

Raport științific

privind implementarea proiectului

Implementarea de metode de asimilare de date pentru a îmbunătăți predicția valurilor în zonele costiere românești ale Mării Negre - DAMWAVE (PN-II-ID-PCE-2012-4-0089)

în perioada septembrie – decembrie 2013

Obiectivele acestei etape sunt:

1. Predicția climatului de val din bazinul Mării Negre prin realizarea de simulări cu sistemul de modelare numerică a valurilor pe o perioadă de 10 ani.
2. Compararea datelor furnizate de modelul numeric cu observații de satelit pentru perioada de 10 ani, analiza erorilor sistematice care apar în cadrul predicțiilor

Introducere

Datele climatologice pe termen mediu și lung privind stările mării prezintă o importanță deosebită atât din punct de vedere științific, cât și pentru o gamă largă de aplicații maritime. Studiile climatologice pot fi realizate pe baza măsurătorilor in-situ care sunt limitate de obicei doar la câteva locații, sau pe baza simulărilor realizate cu modele numerice de valuri care furnizează informații pe arii geografice extinse. Pentru ca previziunile modelelor numerice pentru valuri să fie cât mai apropiate de realitate, acestea sunt mai întâi calibrate și apoi validate în zona de implementare. Chiar și în aceste condiții, pot să apară diverse erori sau rezultate cu acuratețe mai redusă, mai ales în cazul evenimentelor extreme care sunt mai dificil de modelat. O soluție pentru a îmbunătăți estimările stărilor mării este aplicarea de metodologii de asimilare de date (DA) prin care rezultatele modelului pentru valuri sunt combinate cu măsurători (*in situ* și/sau sateliți). Mai recent, disponibilitatea sporită și pe arii extinse a măsurătorilor de satelit din ce în ce mai precise a încurajat studiile privind includerea schemelor de asimilare de date, atât în modelele operaționale, cât și în bazele de date de tip hindcast.

În ceea ce privește bazinul Mării Negre, există foarte puține informații disponibile în domeniul public privind caracteristicile pe termen mediu și lung ale stărilor mării. De asemenea, până în prezent există doar validări sporadice (de ordinul a câteva luni) ale simulărilor efectuate cu modelele pentru valuri pe întreg bazinul Mării Negre, în general acestea limitându-se doar la diverse locații în care existau măsurători de baliză, și fără a se implementa metode DA. În această etapă a proiectului s-a avut ca obiectiv principal realizarea de simulări numerice cât mai realiste pe o perioadă de 10 ani, a căror acuratețe a fost verificată prin comparații cu observații de satelit. Rezultatele simulărilor au fost utilizate pentru realizarea de analize climatologice și vor sta ulterior la baza implementării de metode DA.

Predicția climatului de val din bazinul Mării Negre

Pentru atingerea acestui obiectiv s-au realizat simulări cu sistemul bazat pe modelul spectral în medie de fază pentru predicția valurilor SWAN (Simulating Waves Nearshore) pentru o perioadă de 10 ani, cât mai apropiată de prezent. Având în vedere caracteristicile specifice ale Mării Negre, pentru forțarea modelului de val sunt necesare câmpuri de vânt cu o rezoluție spațială și temporală cât mai ridicată. Date de vânt care să satisfacă aceste cerințe s-au găsit disponibile și au fost descărcate de pe pagina web NCEP-CFSR (United States National Centers for Environmental Prediction, Climate Forecast System Reanalysis) <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>. Câmpurile de vânt descărcate sunt pentru o perioadă de 10 ani (1999-2008) și acoperă întregul bazin al Mării Negre, dar și bazinul Mării Caspice. Datele sunt disponibile în format NetCDF (Network Common Data Form), dar pentru generarea fișierului grilă de vânt utilizat ca input în simulările cu modelul de valuri sau pentru analizele climatologice a fost necesară conversia lor în format ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Datele au o rezoluție spațială de 0,312°x0,312° și o rezoluție temporală de 3 ore. Informațiile procesate sunt păstrate în baza de date a

proiectului DAMWAVE, atât în format numeric, cât și imagini, câteva exemple fiind prezentate în continuare. Figura 1 ilustrează câmpurile de vânt deasupra bazinului Mării Negre pentru o situație extremă întâlnită în ianuarie 2004 (Figura 1-stânga) și un caz cu intensități medii ale vitezei vântului, din martie 2004 (Figura 1-dreapta). Pentru lărgirea bazei de date privind caracteristicile vântului, au fost achiziționate și date provenind de la diverse stații meteorologice care operează pe țărm sau în zona offshore a bazinului Mării Negre, realizându-se analize statistice privind caracteristicile vântului în bazinul Mării Negre.

