

## ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΥΕΤΙΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΩΝ

Z. ΜΗΤΡΑΚΑ, Ν. ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗΣ ΚΑΙ Ι. ΚΑΜΑΡΙΑΝΑΚΗΣ

*Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας  
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε η εκτίμηση της χωρο-χρονικής κατανομής του υετίσιμου νερού (PW) στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας με βάση καταγραφές του ραδιομέτρου AVHRR στο θερμικό υπέρυθρο. Το PW προέκυψε ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας ( $\Delta T$ ) των δύο θερμικών καναλιών του AVHRR. Η σχέση PW –  $\Delta T$  προσδιορίστηκε με τη βοήθεια δεδομένων PW από ατμοσφαιρικό προϊόν του ραδιομέτρου MODIS. Χρησιμοποιήθηκαν οι χωρικές μέσες τιμές των παραμέτρων PW και  $\Delta T$  σε έναν κάρναβο φαντίων  $5 \times 5$  km. Επιπλέον οι προερχόμενες από το MODIS τιμές του PW προσαρμόστηκαν στην ώρα λήψης του AVHRR. Για την προσαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο ρυθμός μεταβολής του PW στην περιοχή μελέτης ο οποίος εκτιμήθηκε με χρήση δεδομένων ραδιοβολίσεων από τους σταθμούς ανώτερης ατμόσφαιρας της Αθήνας, της Θεσσαλονίκης, του Ηρακλείου και της Σμύρνης. Η εκτιμηθείσα σχέση PW –  $\Delta T$  εφαρμόστηκε σε δεδομένα AVHRR της χρονικής περιόδου 2001-2005 για την αποτύπωση της ενδοετήσιας και της χωρικής μεταβλητότητας του PW στην περιοχή μελέτης. Για την αξιολόγηση της απόδοσής της χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα ραδιοβολίσεων από τους προαναφερθέντες μετεωρολογικούς σταθμούς. Παρατηρήθηκε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των εκτιμηθέντων από το AVHRR τιμών PW και των αντίστοιχων προσδιορισθέντων από τις καταγραφές των ραδιοβολίσεων τιμών PW (RMSE = 0.46 cm).

## ESTIMATION OF SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF PRECIPITABLE WATER WITH THE USE OF SATELLITE AND RADIOSONDE DATA

Z. MITRAKA, N. CHRYSOULAKIS AND Y. KAMARIANAKIS

*Foundation for Research and Technology – Hellas  
Institute of Applied and Computational Mathematics*

### ABSTRACT

In this study, Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) thermal infrared records were used to estimate the spatial distribution of precipitable water (PW) over the broader area of Greece. PW was derived as a function of AVHRR thermal channels brightness temperature difference ( $\Delta T$ ). The PW –  $\Delta T$  relationship was calibrated using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) atmospheric product. Both MODIS derived PW and AVHRR derived  $\Delta T$  were spatially aggregated in a grid of  $5 \times 5$  km cells. The MODIS derived PW was adjusted to the AVHRR acquisition time by means of PW rates of change over the study area, which were estimated using radiosonde data at Athens, Thessaloniki, Heraklion and Izmir synoptic stations. The estimated PW –  $\Delta T$  relationship was applied to AVHRR data for the period 2001-2005, to monitor the interannual and spatial variability of PW over the study area. Radiosonde derived PW values at the above synoptic stations were used to validate the PW –  $\Delta T$  relationship. A very good agreement between radiosonde and AVHRR derived PW values was observed, since a RMSE of 0.46 cm was calculated for the whole the five years period.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υετίσιμο νερό (Precipitable water - PW) είναι το ποσό των υδρατμών σε κατακόρυφη διεύθυνση και εκφράζεται σε  $\text{g/cm}^2$ , ή ως το ύψος μιας αντίστοιχης στήλης νερού σε cm. Η χωρο-χρονική κατανομή του PW είναι σημαντική για την κατανόηση

του υδρολογικού κύκλου και αποτελεί αντικείμενο μελέτης σε παγκόσμια, περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Χρησιμοποιείται ευρέως στον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου, καθώς και σε μελέτες εξατμισοδιαπνοής (Chrysoulakis et al., 2008). Η γνώση του μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους από δορυφορικά δεδομένα (Chrysoulakis and Cartalis 2002). Ακόμα, είναι εξαιρετικά χρήσιμο στην εφαρμογή τεχνικών συμβολομετρίας (InSAR) ραντάρ (Hanssen et al., 2001).

