

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΘΕΡΜΑΪΚΟ ΚΟΛΠΟ ΓΙΑ ΔΗΜΟΣΙΑ ΧΡΗΣΗ (WAVEFORUS)

Γιάννης Ν. Κρεστενίτης, Κατερίνα Κομπιάδου, Γιάννης Ανδρουλιδάκης, Χρήστος Μακρής, Βασίλης Μπαλτίκας, Γεωργία Καλαντζή, Χαράλαμπος Σκουλικάρης, Γιάννης Κοντός

Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη. E-mail: kobiadou@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της έρευνας, η οποία αναλύεται στην παρούσα εργασία, είναι η ανάπτυξη ενός σύγχρονου και ολοκληρωμένου συστήματος πρόγνωσης θαλασσιών παραμέτρων (WaveForUs), για το Θερμαϊκό Κόλπο. Το σύστημα παρέχει 3-ήμερες προγνώσεις: (α) κυματικών χαρακτηριστικών, (β) τρισδιάστατης θαλάσσιας κυκλοφορίας και (γ) στάθμης θάλασσας με τη χρήση σύγχρονων αριθμητικών μοντέλων. Τα ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου στα μαθηματικά ομοιώματα λαμβάνονται από το μετεωρολογικό μοντέλο WRF-ARW. Οι προσομοιώσεις κυκλοφορίας λαμβάνουν υπόψη και εκροές γλυκών νερών από τα ποτάμια στην περιοχή, με βάση πρότυπη μεθοδολογία πρόβλεψης των παροχών τους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του WaveForUs, οι βασικές παραμετροποιήσεις των μαθηματικών μοντέλων θαλάσσιας πρόγνωσης, και τα αποτελέσματα αξιολόγησης των ελέγχων βαθμονόμησης αναδρομικών (hindcast) προσομοιώσεων.

Λέξεις-κλειδιά: μοντέλα πρόγνωσης, κύμα, μετεωρολογική παλίρροια, θαλάσσια κυκλοφορία

OPERATIONAL OCEANOGRAPHIC FORECASTING SYSTEM IN THE THERMAIKOS GULF FOR PUBLIC USE (WAVEFORUS)

Yannis N. Krestenitis, Katerina Kombiadou, Yannis Androulidakis, Christos Makris, Vasilis Baltikas, Georgia Kalantzi, Charalampos Skoulikaris, Yiannis Kontos

Division of Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece. E-mail: kobiadou@civil.auth.gr