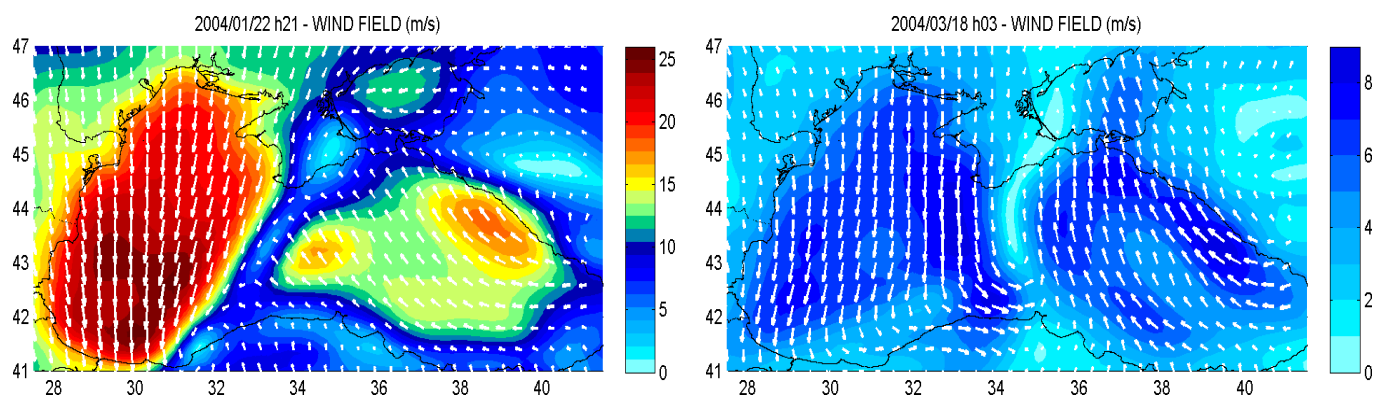


Figura 1 Câmpuri de vânt corespunzătoare unei situații extreme (a) și medii (b) din 2004/01/22-h21 și respectiv 2004/03/18-h03.

Pentru a ne asigura că rezultatele simulărilor de tip hindcast cu modelul de val pentru perioada de 10 ani considerată vor avea o acuratețe cât mai ridicată, a fost realizată mai întâi o calibrare a modelului SWAN în bazinul Mării Negre pentru găsirea configurațiilor cele mai adecvate (dintre diversele opțiuni existente) pentru procesele fizice relevante. Calibrările au fost făcute pentru o perioadă de trei luni la începutul anului 1999 considerând atât date de la măsurători in situ (platforma Gloria și balizele Gelendzhik și Hopa) cât și date de satelit.

Au fost definite două nivele de calcul (**1-Global**, pentru întregul bazin al Mării Negre, și **2-Costier**, pentru zona din apropierea litoralului românesc), care sunt prezentate în Tabelul 1. Alte domenii cu rezoluție mai mare urmează să se implementeze ulterior și să se cupleze cu domeniul costier prin procedeele numite 'nesting'. După finalizarea procesului de calibrare, considerând câmpurile de vânt achiziționate și procesate, au fost realizate simulări numerice cu modelul SWAN corespunzător primului nivel de calcul (Global) pentru întreaga perioadă țintă de 10 ani (1999-2008). În toate punctele grilei de calcul au fost generate valorile principalilor parametri de val cum ar fi înălțimea semnificativă (H_s), perioada medie (T_m), perioada vârfului spectral (T_p), direcția medie (Dir), energia transportată de val (E_{tr}) și direcția de transport a energiei (D_{tr}).