Το PW υπολογίζεται με χρήση δεδομένων ραδιοβολίσεων. Ο τρόπος αυτός αποτελεί την πλέον αξιόπιστη μέθοδο, όμως τα βασικά της μειονεκτήματα είναι η χαμηλή συχνότητα λήψης των μετρήσεων και το αραιό δίκτυο σταθμών ανώτερης ατμόσφαιρας. Το σφάλμα της μεθόδου αυτής είναι της τάξης του 5 με 10%. (Cartalis and Chrysoulakis, 1997; Chrysoulakis and Cartalis, 2000; Chrysoulakis et al., 2001; Motell et al., 2005).

Η χωρική κατανομή του PW μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση δορυφορικών δεδομένων, όπως οι καταγραφές του Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) στο εγγύς υπέρυθρο (Kaufman and Gao, 1992). Το PW εκτιμάται με σφάλμα 5 έως 10% επάνω από χειρσαίες περιοχές (Gao and Kaufman, 2003). Για την εκτίμηση του PW με χρήση καταγραφών του Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι (Dalu, 1986; Kleespies and McMillin, 1990). Οι πλέον γνωστοί αλγόριθμοι βασίζονται στην τεχνική “split-window”. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το PW ως γραμμική συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας  $\Delta T$  των θερμικών καναλιών 4 και 5 του AVHRR ( $\Delta T = T_4 - T_5$ ) με ακρίβεια της τάξης των 0.5 cm (Eck and Holben, 1994; Choudhury et al., 1995). Οι Eck και Holben (1994) αναφέρουν πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ PW και  $\Delta T$ , καθώς και το γεγονός ότι η χωρική κατανομή του συντελεστή εκπομπής που σχετίζεται με το είδος και την κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους, έχει μεγαλύτερη επίδραση στους συντελεστές προσδιορισμού της γραμμικής σχέσης PW –  $\Delta T$ , από ότι η εποχική μεταβλητότητα σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η προσαρμογή της εξίσωσης προσδιορισμού του PW από δεδομένα  $\Delta T$  του AVHRR για την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας και η εφαρμογή της για την εκτίμηση της χωροχρονικής κατανομής του PW. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκε η σχέση της χωρικής κατανομής του PW που προέρχεται από το ατμοσφαιρικό προϊόν του MODIS (LAADS, 2007) με τη χωρική κατανομή του  $\Delta T$  που προέρχεται από καταγραφές του AVHRR, λαμβάνοντας υπόψη και την χρονική διαφορά μεταξύ των περασμάτων των δορυφόρων. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της προαναφερθείσας χρονικής διαφοράς χρησιμοποιήθηκε η χωρική κατανομή του ρυθμού μεταβολής του PW στην περιοχή μελέτης, η οποία εκτιμήθηκε με χωρική παρεμβολή με βάση δεδομένα ραδιοβολίσεων τεσσάρων σταθμών (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Ηράκλειο και Σμύρνη). Οι χωρικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε ένα πλέγμα φατινίων 5 x 5 km το οποίο κάλυπτε την περιοχή μελέτης.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Περιοχή μελέτης είναι η ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας. Τα πρωτογενή δεδομένα AVHRR και τα δεδομένα Επιπέδου-2 του MODIS που χρησιμοποιήθηκαν έχουν χωρική διακριτική ικανότητα της τάξης του 1 km. Τα δεδομένα AVHRR διορθώθηκαν γεωμετρικά με τη βοήθεια επίγειων σημείων ελέγχου και προβλήθηκαν στο ίδιο χαρτογραφικό σύστημα με τα δεδομένα MODIS (Geographic Lat/Lon με WGS84). Για

την εξάλειψη του πλανιμετρικού σφάλματος λόγω της επαναπροβολής των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε κάρναβος με φατνία μεγέθους 5 x 5 km, στον οποίο αναχθήκαν τα δεδομένα των δύο πηγών. Η μέθοδος των πλησιέστερων γειτόνων χρησιμοποιήθηκε για τη γεωμετρική διόρθωση.

