate în format electronic și stocate în baza de date. Datele calitative au constat în observații vizuale, fotografii și înregistrări video.

Fluxul de date aferent sistemului de monitorizare-modelare aplicat regimului de val și curenților din zona coastei Deltei Dunării a inclus următoarele componente:

1. Date meteo-hidrologice: precipitații, vânt, val și nivel, curenți/debite, etc.;
2. Date de geomorfologie a plajelor adiacente zonelor de interes: ritmuri de retragere/înaintare ale liniei țărmului;
3. Date privind desfășurarea proceselor hidromorfologice în zona transfrontalieră, respectiv zona deltei secundare a Brațului Chilia, aflată la nord de Canalul Sulina.

La dimensionarea rețelei de măsurători hidrologice a fost urmărită înregistrarea proceselor hidrodinamice locale, în ariile de interes, iar frecvența de monitorizare a fost adaptată urmării variabilității proceselor la nivelul ciclului anual, și respectiv, pe sezoane, dar și, pe cât posibil, la diferite evenimente hidrologice (unde de viitură, furtuni excepționale, etc.). Astfel, în funcție de disponibilitatea aparaturii și a mijloacelor de transport, precum și de starea vremii, sesiunile de măsurători hidrologice s-au întins bianual, dar și corespunzător pentru cele două sezoane, sezonul cald și sezonul rece.

6.1.1.1. Descrierea aparatului ADCP – specificații tehnice

Instrumentele ADCP (Advance Doppler Current Profiler) sunt capabile de a stoca date de viteză a curentului până la 255 de celule de măsurare, pe coloana de apă, fiecare având o componentă U și V, fiind reprezentate în fișierul de date ca NortV1, EastV1; NortV2, EastV2; etc. Există, de asemenea, în plus față de metadatele vis-a-vis relaționate de intervalul de timp a desfășurării măsurătorii (data / ora) și date furnizate de aparat în legătură cu parametrii de poziționare a instrumentului (cum ar fi temperatura, tangaj, rulu, adâncimea de poziționare în apă a aparatului), care contribuie la dimensiunea setului de date. Aparatul ADCP folosit a fost un aparat RDI Teledyne, de tip WorkHorse Sentinel 600kHz, foarte adaptat pentru aplicații marine și costiere, având cu 4-vibratoare cu un spectru larg de frecvență.



Figura 6-3 ADCP-ului WH Sentinel 600 KHz

Adâncimea de operare standard pentru determinarea profilului de curenți pe coloana de apă, domeniul de adâncime este de 10 - 100m la o rezoluție verticală a celei de mediere a vitezei pe coloana de apă de la 0.5m la 8m și o deviație standard de 2.0 -12.9(cm/s). Softul de operare este WinRiver, care permite o achiziție a datelor în teren, precum procesarea și exportul de date într-un format de date accesibil softurilor de analiză aprofundată a datelor.

6.2. Metodologia măsurătorilor de valuri

Deoarece a fost imposibilă montarea unui ADCP pe fundul mălos la gurile de vărsare a Dunării s-a optat pentru măsurători clasice asupra câmpului de valuri: măsurători cu perspectometrul naval (Figura 6-4a).

Perspectometrul naval are aspectul unui teodolit, iar elementele valurilor sunt măsurate cu ajutorul unei rețele reticulare (Figura 6-4b) care are mai multe scale. O scală pentru măsurarea distanțelor (scala verticală în centrul câmpului), una pentru măsurarea înălțimilor valurilor (scala verticală din dreapta celei din centru) și scala pentru măsurarea lungimii valurilor (liniile oblice). Ca să se poată măsura elementele valului, în câmpul vizual al perspectometrului, în largul mării se ancorează o geamandură.

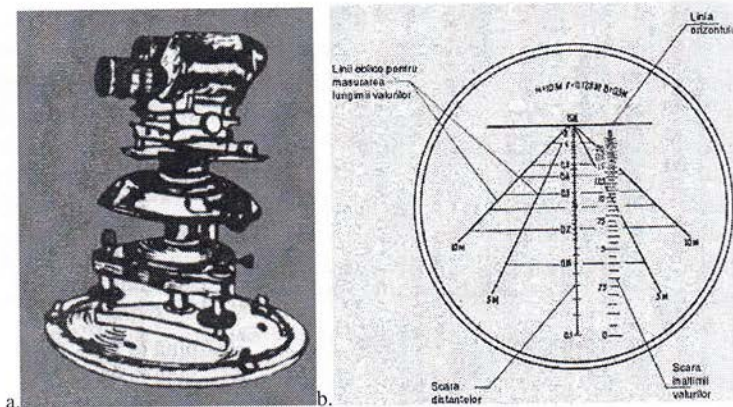


Figura 6-4 a. Perspectometru naval; b. Rețeaua reticulară a perspectometrului naval

Având în vedere faptul că valurile reprezintă oscilații ale maselor de apă până la adâncimi considerabile, cu componente transversale și longitudinale, s-au măsurat elemente atât din componenta transversală (direcția și viteza de propagare a valului, lungimea de undă), cât și din cea longitudinală (perioada, înălțimea valului). S-au mai măsurat și alte elemente specifice, cum ar fi viteza particulei elementare în val, lungimea valului sau elemente care însoțesc acest fenomen: parametrii descriptivi ai vântului.

Măsurătorile s-au executat cu metode clasice, perspectometru și o geamandură, zilnic la trei ore distincte, 07.00 (08.00), 13.00 și 17.00 (18.00), însumând peste 40 de înregistrări, în domeniul de înălțime al valului observat sub 1.5m.

6.2.1. Măsurarea valurilor cu perspectometrul naval și geamandurile de semnalizare

Geamandurile au fost reprezentate de geamandurile de șenal la intrarea în Canalul Sulina, instalate de o parte și de alta a șenalului (Figura 6-5a) în câmpul vizual al unui perspectometru instalat lângă Farul Sulina (Figura 6-5b).

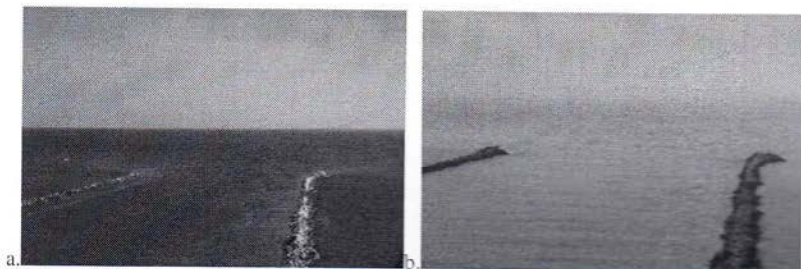


Figura 6-5 Intrarea în Canalul Sulina – a. Amplasarea geamandurii; b. Amplasarea perspectometrului pentru urmărirea câmpului de valuri la gura de vărsare, 30.06.2012. și 20.11.2010

6.2.2. Rezultate și interpretări ale experimentelor de teren

Au fost desfășurate măsurători de curenții cu ajutorul curențmetrelor cu efect Doppler, tip ADCP RDI Teledyne în fața gurilor Dunării, de-a lungul sectorului Sulina - Sf. Gheorghe, în iarna anului 2010, precum și localizat în fața gurilor de vărsare, în vara anului 2012. În perioada sezonului rece, în intervalul 16-18.02.2010, au fost efectuate măsurători ale curenților costieri pe o rețea de profile transversale care să surprindă distribuția curenților în lungul țărmlui Deltei (Figura 6-6).

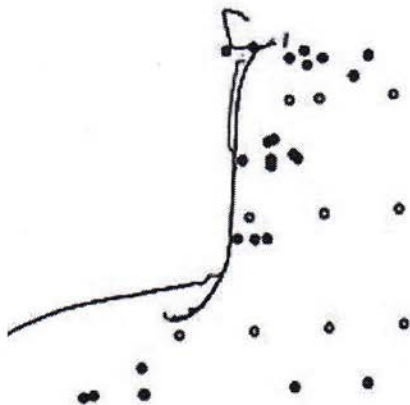


Figura 6-6 Rețeaua de stații de măsurare

Au fost efectuate măsurători în condiții meteo-hidrologice intense, defavorabile măsurătorilor de curenți în cursul unor sesiuni de măsurători dinamice de pe vapor; au fost înregistrați curenții marini din imediata vecinătate a țărmlui natural precum și pe profile de curenți la izobatele de 20 și 30m, în sectorul deltaic, în vederea completării imaginii asupra dinamicii și variabilității spațiale și temporale a circulației costiere, precum și pentru validarea modelelor costiere de circulație, respectiv pentru cartarea curenților costieri la gurile de vărsare, în domeniul de adâncime 10-30m. Dată fiind direcția predominantă a țărmlui N-S, și predominanța situațiilor de calm, precum și de direcțiile valurilor induse de acestea, (cu amplitudini mai mici de 1m pentru a permite efectuarea de profile – măsurători ADCP), în perioada menționată valoarea medie a curenților marini înregistrați nu au depășit 35cm/s, cu direcții variabile în funcție de adâncimea la care s-a făcut măsurătoarea.

În zona Sulina (în zona gurii de vărsare) la adâncimea de 20m este foarte vizibilă propagarea penei de apă dulce în stratul de suprafață și variabilitatea pe coloana de apă a vitezelor (Figura 6-7). Măsurătorile efectuate cu ADCP-ul pe perioada nopții când vaporul a stat în ancoră la două mile nautice NNE de zona a Canalului Sulina, evidențiază stingerea circulației/scăderea magnitudinii curenților de la 50 la 10cm/s, respectiv modificarea direcției de propagare a penei de apă dulce spre sud, odată cu instalarea regimului valurilor de hulă, după o stare a mării de gradul 3 (Figura 6-7).

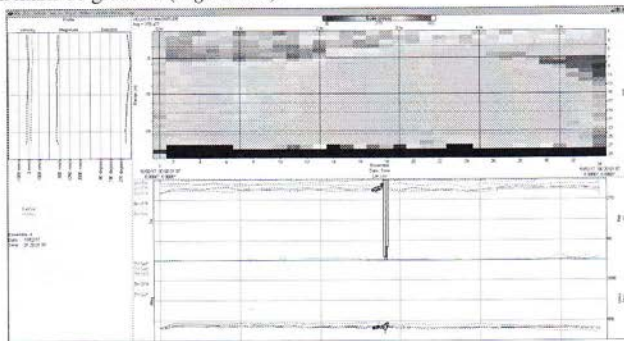


Figura 6-7 Parametri curenților marini în zona Sulina, înregistrați în perioada 17.02.2010

În zona Sf. Gheorghe (Figura 6-78), la fel ca în zonele de ruptură a pantei, datorită neregularităților patului solid al mării în zona barelor existente la gurile de vărsare, curenții deși prezintă dezvoltări accentuate, ajung până la 80cm/s la 3 mile de mal, înregistrările nu au depășit viteza medie de 30cm/s la adâncimea de 32 de metri, chiar pentru situații de calm (Figura 6-8).