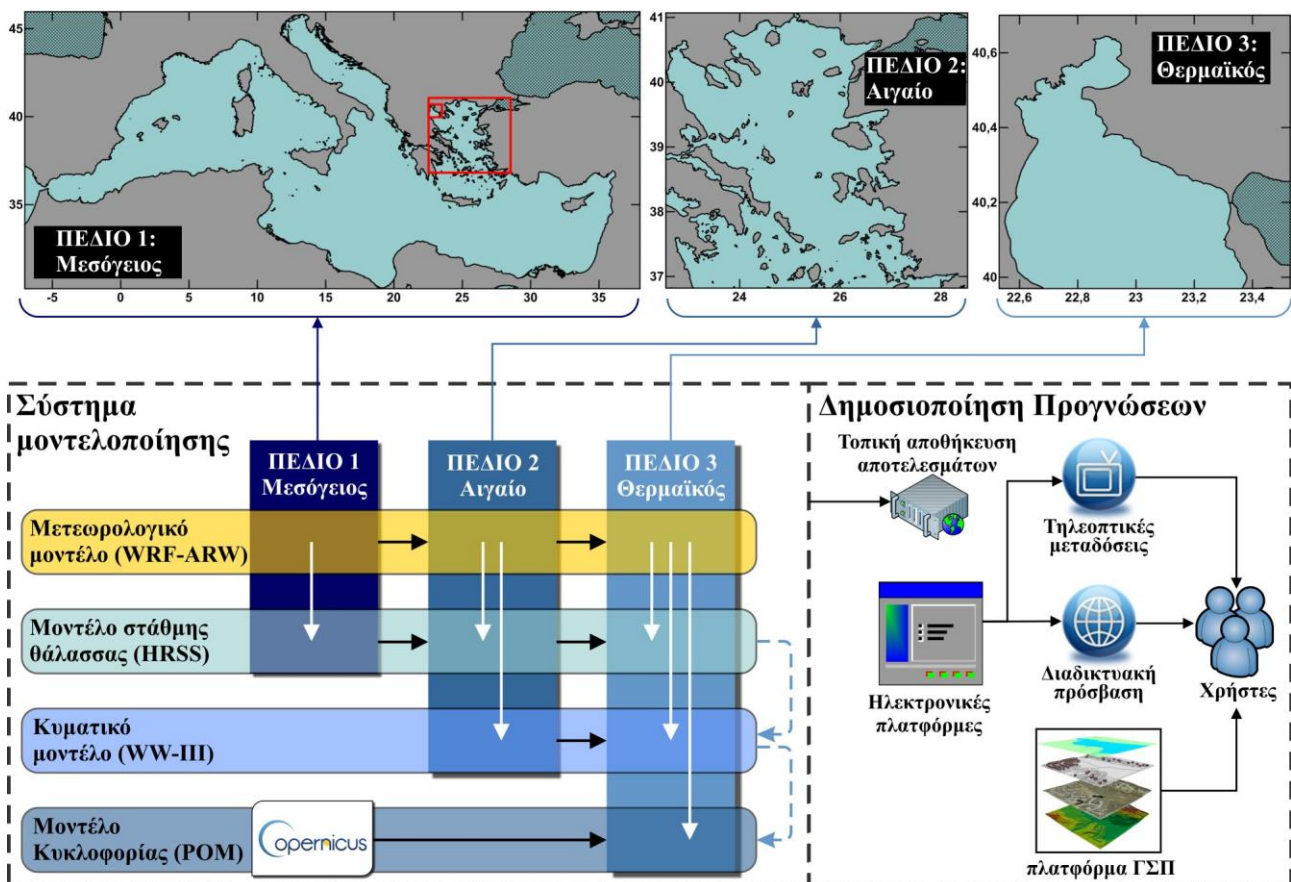
ABSTRACT

The work, analyzed in the present paper, aims at the development of an integrated, state of the art sea-state forecasting system (WaveForUs) for the Thermaikos Gulf. The system provides 3-day forecasts for: (a) wave characteristics, (b) three-dimensional circulation fields and (c) sea level heights using state of the art numerical models. Input atmospheric data are delivered by the WRF-ARW meteorological model. The coastal circulation also takes into account the fresh-water outflow by the rivers in the area, based on an original methodology for the forecasting of their effluence. In the present paper, the main characteristics of WaveForUs, the basic parameterizations of the sea-state numerical models and assessment of results from hindcast calibration and validation simulations are presented.

Key-words: forecasting models, wave, storm surge, coastal circulation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή του Θερμαϊκού κόλπου (Εικ. 1) είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο σε κοινωνικοοικονομικούς, όσο και με περιβαλλοντικούς όρους, καθώς πρόκειται για μια ημίκλειστη λεκάνη, με πλήθος θαλάσσιων δραστηριοτήτων (μεταφορές, αλιεία, υδατοκαλλιέργειες, τουρισμός, ναυταθλητισμός κλπ), ενώ η παράκτια ζώνη είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένη, φιλοξενεί τρεις προστατευόμενους υγροτόπους διεθνούς σημασίας καθώς και εκτεταμένες γεωργικές δραστηριότητες, στο βόρειο τμήμα του κόλπου. Έπεται ότι το ενδιαφέρον και η αναγκαιότητα για αξιόπιστες, υψηλής ανάλυσης και επικεντρωμένες θαλάσσιες προγνώσεις στην περιοχή είναι έντονο. Για το σκοπό αυτό διαμορφώθηκε το σύστημα WaveForUs, ένα σύγχρονο επιχειρησιακό σύστημα θαλάσσιας πρόγνωσης υψηλής ανάλυσης (1/60°×1/60°), που παρέχει τριήμερες προγνώσεις κύματος, Μέσης Στάθμης Θάλασσας (ΜΣΘ), θαλάσσιας θερμοκρασίας, αλατότητας και θαλασσιών ρευμάτων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος, επικεντρώνοντας στα αριθμητικά μοντέλα θαλάσσιας πρόγνωσης (κυματικό, μετεωρολογικής παλίρροιας και κυκλοφορίας) που το απαρτίζουν σε σχέση με τις κύριες παραμετροποιήσεις τους και την εγκυρότητα των προγνώσεων.



ΕΙΚΟΝΑ 1 Σχηματική απόδοση του συστήματος WaveForUs: Τα 3 προγνωστικά πεδία (πάνω, οι σκιασμένες περιοχές εξαιρούνται από τους υπολογισμούς) και τα συστήματα μοντελοποίησης και διάχυσης των προγνώσεων (κάτω). Το σύστημα μοντελοποίησης (κάτω αριστερά) δίνει τα πεδία εφαρμογής του κάθε μοντέλου και τη μεταφορά ατμοσφαιρικών δεδομένων (λευκά βέλη), οριακών συνθηκών (μαύρα βέλη) και δεδομένων σύζευξης (γαλάζια βέλη) μεταξύ μοντέλων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το σύστημα προγνώσεων WaveForUs (Εικ. 1) αποτελείται από τις πλατφόρμες μοντελοποίησης και δημοσιοποίησης των προγνώσεων. Η πλατφόρμα μοντελοποίησης του συστήματος απαρτίζεται από τέσσερα αριθμητικά μοντέλα, ένα ατμοσφαιρικό και τρία μοντέλα θαλάσσιας πρόγνωσης. Η παρούσα εργασία επικεντρώνει στα μοντέλα θαλάσσιας πρόγνωσης, ενώ τα υπόλοιπα μέρη παρουσιάζονται συνοπτικά. Το μετεωρολογικό μοντέλο του συστήματος είναι το Weather Research and

Forecasting model with the Advanced Research dynamic solver (**WRF-ARW**; Pytharoulis et al., 2014; Wang et al., 2010). Για την πρόγνωση κύματος εφαρμόζεται το μοντέλο WaveWatch-III, version 3.14 (**WW-III**; Tolman, 2009), ενώ οι μεταβολές της στάθμης θάλασσας προσομοιώνονται με το μοντέλο High Resolution Storm Surge (**HRSS**; Krestenitis et al., 2011) και η παράκτια κυκλοφορία με το μοντέλο Princeton Ocean Model, version 2008 (**POM**; Blumberg and Mellor, 1987).