Η βαθμονόμηση της σχέσης PW – ΔΤ πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο φατνίου 5 x 5 km με χρήση των 15 λήψεων MODIS και AVHRR που φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι αντίστοιχες τιμές της μετεωρολογικής οριζόντιας ορατότητας ήταν μεγαλύτερες των 10 km, συνεπώς η συγκέντρωση των αερολυμάτων θεωρήθηκε χαμηλή και αγνοήθηκε η απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από αυτά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Ημερομηνίες λήψεων MODIS και AVHRR, όπου φαίνεται και η διαφορά ώρας.

Ημερομηνία	Ωρα Λήψης (UTC)		Χρονική διαφορά	Ημερομηνία	Ωρα Λήψης (UTC)		Χρονική διαφορά
	Terra/MODIS	NOAA16/AVHRR			Terra/MODIS	NOAA16/AVHRR	
02.10.2003	09:30	13:00	3:30	16.04.2004	09:50	12:35	2:45
04.10.2003	09:20	12:35	3:15	23.04.2004	09:10	12:55	3:45
12.10.2003	08:30	12:45	4:15	29.04.2004	09:20	13:30	4:10
22.10.2003	09:05	12:35	3:30	01.07.2004	09:25	13:15	3:50
07.01.2004	08:35	12:05	3:30	07.07.2004	09:35	13:50	4:15
17.01.2004	09:15	11:55	3:40	08.07.2004	08:40	13:35	4:55
25.01.2004	10:00	12:05	2:05	09.07.2004	09:25	13:25	4:00
06.04.2004	09:15	12:50	3:35				

Το ραδιόμετρο MODIS έχει 36 κανάλια, από τα οποία 5 χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του PW. Τα προϊόντα Επιπέδου-2 παρέχουν τη χωρική κατανομή του PW επάνω από την εκάστοτε περιοχή λήψης, η οποία έχει εκτιμηθεί με χρήση επιχειρησιακών αλγορίθμων (Gao and Kaufman, 2003). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα MODIS Επιπέδου-2 τα οποία ήταν διαθέσιμα, από το Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS, 2007). Τα δεδομένα ήταν σε μορφή Hierarchical Data Format (HDF). Αναπτύχθηκε ένα script σε Matlab για την προσπέλαση των αρχείων HDF, για την εξαγωγή τιμών PW και για το διαχωρισμό των εικονοστοιχείων με νέφη. Πληροφορία για νέφη υπήρχε στα αρχεία HDF σε επίπεδο bit. Μια μάσκα νεφών εφαρμόστηκε για να αποφασιστεί αν το εικονοστοιχείο αντιστοιχούσε σε νέφος ή όχι. Οι τιμές PW επαναπροσδιορίστηκαν σε επίπεδο φατνίου 5 x 5 km του καννάβου που κάλυπτε την περιοχή μελέτης. Για κάθε φατνίο υπολογίστηκε ο μέσος όρος των αντιστοιχούντων σε αυτό εικονοστοιχείων, εφόσον σε κανένα από αυτά δεν υπήρχαν νέφη.