Informațiile asupra circulației costiere furnizate de măsurătorile în situ desfășurate cu ajutorul curentmetrelor cu efect Doppler/ADCP, pentru situația semnificativă de calm/lipsă a vântului, evidențiază dinamica penei de apă dulce în stratul de suprafață și un bun acord cantitativ cu rezultatele măsurătorilor pentru valori reale ale parametrilor hidrodinamici, respectiv includerea vectorilor curenților în domeniul valorilor medii de fond 0-0,35cm/s (pentru domeniul de adâncime de 15-30m).

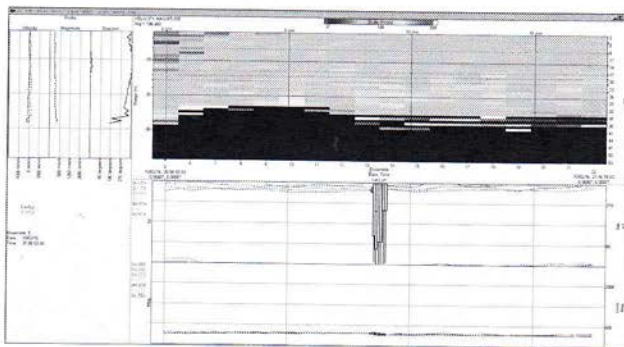


Figura 6-8 Parametrii curenților marini în zona Sf. Gheorghe, înregistrați în perioada 16.02.2010

Experimentele desfășurate în zona de vărsare Sf. Gheorghe și Sulina în vara anului 2012 au urmărit de asemenea înregistrarea variabilității condițiilor hidrodinamice și influența fluviului Dunărea asupra câmpului de valuri costiere. Au fost înregistrați curenții marini din imediata vecinătate a gurilor de vărsare, având ca scop extinderea înțelegerii dinamicii și variabilității spațiale și temporale a hidrodinamicii valurilor și circulației costiere naturale și perturbate de existența sistemelor de protecție, obținute pe model numeric. Pe parcursul sesiunilor de măsurătorii, valorile vitezelor de curent (cm/s), precum și direcțiilor aferente (date în orientări geografice sau grade) au fost înregistrate folosind curentmetrul electromagnetic. Stabilirea locațiilor de măsurare și, respectiv, a frecvenței acestora s-a făcut ținând cont de caracteristicile de val, adâncimea și topografia fundului, precum și de existența obstacolelor marine aferente zonei - dispunerea jetelor Canalului Sulina.

Măsurătorile au fost efectuate în funcție numărul de stații pe fiecare secțiune și de durata de măsurare pentru fiecare orizont de adâncime considerat relevant. Dată fiind direcția predominantă a țărmlui N-S în sectorul costier al Deltei Dunării, precum și direcțiile valurilor, având amplitudini mai mici de 1,5m, valoarea medie a curenților costieri înregistrați au nu a depășit 75cm/s, cu direcții variabile în funcție de adâncimea la care s-a făcut măsurătoarea. În zona Sf Gheorghe s-au efectuat un număr de 12 stații în a căror configurație este reprezentată în Figura 6-9.

Deși aparatul are nevoie de o perioadă de stabilizare, din procesarea/calcularea vitezelor și a direcțiilor curentului, realizată cu ajutorul softului EMLOG (Figura 6-4), furnizat de Valeport, se observă dominantă vitezelor și direcțiilor medii, precum și intervalul de variabilitate a vitezelor instantanee. Pentru măsurători fixe la adâncimi diferite se observă din calcularea vitezelor și a direcțiilor curentului, modificarea intervalului de variabilitate a vitezelor, cu păstrarea direcției dominante a curentului, precum și separarea acestora în intervalul necesar coborării aparatului la o adâncime mai mare (Figura 6-5). Analiza datelor obținute relevă, în general, o intensitate și o variabilitate crescută în zona gurii de vărsare și, în special în zonele apropiate de capetele digurilor, precum și o uniformitate a acestora pe spațiul zonelor de larg. Curentul longitudinal indus în apropierea guri de vărsare, pentru orizontul de 0,5m, este mai intens, având valori instantanee măsurate de până la 100cm/s.

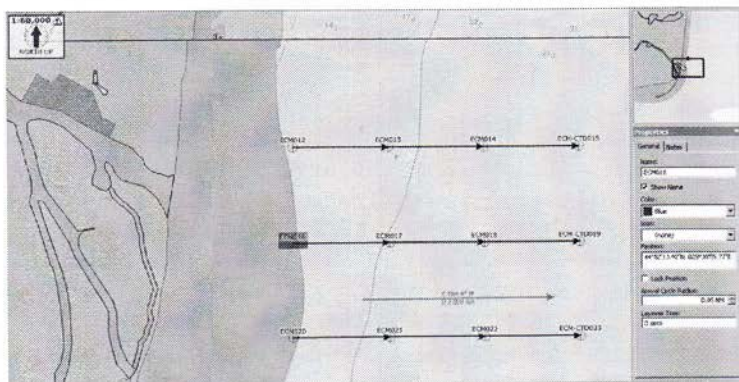


Figura 6-9 Rețea de măsurători în zona Sf. Gheorghe

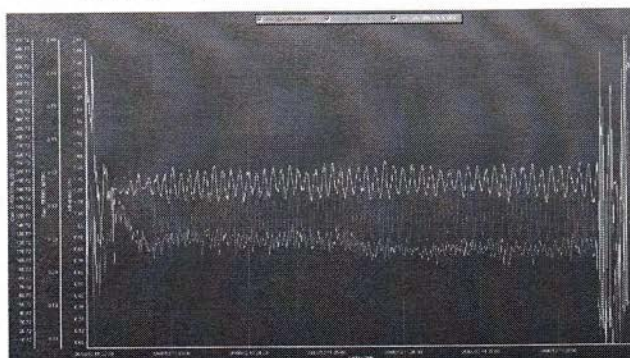


Figura 6-4 Stația ECM016, adâncime 10m, în fața Brațului Sf. Gheorghe – 20.06.2012

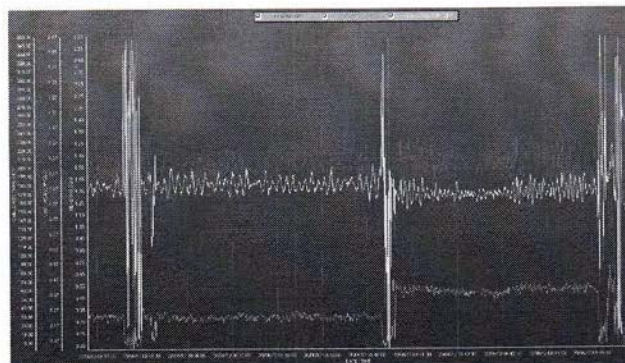


Figura 6-5 Stația ECM019, adâncime 30m, în fața Brațului Sf. Gheorghe, în două paliere de măsurare – 20.06.2012

În zona Sulina s-au efectuat un număr de 10 stații în carioaj (*Figura 6-62*). Pentru situația regimului de val din direcția NE, produs de vânt, cu înălțime mai mare de $H = 0,4 - 0,5m$, se remarcă circulația anticiclonică indusă de prezența jetelelor. De asemenea, pentru regimurile de agitație marină cu val din direcția SE, având înălțimea medie mai mică de $1,0m$, se remarcă influența acestor diguri, prin crearea unor curenți jet ce se resimt și la distanțe mai mari de intrarea pe canal.

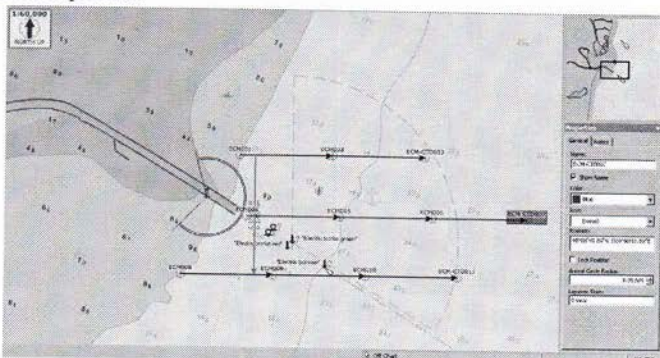


Figura 6-6 Rețea de măsurători în zona Sulina

Măsurătorile de curenți într-o secțiune transversală pe direcția canalului Sulina validează rezultatele pe model numeric, vitezele variind pentru curenții din direcția sud/azimut 100-160 de grade, între 25 și 35cm/sec (*Figura 6-7* și *Figura 6-8*). Odată cu apropierea de mal, viteza curentului crește de la 0.5 la 0.75cm/sec, prezentând și maxime de 1m/sec, la o direcție dominantă constantă.

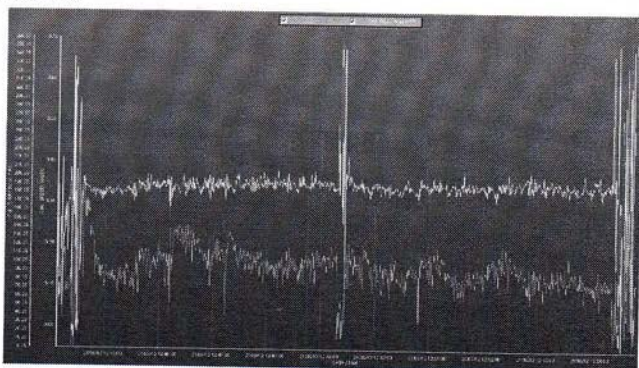


Figura 6-7 Stația ECM005, adâncime 20m, în fața Canalului Sulina – 21.06.2012

Rezultatele obținute evidențiază caracterul neuniform al câmpului de curenților în zona de vărsare a Dunării, precum și existența unor gradienti importanți pe verticală, determinați de diferențele de viteză și de orientare a curgerii la diferite nivele de adâncime. Rezultatele prelucrării relevă preponderența curenților orientați în lungul țărmlui (aproximativ 80%),

față de cei perpendiculari pe coastă (aproximativ 20% din total), iar vitezele medii sunt mai mari pentru curgerile în lungul țămului (32cm/s) și mai reduse pentru cele normale la coastă (20cm/s).