Τα μοντέλα εφαρμόζονται σε τρία πεδία, διαδοχικά αυξανόμενης διακριτοποίησης (Εικ. 1): **(α)** Μεσόγειος Θάλασσα (Πεδίο 1) με χωρικό βήμα $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ (~15km), **(β)** Αιγαίο Πέλαγος (Πεδίο 2) με χωρικό βήμα $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ (~5km) και **(γ)** Θερμαϊκός Κόλπος (Πεδίο 3) με χωρικό βήμα $0.016^{\circ} \times 0.016^{\circ}$ (~1.7km). Οι οριακές συνθήκες (στα ανοιχτά όρια σύνδεσης μεταξύ πεδίων) μεταφέρονται από το χαμηλότερης προς το υψηλότερης ανάλυσης πεδίο (π.χ. από το Πεδίο 1 στο 2) και η ατμοσφαιρική διέγερση παρέχεται από εφαρμογή του μοντέλου WRF-ARW σε κάθε πεδίο (Εικ. 1). Το μοντέλο WW-III δεν εφαρμόζεται στο πεδίο της Μεσογείου, αφού, βάσει δοκιμαστικών προσομοιώσεων, κρίθηκε ότι δεν επηρεάζει τους κυματισμούς που διαδίδονται στο πεδίο του Θερμαϊκού. Το μοντέλο POM εφαρμόζεται μόνο στο πεδίο 3 και λαμβάνει δεδομένα (στάθμης θάλασσας, θερμοκρασίας, αλατότητας και ρευμάτων) στο νότιο ανοιχτό όριο από το ευρωπαϊκό επιχειρησιακό σύστημα COPERNICUS. Τα μοντέλα θαλάσσιας πρόγνωσης είναι μονόδρομα συζευγμένα μεταξύ τους: το μοντέλο HRSS παρέχει αποτελέσματα ΜΣΘ στο WW-III και το WW-III παρέχει στο POM τιμές ταχύτητας κυματογενών ρευμάτων Stokes. Σημειώνεται ότι η βαθυμετρία των πεδίων προήλθε από τα δεδομένα GEBCO (2008).

Το σύστημα είναι επιχειρησιακό και παρέχει τριήμερες προγνώσεις κυματικών πεδίων (σημαντικό ύψος και διεύθυνση διάδοσης), ΜΣΘ και παραμέτρων κυκλοφορίας (πεδία ρεύματος, θερμοκρασίας και αλατότητας) που ανανεώνονται καθημερινά στις 08:30 UTC. Η διάχυση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω: α) της διαδικτυακής πλατφόρμας ΓΣΠ του προγράμματος¹, β) τηλεοπτικών μεταδόσεων της ΔΙΟΝ τηλεόρασης² και της ιστοσελίδας του προγράμματος WaveForUs³.

2.1 Το μοντέλο προσομοίωσης του κυματικού πεδίου

Για τις προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών του κυματικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκε το φασματικό μοντέλο 3^{ης} γενιάς WaveWatch-III (WW-III). Το WW-III υπολογίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των κυματισμών (περίοδος, ύψος κύματος και κατεύθυνση διάδοσης) από τη θεμελιώδη εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης (wave action) και το φάσμα πυκνότητάς της. Οι φυσικές διεργασίες που μπορεί να περιλάβει είναι η γένεση και η απόσβεση των κυματισμών λόγω της δράσης του ανέμου στη διεπιφάνεια νερού – αέρα, η διάθλαση λόγω της επιρροής του πυθμένα και της χωροχρονικής μεταβολή της βαθυμετρίας και της μέσης στάθμης θάλασσας (ΜΣΘ), οι μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις συντονισμού διαφόρων συνιστωσών του φάσματος, η απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω υδροδυναμικής αστάθειας στην ανοιχτή θάλασσα και της τριβής στον πυθμένα, η θραύση των κυματισμών λόγω επιρροής της ρήγωσης, και η σκέδαση λόγω της αλληλεπίδρασης κυματισμών-πυθμένα. Όλες οι προαναφερθείσες διεργασίες λαμβάνονται υπόψη με τη χρήση διαφόρων όρων πηγής και απόσβεσης στις εξισώσεις του WW-III. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στα δύο Πεδία 2 και 3 (Εικ. 1) με αμφίδρομη εμφώλευση από τον αδρότερο κάρναβο σε αυτόν με την υψηλότερη χωρική ανάλυση και αντίστροφα, δηλ. από το Πεδίο 2 (Βόρειο Αιγαίο) προς το Πεδίο 3 (Θερμαϊκός Κόλπος) και αντίστροφα. Η χωρική διακριτοποίηση είναι ίδια όπως και για τα υπόλοιπα υδροδυναμικά μοντέλα. Τα δεδομένα εισόδου για τα πεδία ανέμου παράχθηκαν με ωριαίο χωρικό βήμα διακριτοποίησης από το μετεωρολογικό μοντέλο WRF.