Για την αποτύπωση των χωρικών κατανομών του ΔΤ για την περίοδο 2001 – 2005, χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές του AVHRR του NOAA 16 οι οποίες ήταν διαθέσιμες από τον επίγειο δορυφορικό σταθμό λήψης του ΙΤΕ και από το NOAA Satellite Active Archive (CLASS, 2005). Από τα πρωτογενή δεδομένα προέκυψαν τιμές θερμοκρασίας λαμπρότητας για τα κανάλια του θερμικού υπερύθρου με βαθμονόμηση (Chrysoulakis et al., 2007). Τα δεδομένα ήταν σε μορφή NOAA Level 1b και οι παράμετροι βαθμονόμησης καθώς και το ύψος πτήσης υπήρχαν στα μεταδεδομένα. Ο εντοπισμός των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούσαν σε νέφη πραγματοποιήθηκε με χρήση του αλγορίθμου που προτάθηκε από τους Chrysoulakis and Cartalis (2007). Κατόπιν εξήχθη η χωρική κατανομή του ΔΤ και πραγματοποιήθηκε γεωμετρική διόρθωση και προβολή στο προαναφερθέν γεωδαιτικό σύστημα. Το ύψος της πτήσης του δορυφόρου

χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση της πανοραμικής παραμόρφωσης. Η γεωμετρική διόρθωση πραγματοποιήθηκε με χρήση περιορισμένου αριθμού επίγειων σημείων ελέγχου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε αναγωγή της εξαχθείσας χωρικής κατανομής του ΔΤ στον κάρναβο φατνίων 5 x 5 km. Όπως και στην περίπτωση του PW από τις καταγραφές MODIS, ο μέσος όρος του ΔΤ σε κάθε φατνίο του καννάβου υπολογίστηκε με βάση τα αντιστοιχούντα εικονοστοιχεία που δεν περιείχαν νέφη.

Τα δεδομένα ραδιοβολίσεων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατακόρυφες κατανομές της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας δρόσου από τους σταθμούς της Αθήνας (37.90 N, 23.73 E), της Θεσσαλονίκης (40.52 N, 22.97 E), του Ηρακλείου (35.33 N, 25.18 E) και της Σμύρνης (38.43 N, 27.17 E). Τα δεδομένα αυτά για τη χρονική περίοδο 2001-2005 διατέθηκαν από το UK Meteorological Office (Met Office, 2006). Η εξαγωγή του PW από δεδομένα ραδιοβολίσεων πραγματοποιήθηκε με ακρίβεια 0.1 – 0.2 cm (Cartalis and Chrysoulakis, 1997; Chrysoulakis and Cartalis, 2000).

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι συντελεστές της εξίσωσης που συνδέει τα PW και ΔΤ είναι διαφορετικοί για κάθε περιοχή. Αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση του ΔΤ ανάλογα με την κατάσταση της ατμόσφαιρας και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Στην παρούσα εργασία, οι προερχόμενες από τις καταγραφές MODIS τιμές PW χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων, το οποίο προσαρμόστηκε για τη χρονική υστέρηση μεταξύ των περασμάτων Terra/MODIS και NOAA16/AVHRR από την περιοχή μελέτης. Για την προσαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ραδιοβολίσεων. Πιο συγκεκριμένα, αν η λήψη AVHRR πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος γίνεται σε χρόνο  $t = t_0$ , το PW στο φατνίο  $(x,y)$  σε χρόνο  $t_0$ ,  $PW(x,y,t_0)$ , μπορεί να υπολογιστεί σαν γραμμική συνάρτηση του  $\Delta T(x,y,t_0)$ :

$$PW(x,y,t_0) = a\Delta T(x,y,t_0) + b \quad (1)$$

όπου  $\Delta T = T_4 - T_5$  η θερμοκρασία λαμπρότητας για τα κανάλια 4 και 5 του AVHRR στο φατνίο  $(x,y)$ .

Αναπτύσσοντας κατά σειρά Taylor το PW για το χρόνο  $t_0$  έχουμε (Chrysoulakis et al., 2008):

$$PW(x,y,t) = PW(x,y,t_0) + \Delta t \frac{\partial PW(x,y,t_0)}{\partial t} \quad (2)$$

όπου  $PW(x,y,t)$  είναι η τιμή του PW στο φατνίο  $(x,y)$  με βάση τις καταγραφές του MODIS σε χρόνο  $t$ ,  $PW(x,y,t_0)$  είναι η τιμή του PW για το ίδιο φατνίο κατά τη χρονική στιγμή λήψης του AVHRR  $t_0$ ,  $\Delta t = t - t_0$  είναι η διαφορά χρόνου μεταξύ των περασμάτων του MODIS και του AVHRR, και  $\frac{\partial PW(x,y,t_0)}{\partial t}$  είναι η μερική

παράγωγος του PW ως προς το χρόνο στο φατνίο  $(x,y)$  τη χρονική στιγμή  $t=t_0$ , η οποία αναπαριστά το ρυθμό μεταβολής του PW σε ένα φατνίο του πλέγματος.