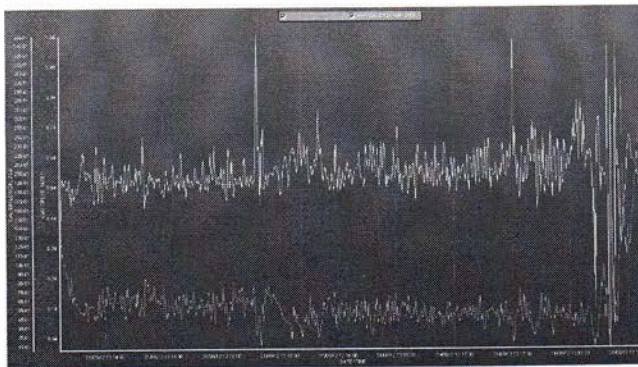


Figura 6-8 Stația ECM009, adâncime 17m, în fața Canalului Sulina – 21.06.2012

Măsurători executate pe perioada verii nu au permis înregistrarea unor condiții hidrometeorologice variate, dar s-a remarcat o dominantă a curgerilor spre nord, cu ponderi de ordinul 45%-65%, din totalul datelor. Variabilitatea vitezelor măsurate la gura de vărsare a canalului este considerabilă, ele reflectând modificările de direcție și viteza a vânturilor locale. Astfel, pentru a avea o imagine mai bună asupra câmpului de curenți la gura de vărsare, au fost efectuate profile cu ajutorul unui ADCP RDI WH600, atât transversal pe direcția canalului (Figura 6-15), cât și transversal pe bara Sulina, observându-se stratificarea maselor de apă, respectiv a vitezelor în zona gurii de vărsare și în arile adiacente acesteia

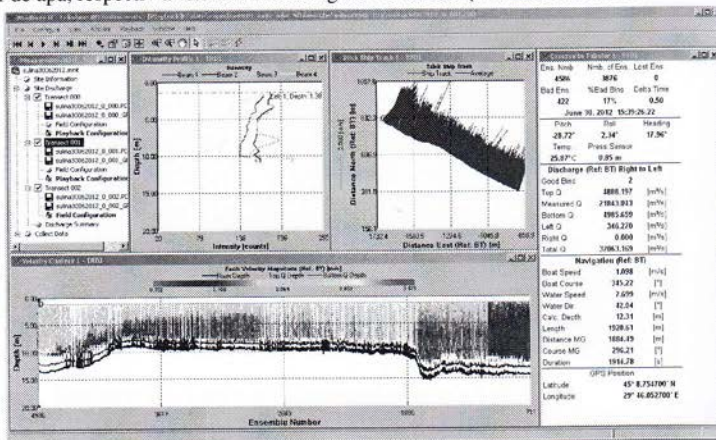


Figura 6-14 Profilul transversal pe bara Sulina – modificarea câmpului de curenți la gura de vărsare a Canalului Sulina, 30.06.2012

Este de menționat faptul că măsurătorile efectuate au furnizat date în concordanță cu prognozele INCDM, respectiv valorile calculate de modelul POM (Princeton Ocean Model) pentru curenții marini, atât pentru viteză, cât și pentru direcție (Figura 6-15).

(<http://www.rmri.ro/RMRI/Forecasts/ForecastsRO.php>).

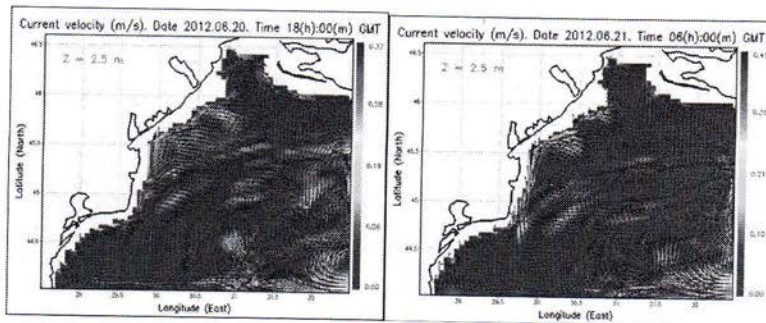


Figura 6-15 Circulata de la nord la sud a curenților marini în perioada 20-21.06.2012

Măsurarea valurilor cu perspectometrul la gura de vărsare Sulina (Figura 6-16). În experimentul desfășurat, s-a folosit perspectometrul de tip GM-12, care are posibilitatea măsurării: principalilor parametri de val (măsurarea înălțimii, perioadei, vitezei și direcției de propagare a valurilor, precum și a distanțelor pe mare). Astfel, amplasamentul perspectometrului naval la farul din Sulina sau pe digul canalului a permis înregistrarea parametrilor de val în trei zone (Figura 6-16), corespunzând amplasamentului celor trei geamanduri de semnalizare, în intervalul de desfășurare a experimentelor.

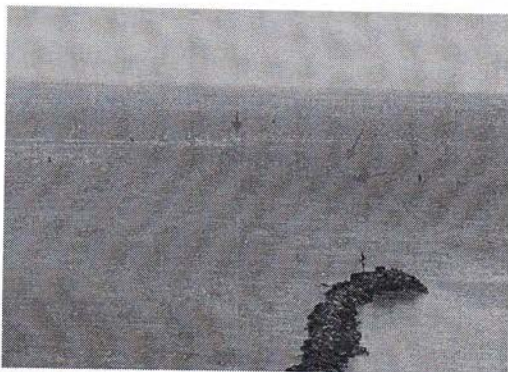


Figura 6-16 Digul sudic al Canalului Sulina - geamanduri de semnalizare 28.06.2012

Posibilitățile tehnice ale aparatului au permis măsurarea înălțimii valurilor cu o eroare de $\pm 10\%$, iar a distanțelor de $\pm 5\%$ din valorile măsurate, în Tabelul 5 fiind prezentate rezultatele de la geamandura 1.

EXPERIMENTE ÎN TEREN PENTRU STUDIUL INTERACȚIUNII DINTRE VALURI ȘI CURENȚI ÎN ZONA GURILOR DE VĂRSARE ALE DUNĂRII

Tabelul 5 Sulina Geamandura 1 - electrica/roșu, izobata 17m (0.5nm)

Sulina		Geamandura 1 - electrica/roșu, izobata 17m (0.5nm)					
an	luna	zi	ora	H	DIR	L	T
2012	6	17	7	0.6	NE	4.5	2.7
2012	6	17	13	0.8	ENE	3.8	3
2012	6	17	19	0.7	E	6.2	2.6
2012	6	18	7	0.7	E	4.8	4
2012	6	18	13	0.9	ENE	5.8	3
2012	6	18	19	0.5	ENE	5.8	2.6
2012	6	19	7	0.5	ENE	4.9	4
2012	6	19	13	0.9	E	5.3	3
2012	6	19	19	0.7	E	5.7	4.5
2012	6	20	7	0.8	E	4.9	3
2012	6	20	13	0.9	ENE	5.8	3
2012	6	20	19	0.7	E	6.5	2.6
2012	6	21	7	0.5	E	5.5	3.7
2012	6	21	13	0.5	E	4.8	3
2012	6	21	19	0.8	ESE	5.8	2.6
2012	6	22	7	0.4	ESE	4.8	4.3
2012	6	22	13	0.8	ESE	6.5	3
2012	6	22	19	0.9	SE	5.7	2.6
2012	6	23	7	0.6	SE	5.5	3.3
2012	6	23	13	1	ESE	6.5	3
2012	6	23	19	0.7	ESE	5.8	2.6
2012	6	23	19	0.96	ESE	5.8	3.4

Se remarcă o intensificare progresivă a înălțimii câmpului de valuri în zona barei (Figura 6-17), la contactul cu curentul provenind de pe Brațul Sulina, precum și refracția corespundență.

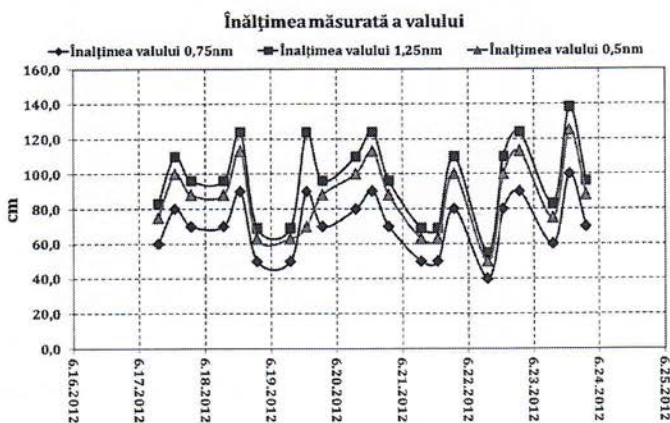


Figura 6-17 Înălțimea măsurată a valului

6.3. Observații asupra răspunsului costier

Procesele de propagare și transformare a valurilor în zona gurilor de vărsare este determinat în mod decisiv de regimul hidrologic al fluviilor. Astfel transportul de apă și sedimentele induse de valuri este raportat la vitezele generate de valurile de frecvență înaltă și joasă, și are componente transversale și longitudinale vis-a-vis de orientarea țărmului, atât în cazul valurilor nedeverlate, cât și a celor deferlate. În zonele costiere, interacțiunea valurilor de vânt cu curenții marini sau fluviali în apropierea țărmului generează mișcări de perioadă lungă constituite din valuri cu frecvență joasă determinate de valurile scurte care ajung la țărm sub un unghi înclinat, precum și alte tipuri de mișcări ale maselor de apă, cum ar fi curenții cu deplasare în lungul țărmului (longitudinal currents) și cei de întoarcere (rip currents).

În zone de vărsare a fluviilor în mare sau în ocean, câmpurile de curenți și valuri interacționează în cea mai mare pondere prin intermediul fenomenelor de refracție a valurilor datorită curenților orizontali, de cele mai multe ori cu direcție opusă de propagare, a proceselor de intensificare a frecării de fund sesizată de curenți datorită interacțiunii cu stratul limită determinat de valuri, dar și a celor de intensificare a tensiunii de forfecare pe fund și a disipării energiei valurilor datorită interacțiunii cu stratul limită determinat de curenți, generându-se astfel modificarea structurii curgerii verticale a curenților sub acțiunea valurilor.

