

## **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 în perioada ianuarie – decembrie 2014**

În cea de a doua etapă de implementare a proiectului desfășurată în perioada menționată, au fost urmărite obiectivele specifice proiectului:

1. Implementarea unei scheme pentru asimilarea de date (DA-Data Assimilation) bazată pe metode secvențiale sau variaționale pentru simulările de tip hindcast.
2. Validarea rezultatelor obținute în urma aplicării metodologiei DA pentru hindcast, perioada 1999-2008.
3. Diseminarea rezultatelor

#### **1. Implementarea unei scheme pentru asimilarea de date (DA-Data Assimilation) bazată pe metode secvențiale sau variaționale pentru simulările de tip hindcast.**

##### **1.1. Analiza principalelor scheme DA aplicate în prezent în sistemele de predicție a valurilor.**

Într-o prima fază, pentru a putea implementa în deplină cunoștință de cauză cele mai potrivite scheme de asimilare de date în predicția valurilor cu modele numerice spectrale, a fost făcută o analiză eshaustivă a principalelor scheme DA aplicate în prezent în sistemele de predicție a valurilor. Câteva aspecte mai importante privind rezultatele acestei analize sunt prezentate pe scurt în această secțiune.

Asa cum se cunoaște, scopul principal al asimilării de date este de a reduce erorile sistematice de predicție care apar în rezultatele directe furnizate de modelele numerice, profitând de disponibilitatea de măsurători existente în zona de interes. Principiul de bază în asimilarea de date este de a combina informațiile provenite din măsurători cu rezultatele obținute în urma simulărilor realizate cu modele numerice pentru a obține o estimare cât mai apropiată de realitate a câmpurilor geofizice de interes (Kalnay, 2003; Reichle, 2008). În acest sens, tehnicile uzuale de asimilare de date utilizează observațiile și oferă estimări complete la scara impusă de aplicație - atât în timp, cât și în spațiul geografic. Combinația optimă a măsurătorilor cu informațiile provenite de la model ia în considerare incertitudinile care însoțesc atât observațiile cât și estimările modelului. Ori de câte ori, și oriunde în zona de aplicație, sunt disponibile măsurători precise, estimările asimilării vor fi mai aproape de aceste observații. Toate metodele de asimilare a datelor împărtășesc principiul de bază care fuzionează modele și observații, dar gradul de sofisticare al algoritmului de fuziune variază foarte mult de la o tehnica de asimilare de date la alta. De asemenea, rămân diferențe importante între metodele specifice care sunt cele mai potrivite pentru o aplicație dată.

Asimilarea de date în predicția valurilor se realizează de obicei pentru mărimea *înălțimea semnificativă a valurilor* ( $H_s$  – significant wave height), măsurători ale acestui parametru de val fiind disponibile atât local (care provin în general de la balize), cât și pe arii extinse (date de altimetru). Metodele de asimilare de date utilizate în predicția valurilor sunt clasificate în două categorii: secvențiale și variaționale.

Metodele secvențiale combină toate observațiile înregistrate într-o anumită fereastră de timp și corectează rezultatele modelului fără a considera dinamica acestuia. Schemele DA cele mai cunoscute sunt bazate fie pe proceduri secvențiale instantanee, cum ar fi interpolările optimale (OI – Optimal Interpolation, Daley, 1991; Lionello et al., 1992; Abdalla et al, 2005), sau pe Corecții Succesive (SCM - Successive Corrections Method, de ex. Thomas, 1988). Aceste două metode prezintă avantajul că necesită cerințe de calcul mai reduse, schemele DA bazate pe OI fiind cele mai utilizate în prezent în marile centre de previziuni a valurilor.

Alte scheme DA se bazează pe aplicarea filtrului Kalman (KF-Kalman Filter), această metodă prezentând mai multe nivele temporale. Principala problemă în aplicarea unor astfel de tehnici apare din aproximarea matricii de covarianță a erorilor care necesită un timp de calcul ridicat, iar pentru reducerea acestuia sunt necesare simplificări (a se vedea de exemplu Voorrips, 1999). Recent au fost testate tehnici care combină în cadrul modelelor de valuri,

filtrele Kalman și tehnicile DA pentru îmbunătățirea acurateții simulărilor (Emmanouil et al., 2012). Mai precis, abaterile sistematice ale rezultatelor modelului de val sunt minimizate prin utilizarea de algoritmi de filtrare Kalman în zonele cu flux continuu de observații. Apoi, rezultatele îmbunătățite sunt asimilate prin scheme de tip OI în perioada de prognoză a modelului val pentru a extinde impactul asimilării în timp și spațiu. Trebuie totuși remarcat faptul că, metodologia propusă poate fi aplicată cu succes doar atunci când există serii continue în timp de date măsurate (de exemplu, date de baliză), ceea ce este destul de greu de realizat.

Schemele variaționale consideră mai multe nivele de timp în care dinamica modelului este luată în considerare explicit în timpul procesului de asimilare. Totuși, cerințele de calcul ridicate relaționate cu implementarea unor astfel de metode au încetinit oarecum implementarea lor în domeniul previziunilor pentru valuri. De altfel, o comparație cu metodele OI a fost realizată de Voorrips and de Valk (1997) pentru condiții de val dominate de valuri de vânt (aceste condiții sunt caracteristice și în Marea Neagră) și aceasta nu a evidențiat avantaje privind metodele variaționale. Rezultatele obținute după aplicarea tehnicilor de asimilarea de date sunt apoi translatate în domeniul spectral (Lionello et al., 1992; Greenslade, 2001; Emmanouil et al., 2007).

Cele mai multe centre pentru predicția vremii care utilizează operațional modele pentru valuri asimilează date de altimetru, respectiv  $H_s$ , utilizând proceduri bazate pe tehnici OI sau SCM. La seminarul cu tematica *Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction* <http://www.ecmwf.int/en/seminar-2014-use-satellite-observations-numerical-weather-prediction> organizat în septembrie 2014 de unul din cele mai importante centre de predicție a vremii la nivel global, respectiv European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), au fost purtate discuții privind asimilarea de date în modelele de valuri, atât în acest centru, precum și în alte centre pentru predicția vremii (este de menționat că doi membri ai echipei de cercetare a proiectului DAMWAVE au participat la acest seminar). Cea mai eficientă metodă DA (considerând timpul de calcul vs. acuratețea rezultatelor) pentru  $H_s$  continuă să fie OI, informații privind modul în care este aplicată metoda OI la ECMWF se regăsesc în prezentarea *Active techniques for wind and wave observations: scatterometer, altimeter, SAR* (pentru valuri începând cu slide-ul 39) [http://www.ecmwf.int/sites/default/files/AS-presentation\\_DeChiara\\_Abdalla.pdf](http://www.ecmwf.int/sites/default/files/AS-presentation_DeChiara_Abdalla.pdf).