Έτσι, το PW του MODIS συνδέεται με το ΔΤ του AVHRR μέσω της σχέσης:

$$PW(x,y,t) - \Delta t \frac{\partial PW(x,y,t_0)}{\partial t} = a\Delta T(x,y,t_0) + b \quad (3)$$

Το πρώτο μέλος αναπαριστά μία εκτίμηση του υετίσιμου νερού τη στιγμή λήψης του AVHRR, που το ονομάζουμε  $PW^*$ . Το  $PW^*$  υπολογίστηκε με συνδυασμό του PW από το MODIS με το ρυθμό μεταβολής του PW από δεδομένα ραδιοβολίσεων. Το

τελευταίο υπολογίστηκε με χωρική παρεμβολή με χρήση δεδομένων από τους τέσσερις συνοπτικούς σταθμούς. Ο όρος  $\frac{\partial PW(x,y,t_0)}{\partial t}$  υπολογίστηκε με τη βοήθεια γραμμικής παλινδρόμησης από τιμές PW που υπολογίστηκαν στους σταθμούς της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας δεδομένα ραδιοβολίσεων. Συνεπώς, για το φατνίο (x,y) η εξίσωση (3) μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$PW^*(x,y,t_0) = a\Delta T(x,y,t_0) + b \tag{4}$$

Οι συντελεστές *a* και *b* στην (4) μπορούν να εκτιμηθούν, σε επίπεδο φατνίου 5 x 5 km, με γραμμική παλινδρόμηση του PW\* και του ΔT, για της ημερομηνίες του Πίνακα 1. Στη συνέχεια η παραχθείσα εξίσωση εφαρμόστηκε στα δεδομένα AVHRR ώστε να προκύψει η χωρική κατανομή PW για την περίοδο 2001–2005 για την περιοχή μελέτης. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της πραγματοποιήθηκε μετά από σύγκριση με τιμές PW από ραδιοβολίσεις στους τέσσερις σταθμούς της περιοχής μελέτης.

Η μέθοδος ευσταθούς γραμμικής παλινδρόμησης (Robust Regression Analysis) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων *a* και *b* της παραπάνω σχέσης με στόχο να μη ληφθούν υπόψη οι ακραίες δειγματικές παρατηρήσεις (outliers). Οι ακραίες παρατηρήσεις αναγνωρίστηκαν μετά από εκτίμηση των συντελεστών παλινδρόμησης με τη μέθοδο Least Trimmed Squares (LTS). Η μέθοδος αυτή, μετρά το ποσοστό των ακραίων παρατηρήσεων που είναι επιτρεπτό, ώστε η μέθοδος εκτίμησης να διατηρεί την ευστάθειά της. Το γραμμικό μοντέλο στην παρούσα μελέτη περιέχει μόνο μια επεξηγηματική μεταβλητή και συνεπώς, εφαρμόστηκε επακριβώς ο αλγόριθμος των Rousseeuw and Leroy (1987). Τα διαγνωστικά ακραίων παρατηρήσεων βασίστηκαν στα κατάλοιπα της παλινδρόμησης LTS με χρήση των αποστάσεων Mahalanobis και MCD (Minimum Covariance Determinant). Ένα ζευγάρι τιμών PW\*–ΔT χαρακτηρίζεται σαν ακραία παρατήρηση, αν οι αντίστοιχες αποστάσεις υπερβαίνουν κάποιες προκαθορισμένες τιμές. Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ευσταθούς παλινδρόμησης υπολογίστηκαν οι τελευταίες “διορθωμένες” εκτιμήσεις των ελαχίστων τετραγώνων, οι οποίες είναι οι εκτιμήσεις χωρίς τον υπολογισμό των ακραίων δειγματικών παρατηρήσεων.