În cazul gurilor Dunării, condițiile atât naturale cât și antropice în cazul Sulina și, mai recent, Bistroe, procesele de interacțiune val – curenț au loc în combinație cu circulația orizontală a curenților deversați de apă dulce, conducând la apariția unor curenți longitudinali și curenți de rip, care produc pe țărm efecte foarte vizibile la scări mici de timp. Astfel, în cazul curenților opuși sensului de propagare a valurilor, se produce o modificare asimetrică a vitezelor din apropierea suprafeței libere față de cele din straturile limită, ceea ce conduce la intensificarea câmpului de valuri. Ca urmare, rezultă o creștere importantă a tensiunilor de forfecare, cu efect în antrenarea accentuată a particulelor de sediment. Studiile desfășurate în anii precedenți au evidențiat faptul că în sectorul nordic, transportul net de sedimente indus în lungul țărmului are loc pe anumite traiecte de curenți (Figura 6-18), conform lui Giosan et al. (1997).

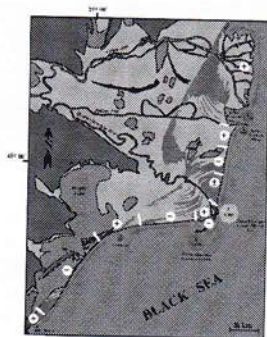


Figura 6-18 Transportul longitudinal de sedimente în sectorul litoral nordic (valori în mii metri cubi/an) (Giosan, 1997)

Chiar dacă pe ansamblul litoralului situația reală este apropiată, în zonele gurilor de vărsare se constată anumite discontinuități ale regimului transportului sedimentar, observându-se anumite accentuări ale proceselor de depunere și, respectiv, de eroziune a țărmului, incluzând relieful submarin, la nivel local și regional (Figura 6-19). Concomitent cu măsurătorile desfășurate în zona marină, au fost efectuate măsurători GPS la interfața mare-uscat, pentru decelarea variabilității răspunsului costier la acțiunea factorilor de agitație marină, în zonele adiacente gurilor de vărsare ale Dunării (Figura 6-9). A fost sesizată o modificare rapidă a poziției de țărm în special în zona de vărsare, aflată atât sub influența mării cât și a regimului hidrologic al Dunării.



Figura 6-19 Intensificare proceselor sedimentare la gura de vărsare a canalului Sulina



Figura 6-9 Măsurători ale poziției liniei țărmului în zonele adiacente gurilor de vărsare ale Dunării - iunie 2012

S-a urmărit evaluarea răspunsului costier la modificările potențialului transportului de sedimente longitudinal, generat de valuri, respectiv modificarea liniei de țărm. Pentru aceasta au fost efectuate măsurători ale liniei de țărm cu două GPS-uri diferențiale, urmărindu-se o analiză de corelație ce ar putea să furnizeze anumite concluzii în legătură cu acțiunea câmpurilor de valuri și curenți, în stadiul prezent al studiului desfășurat în zona gurilor

Dunării. Bilanțul ritmurilor de modificare la interfața mare - uscat, pentru acest sector deltaic, au evidențiat procesele de amplificarea curenților longitudinali opuși, induși de curentul anticiclonic și de câmpul de difracție, în zona Sulina și, respectiv, de transformare și atenuare a valurilor prin sistemul longitudinal de bare în zona Sf. Gheorghe (Figura 6-10).

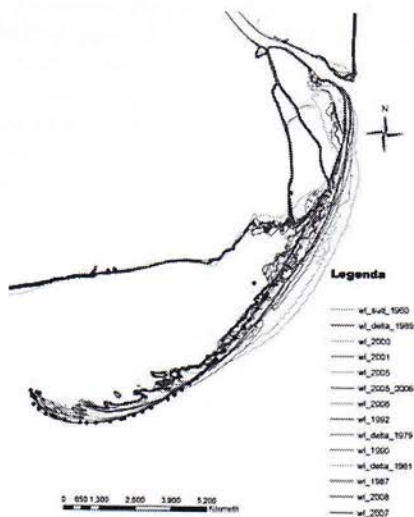


Figura 6-10 Variația linie țărmului în zona Sf. Gheorghe – Insula Sahalin în ultima jumătate de secol

6.4. Concluzii

Între elementele valurilor, care interesează navigația maritimă, sunt oscilațiile suprafeței pe axa Oz. Aceste oscilații sunt caracterizate de amplitudini, frecvențe, perioade și valori extreme, pentru că în funcție de aceste valori pot fi luate deciziile de întrerupere a accesului pe calea navigabilă, în funcție de regimul valurilor și tendința de intensificare a vitezei vântului.

Din alt punct de vedere, pentru estimarea bilanțului energetic al valurilor într-o anumită zonă (la litoralul românesc), elementele valurilor trebuie măsurate cu densitate spațială și temporală mare. Deși acest lucru se poate realiza numai cu ajutorul unor geamanduri oceanografice pe care este instalat un sistem integrat de senzori inerțiali, ale căror date sunt înregistrate continuu sau/și transmise la distanță, rezultatele măsurătorilor reflectă modul de propagare a valurilor la apropierea de țărm și intensificarea regimului de val, în condițiile în care există un curent de direcție inversă.

Chiar dacă particularitățile climatice ale zonei marine românești sunt determinate de influența exercitată de inputul Dunării, caracterul stării de agitație a mării într-o regiune dată este determinat nu numai de regimul vânturilor, ci și de structura hidrodinamicii maselor de apă în vecinătatea țărmului, respectiv de configurația topobatismetrică a fundului mării, în

legătura cu procesele de sedimentare rapidă în zonele de vărsare. Evoluția medie sezonieră a perioadelor de calm (înălțimea valurilor mai mică de 0.3 - 0.5m, limita de detecție a metodei de măsurare vizuale cu perspectomertul), relevă că durata perioadelor de calm este apropiată de minim în lunile de vară.

Astfel, datele înregistrate au permis validarea rezultatelor obținute pe model, iar diferențele între valorile măsurate și cele calculate este de 45%, încadrându-se într-un domeniu de acceptabilitate privind acuratețea rezultatelor, în relație cu valorile măsurate.

Curenții costieri și câmpul de valuri din apropierea coastei, reprezintă mișcări foarte dinamice ale maselor de apă, iar investigarea componentelor lor atât transversale (direcția și viteza de propagare a valului, lungimea de undă), cât și longitudinale (perioada, înălțimea valului), prin măsurătorile directe (mecanice, ultrasonice, electromagnetice) sau chiar vizuale, sunt deosebit de importante, atât pentru proiectarea navelor fluviale și maritime, cât, mai ales, pentru optimizarea tehnicii de operare a transportului naval în zonele gurilor de vărsare fluviale.

Prin utilizarea curențmetrelor cu efect Doppler și a celor electromagnetice au fost măsurate vitezele curenților în apropierea țărmlui. Măsurătorile s-au executat cu metode specifice ECM și ADCP, în stații și, respectiv, pe profile, într-o dispunere care să permită investigarea parametrilor descriptivi ai elementelor dinamice ale valurilor: viteze, perioade, amplitudini, în adiacentele gurilor de vărsare a Dunării din sectorul românesc.

Pentru scopurile lucrării prezente, efectuarea de măsurători în vecinătatea brațelor Deltei Dunării a permis investigarea/validarea rezultatelor obținute pe model, în special pentru direcția de propagare nord, precum și extrapolarea măsurătorilor pentru cazul "vânt de NE", situație caracterizată prin condiții de val puternice și vânt, reprezentând o situație înalt energetică, cea mai comună pentru zona Deltei Dunării.

În acest mod, studiul privind interacțiunea curenților asupra câmpului de valuri în zona Deltei Dunării, precum și cele trei situații semnificative de setare a modelului numeric, respectiv de considerare a parametrilor hidrologici marini, a fost susținut de măsurători în situ, care au permis evidențierea elementelor regimului de val în apropierea țărmlui, în zone de vărsare, cu sau fără câmpuri de curenți având direcție inversă sau perpendiculară direcției de propagare.

Analiza comparativă a rezultatelor obținute prin simulări numerice asupra curenților marini și costieri, precum și cele asupra transformării valurilor în sectorul Deltei Dunării și, respectiv, prin măsurători *in situ*, relevă o complexitate deosebită a proceselor hidrodinamice în vecinătatea gurilor de vărsare, precum și necesitatea abordării complexe a demersurilor de analize numerice/teoretice, cât și a celor de măsurători și observații pe teren (*in situ*), în desfășurarea lor în timp și spațiu.

CAPITOLUL 7

CONSIDERAȚII FINALE

7.1. Discuții asupra rezultatelor obținute în cadrul tezei de doctorat

Obiectivul principal al studiilor realizate în cadrul prezentei teze de doctorat a fost de a analiza efectul interacțiunilor dintre valuri și curenți în zona de la gurile Dunării și, în mod special, la intrarea în Brațul Sulina. Această zonă reprezintă principala poartă de intrare de la extremitatea sudică în Coridorul Pan European numărul VII, definit de sistemul de navigație interioară Rin-Main-Dunăre. Interacțiunile dintre valuri și curenți reprezintă cel mai relevant fenomen hidrodinamic care are loc în această zonă și afectează în mod direct navigația, mai ales în ceea ce privește ieșirea navelor fluviale pe mare sau accesul acestor nave pe Dunăre. Importanța studiului rezidă mai ales din faptul că aceste fenomene hidrodinamice pot avea ca principal efect o creștere substanțială a înălțimii valurilor, care uneori poate conduce până la apariția așa-numitelor valuri anormale, la care înălțimea maximă depășește dublul înălțimii semnificative (cunoscute în literatura de specialitate și ca *Rogue Waves* sau *Freak Waves*). Acest tip de valuri cu înălțimi foarte mari, care pot apărea datorită interacțiunii valurilor cu curenții opuși, sunt foarte periculoase pentru navigație și mai ales pentru navele fluviale a căror structură este proiectată, în general, pentru condiții de val mai puțin severe. Fenomenul studiat este cu atât mai important cu cât traficul naval la Bara Sulina este destul de ridicat iar, în condițiile preconizatei reluări a construcției Canalului Dunăre-București, este de așteptat ca navigația din zonă să crească considerabil. În mod evident, o mai bună cunoaștere a efectelor interacțiunii dintre valuri și curenți ar conduce la creșterea siguranței navigației.