2.2 Μοντέλο στάθμης θάλασσας

Η μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας (στάθμης) της θάλασσας λόγω μετεωρολογικής και αστρονομικής παλίρροιας προσομοιώνεται με το 2-διάστατο μοντέλο HRSS (De Vries et al., 1995; Kres-

¹ <http://ecoplan.static.otenet.gr:8079/WForUsApp/AppStart.html>

² <http://www.diontv.gr/index.php/eidiseis-apo-tin-dion-tileorasi-2/wave-4-us>

³ <http://wave4us.web.auth.gr>

tenitis et al. 2011) και στα 3 πεδία (Εικ. 1). Το μοντέλο προσδιορίζει την ανύψωση στάθμης θάλασσας σε κάθε κελί κανάβου επιλύοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes, με την προσθήκη του όρου επίδρασης της αστρονομικής παλίρροιας (z_0) στις εξισώσεις ταχύτητας που προσδιορίστηκε βάσει της παραμετροποίησης του Schwiderski (1980):

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(h+z)u}{\partial x} + \frac{\partial(h+z)v}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu + g \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\tau_x}{(h+z)} - k \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{\rho_0(h+z)} - \frac{g}{\rho_0} \frac{0.9\partial z - 0.7\partial z_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv + g \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\tau_y}{(h+z)} - k \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{\rho_0(h+z)} - \frac{g}{\rho_0} \frac{0.9\partial z - 0.7\partial z_0}{\partial y} \end{cases}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, z είναι η απόσταση της ΜΣΘ από τη στάθμη ισορροπίας, h είναι το αδι-ατάραχτο βάθος, u και v οι μέσες με το βάθος ταχύτητες κατά x και y , g η επιτάχυνση της βαρύτητας, f η παράμετρος Coriolis, P είναι η ατμοσφαιρική πίεση στη στάθμη θάλασσας, ρ_0 η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, k συντελεστής τριβών πυθμένα και τ_x και τ_y είναι οι συνιστώσες κατά x και y των διατμητικών τάσεων του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Ο υπολογισμός των διατμητικών τάσεων (τριβής) στην επιφάνεια γίνεται από τη σχέση:

$$\begin{cases} \tau_i = \rho_A C_D |W| W_i \\ C_D = (0.63 + 0.066 W_i) / 10^3 \Big|_{i=x,y} \end{cases}$$

όπου ρ_A είναι η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, $|W|$ το μέτρο της έντασης του ανέμου και W_i η συνιστώσα ανέμου κατά x και y κάθε φορά. Η εξίσωση του συντελεστή τριβής στην επιφάνεια, C_D , ακολουθεί την παραμετροποίηση των Smith and Banke (1975) και οι τιμές των συντελεστών προέκυψαν από αριθμητικά πειράματα για τη βέλτιστη σύγκλιση των πειραματικών προσομοιώσεων με επιτόπου μετρήσεις ΜΣΘ.

2.3 Μοντέλο θαλάσσιας κυκλοφορίας

Για την προσομοίωση της κυκλοφορίας εφαρμόστηκε το Princeton Ocean Model (POM; Blumberg and Mellor, 1987), ένα ευρέως διαδεδομένο και επικυρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο ελεύθερης επιφάνειας και σίγμα συντεταγμένων, κατάλληλο για εφαρμογή σε παράκτιες εκβολικές περιοχές. Στο σύστημα WaveForUs το POM εφαρμόζεται μόνο στο Πεδίο 3 (Θερμαϊκός, Εικ. 1) λαμβάνοντας οριακές συνθήκες στάθμης, ρευμάτων και θερμοαλατικών χαρακτηριστικών για το νότιο ανοιχτό όριο του πεδίου από το σύστημα COPERNICUS και εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή για την μεταφορά από τον κানাβο του COPERNICUS (1/16°) στον κানাβο του WaveForUs (1/60°). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων (άνεμος, πίεση, υετός, θερμοκρασία, υγρασία και ροές θερμότητας και ακτινοβολίας) που παρέχονται από τις προγνώσεις του WRF-ARW. Σχετικά με τις ανταλλαγές θερμότητας στο επιφανειακό στρώμα, αυτές υπολογίζονται από την ισορροπία ροών ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους) και ροών θερμότητας (αισθητής και λανθάνουσας). Οι πρώτες λαμβάνονται από το WRF-ARW, ενώ οι ροές αισθητής, Q_{SH} , και λανθάνουσας, Q_{LH} , θερμότητας υπολογίζονται ως εξής (Rosati and Miyakoda, 1988):

$$\begin{cases} Q_{SH} = \rho_a c_p c_H |W| (T_s - T_a) \\ Q_{LH} = \rho_a \cdot L \cdot c_E |W| (e_{sat}(T_s) - r \cdot e_{sat}(T_a))^{0.622} / p_a, \quad L = 2.501 \cdot 10^6 - 2.3 \cdot 10^3 T_s \end{cases}$$