Tabelul 1 Caracteristicile primelor două nivele de calcul considerate în modelul SWAN

Nivel de calcul	$\Delta x \times \Delta y$	Δt (min)	Nr frecvențe	Nr direcții	$ngx \times ngy = np$	Origine (long/lat)
1-Global	$0,08^\circ \times 0,08^\circ$	10 (nestaționar)	30	36	$176 \times 76 = 13376$	27,5 E / 41,0 N
2-Costier	$0,02^\circ \times 0,02^\circ$	10 (nestaționar)	30	36	$101 \times 101 = 10201$	28,5 E / 43,5 N

În acest fel a fost realizată o bază de date cu rezultatele simulărilor numerice pentru întregul interval de timp considerat, care conține informații credibile privind principalii parametri de val din bazinul Mării Negre. Informațiile sunt păstrate ca fișiere binare comprimate (format Matlab) care conțin valorile parametrilor de val enumerați mai sus, cu o rezoluție temporală de 3 ore, iar pentru câmpurile de înălțimi semnificative și direcția medie a valurilor au fost generate și imagini. Pe baza acestor date s-au calculat mediile climatologice corespunzând întregului bazin al Mării Negre pentru: totalitatea datelor și pentru fiecare an, sezon vară și iarnă întreaga perioadă dar și pentru fiecare an, medii lunare și anuale. Rezultatele obținute indică clar faptul că în zona de vest a Mării Negre condițiile de val sunt sistematic mai mari decât în zona estică, câteva exemple fiind prezentate în Figura 2 care ilustrează mediile parametrului H_s pentru:

fiecare sezon, întreaga perioadă, cât și doar pentru luna ianuarie, corespunzător intervalului de timp 1999-2008. În analizele realizate sezonul de iarnă reprezintă intervalul de timp din octombrie până în martie, iar sezonul de vară restul anului.