Pentru realizarea obiectivului considerat, în afară de realizarea unei analize exhaustive a datelor de val, vânt și curenți înregistrate în zonă de-a lungul timpului, a fost implementat, validat și utilizat, un sistem de predicție a valurilor bazat pe modele numerice spectrale în medie de fază, respectiv modelul SWAN. Sistemul a fost mai întâi calibrat la nivelul întregului bazin al mării, după care s-a mărit rezoluția, spațiul geografic fiind focalizat spre zona de vărsare a Dunării în mare. Deși același model a fost utilizat pentru toate nivelele, parametrizările fizice considerate sunt diferite de la un nivel de calcul la altul. La ultimele două nivele a fost introdus și efectul curenților induși de vărsarea fluviului în mare, dar a fost luat în considerare și efectul curenților induși de vântul local, iar la ultimul nivel s-a trecut de la sistemul de coordonate sferice (latitudine-longitudine) la sistemul de coordonate carteziene.

O concluzie importantă care rezultă din studiile efectuate ar fi că modelele numerice bazate pe conceptul de spectru de val (care este transformata Fourier a funcției de autocorelație a ridicării suprafeței libere) pot furniza rezultate credibile la nivelul întregului

• bazin al Mării Negre, deși unele procese sunt sensibil diferite într-o astfel de mare închisă, față de procesele corespondente din ocean unde aria de generare este considerabil mai extinsă.

Pe de altă parte, rezultatele comparațiilor efectuate în cadrul tezei de doctorat între experimentele realizate la bazinul de valuri al Institutului de Hidraulică din Danemarca și simulările cu modelul SWAN focalizate pe condițiile similare cu cele întâlnite la gurile Dunării arată că, în general, modelul SWAN poate oferi o bună reprezentare a proceselor complexe de interacțiuni val-curent care au loc la intrarea în Delta Dunării. În consecință, SWAN poate fi folosit ca un instrument eficient pentru a evalua transformările puternice ale valurilor din această zonă.

În acest fel a fost implementat un sistem bazat pe modele numerice spectrale pentru valuri care furnizează rezultate credibile, atât la nivelul întregului bazin al Mării Negre, cât și la nivelul local, focalizat pe aria costieră marină din apropierea Deltei Dunării. De altfel, rezultatele simulărilor efectuate cu sistemul de modele numerice au fost confirmate de experimentul efectuat în zona țintă.

Simulările numerice referitoare la interacțiunile dintre valuri și curenți au fost realizate la două nivele de calcul. Un prim nivel (indicat în lucrare ca nivelul III), la care s-au păstrat coordonatele sferice, cuprinde întreaga zonă costieră de la gurile Dunării, cu rezoluția spațială de $0,005^\circ$ (aproximativ 500m). Cel de-al doilea nivel (indicat în lucrare ca nivelul IV) este focalizat numai pe intrarea în Canalul Sulina și pentru simulările realizate au fost utilizate coordonatele carteziene, iar rezoluția a fost aproximativ de 10 ori mai mare (adică 50m). Rezultatele corespunzătoare nivelului III arată că cele mai intense procese de interacțiune dintre valuri și curenți apar la Brațul Sfântul Gheorghe. Acest lucru este demonstrat și de dinamica sedimentară deosebită din această zonă, care a dus la apariția sistemului insular Sacalin. Rezultatele obținute prin simulările efectuate la nivelul IV, focalizat pe Brațul Sulina scot în evidență un alt aspect deosebit de important, care se referă la condițiile cele mai probabile de apariție a valurilor anormale și, deci, a condițiilor cele mai periculoase din punct de vedere al intrării sau ieșirii din zona Canalului Sulina. Aceste condiții corespund unor înălțimi semnificative, între 2.5 și 3.5 metri, și unei direcții de propagare a valurilor aproximativ normal spre linia țărmului.

Evaluările efectelor curenților asupra valurilor s-au realizat atât în spațiul geografic, cât și în cel spectral, analizând modul în care sunt modificate formele spectrale standard (pornind de la un spectru teoretic JONSWAP) pentru diverse situații reprezentative ale configurației matricei de mediu, dar și localizarea spațială a punctelor în care interacțiunile dintre valuri și curenți sunt, în general, mai puternice.

În finalul acestui subcapitol, ar mai trebui menționată și localizarea fenomenului care se extinde, în general, pe o distanța de 12-15 km de la gurile Dunării și care foarte rar se propagă pe distanțe mai mari de 20 de kilometri (aceasta în condiții cu totul extreme, când de altfel navigația nici nu este posibilă).

7.2. Contribuții originale și direcții pentru cercetarea viitoare

Contribuțiile proprii evidențiate în cadrul prezentei teze de doctorat pot fi grupate pe mai multe direcții, după cum urmează:

- I. Analiza matricei de mediu și a dinamicii ei din zona țintă (zona costieră de la vărsarea Dunării în mare);
- II. Validarea reprezentării interacțiunii dintre valuri și curenți în cadrul modelului SWAN, prin comparații cu rezultatele experimentale de la Institutului de Hidraulică din Danemarca;
- III. Implementarea unui sistem de modelare complex și cu mai multe nivele de calcul, bazat pe modelul spectral în medie de fază SWAN, care este focalizat pe zona costieră de la gurile Dunării, în general, și pe intrarea în Brațul Sulina, în mod special;
- IV. Experimente realizate în zona țintă, prin efectuarea de măsurători locale pentru valuri și curenți.

În ceea ce privește prima direcție originală a tezei de doctorat *analiza matricei de mediu și a dinamicii ei din zona țintă*, se pornește de la faptul că Delta Dunării este un sistem complex, care a fost supus, în ultimele perioade de timp, la transformări semnificative. Acest lucru se datorează în principal dinamicii matricei de mediu și, din acest motiv, aceasta a fost studiată în detaliu prin analiza și procesarea unei mari cantități de informație. Principalii parametri luați în considerație și analizați sunt regimul curenților induși de Fluviul Dunărea, regimul valurilor și vânturilor, precum și transportul sedimentelor. Aspectele relaționate cu această direcție sunt tratate în Capitolul 2.

Cea de-a doua direcție originală a lucrării se referă la *validarea reprezentării interacțiunii dintre valuri și curenți, în cadrul modelului SWAN, prin comparații cu rezultatele experimentale de la Institutului de Hidraulică din Danemarca*, și ceea ce constituie obiectul Capitolului 4. Obiectivul acesteia este de a analiza unele rezultate experimentale privind modelarea interacțiunii dintre valuri și curenți. Au fost considerate la acest nivel date experimentale înregistrate în bazinul de valuri aparținând Institutului de Hidraulică din Danemarca (DHI), unde curenții sunt generați în mod artificial. În paralel, au fost realizate simulări cu modelul SWAN, pentru a evalua performanțele modelului. Au fost urmărite, în mod special, cazurile asemănătoare cu cele întâlnite la vărsarea Dunării în mare, punându-se accent pe situația în care valurile se propagă în prezența unor curenți opuși puternici, care măresc considerabil înălțimile de val.

Rezultatele prezentate, care sunt cu totul originale, arată că modelul SWAN poate oferi, în general, o bună reprezentare a proceselor complexe de interacțiuni val-curent, care au loc la intrarea în Delta Dunării și, în consecință, SWAN poate fi folosit ca un instrument eficient pentru a evalua transformările puternice ale valurilor din zona țintă.

Cea mai consistentă direcție originală a lucrării se referă la *implementarea unui sistem de modelare complex și cu mai multe nivele de calcul, bazat pe modelul spectral în medie de fază SWAN, care este focalizat pe zona costieră de la gurile Dunării, în general, și pe intrarea în Brațul Sulina, în mod special*, și este realizată în Capitolul 5. Aceasta se

concentrează asupra studiului interacțiunii dintre valuri și curenți la vărsarea Fluviului Dunărea în Marea Neagră, sector costier care este supus unui important trafic naval.

În cadrul sistemului de predicție multi-nivel, bazat pe modelul SWAN, au fost considerate patru nivele distincte de calcul, la care fizica este destul de diferită, punând accentul pe procesele dominante de la fiecare nivel. Astfel, în ceea ce privește primul nivel de calcul cu rezoluția în spațiul geografic de 0,08°, care este numit în lucrare și nivelul global (cuprinde întregul bazin al Mării Negre), este pus accentul pe procesele din apă adâncă: transferul de energie de la vânt la valuri, disiparea prin înspumare (whitcapping) și interacțiunile neliniare dintre valuri de tip cuadruplet.

Al doilea nivel, denumit și nivelul costier, are rezoluția în spațiul geografic de 0,02° și acoperă zona de vest a Mării Negre, care corespunde zonei economice românești. În acest caz, pe lângă procesele considerate anterior, alte procese specifice transformării valurilor în apă cu adâncime finită devin relevante. Cel de-al treilea nivel de calcul, denumit și nivelul local, are rezoluția în spațiul geografic de 0,005° și acoperă sectorul costier de la gurile Dunării, unde procesele dominante sunt relaționate cu interacțiunea dintre valuri și curenții induși de fluviu la vărsare. La acest nivel au fost considerate mai multe studii de caz, care corespund la condițiile cele mai semnificative din punct de vedere al configurației matricei condițiilor de mediu (valuri, vânt și curenți) din sectorul costier considerat. Acestea ilustrează, de fapt, situații reale care sunt cele mai reprezentative pentru zona de vărsare a Dunării în mare.

Așa cum s-a ilustrat în capitolul 5, efectul curenților asupra valurilor la gurile Dunării este într-adevăr relevant și conduce uneori la creșteri ale înălțimii semnificative a valurilor mai mari de un metru (aceasta mai ales la intrarea în Brațul Sfântu Gheorghe). Rezultatele obținute au scos în evidență faptul că prezența curenților opuși de intensitate mare produce creșteri considerabile în câmpul de înălțimi semnificative, dar și în ceea ce privește lungimile și direcțiile valurilor. Întrucât cel mai important sector din aria țintă considerată este cel de la intrarea în Canalul Sulina, fenomenele din această zonă au fost studiate și prin implementarea unui domeniu de calcul de rezoluție înaltă (nivelul de calcul IV, cu o rezoluție în spațiul geografic de 50 m). Rezultatele simulărilor arată că există un risc ridicat de apariție a valurilor anormale, fapt care este indicat de valorile relativ mari ale indicelui BFI.