## 1.2. Identificarea și implementarea unei metodologii DA în care să existe un echilibru între acuratețea numerică a rezultatelor și timpul de calcul.

### 1.2.1 Metodologie DA pentru îmbunătățirea predicțiilor locale la nivelul zonei costiere românești

Întrucât obiectivul principal al proiectului îl reprezintă îmbunătățirea predicțiilor de val în zona economică românească din bazinul Mării Negre, o primă parte a cercetării realizate în cadrul proiectului DAMWAVE a fost focalizată pe îmbunătățirea locală a predicțiilor condițiilor de val la nivelul zonei costiere românești. Acest lucru a fost realizat prin asimilarea datelor de val măsurate *in-situ* la Platforma de foraj marin Gloria. Astfel, asimilarea locală de date s-a realizat la două nivele diferite: asimilare în domeniul timpului și asimilare în spațiul geografic (care a fost ulterior transferată în spațiul spectral).

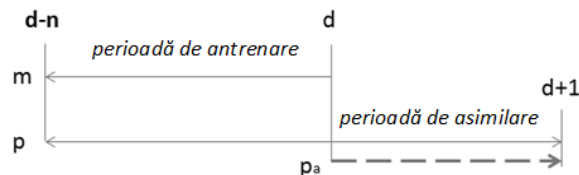
#### -schemă DA in domeniul timpului

Schema DA adoptată pentru a se realiza corecții în domeniul timpului se bazează pe un algoritm de corecții succesive. Astfel, pentru fiecare zi  $d$ , previziunile produse cu modelul numeric de valuri la locația Platformei Gloria cu o rezoluție temporală de 6 ore (identic cu intervalul măsurărilor) sunt corectate în concordanță cu măsurătorile realizate anterior pentru aceeași locație. Utilizând ansamblul de măsurători și predicțiile corespunzătoare produse în  $d-n$  zile anterioare, numită *perioadă de antrenare* (training period), scopul este să găsim valorile parametrilor care definesc ecuația drepte de regresie care se ajustează cel mai bine setului de date. Parametrii care definesc ecuația drepte de regresie sunt estimați pe baza metodei *celor mai mici pătrate* cu relațiile de mai jos, fiind apoi utilizați pentru corectarea previziunilor produse în ziua  $d$ :

$$\beta_1^d = \frac{\sum_{i=1}^k (m_i - \bar{m})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^k (m_i - \bar{m})^2} \quad \text{și} \quad \beta_0^d = \bar{p} - \beta_1^d \bar{m}, \quad (1)$$

unde subscriptul  $d$  indică ziua în care este aplicată DA,  $\beta_0$  este interceptorul,  $\beta_1$  este coeficientul de regresie (panta),  $p$  reprezintă parametrul de val estimat de modelul de valuri ( $H_s$  sau perioada medie),  $m$  reprezintă parametrul măsurat,  $\bar{m}$  și  $\bar{p}$  sunt valorile medii ale variabilelor, iar  $k$  reprezintă numărul valid de măsurători disponibile în perioada de antrenare a algoritmului. O reprezentare schematică a acestei metode este ilustrată în Figura 1, iar fundamente teoretice ale metodei se pot găsi de exemplu în Wilks (2006) sau Soukissian și Kechris (2007). Valorile corectate ale previziunilor parametrului de val  $p_a^d$  pentru ziua  $d$  sunt obținute prin aplicarea ecuației de regresie (2):

$$p_a^d = \beta_1^d p^d + \beta_0^d, \quad (2)$$

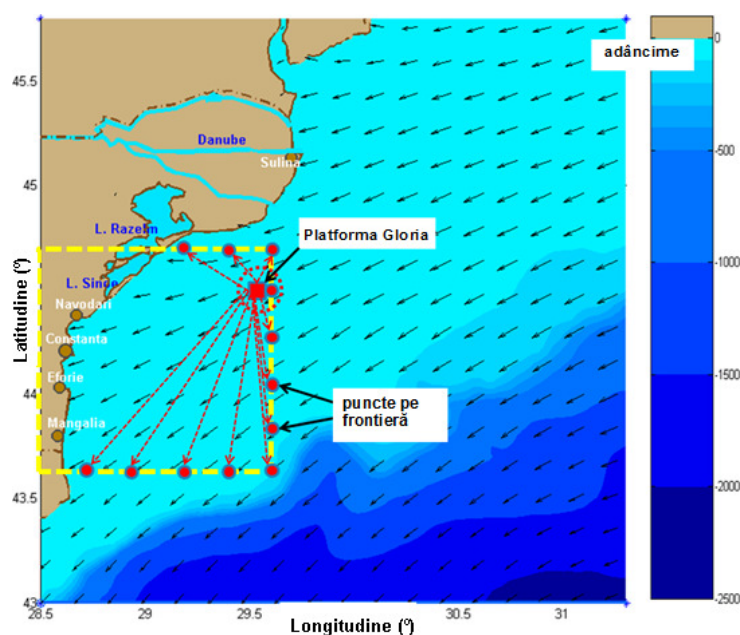


**Figura 1.** Prezentare grafică a perioadei de timp luate în considerare pentru calculul și aplicarea parametrilor de regresie liniară.

Rezultatele prezentate mai sus au fost publicate în Rusu (2014). Schema DA descrisă a fost implementată cu succes, permițând îmbunătățirea substanțială a predicțiilor condițiilor de val (parametrii de val considerați au fost înălțimea semnificativă și perioada medie) la locația platformei Gloria. Pentru a putea însă îmbunătăți predicțiile valurilor cu modelele numerice spectrale, în zona costieră românească este foarte importantă și implementarea unei scheme DA care să permită realizarea de corecții nu numai într-un punct, dar în întreg spațiul geografic aferent litoralului românesc.

#### -schemă DA spațială

Pentru a propaga corecțiile de la locația platformei de foraj marin Gloria în întreg spațiul geografic aferent zonei costiere românești, a fost realizată și implementată o schemă DA originală bazată de asemenea pe metoda corecțiilor succesive. În acest caz, corecția din spațiul geografic este urmată de o corecție în spațiul spectral în punctele definite pe frontiera domeniului de calcul, după care se realizează simularea efectivă cu modelul SWAN. Procedura DA propusă este sugerată în Figura 2 și consideră utilizarea măsurătorilor in-situ efectuate la platforma Gloria, în scopul de a corecta previziunile de val în domeniul de calcul care acoperă zona de interes.