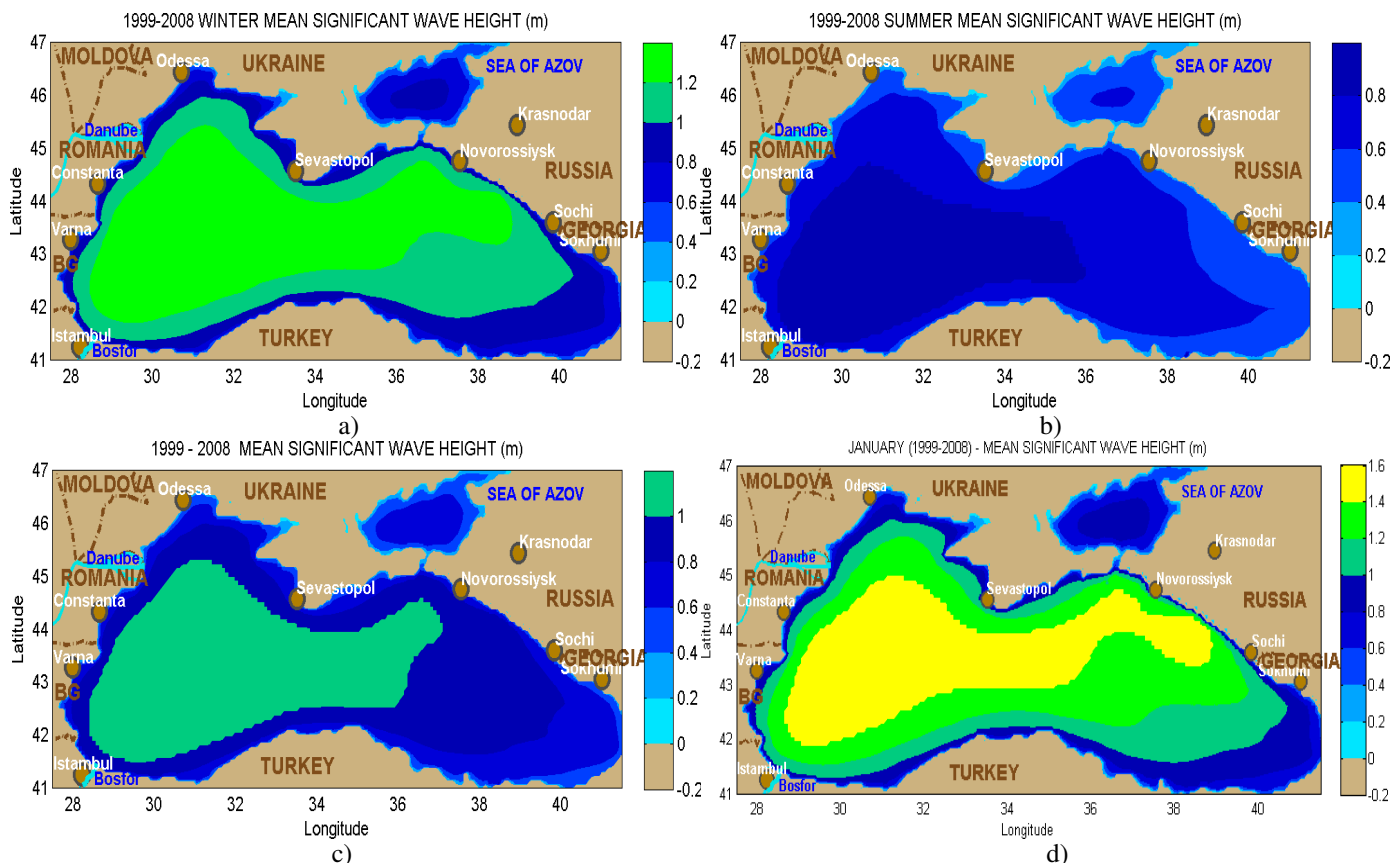


Figura 2 Câmpuri de înălțimi semnificative, valori medii pentru intervalul de timp (1999-2008) rezultate din simulările cu modelul de valuri SWAN. a) perioada de iarnă, b) perioada de vară, c) perioada totală, d) luna ianuarie.

Compararea previziunilor cu observații de satelit, analiza erorilor sistematice

Contribuția pozitivă a observațiilor de satelit pentru validarea modelelor de valuri a fost stabilită în mod clar și cele mai multe centre de predicție a vremii care operează modele globale pentru valuri realizează în prezent astfel de validări. Acuratețea și rezoluția spațială a măsurătorilor altimetrice permit determinarea calității previziunilor realizate cu modelul de valuri la nivelul global al Mării Negre.

În vederea realizării de comparații între previziuni și observațiile de satelit au fost descărcate din bazele de date internaționale (în principal <http://cersat.ifremer.fr/> și <http://www.avisooceanobs.com>) măsurătorile de satelit pentru perioada de timp considerată (1999-2008). Acestea se referă la sistemul *multi-mission* care cuprinde măsurători provenite de la mai mulți sateliți: ERS-2, ENVISAT, TOPEX, Poseidon, JASON-1, JASON-2, GEOSAT Follow-On (GFO). În paralel cu înălțimea semnificativă a valului s-au reținut și valorile vitezei vântului de-a lungul traiectoriilor sateliților deasupra bazinului Mării Negre, realizându-se în acest fel o bază de date consistentă pentru perioada de zece ani considerată (1999-2008) privind măsurătorile de val și vânt pe întregul bazin.

Evaluarea rezultatelor simulărilor cu modelul SWAN în raport cu datele de satelit prezintă avantajul că oferă o perspectivă mult mai amplă, la întreaga scară geografică a bazinului Mării Negre, în comparație cu evaluările realizate in-situ. Pentru a putea compara rezultatele modelului SWAN cu observații altimetrice a fost mai întâi necesară interpolarea în spațiu și timp (interpolare bilineară) a datelor simulate în punctele grilei de calcul la pozițiile măsurătorilor altimetrice situate de-a lungul traiectoriilor sateliților. În acest fel este asigurată corespondența spațio-temporală între simulări și datele de altimetru.