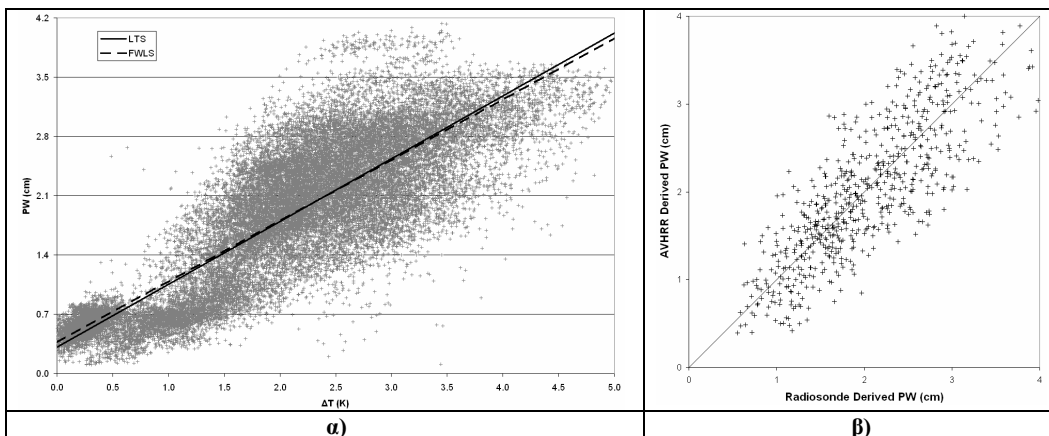
Η προκύπτουσα σχέση PW\*– ΔT εφαρμόστηκε στα δεδομένα AVHRR για την εκτίμηση της χωρικής κατανομής PW. Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες λήψεις του NOAA 16 για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο, Οκτώβριο με αποτέλεσμα τη δημιουργία χωροχρονικής κατανομής. Για τη μελέτη της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε μήνα (Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο, Οκτώβρη) για τη χρονική περίοδο 2001 – 2005.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της σχέσης PW\*–ΔT χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ραδιοβολίσεων, υποθέτοντας ότι η μέτρηση σε κάθε συνοπτικό σταθμό είναι αντιπροσωπευτική για το 5 x 5 km φατνίο στο οποίο αντιστοιχεί (Chrysoulakis et al., 2008). Με αυτό τον τρόπο έγινε σύγκριση σε επίπεδο εικονοστοιχείου των τιμών PW από ραδιοβολίσεις και τιμών PW από AVHRR, με υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE

: Root Mean Square Error). Χρησιμοποιήθηκαν εικονοστοιχεία τα οποία δεν αντιστοιχούσαν σε νέφη για τους μήνες Ιανουάριο (153 ζεύγη τιμών), Απρίλιο (185 ζεύγη τιμών), Ιούλιο (272 ζεύγη τιμών) και Οκτώβριο (221 ζεύγη τιμών) για τη χρονική περίοδο 2001–2005, και για ολόκληρο το σετ δεδομένων (831 ζεύγη τιμών).