**Figura 2.** Domeniul de calcul (marcat cu linie galbenă întreruptă) și schema DA luate în considerare pentru îmbunătățirea previziunilor de val în zona litoralului românesc, harta batimetrică este ilustrată în fundal împreună cu un exemplu care este caracteristic direcției de propagare a valurilor.

Această metodă presupune propagarea corecției dintre măsurătorile de la Gloria și rezultatele simulărilor cu modelul numeric pentru predicția valurilor, corespunzătoare aceleiași locații și aceluiași moment de timp, în spațiul geografic și în special în punctele de frontieră ale domeniului de calcul. Astfel, într-un punct  $B$  (situat pe frontiera domeniului de calcul marcat cu galben) valoarea lui  $H_s$  asimilată, care corespunde momentului  $Tf$  ( $H_{sBTf}^{Assim}$ ) este calculată cu următoarea relație:

$$H_{sBTf}^{Assim} = H_{sBTf}^{Sim} + C_1(B, Tf)(\Delta H_{sGTf}), \quad (3)$$

$H_{sBTf}^{Sim}$  reprezintă valoarea lui  $H_s$  simulată în punctul  $B$ ,  $\Delta H_{sGTf}$  este calculat ca diferența dintre valoarea lui  $H_s$  măsurată și simulată la poziția Platformei Gloria și corecția  $C_1(B, Tf)$  a fost definită ca:

$$C_1(B, Tf) = \frac{H_{sBTf}^{Sim}}{H_{sGTf}^{Sim}}. \quad (4)$$

După efectuarea corecțiilor parametrului  $H_s$  în punctele  $B$  care controlează condițiile variabile ale domeniului de calcul, următorul pas constă în transferarea acestei corecții în spațiul spectral. Informații suplimentare privind implementarea acestei metode în zona costiera romaneasca se găsesc în Butunoiu și Rusu (2014).

Ca un pas ulterior se preconizează cuplarea celor două scheme ceea ce ar permite dezvoltarea unui sistem de predicție de tip forecast focalizat pe zona costieră românească.

### 1.2.2 Metodologie DA pentru întreg bazinul Mării Negre

În afară de îmbunătățirea locală a predicțiilor de val, un pas important îl reprezintă implementarea unei scheme DA la nivelul global al Mării Negre care se bazează pe datele de satelit, date care în ultimii ani au o rezoluție și o acuratețe din ce în ce mai bună.

În urma studiului bibliografic privind metodologiile DA aplicate pentru previziunile de valuri pe suprafețe extinse și analiza avantaje/dezavantaje, pe bazinul Mării Negre s-a decis aplicarea algoritmului bazat pe tehnicile OI, formulat în spațiul de observare, cu definițiile de mai jos (Kalnay, 2003):

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{P}_b \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_b \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)] \quad (5)$$

unde

$\mathbf{y}$	Vectorul observații la un ciclu specific de actualizare (Observation vector)
$\mathbf{x}_b$	Vectorul de stare a predicției (Background vector)
$\mathbf{x}_a$	Vectorul analiză (Analysis vector)
$H, \mathbf{H}$	Operatorul înainte, Matricea (Forward operator, Matrix)
$\mathbf{R}$	Covarianța erorii observațiilor (Observation Error Covariance)
$\mathbf{P}_b$	Covarianța erorii predicțiilor (Background Error Covariance)
$\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$	Vector de inovație (Innovation vector)
$\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_a)$	Vector rezidual (Residual vector)
$\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b$	Vector de creștere (sau corecție) (Increment vector)

Utilizarea *operatorului înainte*  $H$  este o metodă de a converti o variabilă simulată de model într-o variabilă observată. În cazul nostru, atât observațiile cât și previziunile reprezintă aceeași variabilă, respectiv  $H_s$ , și atunci  $H$  se reduce la o interpolare spațială a previziunilor la locația observațiilor. Creșterea analizei este definită de relația  $\mathbf{P}_b \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_b \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} [\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)]$ , unde cantitatea  $\mathbf{P}_b \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_b \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}$  este matricea pondere (de asemenea întâlnită și sub numele de matricea de câștig Kalman). Astfel,  $\mathbf{H} \mathbf{P}_b \mathbf{H}^T$  este covarianța erorii predicțiilor între locațiile observațiilor, și  $\mathbf{P}_b \mathbf{H}^T$  este covarianța erorii predicțiilor între observație și locațiile grilei. Covarianța erorii predicțiilor este separată într-o varianță a erorii predicțiilor și o corelație. Corelația orizontală este calculată cu relația  $C_h = \exp(-s_h / L_{max})$  unde  $s_h$  este distanța orizontală între două locații (observații sau observație și un punct de grilă) iar  $L_{max}$  este lungimea de corelație pentru erorile de predicție pentru  $H_s$  (Lionello et al., 1992).

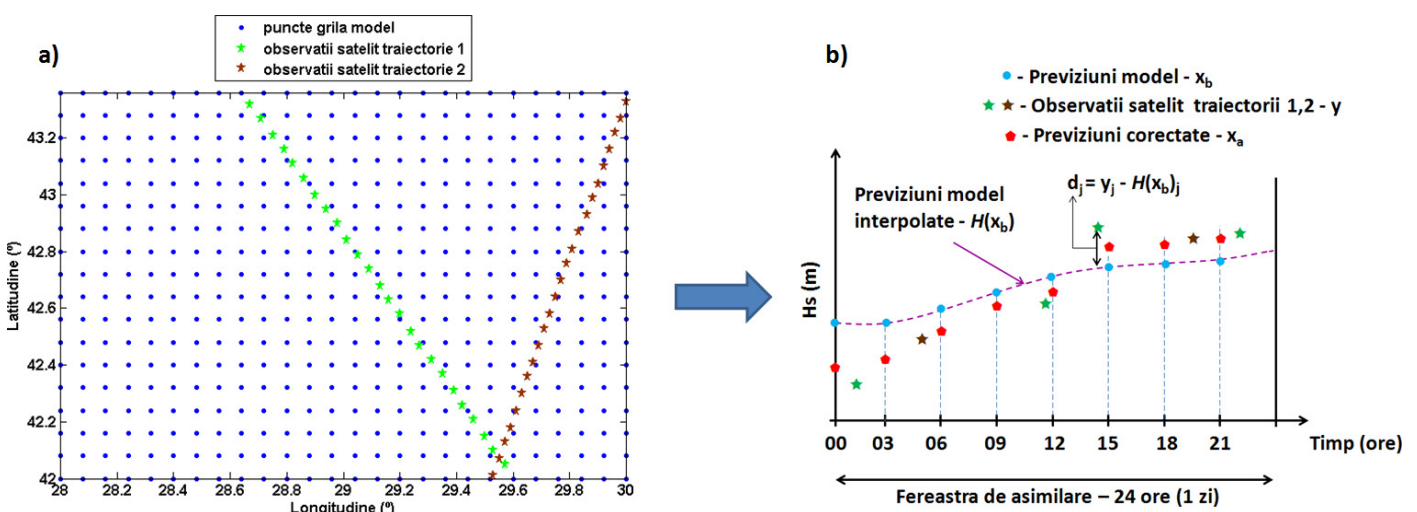
Diverse studii (ca spre exemplu cel realizat de Greenslade și Young, 2005) indică faptul că  $L_{max}$  la latitudinea de  $45^\circ$  (bazinul Mării Negre este centrat pe această latitudine) este în jur de 400km, ceea ce în grade reprezintă aproximativ  $4^\circ$ . În primul rând a fost utilizată această valoare, dar având în vedere că în Marea Neagră valurile de vânt sunt predominante, s-a considerat că este necesar să fie testate și valori mai mici pentru  $L_{max}$  și să se calculeze rezultatele statistice obținute prin aplicarea de DA.