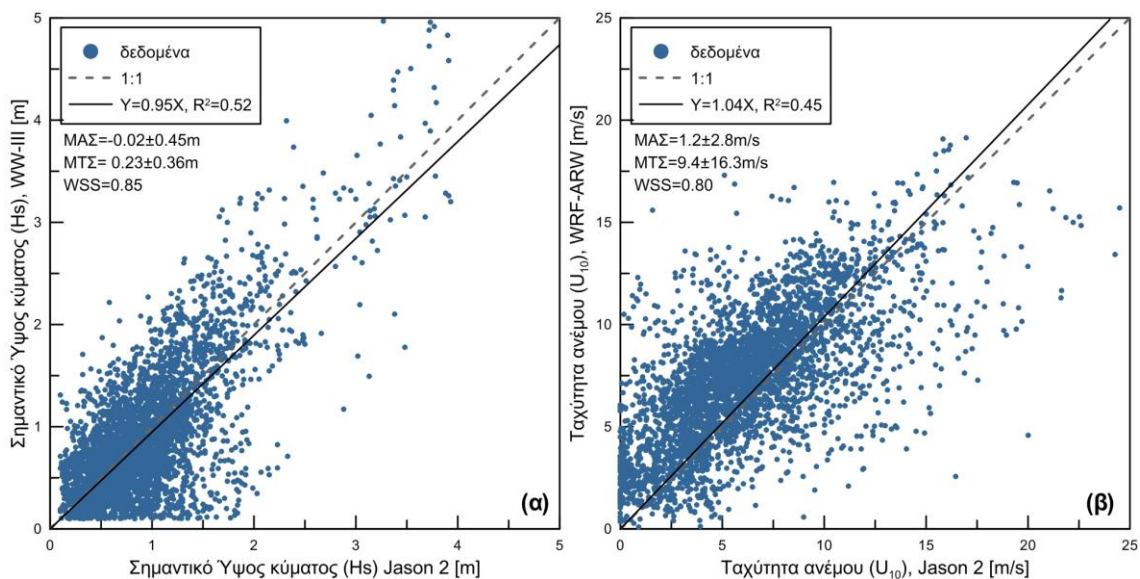
όπου ρ_a είναι η πυκνότητα αέρα, c_E και c_H συντελεστές τυρβώδους ανταλλαγής ($c_E=c_H=1.1 \cdot 10^{-3}$), c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα ($c_p=1005$ J/kg/K), $e_{sat}(T_s)$ και $e_{sat}(T_a)$ είναι η πίεση ατμού κορεσμού για την θερμοκρασία θάλασσας (T_s) και αέρα (T_a), L είναι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, r η σχετική υγρασία (λαμβάνεται από το WRF-ARW) και p_a η ατμοσφαιρική πίεση.

Σημειώνεται, τέλος, ότι στα πλαίσια του συστήματος αναπτύχθηκε μεθοδολογία εκτίμησης των παροχών εκροής των τριών κυρίων ποταμών της περιοχής (Αξιού, Αλιάκμονα και Λουδία) για τον 3-ήμερο προγνωστικό ορίζοντα του WaveForUs (Kombiadou et al., 2015).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αποτελέσματα Επαλήθευσης Κυματικού Μοντέλου

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου WW-III χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές μετρήσεις του Jason-2 για το διάστημα 03/2013 με 02/2014 από την περιοχή του Αιγαίου. Οι δορυφορικές καταγραφές έχουν επεξεργαστεί ώστε να αποκλειστούν εσφαλμένες καταγραφές, ενώ εξασφαλίστηκε και η χωρο-χρονική συμβατότητα μεταξύ αποτελεσμάτων του μοντέλου και τροχιών του δορυφόρου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων σημαντικού ύψους κύματος (H_s) του μοντέλου WW-III και των δορυφορικών μετρήσεων δίνονται στην Εικ. 2, σε συνδυασμό με τη σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένης (WRF-ARW) και δορυφορικά προσδιορισμένης ταχύτητας ανέμου σε υψόμετρο 10 m (U_{10}). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει αρκετά καλή σύμπτωση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης για το σημαντικό ύψος κύματος, ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που ενέχει ο δορυφορικός προσδιορισμός της παραμέτρου. Οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται σε τιμές ύψους κύματος κάτω του 1.5 m, ενώ σε υψηλότερες τιμές η σύγκριση είναι σημαντικά καλύτερη. Παράλληλα, η σύγκριση της ταχύτητας ανέμου (Εικ. 2β) παρουσιάζει παρόμοια διασπορά, γεγονός που υποστηρίζει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου, σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές σφαλμάτων (ΜΑΣ: Μέσο Απόλυτο Σφάλμα και ΜΤΣ: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα) και την υψηλή τιμή του συντελεστή Willmott Skill Score (WSS).



ΕΙΚΟΝΑ 2 Σύγκριση σημαντικού ύψους κύματος H_s από το WW-III (α) και της ταχύτητας ανέμου στα 10m από το WRF-ARW (β) με δορυφορικές μετρήσεις του Jason-2 (δίνονται τιμές για ΜΑΣ: Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, ΜΤΣ: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα και WSS: Willmott Skill Score).

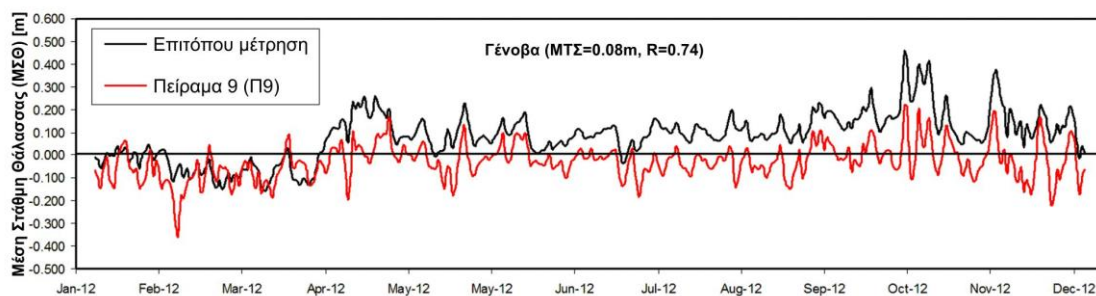
3.2 Βαθμονόμηση/Επαλήθευση Μοντέλου Στάθμης Θάλασσας