Principalii parametri statistici calculați în evaluarea rezultatelor simulărilor sunt valorile medii măsurate și simulate ale înălțimii semnificative, biasul, eroarea medie absolută, eroarea *RMS*, indicele de împrăștiere sau eroarea normalizată (*SI*) calculată ca eroarea *RMS* împărțită la valoarea medie observată, coeficientul de

corelare (R) și panta liniei de regresie dusă prin origine (S). Acești parametrii statistici au fost evaluați pe anumite paliere sau categorii, cum ar fi valori anuale, sezonale și lunare, pentru fiecare satelit în parte și total. De asemenea, pentru toate comparațiile au fost realizate și diagrame de împrăștiere din care se pot observa cu mai multă ușurință diferențele dintre simulări și măsurători pe diverse paliere de H_s .

Rezultatele statistice obținute prin compararea înălțimilor semnificative simulate de modelul SWAN cu observațiile altimetrice sunt prezentate în Tabelul 2, atât pentru fiecare altimetru cât și pentru toate altimetrele (N reprezintă numărul de perechi de date utilizate în calculul statistic). Pentru fiecare altimetru este indicată perioada de funcționare în intervalul de 10 ani (1999-2008).

Tabelul 2 Rezultate statistice obținute pentru H_s (prezentate pentru fiecare altimetru separat și pentru toate altimetrele), simulări cu modelul SWAN comparate cu date de altimetru pe întreg bazinul Mării Negre pentru o perioadă de 10 ani (1999-2008).

Satelit / Perioada de timp	MeanObs (m)	MeanSim (m)	Bias (m)	MAE (m)	RMSE	SI	R	S	N
ERS-2 (toată perioada de 10 ani)	0,98	0,95	-0,03	0,32	0,43	0,44	0,82	1,00	190341
ENVISAT (din 14-05-2002)	1,12	1,08	-0,04	0,27	0,37	0,33	0,88	1,00	101660
TOPEX (până în 08-10-2005)	0,93	0,94	0,01	0,24	0,34	0,37	0,88	1,03	142337
Poseidon (până în 08-10-2005)	0,88	0,92	0,04	0,29	0,39	0,44	0,78	1,01	3840
Jason-1 (din 15-01-2002)	1,13	1,10	-0,03	0,28	0,38	0,34	0,87	1,02	132266
GFO (07-01-2000 până în 07-09-2008)	1,22	1,23	0,01	0,27	0,39	0,32	0,87	1,04	112297
Jason-2 (din 04-07-2008)	1,08	0,97	-0,11	0,28	0,37	0,34	0,87	0,94	9472
Toți sateliții	1,06	1,04	-0,02	0,28	0,39	0,37	0,86	1,02	692213

Din Tabelul 2 se observă că numărul de date analizate este relativ mare ($N = 692213$), ceea ce oferă o mai mare încredere în rezultatele obținute. În general rezultatele statistice indică faptul că există o corelare bună între simulări și observații (valori ale parametrului R în general peste 0,85), un bias în general mai mic decât 0,05m și S cu valori apropiate de 1. Valorile lui SI sunt mai ridicate, dar acest lucru este în concordanță cu rezultatele obținute și în alte studii realizate în mări închise precum Marea Mediterană sau Adriatică.

În următoarea figură sunt prezentate diagramele de împrăștiere pentru sezonul de vară (Figura 3-stânga) și sezonul de iarnă (Figura 3-dreapta), precum și rezultatele statistice. Rezultatele obținute pentru perioada de iarnă prezintă o corelare mai bună, cu o ușoară supraestimare a observațiilor ($S > 1$) de către simulări. Pentru perioada de vară modelul subestimează observațiile ($S < 1$) iar indicele de împrăștiere prezintă valori mai mari.