Îmbunătățirea estimărilor privind starea mării pe întreg bazinul Mării Negre prin aplicarea de metodologii DA depinde foarte mult de volumul de date de  $H_s$  măsurate care sunt asimilate. Pentru arii extinse singurele măsurători disponibile sunt cele furnizate de sateliți, care în ultimii ani au devenit din ce în ce mai precise făcând ca acestea să reprezinte o sursă viabilă pentru utilizarea lor în implementarea de DA.

Algoritmul DA implementat la nivelul bazinului Mării Negre utilizează baza de date realizată în prima etapă de implementarea proiectului. Aceasta conține informații privind rezultatele simulărilor numerice pentru o perioadă de 10 ani (1999-2008) privind valorile de  $H_s$  simulate de modelul de valuri SWAN (Simulating Waves Nearshore) pe întregul bazin al Mării Negre. Informațiile sunt păstrate ca fișiere binare comprimate (format Matlab) cu o rezoluție temporală de 3 ore, iar rezoluția spațială a previziunilor este de  $0.08^\circ$  (atât în longitudine, cât și în latitudine). De asemenea, sunt disponibile și măsurători de  $H_s$  provenite de la mai mulți sateliți a căror traiectorie a traversat zona Mării Negre în perioada menționată, respectiv ERS-2, ENVISAT, TOPEX, Poseidon, JASON-1, JASON-2, GEOSAT Follow-On (GFO).

Asimilarea de măsurători de altimetru se aplică pentru o fereastră de 24 ore (1 zi), așa cum este prezentat schematic în Figura 3. Pentru a putea calcula *vectorul de inovație*, care reprezintă de fapt diferența ( $d_j$ ) dintre cele  $j$  observații altimetrice ( $y_j$ ) înregistrate într-o zi pe bazinul Mării Negre și previziunile modelului ( $x_b$ ) interpolate la poziția observațiilor  $H(x_b)_j$  a fost mai întâi necesară interpolarea în spațiu și timp (interpolare bilineară) a datelor simulate în punctele grilei de calcul a modelului SWAN la pozițiile măsurătorilor altimetrice situate de-a lungul traiectoriilor sateliților (Figura 3b). În acest fel este asigurată corespondența spațio-temporală între simulări și datele de altimetru. Toate observațiile dintr-o perioadă de 24 ore sunt utilizate simultan pentru estimarea vectorului inovație.

Pentru a reduce cât mai mult influența erorilor de măsurare asupra rezultatelor obținute prin aplicarea metodologiei DA, s-a realizat și o verificare amănunțită a calității datelor de satelit care au fost asimilate. Astfel, chiar dacă există deja o filtrare a datelor furnizate de IFREMER - Laboratoire d'Océanographie Spatiale <http://cersat.ifremer.fr/> totuși mai apar valori eronate care nu au fost eliminate de filtru (de exemplu, unele măsurători greșite sunt situate în imediata apropiere a coastei, unde pământul poate induce influențe în amprenta altimetrului).



**Figura 3.** Prezentare schematică a unui domeniu de calcul pentru care există previziuni ale modelului de valuri în punctele de grilă și traiectoriile sateliților care traversează aria respectivă în 24 ore (a); Calculul diferenței  $d_j$  dintre observația  $y_j$  și previziunea interpolată la poziția observației  $H(x_b)_j$  realizat la momentul observației, considerând valorile observațiilor înregistrate în fereastra de asimilare (b).

## 2. Validarea rezultatelor obținute în urma aplicării metodologiei DA pentru hindcast

**Realizarea de comparații și analize statistice pentru validarea metodologiei DA aplicată pentru datele hindcast obținute pentru perioada 1999-2008 (simulări numerice pentru o perioadă de 10 ani).**

Baza de date realizată în prima etapă a proiectului DAMWAVE conține valorile  $H_s$  simulate cu modelul de valori SWAN și acoperă o perioadă de 10 ani. Trebuie menționat însă că nu există în domeniul public măsurători de baliză în bazinul Mării Negre care să acopere întreaga perioadă în mai multe locații. Singura sursă de măsurători care îndeplinește ambele cerințe (10 ani de măsurători și diverse locații în zona de interes) sunt observațiile de satelit provenite de la sistemul *multi-mission* care cuprinde măsurători provenite de la 7 sateliți: ERS-2, ENVISAT, TOPEX, Poseidon, JASON-1, JASON-2 și GEOSAT Follow-On (GFO).

În aceste condiții, pentru a fi posibilă o evaluare cât mai eficientă a impactului produs de DA asupra previziunilor de  $H_s$ , s-a procedat la împărțirea datelor de satelit (procedeu similar cu cel utilizat de Skandrani et al., 2004) încercând ca procentul de date asimilate să fie > 50% din totalul de observații existente (atât anual cât și pentru întreaga perioadă). Acest echilibru a fost posibil de îndeplinit folosind pentru validare observații provenite de la ENVISAT și TOPEX, iar pentru DA cele provenite de la ceilalți cinci sateliți disponibili în perioada 1999-2008. Informații privind numărul de observații existente pentru fiecare an de simulări/satelit, precum și numărul de observații utilizate pentru DA și validare sunt prezentate în Tabelul 1.