În sfârșit, cea de-a patra direcție originală de cercetare se referă la *experimentele realizate în zona țintă prin efectuarea de măsurători locale pentru valuri și curenți*, la care doctoranda a participat nemijlocit, și care sunt descrise în Capitolul 6 al tezei de doctorat. În această parte, se prezintă rezultate experimentale privind măsurarea valurilor și curenților în zona de la vărsarea Dunării în mare, mai ales la nivelul Brațelor Sfântu Gheorghe și Sulina. Au fost utilizate mai multe dispozitive de măsurare *in situ*, dar cele mai importante sunt cele de tip ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), care permit măsurarea simultană a valurilor și curenților. Din analiza acestor măsurători trebuie menționat faptul că rezultatele furnizate de sistemul de modelare numerică implementat în cadrul tezei sunt, în general, confirmate.

Se mai poate preciza și faptul că, deși lucrarea de doctorat nu dezvoltă teorii noi și nu au fost deduse formule sau ecuații originale, partea teoretică a tezei de doctorat (concentrată mai ales în capitolul 3) sintetizează foarte multe noțiuni teoretice, fiind consultate și corolaționate diverse surse de informare. Astfel sunt mai întâi trecute în revistă fenomenele asociate cu

generarea și propagarea valurilor, incluzând generarea și propagarea valurilor în apă adâncă, dar și propagarea valurilor în apă puțin adâncă cu fenomenele care însoțesc trecerea de la apă adâncă, la apă puțin adâncă. Sunt discutate, apoi, modelul spectral al valului marin și modelarea interacțiunii dintre valuri și curenți. Se poate, deci, aprecia că și această parte teoretică prezintă elemente de originalitate.

În ceea ce privește direcțiile posibile pentru cercetarea viitoare, se poate aprecia că o direcție deosebit de importantă pentru dezvoltarea cercetării efectuate în cadrul prezentei lucrări ar fi cuplarea la sistemul de predicție a valurilor, bazat pe modele numerice spectrale în medie de fază și a unor modele pentru valuri bazate pe conceptul de impuls (care rezolvă faza), cum ar fi REFDIF sau FUNWAVE. De asemenea, pot fi cuplate și modele de circulație costieră (ca de exemplu SHORECIRC), precum și modele numerice care permit evaluarea transportului de sedimente.

O altă direcție care trebuie luată în considerare se referă la asimilarea de date. Prin asimilarea observațiilor de val și curenți provenite de la diverse surse (fie date de satelit sau măsurători *in situ*), calitatea previziunilor modelelor numerice este îmbunătățită semnificativ. Deși, în acest moment, asimilarea de date în modelele numerice pentru valuri și curenți nu este atât de avansată în comparație cu ceea ce s-a făcut privind modelele numerice pentru predicția atmosferică, asimilarea de date în modelele oceanografice reprezintă o direcție foarte actuală, care este cu atât mai valoroasă cu cât condițiile deosebit de complexe de la gurile Dunării nu sunt întotdeauna reprezentate în mod corespunzător în modelele spectrale pentru valuri.

În sfârșit, o altă direcție care trebuie luată în considerare în cercetarea viitoare se referă la faptul ca la 45 km nord-vest de Sulina, în Marea Neagră, se află un sector marin deosebit de controversat, numit și 'Triunghiul Bermudelor din Marea Neagră' sau 'Vârtejul Morții'. În această zonă, care este cunoscută încă din Evul Mediu, se presupune că au dispărut multe nave. Cele mai credibile concluzii vorbesc despre o anomalie magnetică care se manifestă pe o suprafață de circa 10 km și care se deplasează lent prin Marea Neagră, iar momentan aceasta se îndreaptă direct spre Sulina. În aceste condiții apare ca evident faptul că în afară de fenomenele hidrodinamice deosebite care se produc în sectorul costier de la intrarea în Canalul Sulina, este de așteptat ca, foarte curând, să se producă și anomalii magnetice, ceea ce ar reprezenta un factor de risc suplimentar pentru navigația din zonă. În consecință, apare ca o direcție deosebit de importantă pentru cercetarea viitoare realizarea de echipe multidisciplinare pentru a efectua cercetări și măsurători complexe la bara Sulina.

Ar mai trebui menționat și faptul că cercetările și studiile realizate în timpul elaborării tezei au fost diseminate prin diferite publicații după cum urmează: trei lucrări ISI din care una (Rusu și Ivan, 2010) este publicată în *Environmental Engineering and Management Journal*, iar alte două (Ivan și Rusu, 2012a; Ivan și alții, 2012a) au fost acceptate și sunt în curs de publicare în *Environmental Engineering and Management Journal* și respectiv *Journal of Environmental Protection and Ecology*. La acestea se mai adaugă alte două lucrări publicate în *Proceeding ISI* care au fost prezentate la *The 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2012)*, precum și o monografie intitulată *Modelarea proceselor hidrodinamice în zonele de deltă și estuar*, publicată de Editura AGIR, în cadrul colecției

Studii și cercetării (Rusu și Ivan, 2011). Autoarea tezei a prezentat rezultatele cercetării și la alte conferințe internaționale de prestigiu cum ar fi: IMAM (International Maritime Association of the Mediterranean) 2009, Istanbul (Ivan și Rusu, 2009) și Black Sea 2010 (Ivan și alții, 2010) dar și la alte workshop-uri internaționale și naționale, care au avut loc în România (mai ales în orașele Galați și Constanța).

La finalul tezei de doctorat ar mai trebui precizat și un alt detaliu, care privește relevanța cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat și anume faptul că acestea au fost cuprinse într-o propunere de proiect depus în Programul Cadru FP7, la sfârșitul anului 2011. Titlul proiectului era *Green Engineering for Challenges in Inland Navigation: The Danube Perspective* (Inginerie verde pentru provocările navigației interioare – perspectiva Dunăreană, acronim GREENCHAIN). La proiect au participat, ca parteneri, reprezentanți din țări și instituții cu o deosebită tradiție științifică, dar și în ceea ce privește navigația, cum ar fi PANTEIA BV, NEA Business, Olanda, Universitatea din Gent și Flanders Hydraulics Research (Centrul de Cercetări Hidraulice Flamand), Belgia, Universitatea din Belgrad, Serbia și Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre (Centrul Bulgar de Cercetări Hidrodinamice). Deși proiectul nu a primit finanțare, este de menționat faptul că acesta a primit un punctaj relativ bun (10,5 puncte din maximum 15), fiind inclus pe lista de rezervă. În același timp faptul că tema abordată în cadrul tezei și-a găsit loc într-un proiect de o asemenea anvergură reflectă importanța deosebită a temei.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Almazov, A., Bondar, C., Diaconu, C., Ghederim, V., Mihailov, V., Miță, P., Nichiforov, I., Rai, I., Rodionov, N., Stănescu, S., Stănescu, V., Vaghin, N., 1963. *Hydrological monograph of the Danube's mouths*, Romanian State Department of the Water.
2. Baschek, B., 2005. Wave-current interaction in tidal fronts, *Proceedings of the 14th 'Aha Huliko'a Winter Workshop, Rogue Waves*, Ed. P. Muller and C. Garrett.
3. Battjes, J.A., 1994. Shallow water wave modelling, *Proc. Int. Symp.: Waves - Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, 1-23.
4. Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering*, Hamburg, ASCE, 569-587.
5. Battjes, J.A., 1974. Surf similarity, *Proceedings of 14th Coastal Engineering Conference*, Copenhagen, Denmark, American Society of Civil Engineers, New York, pp.466-480.
6. Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of Combined Refraction-Diffraction, *Proceedings of the 13th Conf. Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver.
7. Bertotti, L., Cavaleri, L., 1994. Accuracy of wind and wave evaluation in coastal regions, *Proceedings of the 24th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 57-67;
8. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research C4*, 104, 7649-7666.
9. Bouws, E., Komen, G.J., 1983. On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 13(9), 1653-1658.
10. Bretschneider, C.L., 1952. Revised wave forecasting relationships, *Proc. 2nd Conf. On Coastal Eng.*, ASCE, Council on Wave Research.
11. Bretherton, F.P., Garrett, C.J.R., 1968. Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proceedings of the Royal Society*, England, Series A, Vol. 302, No. 1471, January, 529-554.
12. Briggs, M.J., Thompson, E.F., Green, D.R., Lillycrop, L.S., 1993. Laboratory Description of Harbor Idealized Tests, Vol 1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CERC-93-1, Vicksburg, MS.
13. Blumberg, A.F., Mellor, G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal-ocean Models*, edited by N. Heaps, 208 pp., American Geophysical Union.
14. Burrows, R., Hedges, T.S., 1985. The influence of currents on ocean wave climates, *Coastal Eng.* 9, 247-260.
15. Burling, R.W., 1959, The spectrum of waves at short fetches, *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 12, 96-117.
16. CERC, 1984. Shore Protection Manual, Coastal Engineer Research Center, U.S. Army Corps of Engrs. Washington D.C.: U.S. Govt. Printing Office.
17. Cherneva Z., Andreeva N., Pilar P., Valchev N., Petrova P., Guedes Soares C., 2008, Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea, *Coastal Engineering* 55, 881-893.
18. Christoffersen, J.B., 1982. Current depth refraction of dissipative water waves. Series Paper No. 30, Inst. Hydrodyn. And Hydraul. Eng., Tech. Univ. Denmark, Lyngby.