Η βαθμονόμηση του μοντέλου στάθμης θάλασσας έγινε για το Πεδίο 1 (Μεσόγειος) χρησιμοποιώντας επιτόπου μετρήσεις στάθμης θάλασσας για το έτος 2012 από διάφορους σταθμούς της Μεσογείου. Η επιλεγθείσα βέλτιστη διαμόρφωση του μοντέλου εφαρμόστηκε στα Πεδία 2 και 3. Εκτελέστηκαν διάφορα πειράματα, ώστε να διερευνηθούν διαφορετικές παραμετροποιήσεις σε σχέση με τις επιδράσεις του μέγιστου βάθους του πεδίου, της αστρονομικής παλίρροιας, της αλληλεπίδρασης ατμόσφαιρας-θάλασσας κλπ. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των 12 συνολικά πειραμάτων που έγιναν περιλήφθηκαν πειράματα: με πραγματικό ή μικρότερο μέγιστο βάθος (Π7 και Π8), με εφαρμογή αρμονικής συνθήκης ταλάντωσης στο ανοιχτό όριο του Γιβραλτάρ (Π2, Π4 και Π9-12), με

αλλαγή του συντελεστή τριβών επιφανείας, C_D , ελέγχοντας σταθερές τιμές ή και μεταβλητές σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου και με διαφορετικές τιμές της σταθεράς υπολογισμού της τυρβώδους διάχυσης. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των χρονοσειρών ΜΣΘ από τις επιτόπου μετρήσεις και από τις προσομοιώσεις των 12 πειραμάτων (Π1-12) δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1), ως τιμές της παραμέτρου WSS ($0 \leq WSS \leq 1$), που αποτελεί κριτήριο της επιτυχίας του μοντέλου να περιγράψει τις συνθήκες στο πεδίο. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή WSS, τόσο μεγαλύτερη η επιτυχία του μοντέλου. Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης προέκυψε η βέλτιστη παραμετροποίηση (Π9), η οποία περιλαμβάνει: (α) παραμετροποίηση της παλίρροιας κατά Schwiderski (1980), (β) ρεαλιστική βαθυμετρία, (γ) χρήση αρμονικής ταλάντωσης στο Γιβραλτάρ και (δ) χρήση σταθερού συντελεστή τριβής $C_D=10^{-5}$. Οι διαφορές μεταξύ επιτόπου μέτρησης και προσομοίωσης μπορεί να οφείλονται εν μέρει σε τοπικά φαινόμενα (ανακλάσεις κ.α.), καθώς συχνά οι μετρητές στάθμης τοποθετούνται εντός λιμενολεκανών. Η καλή απόδοση του μοντέλου φαίνεται επίσης από τη χρονοσειρά σύγκρισης μέτρησης και προσομοίωσης που δίνεται ενδεικτικά για το σταθμό της Γένοβα (Εικ. 3). Η παραμετροποίηση του Π9 χρησιμοποιείται από σύστημα του WaveForUs σε επίπεδο 3-ήμερης πρόγνωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Τιμές της παραμέτρου WSS για το σύνολο των 12 πειραμάτων και για όλους τους διαθέσιμους σταθμούς. Με γκρι σκίαση σημειώνεται το βέλτιστο πείραμα.

Σταθμός	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5	Π6	Π7	Π8	Π9	Π10	Π11	Π12
Θεσσαλονίκη	0.48	0.59	0.53	0.57	0.62	0.53	0.59	0.56	0.68	0.55	0.51	0.65
Γένοβα	0.72	0.76	0.76	0.77	0.71	0.73	0.77	0.77	0.79	0.76	0.72	0.61
Αγκόνα	0.61	0.68	0.68	0.69	0.67	0.63	0.73	0.70	0.72	0.67	0.64	0.69
Νάπολη	0.56	0.62	0.59	0.61	0.59	0.56	0.68	0.66	0.69	0.61	0.56	0.58
Μαρσέιγ	0.50	0.51	0.55	0.52	0.42	0.51	0.39	0.43	0.46	0.52	0.81	0.46
Βενετία	0.61	0.71	0.71	0.72	0.80	0.66	0.75	0.71	0.82	0.69	0.68	0.68
Κατάνια	0.40	0.47	0.36	0.43	0.40	0.38	0.45	0.44	0.51	0.43	0.36	0.46
Χαντέρα	0.50	0.54	0.54	0.55	0.62	0.50	0.62	0.65	0.66	0.53	0.51	0.45
Κάλιαρι	0.45	0.54	0.47	0.51	0.54	0.48	0.50	0.49	0.60	0.50	0.46	0.43
Οτράντο	0.44	0.53	0.46	0.51	0.52	0.45	0.54	0.51	0.62	0.50	0.43	0.39
Αλεξανδρούπολη	0.34	0.64	0.63	0.64	0.73	0.59	0.68	0.64	0.77	0.61	0.60	0.76
Μέση τιμή	0.51	0.60	0.57	0.59	0.60	0.55	0.61	0.60	0.67	0.58	0.57	0.56