**Tabelul 1.** Informații privind numărul de observații existente în perioada considerată, numărul de observații utilizate pentru asimilare și validare.

Anul/Satelit	ERS-2	ENVISAT	TOPEX	Poseidon	JASON1	GFO	JASON2	Total	Assim	Validare	Assim/Total
1999	19393		17804	1601				38798	20994	17804	54,11%
2000	19293		19051	1362		11257		50963	31912	19051	62,62%
2001	19172		20244	560		15156		55132	34888	20244	63,28%
2002	19198	6040	19631	298	15889	13788		74844	49173	25671	65,70%
2003	11000	10183	21977		16615	11619		71394	39234	32160	54,95%
2004	12329	11650	18563		16980	11632		71154	40941	30213	57,54%
2005	17638	11069	15345		17243	14503		75798	49384	26414	65,15%
2006	17154	10783			15636	11163		54736	43953	10783	80,30%
2007	17322	18320			16790	7638		60070	41750	18320	69,50%
2008	18367	18634			16199	4937	9435	67572	48938	18634	72,42%
<b>Total</b>								<b>620461</b>	<b>401167</b>	<b>219294</b>	<b>64,66%</b>

Parametrii statistici utilizați pentru analiza influenței metodologiei DA asupra calității predicției parametrului de val  $H_s$  sunt cei utilizați în mod frecvent pentru evaluarea calității predicțiilor, și anume: bias (diferența dintre media  $H_s$  obținut din simulare/asimilare și media valorilor corespunzătoare măsurate), eroarea medie absolută, eroarea medie pătratică (*RMS*), indicele de împrăștiere sau eroarea normalizată (*SI*) calculată ca raportul dintre *RMS*/valoarea medie observată, coeficientul de corelare (*R*) și panta liniei de regresie dusă prin origine (*S*).

Prima dată au fost calculați parametrii statistici corespunzători comparației dintre  $H_s$  simulate cu modelul SWAN ( $H_{s-SWAN}$ ) și măsurătorile de altimetru considerate pentru validare, respectiv observațiile realizate de ENVISAT și TOPEX. Aceste rezultate statistice sunt considerate ca referință pentru a evalua influența DA asupra calității previziunilor și sunt prezentate în Tabelul 2 (*N* reprezintă numărul de perechi de date utilizate în calculul statistic). Așa cum s-a specificat anterior, s-au testat și alte valori pentru  $L_{max}$  iar în Tabelul 2 sunt prezentate rezultatele statistice obținute în urma aplicării DA în care  $L_{max}$  a avut valorile de 4° (DA1) și 3,2° (DA2).

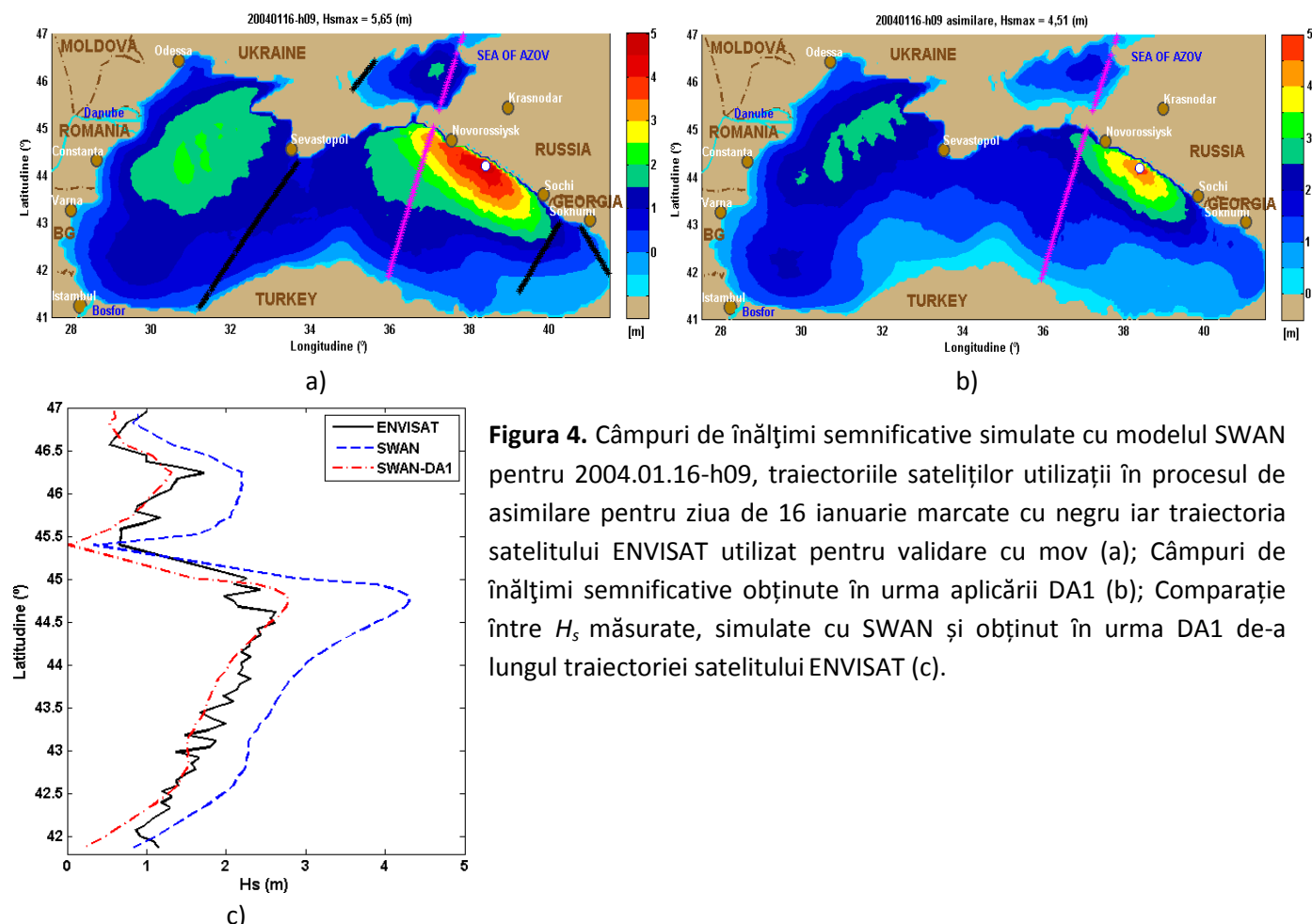
Analiza rezultatelor statistice prezentate în Tabelul 2 indică cu certitudine că prin aplicarea schemelor de DA se îmbunătățesc toți parametrii statistici, de remarcat îmbunătățirea semnificativă în ceea ce privește *MAE*, *RMSE*, *SI* și *R*. Astfel, poate fi remarcat că după asimilare coeficientul de corelare a depășit valoare de 0,9 iar indicele de împrăștiere a scăzut sub 0,3. Modificarea lui  $L_{max}$  nu aduce variații semnificative ale parametrilor statistici, dar totuși se observă o ușoară îmbunătățire a rezultatelor o dată cu scăderea lui  $L_{max}$ . Pentru a evalua robustețea algoritmului

DA aplicat, parametrii statistici au fost analizați pe mai multe paliere sau categorii: pentru fiecare lună, an, sezon și pentru total date. Comparațiile cu rezultatele de referință indică în mod constant o îmbunătățire a calității predicțiilor de val după aplicarea DA.