19. Christoffersen, J.B., Jonsson, I.G., 1980. A note on wave action conservation in a dissipative current wave motion, *Appl. Ocean Res.*, 2, 179-182.
20. Coles, S.G., 1993. Regional Modeling of extreme storms via max-stable processes, *Journal of the Royal Statistical Society Series B-methodological*, 55: (4) 797- 816.
21. Collins, J.I., 1972. Prediction of shallow water spectra, *J. Geophys. Res.*, 77, No. 15, 2693-2707.
22. Collins, J.I., 1972. Prediction of shallow water spectra, *J. Geophys. Res.*, 77(15), 2693-2707.
23. Dean, R.A., Dalrymple, R.A., 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific.
24. Demirbilek, Z., Panchang, V., 1998. CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation, Technical Report CHL-98-26, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
25. Donelan, M.A., Hamilton, J., Hui, W.H., 1985. Directional spectra of wind-generated waves, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, A 315, 509-562.
26. Donelan, M., Skafel, M., Graber, H., Liu, P., Schwab, D., Venkatesh, S., 1992. On the growth rate of wind-generated waves. *Atmos.-Ocean* 30, 457-478.
27. Dorrestein, R., 1960. Simplified method of determining refraction coefficients for seawaves, *J. Geophys. Res.* 65(2), 637-642.
28. Efimov VV, Shokurov MV, Yarovaya DA. 2007. Numerical simulation of quasitropical cyclone over the Black Sea. *Izv Atmos Ocean Phys* 43: 723-743.
29. Elliott, A.J. 1986. Shore diffusion and spread of oil in the surface layers of the North sea, *Dt. Hydrogr. Z* 39, 113-137.
30. Eldeberky, Y., 1996. *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
31. Fenton, J.D., 1985. A fifth-order theory for steady waves, *J. Waterway, Port, Coastal and ocean Eng.*, 111, 216-234.
32. Galvin, C.J., 1968. Breaker type classification on tree laboratory beaches, *Journal of Geophysical Research* 73(12), 3651-3659.
33. Gaspar, P., Florens, J.-P., 1998. Estimation of the sea state bias in radar altimeter measurements of sea level: Results from a new nonparametric method, *J. Geophys. Res.* 103, 15,803-15,814.
34. Goda, Y., 2000. *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 15, World Scientific.
35. Gröen, P., Dorrestein, R., 1976. Zeegolven. KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) Opstellen op Oceanografisch en Maritiem Meteorologisch Gebied, 11.
36. Guedes Soares, C., 2008. Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe. *Coastal Engineering* 55, No. 11, 825-826.
37. Guedes Soares, C., de Pablo, H., 2006. Experimental study of the transformation of wave spectra by a uniform current, *Ocean Engineering* 33, 293-310.
38. Guedes Soares, C., Rodriguez, G.R., Cavaco, P., Ferrer, L., 2000. Experimental study on the interaction of wave spectra and currents. *Proceedings of the ETCE/OMAE Joint Conference Energy for the New Millennium*, ASME, paper OMAE 2000/S&R-6133.
39. Hasselmann, K., 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum: Part 1. General theory, *J. Fluid Mech.* 12, 481-500.
40. Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to white

- capping, *Bound-layer Meteor.* 6, 1-2, 107-127.
41. Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models, *J. Phys. Oceanogr.* 15, 11, 1378-1391.
 42. Hedges, T.S., 1978. Some effects of currents on measurements and analysis of waves, *Proceedings of the Inst. Civ. Engrs.*, Part 2, 65, 685-692.
 43. Hedges, T.S., 1981. Some effects of currents on wave spectra. *Proceedings of the First Indian Conference in Ocean Engineering*, vol. 1, Indian Institute of Technology, Madras, 30-35.
 44. Hedges, T.S., 1987. Combinations of waves and currents: An introduction, *Proceedings of the Proc. Inst. Civ. Eng.*, 82 (Part I), 567-585.
 45. Hedges, S.T., Anastasiou, K., Gabriel, D., 1985. Interaction of random waves and currents, *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng.* 111 (2), 275-288.
 46. Hedges, T.S., Lee, B.W., 1992. The equivalent uniform current in wave-current computations, *Coastal Engineering* 16, 301-311.
 47. Henderson R, 2006. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power takeoff system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy* 31:271-283.
 48. Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press, Cambridge.
 49. Huang, N.E., Chen, D.T., Tung, C.C., Smith, J.R., 1972. Interactions between steady non-uniform currents and gravity waves with applications for current measurements, *J. Phys. Oceanogr.* 2, 420-431.
 50. Hurdle D.P., van Vledder G.Ph., 2004. Improved spectral wave modelling of white-capping dissipation in swell sea systems, *Proceedings of the 23rd Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng.*, Vancouver, vol. 2, 545-551.
 51. Ivan, A., Rusu, E., 2009. Wave-Current Interactions at the Entrance of the Danube Delta, *Proceedings of the 13th International Congress of Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources - IMAM2009*, Istanbul, Turkey, Vol. 3, pp. 875-882.
 52. Ivan, A., Diaconu, G.S., 2010. Analysis of the navigation threats at the entrance of Sulina channel, *The Annals of Dunarea de Jos, University of Galati, Fascicle X, Applied mechanics*.
 53. Ivan, A., Gasparotti, C., Rusu, E., 2010. Dynamics of the environmental matrix at the entrance of the Danube Delta, *Proceedings of the Tenth International Conference on Marine Sciences and Technologies - BLACKSEA2010*, 7-9 October, Varna, Bulgaria, 338-343.
 54. Ivan, A., Rusu, E., 2011. Study of the hydrodynamic processes at the entrance of the Danube Delta, *International Workshop Research Quality in Doctoral School, Increased Industrial and International Visibility*, 13-14 July, 2011 Galati, Romania.
 55. Ivan, A., Rusu, L., 2012a. Validation of the SWAN model for the influence of the opposite currents on the wave spectra, *Environmental Engineering and Management Journal*, in press.
 56. Ivan, A., Gasparotti, C., Rusu, E., 2012. Influence of the interactions between waves and currents on the navigation at the entrance of the Danube delta. Protection and Sustainable Management of the Black Sea Ecosystem, Special Issue. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, in press.

57. Ivan, A., Rusu, E., 2012b. Assessment of the navigation conditions in the coastal sector at the entrance of the Danube Delta, *Proceedings of the 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2012)*, Albena, Bulgaria, Vol. 3, 935 - 942.
58. Ivan, A., Rusu, L., Măcuță, S., 2012. Validations with experimental data of SWAN simulations for the wave propagation in the presence of strong opposite currents. In: *Proc. of 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2012)*, 17-23 June, Albena, Bulgaria, Vol. 3, 1025-1032.
59. Janssen P.A.E.M., 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography* 21, 1631-1642.
60. Janssen, P.A.E.M., 2003. Nonlinear four-wave interactions and freak waves, *J. Physical Ocean.* 33, 863-883.
61. Jonsson, I.G., 1978. Energy flux and wave action in gravity waves propagation on a current, *J. Hydraul. Res.* 16, 223-234; Errata, 17, No. 1, 1979.
62. Jonsson, I.G., 1990. Wave-current interactions. In: Le Mehaute, B., Hanes, D.M. Eds., *The Sea*, Chap. 3, Vol. 9, Part A, John Wiley & Sons, Inc., New York.
63. Jonsson, I.G., Skougaard, C., Wang, J.D., 1971. Interaction Between Waves and Currents, *Proceedings of the 12th Conference on Coastal Engineering*, Washington D.C., 1970, Vol. I. ASCE, New York, 489-507.
64. Jonsson, I.G., Wang, J.D., 1980. Current-depth refraction of water waves, *Ocean. Eng.* 7, 153-171.
65. Jonsson, I.G., Christoffersen, J.B, 1985. Current depth refraction of regular waves. *Proceedings of the 19th Conference on Coastal Engineering*, Houston, Texas, 1984, Vol. II ASCE, New York, 1103-1117.
66. Keulegan, G.H., 1950. *Wave Motion, Engineering Hydraulics*, Chapter 11, John Wiley and Sons, Inc., New York.
67. Kirby, J. T., and Ozkan, H.T., 1994: Combined Refraction/Diffraction Model for Spectral Wave Conditions - REF/DIF_S version 1.1, Documentation and User's Manual, Centre for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, DE 19716 CACR Report No. 94-04, 129pp.
68. Komar, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 545 p.
69. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1984. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 560 p.
70. Gaspar, P., Labroue, S., Ogor, F., Lafitte, G., Marchal, L., Rafanel, M., 2002. Improving Nonparametric Estimates of the Sea State Bias in Radar Altimeter Measurements of Sea Level, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 19, 1690-1707
71. Lakshmi, H.K., Clayson, C.A., 2000. *Small Scale Processes in Geophysical Fluid Flows*, AP - International Geophysics Series, volume 67, Academic Press, San Diego, Calif., 888 p.
72. Lin W., Sanford L.P., Suttles S.E., 2002. Wave measurement and modeling in Chesapeake Bay, *Continental Shelf Research* 22, 2673-2686.
73. Longuet-Higgins, M.S., 1952. On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, *J. Mar. Res.* 11, 245-266.
74. Longuet-Higgins, M.S., 1969. On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves, *Proceedings of the Royal Society*, 310, A, 151-159.
75. Longuet-Higgins, 1979. The trajectories of particles in steep symmetric gravity waves, *J. Fluid Mech.* 94, 497-518.

76. Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1960. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents, *J. Fluid Mech.* 8, 565-583.
77. Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1961. The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents, *J. Fl. Mech.* 10, 529-549.
78. Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529-562.
79. Lopatoukhin L.J., Boukhanovsky A.V., Chernysheva E.S., Ivanov S.V., 2004. Hindcasting of wind and wave climate of seas around Russia, *Proceedings of the 8th International Workshop on Waves Hindcasting and Forecasting*, Hawaii.
80. Madsen, O.S., Poon, Y.-K., Graber, H.C., 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, *Proceedings of the 21st Coastal Engineering Conf.*, ASCE;
81. Moeini M.H., Etemad S.A., 2009. Wave parameter hindcast in a lake using the SWAN model, *Transaction A: Civil Engineering* 16, 156-164.
82. Munk, W.H., Arthur, R.S., 1952. Wave intensity along a refracted ray in gravity waves, Natl. Bur. Stand. Circ 521, Washington, D.C.
83. Nwogu, O., 1993. Effect of steady Currents on directional wave spectra, *Proceedings of the 12th Int. Conf: on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 1, 25-32.
84. Onorato, M., Waseda, T., Toffoli, A., Cavaleri, L., Gramstad, O., Janssen, P. A., Kinoshita, T., Monbaliu, J., Mori, N., Osborne A. R., Serio, M., Stansberg, C. T., Tamura, H., Trulsen, K., 2009. Statistical properties of directional ocean waves, *Phys. Rev. Lett.* 102, 114502.
85. Peregrine, D.H., 1976. Interaction of Water Waves and Currents, *Adv. Appl. Mech.* 16, Academic Press, 9-117.
86. Peregrine, D.H., Jonsson, I.G., 1983. Interaction of waves and currents. Misc. Rep. No. 83-6, U.S. Army, Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center, Fort Belvoir, Va.
87. Phillips, O.M., 1977. *The dynamics of the upper ocean*, Cambridge University Press, 336 p.
88. Phillips O. M., 1958. *On the Generation of Waves by Turbulent Wind*, Jour. Fluid Mech., vol. 2, 417-445.
89. Phillips, O.M., 1985. *Spectral and statistical properties of the equilibrium range in windgenerated gravity waves*, J. Fluid Mech. 156, 505-531.
90. Pierson, W.J., Tick, L.J., Baer, L., 1966. Computer based procedures for preparing global wave forecasts and wind field analysis capable of using wave data obtained by a spacecraft. *Sixth Naval Hydrodynamics Symposium*, Office of Naval Research, Washington, D.C., 499-532.
91. Pierson, W.J., Neumann, G., James, R.W., 1955. *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics*, U.S. Navy Hydrographic Office Publication No. 603, Washington, D.C.
92. Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.* 95, 159-176.
93. Resio, D.T., J.H. Pihl, B.A. Tracy and C.L. Vincent, 2001. *Nonlinear energy fluxes and the finite depth equilibrium range wave spectra*, J. Geophys. Res., 106, C4, p. 6985-7000.
94. Rusu, E., Rusu, L., Guedes Soares, C., 2006. Assessing of Extreme Wave Conditions in the Black Sea with Numerical Models, *Proceedings of the 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Victoria, Canada, September, 2006.