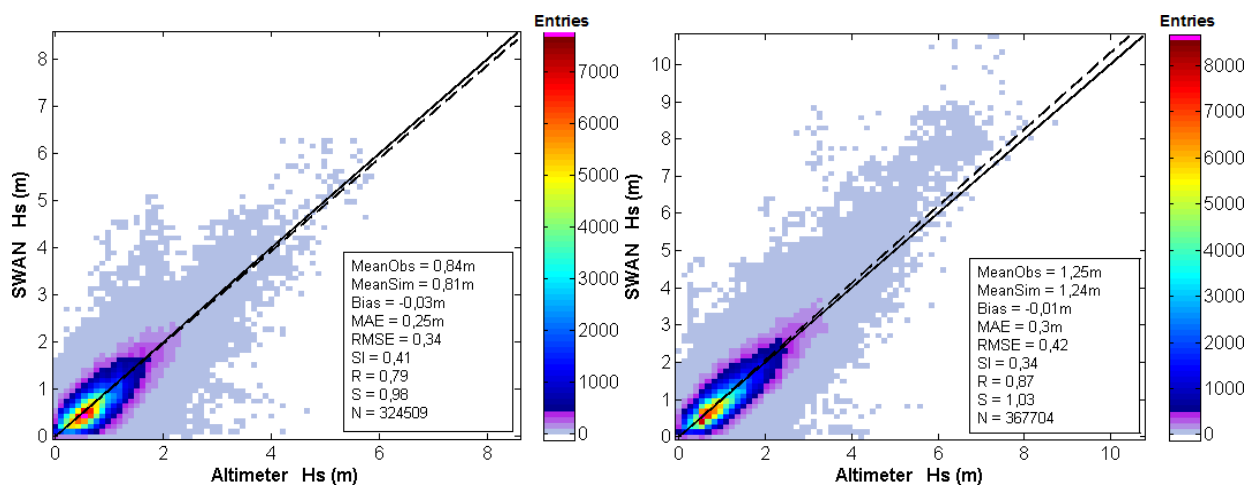


Figura 3 Diagrame de împrăștiere pentru perioada de vară (stânga) și iarnă (dreapta) corespunzător intervalului de timp 1999-2008.

Analizând rezultatele obținute din simulările efectuate cu modelul SWAN pe întregul bazin al Mării Negre pentru perioada 1999-2008 și corelând aceste analize și cu datele de satelit au fost puse în evidență mai multe situații specifice pentru cazurile de energie medie și pentru cazurile de furtună. În acest sens, în

Figura 4 sunt ilustrate două situații cu condiții medii spre înalte de val (câmpurile de înălțimi semnificative și vectorii de val corespunzătoare momentelor de timp 2001/08/02-h21 și 2002/01/21-h21) și două situații de condiții de furtună (2001/12/09-h06 și 2001/12/30-h12).