**Tabelul 2.** Rezultate statistice obținute pentru  $H_s$  simulat cu SWAN și  $H_s$  obținute în urma aplicării de metode DA, comparate cu măsurători de altimetru (ENVISAT și TOPEX) pe întreg bazinul Mării Negre, perioada (1999-2008).

Parametru	MeanObs (m)	MeanSim (m)	Bias (m)	MAE (m)	RMSE	SI	R	S	N
$H_{s-SWAN}$		0,978	-0,031	0,249	0,345	0,342	0,885	1,002	
$H_{s-DA1}$ ( $L_{max} = 4^\circ$ )	1,009	1,011	0,002	0,188	0,268	0,266	0,925	1,006	219294
$H_{s-DA2}$ ( $L_{max} = 3,2^\circ$ )		1,009	0,000	0,187	0,267	0,265	0,925	1,005	

Un exemplu sugestiv este prezentat în Figura 4a sunt prezentate rezultatele simulărilor cu SWAN pe bazinul Mării Negre pentru un moment de timp (2004.01.16-h09). În urma procesului de asimilare (DA1) a datelor măsurate de sateliții care au traversat zona în ziua de 16 ianuarie (linii negre) s-a obținut un nou câmp de  $H_s$  cu caracteristicile prezentate în Figura 4b. În Figura 4c este prezentată o comparație între valorile  $H_s$  măsurate de satelitul ENVISAT, simulate cu SWAN și obținut în urma DA1 de-a lungul traiectoriei satelitelui utilizat în validare. Din Figura 4 se observă că valorile simulate cu SWAN erau mai mari decât măsurătorile, dar în urma aplicării DA acestea s-au îmbunătățit considerabil.

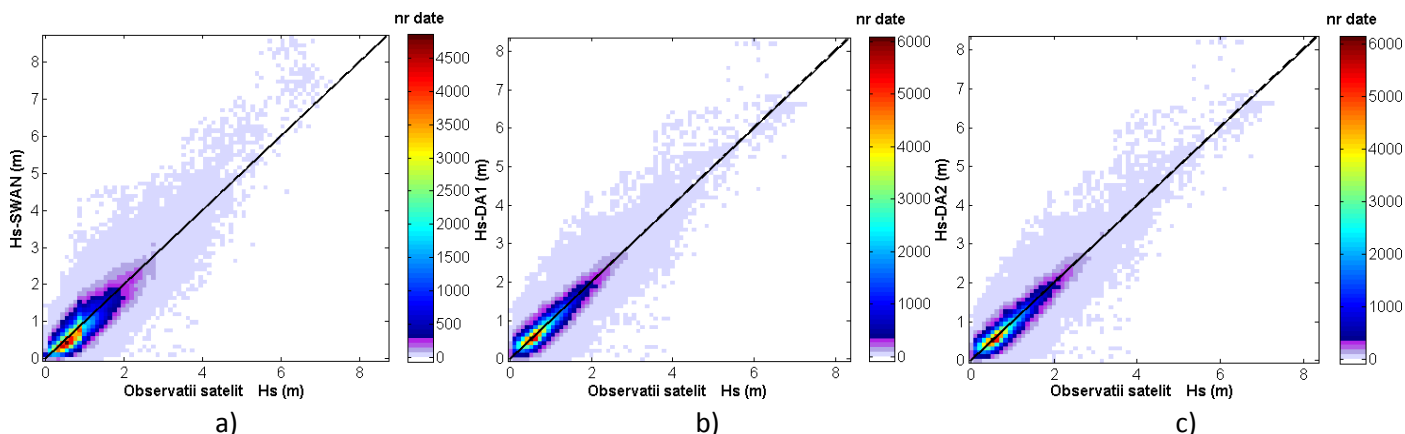


**Figura 4.** Câmpuri de înălțimi semnificative simulate cu modelul SWAN pentru 2004.01.16-h09, traiectoriile sateliților utilizații în procesul de asimilare pentru ziua de 16 ianuarie marcate cu negru iar traiectoria satelitelui ENVISAT utilizat pentru validare cu mov (a); Câmpuri de înălțimi semnificative obținute în urma aplicării DA1 (b); Comparație între  $H_s$  măsurate, simulate cu SWAN și obținut în urma DA1 de-a lungul traiectoriei satelitelui ENVISAT (c).

De asemenea, pentru toate comparațiile au fost realizate și diagrame de împrăștiere (Figura 5) din care se pot observa diferențele dintre măsurători de  $H_s$  și simulările fără DA și cu DA. Se observă că după aplicare de DA datele sunt mai grupate de-a lungul liniei de ajustare perfectă.

Având în vedere că algoritmul DA testat pentru simulările de tip hindcast a prezentat rezultate concludente privind îmbunătățirea previziunilor, s-a trecut la următoarea etapă în care toate datele de satelit disponibile au fost asimilate. În acest fel a fost creată o bază de date în care toate informațiile privind previziunile de  $H_s$  au fost

îmbunătățite prin aplicarea de DA. Rezultatele obținute în această secțiune urmează să fie publicate în mai multe articole la conferințe și reviste de specialitate.



**Figura 5.** Diagrame de împrăștiere pentru  $H_s$ , simulări (SWAN, DA1 și DA2) și măsurători din intervalul 1999-2008.

### 3. Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor prin intermediul publicațiilor științifice a urmărit în primă fază fructificarea în cât mai mare măsură a tuturor rezultatelor obținute în prima etapă a proiectului. Astfel, o primă direcție urmărită în cadrul diseminării se referă la analize eshaustive a datelor provenite de la diverse surse (modele numerice, măsurători de satelit, date furnizate de diverse centre de predicție hidrometeorologică) și care au fost cuprinse în baza de date a proiectului DAMWAVE. Pentru o mai bună înțelegere a climatului de vânt și valuri, analizele nu au fost limitate doar la spațiul geografic al Mării Negre fiind făcute comparații complexe și cu diverse alte zone din mediul marin și oceanic.