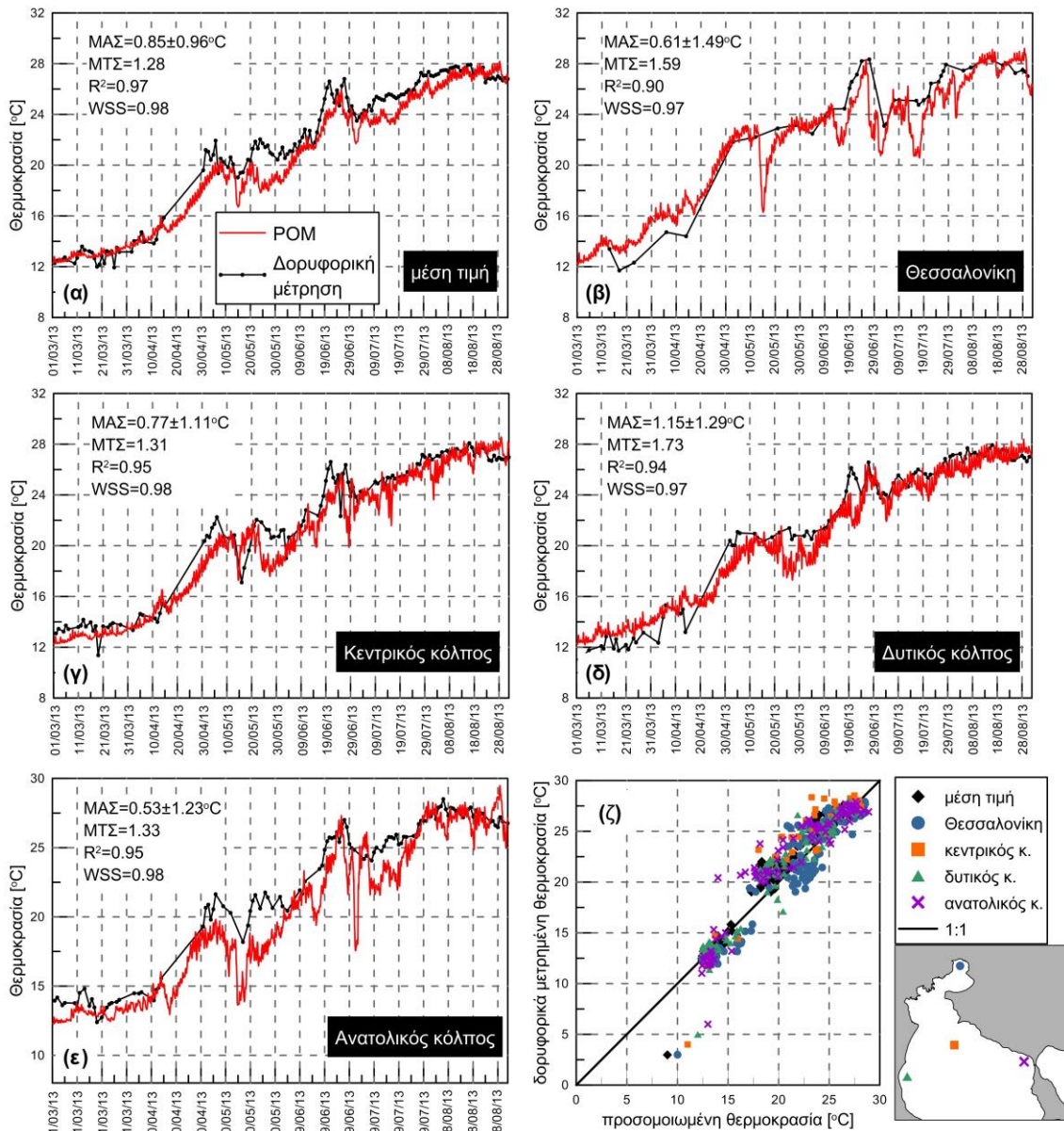


ΕΙΚΟΝΑ 3 Σύγκριση χρονοσειράς ΜΣΘ μοντέλου από το Π9 (κόκκινη γραμμή) και επιτόπου μετρήσεων (μαύρη γραμμή) για το σταθμό της Γένοβα. Δίνονται οι τιμές ΜΤΣ και συντελεστή συσχέτισης R.

3.3 Επαλήθευση Μοντέλου Θαλάσσιας Κυκλοφορίας

Για την αξιολόγηση του μοντέλου κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές μετρήσεις επιφανειακής θερμοκρασίας (L3 multi-sensor SST, με ανάλυση 0.02°) για το διάστημα Μάρτιος με Αύγουστος 2013, οι οποίες συγκρίθηκαν με αποτελέσματα του μοντέλου (Εικ. 4). Η σύγκριση πραγματοποιείται για τη μέση τιμή στο σύνολο του πεδίου (Εικ. 4α), σε χαρακτηριστικές θέσεις του κόλπου (Εικ. 4β-ε) και εξετάζοντας την διασπορά μεταξύ μέτρησης και προσομοίωσης (Εικ. 4ζ). Στατιστικές παράμετροι της αποδοτικότητας του μοντέλου, όπως ΜΑΣ, ΜΤΣ, συντελεστής συσχέτισης (R^2) και παράμετρος WSS, επίσης σημειώνονται στα γραφήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο αναπαράγει με καλή ακρίβεια τη θερμοκρασιακή μεταβλητότητα στην επιφάνεια

στο σύνολο το πεδίου και στις διάφορες υπο-περιοχές του κόλπου, τόσο σε επίπεδο εποχικού κύκλου, όσο και σε επίπεδο διακυμάνσεων μικρότερης χρονικής κλίμακας. Η αποδοτικότητα του μοντέλου επιβεβαιώνεται και από τις τιμές σφάλματος, που είναι αρκετά μικρές, και από τους ιδιαίτερα υψηλούς (~1) συντελεστές συσχέτισης και παραμέτρου WSS. Σημειώνεται, τέλος ότι αντίστοιχη αποδοτικότητα βρέθηκε και κατά τη σύγκριση αντίστοιχων αποτελεσμάτων και για το έτος 2012.