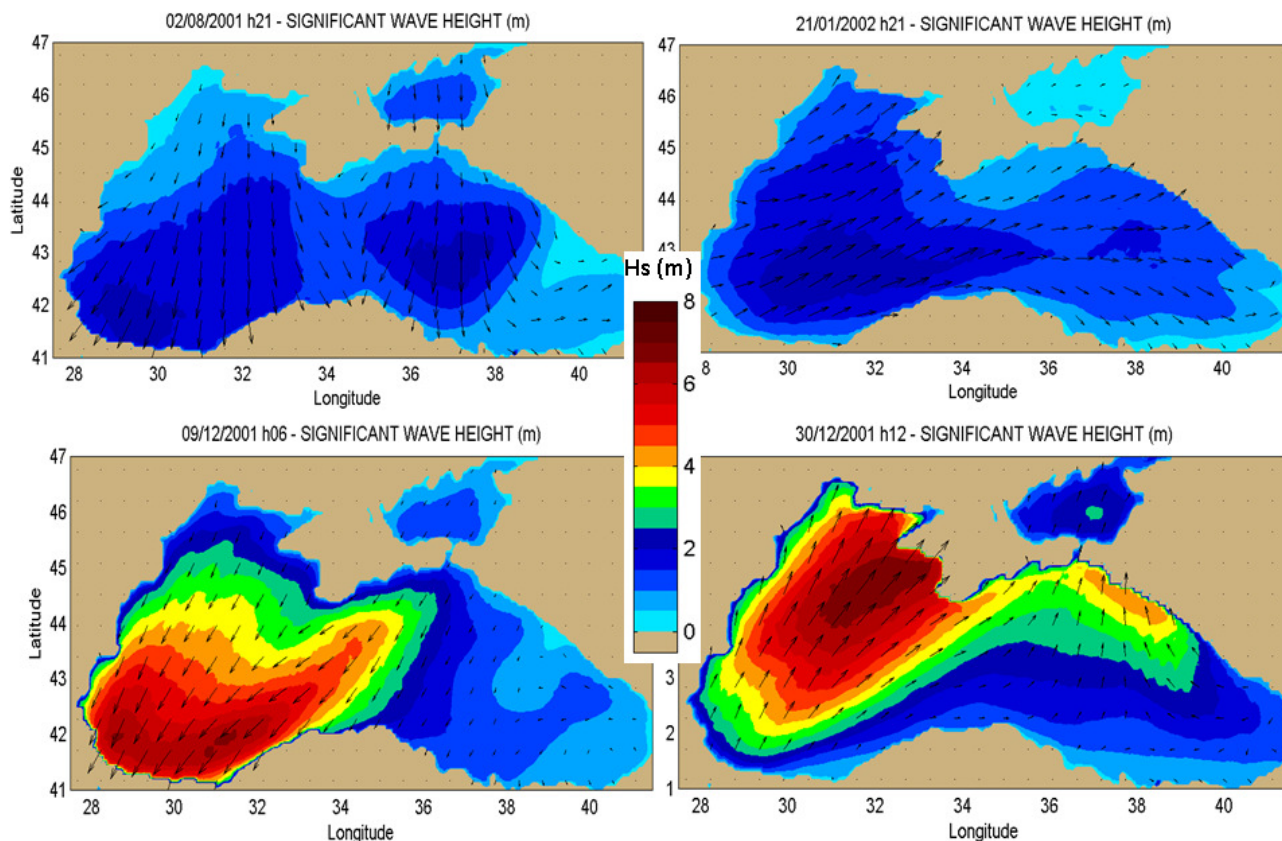


Figura 4 Câmpuri de înălțimi semnificative și vectorii de undă, simulări cu modelul SWAN pentru condiții medii spre înalte și condiții de furtună.

În scopul de a face comparații cu alte mări închise având caracteristici asemănătoare cu Marea Neagră s-a realizat și o analiză a datelor de satelit (pentru intervalul de timp 2005-2010) urmată de simulări cu modelul SWAN în bazinul Mării Caspice. O exemplificare este prezentată în Figura 5 în care este ilustrată o situație de energie medie spre înaltă (Figura 5a) și o situație de furtună (Figura 5b). Așa cum arată rezultatele, dacă în termeni medii situația din cele două mări este destul de asemănătoare, în ceea ce privește situațiile de furtună Marea Neagră prezintă valori sensibil mai mari pentru parametrul H_s .