În paralel cu implementarea de metode de asimilare de date pentru a îmbunătăți predicțiile de valuri, o altă direcție deosebit de importantă, care a fost, și va fi de fapt urmarită în mod continuu în cadrul proiectului DAMWAVE o reprezintă realizarea de diverse studii privind aplicarea modelelor numerice spectrale în sprijinul activităților umane din zonele costiere și offshore. În mod special au fost realizate și publicate lucrări de referință privind protecția costieră, creșterea siguranței navigației sau evaluarea resurselor de energie re folosibilă din mediul marin.

#### 3.1-Pregătirea de articole științifice pentru publicarea în reviste indexate ISI și BDI

Trebuie menționat la acest punct faptul ca în planul de realizare a proiectului ne-am propus anumiți parametri privind publicarea de articole științifice în reviste de specialitate, precum și participări la conferințe în domeniu, pe care am reușit sa-i îndeplinim cu succes, și chiar sa-i depășim substanțial.

#### REZULTATE PROPUSE

-Prezentarea unei lucrări la conferința internațională AQUALIRES, ianuarie 2014.

Parametru îndeplinit prin prezentarea lucrării:

Rusu, L., Butunoiu, D., Rusu, E, 2014, Analysis of the extreme storm events in the Black Sea considering the results of a five year wave hindcast. Oral presentation at International Conference AQUALIRES2014 – New tools for sustainable management of aquatic living resources, Bucharest, Romania, 17-18 January 2014, <http://aqualires.incdpm.ro/images/AGENDA.pdf>, event included in the calendar of the European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/events/new-tools-for-sustainable-management>

-Prezentarea a două lucrări științifice la conferința internațională *European Geosciences Union General Assembly*, aprilie 2014.

Parametru îndeplinit prin prezentarea lucrărilor:



Rusu, L., Răileanu, A., 2014. Wave modelling to assess the storm conditions in the Black Sea. Poster presented at European Geosciences Union General Assembly 2014 (EGU2014), Vol. 16, EGU2014-2140, 27 Apr – 02 May, Vienna, Austria. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-2140.pdf>

Rusu, E., Zanopol, A., 2014. Modelling the coastal processes at the mouths of the Danube River in the Black Sea. Poster presented at European Geosciences Union General Assembly 2014 (EGU2014), Vol. 16, EGU2014-2154. 27 Apr – 02 May, Vienna, Austria. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-2154.pdf>

-Publicarea unui articol științific în volumele Conferinței *International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM2014*, iunie 2014 (indexată SCOPUS)

Parametru îndeplinit prin publicarea lucrării:

Rusu, L., 2014. A data assimilation scheme to improve the wave predictions in the western side of the Black Sea. In: *Proc. of 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2014) – Marine and Ocean Ecosystems*, 17-26 June, Albena, Bulgaria, Vol. II, 539-545. <http://www.sgem.org/SGEMLIB/spip.php?article4517>

-Depunerea unui articol științific pentru evaluare la *Journal of Environmental Protection and Ecology* (ISI).

Parametru îndeplinit, lucrarea de mai jos a fost nu numai depusă dar și deja publicată în acest an:

Rusu, L., Butunoiu, D., Rusu, E., 2014. Analysis of the extreme storm events in the Black Sea considering the results of a ten-year wave hindcast, *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15 (2), 445-454, <http://www.jepe-journal.info/vol-15-no-2-2014> (IF=0.338).

### **ALTE REZULTATE (suplimentare față de parametrii propusi)**

Rusu, E., 2014. Assessment of the Wave Energy Conversion Patterns in Various Coastal Environments, *Energies 2014*, Special Issue Selected Papers from the 1st International e-Conference on Energies, 7(6) 4002-4018; <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/6/4002> (IF=1.6)

Butunoiu, D., Rusu, E., 2014. Wave Modeling with Data Assimilation to Support the Navigation in the Black Sea Close to the Romanian Ports, *International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE2014)*, Belgrade, Serbia 27th -28th November, 2014 (indexata ISI). [http://www.ijtte.com/article/102/ICTTE\\_Belgrade\\_2014.html](http://www.ijtte.com/article/102/ICTTE_Belgrade_2014.html)

### **3.2 Actualizarea continuă a site-ului prin care se diseminează rezultatele obținute în cadrul proiectului DAMWAVE. <http://www.im.ugal.ro/DAMWAVE/index.htm>**

În timpul desfășurării proiectului pagina web a proiectului a fost actualizată cu activitățile și publicațiile realizate în cadrul proiectului.

### **3.3 Sprijinirea tinerilor cercetători**

Colaborarea cu masteranzi și doctoranzi a reprezentat o preocupare continuă a membrilor echipei de cercetare, având ca obiectiv dezvoltarea de studii relaționate direct cu tema proiectului, cât și în domenii conexe precum navigație, operațiuni *offshore* sau activități portuare care sunt dependente de cunoașterea condițiilor de vânt și val a fost în atenția.

Este de menționat în acest sens și faptul că au fost îndrumate de membrii echipei de cercetare și susținute în anul 2014 un număr de 3 dizertații de licență, 5 dizertații de masterat și 2 teze de doctorat. Numele absolvenților și temele sunt prezentate pe pagina web a proiectului DAMWAVE. De asemenea, o teză de doctorat cu tema: *Implementarea de metode de asimilare de date pentru îmbunătățirea predicției valurilor cu modele spectrale în bazinul Mării Negre* (drd. Ing. Alina Răileanu) este în prezent în derulare, ca și mai multe teme de dizertații de masterat relaționate direct cu tematica proiectului

În cadrul proiectului au fost realizate și publicate mai multe lucrări științifice în care sunt incluși tineri cercetători și a căror listă este prezentată mai jos.