95. Rusu, E. 2009. Wave energy assessments in the Black Sea, *Journal of Marine Science and Technology* 14(3), 359-372.
96. Rusu, E., Guedes Soares C., 2009. Numerical modeling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore, *Renewable Energy* 34(6), 1501-1516.
97. Rusu, E. 2010a. Modelling of wave-current interactions at the mouths of the Danube, *Journal of Marine Science and Technology* 15(2), 143-159.
98. Rusu, E., Ivan, A., 2010. Evaluation of the extreme waves at the entrance of the Danube Delta, *Proceedings of the Tenth International Conference on Marine Sciences and Technologies - BLACKSEA2010*, 7-9 October, Varna, Bulgaria, 331-337.
99. Rusu E., 2011. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications, *Journal of Marine Science and Technology - Taiwan* 19, 58-75.
100. Rusu E., Gonçalves M., Guedes Soares C., 2011a. Evaluation of the wave transformation in an open bay, *Ocean Engineering* 38, 1763-1781.
101. Rusu L., Pilar, P., Guedes Soares, C., 2008. Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast, *Coastal Engineering* 55, 906-919.
102. Rusu, L., 2010b. Application of numerical models to evaluate oil spills propagation in the coastal environment of the Black Sea, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 18(4), 288-295.
103. Rusu L., Guedes Soares C., 2011. Modelling the wave-current interactions in an offshore basin using the SWAN model, *Ocean Engineering* 33(1), 63-76.
104. Rusu, L., Ivan, A., 2010. Modelling Wind Waves in the Romanian Coastal Environment, *Environmental Engineering and Management Journal* 9(4), 547-552.
105. Rusu, L., Ivan, A., 2011. *Modelarea proceselor hidrodinamice în zonele de deltă și estuar*, Editura AGIR București, Colecția Studii și cercetări, 184 p.
106. Rusu L., Bernardino M., Guedes Soares C., 2011b. Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary, *Ocean Engineering* 38, 1174-1183.
107. Samuels, W.B., Huang, N.E., Amstutz, D.E., 1982. An Oil Spill Trajectory Analysis Model with a Variable Wind Deflection Angle, *Ocean Engineering* 9, 347-360.
108. Scarci, G., Taramasso, A.C., Rebaudengo Landò, L., Benassai, G., 1992. *Rederivation of the TMA model for Wind Wave Spectra*, Rep. IM1/91, Hydr. Univ. Genova, Italia, 1-11.
109. Silvester, R., 1974. *Coastal Engineering*, Vols 1 and 2, Elsevier, Oxford.
110. Smith, J.M., Sherlock, A.R., Resio, D.T., 2001. STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model, user's guide for STWAVE Version 3.0, *ERDC/CHL SR-01-01*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
111. Stelling, G.S., Leendertse, J.J., 1992. Approximation of convective processes by cyclic AOI methods, *Proceedings of the 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, ASCE Tampa, Florida, 771-782.
112. Tolman, H.L., 1990. The influence of unsteady depths and currents of tides on wind-wave propagation in shelf seas, *J. Phys. Oceanogr.* 20, 1166-1174.
113. Tolman, H.L., 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, *J. Phys. Oceanogr.* 21(6), 782-797.
114. Tolman, H. L. 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III. Technical note 166, NOAA / NWS / NCEP / OMB, 99 p.
115. Valchev N, Davidan I, Belberov Z, Palazov A, Valcheva N. 2010. Hindcasting and

- assessment of the western Black Sea wind and wave climate. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 11:1001-1012.
116. WAMDI group, 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
117. Whitham, G.B., 1962. Mass momentum and energy flux in water waves, *J. Fluid. Mech.* 12, 135-147.
118. Wu, C.H., Yao, A., 2004. Laboratory measurements of limiting freak waves on currents, *J. Geophys. Res.* 109, C1 2002.

Listă publicații

A – Cărți

1. Rusu, L., **Ivan, A.**, 2011. Modelarea proceselor hidrodinamice în zonele de delta și estuar. Editura A.G.I.R., București, Seria: Studii și cercetări, ISBN 978-973-720-365-6, 184 pag. <http://www.agir.ro/carte/modelarea-proceselor-hidrodinamice-in-zonele-de-delta-si-estuar-111111.html>

B – Lucrări în reviste cotate ISI

2. **Ivan, A.**, Gasparotti, C., Rusu, E., 2012. Influence of the interactions between waves and currents on the navigation at the entrance of the Danube delta. Protection and Sustainable Management of the Black Sea Ecosystem, Special Issue. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, Vol. 13(3A), pp 1673-1682. <http://www.jepe-journal.info/journal-content/vol13-no-3a> (Factor Impact 0,102)
3. Rusu, L., **Ivan, A.**, 2010. Modelling Wind Waves in the Romanian Coastal Environment. *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 9(4), pp. 547-552. (Factor Impact 1,004) http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/vol9/no4/18_2_Rusu_10.pdf

lucrare acceptată pentru publicare

4. **Ivan, A.**, Rusu, L., 2013. Validation of the SWAN model for the influence of opposite currents on the wave spectra. *Environmental Engineering and Management Journal*, acceptata in August 2012. http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/accepted/203_564_Ivan_11.pdf (Factor Impact 1,004)

C - Lucrări prezentate și publicate în volumele unor conferințe indexate ISI

5. **Ivan, A.**, Rusu, E., 2012. Assessment of the navigation conditions in the coastal sector at the entrance of the Danube Delta. In: *Proc. of 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2012)*, Albena, Bulgaria, 17-23 Iunie, Vol. 3, pp. 935 – 942. <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2012/s14.v3001>; <http://sgem.org/sgemlib/spip.php?article2204>
6. **Ivan, A.**, Rusu, L., Măcuță, S., 2012. Validations with experimental data of SWAN simulations for the wave propagation in the presence of strong opposite currents. In: *Proc. of 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2012)*, 17-23 Iunie, Albena, Bulgaria, Vol. 3, pp. 1025-1032. <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2012/s14.v3013>; <http://sgem.org/sgemlib/spip.php?article2216>

D - Lucrări prezentate și publicate în volumele unor conferințe internaționale de prestigiu

7. Rusu, E., **Ivan, A.**, 2010. Evaluation of the extreme waves at the entrance of the Danube Delta. In: *Proc. of the Tenth International Conference on Marine Sciences and Technologies - BLACKSEA2010*, 7-9 October, Varna, Bulgaria, pp. 331-337. <http://www.allconferences.com/conferences/2010/20100319091121>

8. **Ivan, A., Gasparotti, C., Rusu, E., 2010.** Dynamics of the environmental matrix at the entrance of the Danube Delta. In: *Proc. of Tenth International Conference on Marine Sciences and Technologies - BLACKSEA2010*, 7-9 October, Varna, Bulgaria, pp. 338-343.
<http://www.allconferences.com/conferences/2010/20100319091121>
9. **Ivan, A., Rusu, E., 2009.** Wave-Current Interactions at the Entrance of the Danube Delta. In: *Proc. of the 13th International Congress of Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources - IMAM2009*, Istanbul, Turkey, Vol. 3, pp. 875-882.
http://www.imam2009.itu.edu.tr/files/IMAM_2009.pdf
10. **Ivan, A., Rusu, E., 2011.** Study of the hydrodynamic processes at the entrance of the Danube Delta, *International Workshop 'Research quality in doctoral school increased industrial and international visibility'*, 13 – 14 iulie 2011, Galați, Romania.
http://www.phd-expert.ugal.ro/SiteWorkshop2011/new_page_4.htm
11. **Ivan, A., Rusu, E., 2011.** Wave-current interactions and their influence on the navigation conditions at the entrance of the Danube Delta, *International Symposium "Protection and Sustainable Management of the Black Sea Ecosystem, Third Millennium Imperative"*, fifth edition, 29-30 September, 2011, Constanta, Romania
<http://www.rmri.ro/RMRI/Symposium/Downloads/SymposiumProgram2011EN.pdf>

E - Lucrări publicate în Analele Universității "Dunărea de Jos" din Galați (indexate BDI)

12. **Ivan, A., Diaconu, S., 2010.** Analysis of the navigation threats at the entrance of Sulina channel, *The Annals of "Dunarea de Jos", University of Galati, Fascicle X, Applied Mechanics*.

F – Citări (5)

1. Akpınar, A., van Vledder, G.P., Kömürçü, M.T., Özger, M., 2012. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, Issue 50-51, 80-99. (Factor Impact 2,088)
2. Butunoiu, D., Rusu, E. 2012. Sensitivity tests with two coastal wave models *Journal of Environmental Protection and Ecology*, Issue 13 (3), 1332-1349. (Factor Impact 0,102)
3. Gasparotti, C., Rusu, E., 2012. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the Black Sea basin. *Protection and Sustainable Management of the Black Sea Ecosystem, Special Issue, Journal of Environmental Protection and Ecology*, 13 (3A), 1751-1759. (Factor Impact 0,102)
4. Butunoiu, D., Rusu, E., 2012: A Matlab interface associated with modeling surface waves in the nearshore, *Protection and Sustainable Management of the Black Sea Ecosystem, Special Issue, Journal of Environmental Protection and Ecology*, 13 (3A), 1606-1816. (Factor Impact 0,102)

5. Rusu, E., Onea, F, 2013: Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea, *Energy*, Issue 50, 1-14. (Factor Impact 3,487)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044>

Cităta lucrarea: Rusu, L., **Ivan, A.**, 2010. Modelling Wind Waves in the Romanian Coastal Environment. *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 9(4), pp. 547-552.