ΕΙΚΟΝΑ 4 Σύγκριση χρονοσειρών επιφανειακής θερμοκρασία του μοντέλου (κόκκινη γραμμή) και δορυφορικών μετρήσεων (μαύρη γραμμή) σαν μέση τιμή στο σύνολο του πεδίου (α), στη Θεσσαλονίκη (β) και στον κεντρικό (γ), δυτικό (δ) και ανατολικό (ε) κόλπο (οι θέσεις φαίνονται στον χάρτη κάτω δεξιά) και γράφημα σκέδασης του συνόλου των θέσεων (ζ). Στα γραφήματα χρονοσειράς δίνονται και στατιστικές παράμετροι αξιοπιστίας του μοντέλου (ΜΑΣ, ΜΤΣ, R² και WSS)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα WaveForUs είναι ένα εξελιγμένο, επιχειρησιακό, σύστημα πρόγνωσης που προσφέρει τριήμερες, υψηλής ανάλυσης και στοχευμένες προγνώσεις θάλασσας για την περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου. Λόγω των πολυπληθών δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα στον παράκτιο χώρο του κόλπου, όπως αστικές, βιομηχανικές, γεωργικές και τουριστικές, αλλά κυρίως στο θαλάσσιο πεδίο, όπως ναυσιπλοΐα, αλιεία, υδατοκαλλιέργειες, αναψυχή και ναυταθλητισμός, ο Θερμαϊκός αποτελεί χώρο με σημαντική αναγκαιότητα έγκυρων και στοχευμένων θαλάσσιων προγνώσεων. Τα

υψηλής ανάλυσης προϊόντα του συστήματος WaveForUs καλύπτουν την αναγκαιότητα αυτή. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος πρόγνωσης, δίνοντας έμφαση στη βαθμονόμηση/επαλήθευση των προγνώσεων. Στο επίπεδο αυτό, παρουσιάστηκαν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων που απαρτίζουν το σύστημα WaveForUs με επιτόπου και δορυφορικές μετρήσεις, οι οποίες και κατέδειξαν την αξιοπιστία του. Η πρόγνωση έντονων μετεωρολογικών επεισοδίων που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα κατάκλυσης σε παράκτιες περιοχές χαμηλού υψομέτρου συνδυάζεται με σύστημα ειδοποίησης του κοινού, σε περίπτωση σημαντικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας στο σύνολο της παράκτιας ζώνης. Ειδικές, επιστημονικά εξελιγμένες παραμετροποιήσεις, όπως η συνεκτίμηση της αστρονομικής παλίρροιας στην πρόγνωση στάθμης και της παροχής των ποταμών στην παράκτια κυκλοφορία, βελτίωσαν την αποδοτικότητα του συστήματος. Το ευρύ φάσμα προϊόντων θάλασσας πρόγνωσης του συστήματος, υψηλής χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, που διατίθενται στο κοινό μέσω διαφόρων, άμεσων και φιλικών προς το χρήστη, μέσων, καλύπτει τις διαφορετικές ανάγκες των χρηστών του Θερμαϊκού Κόλπου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό πρόγραμμα WaveForUs χρηματοδοτήθηκε από τη δράση «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011»: Συμπράξεις Παραγωγικών και Ερευνητικών Φορέων σε Εστιασμένους Ερευνητικούς και Τεχνολογικούς Τομείς στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα" (ΕΠΑΝ ΙΙ, ΕΣΠΑ 2007-13).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Blumberg A.F. and Mellor G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Ed. N.S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1-16.
- COPERNICUS, Marine Environment Monitoring Service, <http://marine.copernicus.eu/>
- De Vries H. et al. (1995). A comparison of 2D storm surge models applied to three shallow European seas. *Environmental Software*, 10, 23–42.
- GEBCO (2008). The GEBCO_08 grid.
- Kombiadou K., Skoulikaris Ch., Kontos Y., Krestenitis Y. (2015). Assimilating riverine freshwater fluxes in circulation forecasts for the Thermaikos Gulf, *11th Panhellenic Symposium of Oceanography and Fisheries*, Mytilene, Lesvos island, Greece, May 13-17, 2015, pp. 929-932.
- Krestenitis Y.N., Androulidakis Y., Kontos Y. and Georgakopoulos G. (2011). Coastal inundation in the north-eastern Mediterranean coastal zone due to storm surge events. *Journal of Coastal Conservation*, 15, 353–368.
- Pytharoulis I., Tegoulis I., Kotsopoulos S., Bampzelis D., Karacostas Th. and Katragkou E. (2014). Evaluation of the Operational Numerical Weather Predictions of the WaveForUs project, *Proc. 12th Int. Conf. Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, pp. 96-101.
- Rosati A. and Miyakoda K. (1988). A general circulation model for upper ocean simulation. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1601–1626.
- Schwiderski E.W. (1980). On charting global ocean tides. *Reviews of Geophysics*, 18(1), 243-268.
- Smith S.D. and Banke E.G. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(429), 665-673.
- Tolman H.L. (2006). Toward a third release of WW III; a multi-grid model version. *Proc. 9th international workshop on wave hindcasting and forecasting*, JCOMM Tech. Rep. 34. Paper L1.
- Wang W. et al. (2010). ARW Version 3 Modeling System User's Guide, *NCAR-MMM*, 354 pp.