## ALTE REZULTATE REALIZATE ÎN CADRUL PROIECTULUI ÎN CARE SUNT CUPRINȘI ȘI TINERI CERCETĂTORI (de asemenea suplimentare față de parametrii propuși)

### Publicații în reviste

- Zanopol, A., Onea, F., Rusu, E., 2014. Coastal impact assessment of a generic wave farm operating in the Romanian nearshore, *Energy*, 72, 652-670. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214006604> (IF=4,16)
- Zanopol, A., Onea, F., Rusu, E., 2014. Evaluation of the coastal influence of a generic wave farm operating in the Romanian nearshore, *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15 (2), 597-605, <http://www.jepe-journal.info/vol-15-no-2-2014/597.pdf> (IF=0,338)
- Gasparotti, C., Rusu, L., 2014. Prediction of the dynamic responses for two containerships operating in the Black Sea, *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 11, 55-68. <http://www.banglajol.info/index.php/JNAME/article/view/17289>
- Zanopol, A., Onea, F., Rusu, E., 2014. Studies concerning the influence of the wave farms on the nearshore processes, *International Journal of Geosciences*, 5 (7), 728-738. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=47121>
- Zanopol, A.T., Onea, F., Rusu, E., 2014. The Coastal Impact of the WEC Arrays Operating in the Coastal Environment of the Black Sea. *Marine Engineering Frontiers* 2 (2), 16-23. <http://www.seipub.org/mef/paperInfo.aspx?ID=16614>
- Toderascu, R., Rusu, E., 2014. Implementation of a Joint System for Waves and Currents in the Black Sea. *International Journal of Ocean System Engineering* 4(1), 28-41, [http://www.koreascience.or.kr/search/articlepdf\\_ocean.jsp?url=http://ocean.kisti.re.kr/downfile/volume/kcore/E1GPBT/2014/v4n1/E1GPBT\\_2014\\_v4n1\\_29.pdf](http://www.koreascience.or.kr/search/articlepdf_ocean.jsp?url=http://ocean.kisti.re.kr/downfile/volume/kcore/E1GPBT/2014/v4n1/E1GPBT_2014_v4n1_29.pdf)
- Zanopol, A.T., Onea, F., Rusu, L., 2014. Experimental results to evaluate the wave and currents conditions in the Romanian nearshore. *Constanta Maritime University Annals - An XV, Vol. 21-2014, Sect. I, 71-78* (indexată BDI). [http://www.cmu-edu.eu/anale/anale\\_engleza/anale.html](http://www.cmu-edu.eu/anale/anale_engleza/anale.html)

### Lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale

- Zanopol, A., Onea, F., Rusu, E., 2014. Longshore currents evaluation along the Romanian Black Sea coast. In: *Proc. of 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2014) - GEOCONFERENCE ON WATER RESOURCES, FOREST, MARINE AND OCEAN ECOSYSTEMS*, 17-26 June, Albena, Bulgaria, Vol II, 637-644 <http://sgem.org/sgemlib/spip.php?article4530> (indexată SCOPUS)
- Zanopol, A., Onea, F., Rusu, E., 2014. Wave farm influences on the mangalia nearshore wave pattern. In: *Proc. of 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2014) - GEOCONFERENCE ON ENERGY AND CLEAN TECHNOLOGIES*, 17-26 June, Albena, Bulgaria, Vol I, 621-628. <http://sgem.org/sgemlib/spip.php?article4700> (indexată SCOPUS)

## 4. Concluzii

În final se poate aprecia că s-a reușit atingerea integrală a obiectivelor propuse pentru această etapă, fiind implementați și validați diverși algoritmi de asimilare de date pentru simulări de tip hindcast, atât la nivel local, cât și la nivelul întregului bazin al Mării Negre. Algoritmului pentru aria de generare reprezentată de bazinul Mării Negre s-a validat pentru întreaga perioadă de 10 ani (1999-2008) iar rezultatele statistice obținute indică cu claritate faptul că implementarea de metode de asimilare conduce la îmbunătățirea rezultatelor obținute cu sistemul de predicție a valurilor din Marea Neagră.

## Bibliografie

- Abdalla, S., Bidlot, J., Janssen, P., 2005. Assimilation of ERS and ENVISAT wave data at ECMWF. In: *Proceedings of the 2004 ENVISAT & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6–10 September 2004* (ESA SP-572, April 2005).
- Butunoiu, D., Rusu, E., 2014. Wave modeling with data assimilation to support the navigation in the Black Sea close to the Romanian ports, *Proceeding of the International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE2014)*, 27-28 Noiembrie, Belgrad, Serbia.

- Emmanouil, G., Galanis, G., Kallos, G., 2012. Combination of statistical Kalman filters and data assimilation for improving ocean waves analysis and forecasting. *Ocean Modelling* 59–60, 11–23.
- Emmanouil, G., Galanis, G., Kallos, G., Breivik, L.A., Heiberg, H., Reistad, M., 2007. Assimilation of radar altimeter data in numerical wave models: an impact study in two different wave climate regions, *Ann. Geophys.*, 25, 581–595.
- Greenslade, D.J.M., 2001, The assimilation of ERS-2 Significant Wave Height data in the Australian region, *Journal of Marine Systems*, 28, 141–160.
- Greenslade, D.J.M., Young, I.R., 2005. The impact of inhomogenous background errors on a global wave data assimilation system, *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 10 (2), 61–93.
- Kalnay, E., 2003. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 341 pp.
- Lionello, P., Günther, H., Janssen, P.A.E.M., 1992. Assimilation of altimeter data in a global third-generation wave model, *Journal of Geophysical Research*, 97, 14453-14474.
- Reichle, R.H., 2008. Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in Water Resources* 31, 1411–1418.
- Rusu, L., 2014. A data assimilation scheme to improve the wave predictions in the western side of the Black Sea. In: *Proc. of 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2014) – Marine and Ocean Ecosystems*, 17-26 June, Albena, Bulgaria, Vol. II, 539-545.
- Thomas, J.P., 1988. Retrieval of energy spectra from measured data for assimilation into a wave model. *Q.J. R. Meteorol. Soc.*, 114, 781-800.
- Daley, R., 1991. *Atmospheric data analysis*. New York: Cambridge University Press, 457 pp.
- Skandrani, C., Lefevre, J.M., Queffeuilou, P., 2004. Impact of Multisatellite Altimeter Data Assimilation on Wave Analysis and Forecast, *Marine Geodesy*, 27 (3), 511-533.
- Soukissian, T., Kechris, C., 2007. About applying linear structural method on ocean data: Adjustment of satellite wave data, *Ocean Engineering*, 34 (3-4), 371-389.
- Voorrips, A.C., 1999. Spectral wave data assimilation for the prediction of waves in the North Sea. *Coastal Engineering*, 37, 455-469.
- Voorrips A.C., de Valk, C., 1997. A comparison of two operational wave data assimilation methods. Preprint 97-06, Royal Meteorological Institut (KNMI).
- Wilks, D.S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences : An Introduction*, San Diego, CA : Elsevier, 649 pp.

**Buget 2014: 150.476 lei**

Director proiect  
Conf. dr. ing. Liliana Celia Rusu