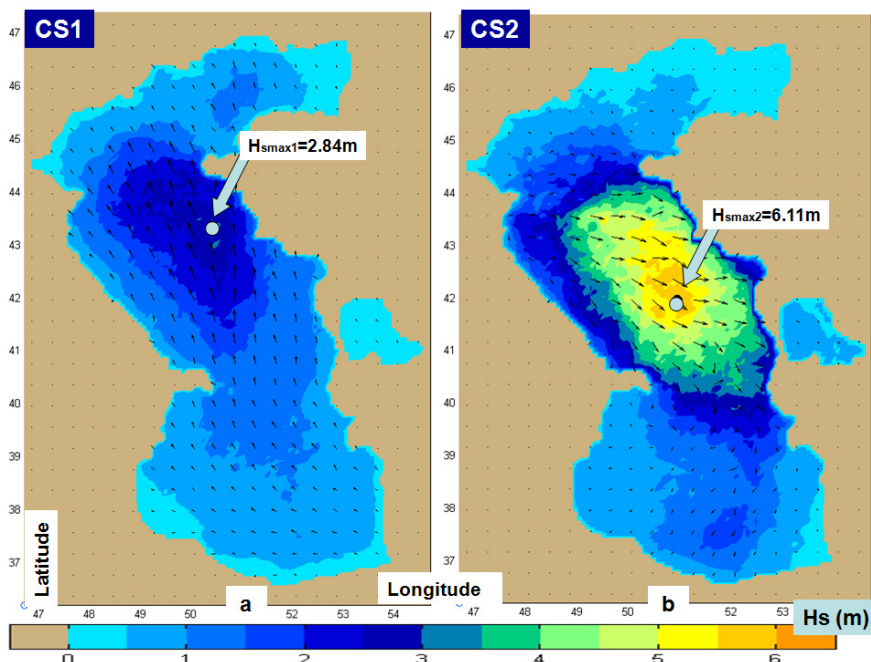


Figura 5 Regimul de valuri din Marea Caspică, câmpuri de înălțimi semnificative și vectorii de undă, simulări cu modelul SWAN (rezultate publicate în Rusu & Onea 2013), CS1 – condiții medii spre înalte pentru perioada de iarnă (corespund la situația din 2009/10/02/h18), b) CS2 – condiții de furtună (corespund la situația din 2009/11/27/h03).

Concluzii

În final se poate aprecia că s-a reușit atingerea tuturor obiectivelor propuse pentru această etapă, fiind finalizată realizarea bazei de date privind parametrii de val (și de vânt) care acoperă întregul bazin al Mării Negre cu o rezoluție spațială de 0.08° atât în longitudine, cât și în latitudine, și o rezoluție temporală de 3ore. Pe baza acestor date a fost realizată o analiza climatologică pentru diverse perioade. Totodată această bază de date constituie punctul de pornire pentru următoarele etape ale proiectului DAMWAVE și care constau în implementarea de metode de asimilare de date pentru a îmbunătăți rezultatele sistemului de predicție a valurilor din Marea Neagră bazat pe modele numerice, atât în domeniile de calcul deja definite cât și în domeniul de calcul de rezoluție înaltă care se vor defini în etapele ulterioare.

Diseminarea rezultatelor

O parte din rezultate au fost diseminate prin publicarea a două lucrări în reviste internaționale, dintre care una în revista *Energy* indexată ISI (FI=3.651), iar cea de-a doua în revista *International Journal of Geosciences* indexată în mai multe BDI. De asemenea, au fost realizate prezentări orale și postere în cadrul Conferințelor Internaționale:

- International Conference Danube - Black Sea 3E - Energy, Environment & Efficiency (IWEEE2013), Interdisciplinary Researches in the Danube and Black Sea areas, Galati 18-21 September 2013 www.iweee.ugal.ro/documente/Program_final.pdf - 1 prezentare orală (prezentare invitată în plenul conferinței) și alte 8 articole publicate în volumul conferinței, editat în ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI MATHEMATICS, PHYSICS, THEORETICAL MECHANICS FASCICLE II, YEAR V(XXXVI) 2013, No. 2 (B+), ISSN 2067-2071.
- The 4th Black Sea Scientific Conference, 'Black Sea - Challenges Towards Good Environmental Status', lucrările fiind prezentate în cadrul manifestărilor: Symposium "Protection and sustainable management of the Black Sea ecosystem, third millennium imperative" Sixth Edition, și Workshop "Sustainable development and energy use in the Black Sea", 29 – 31 Octombrie, Constanța, Romania - 2 prezentări orale și un poster.
http://www.blacksea-commission.org/Downloads/BS-GES-2013-Conference_Program_18.10.pdf .

De asemenea, lucrarea cu titlul "Analysis of the extreme storm events in the Black Sea considering the results of a five-year wave hindcast", autori Liliana Rusu, Dorin Butunoiu, Eugen Rusu, a fost acceptată la Conferința Internațională AQUALIRES2014 <http://www.incdpm.ro/en/news/events/222-aqualires-2014-en>

Se poate menționa de asemenea și faptul că a fost realizată în avans (era prevăzută la începutul anului 2014) pagina web a proiectului DAMWAVE, disponibilă la adresa:
<http://www.im.ugal.ro/DAMWAVE/index.htm>

Buget 2013: 85.100 lei

Director proiect
Conf. dr. ing. Liliana Rusu