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

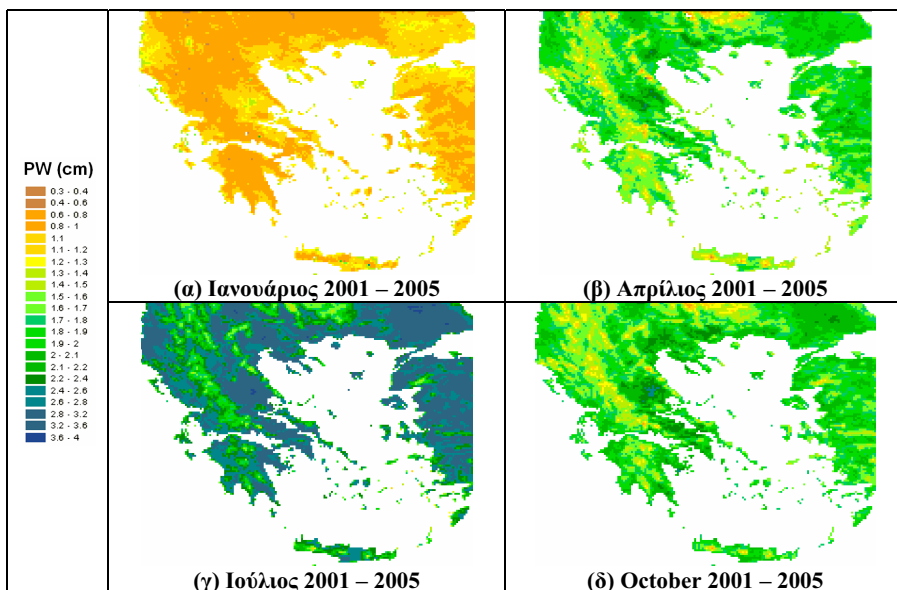
Μετά από εκτίμηση των συντελεστών της εξίσωσης (4) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προέκυψαν μόνο 4 ακραίες παρατηρήσεις, στα 29861 ζευγάρια τιμών  $PW^* - \Delta T$  που περιέχονται στο σύνολο των δεδομένων. Ωστόσο, από την ανάλυση LTS το 0.77% των ζευγαριών  $PW^* - \Delta T$  ταξινομήθηκαν σαν ακραίες παρατηρήσεις, σύμφωνα με τη διαδικασία ευσταθών υπολοίπων και 0.14% των ζευγαριών ταξινομήθηκαν σαν ακραίες παρατηρήσεις έντονης επίδρασης (leverage points). Στο Σχήμα 1α) φαίνονται τα ζευγάρια τιμών  $PW^* - \Delta T$  και τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης FWLS και LTS.



**ΣΧΗΜΑ 1.** Διαγράμματα διασποράς: α)  $PW^* - \Delta T$  όπου φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου ευσταθούς γραμμικής παλινδρόμησης. β) Εκτιμώμενο από καταγραφές AVHRR PW προς παρατηρούμενο από ραδιοβολίσεις PW, για τη χρονική περίοδο 2001–2005.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται χωρική κατανομή των μέσων τιμών PW από δεδομένα AVHRR, όπου μπορεί να παρατηρηθεί η χρονική και η χωρική μεταβλητότητα. Είναι εμφανή τα καλοκαιρινά μέγιστα και τα χειμερινά ελάχιστα των χωρικών κατανομών, καθώς και η επίδραση της τοπογραφίας. Παρατηρούνται μέγιστες τιμές 1.60, 2.61, 3.96 και 2.50 cm για τον Ιανουάριο, τον Απρίλιο, τον Ιούλιο και τον Οκτώβρη αντίστοιχα. Ωστόσο, ιδιαίτερης σημασίας είναι και τα τοπικά μέγιστα που παρατηρούνται στη Θεσσαλία, την κεντρική Μακεδονία, την Ανατολική Θράκη, τη Δυτική Αλβανία και άλλες λιγότερο εκτεταμένες περιοχές της Δυτικής Ελλάδας και της Τουρκίας, ειδικά το καλοκαίρι. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι οι περιοχές αυτές είναι σχεδόν επίπεδες με μεγάλα ποσοστά, αρδευόμενης κυρίως, καλλιεργήσιμης γης. Η άρδευση συνεπώς, προκαλεί φαινόμενα εξάτμισης, που συμβάλουν στην αύξηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας.

Στο Σχήμα 1β) φαίνεται ένα διάγραμμα διασποράς του PW από ραδιοβολίσεις προς το PW από δεδομένα AVHRR για όλη τη χρονική περίοδο 2001–2005 (για τους τέσσερις προαναφερθέντες μήνες). Οι τιμές PW από ραδιοβολίσεις φαίνονται υψηλά συσχετιζόμενες με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις από δεδομένα AVHRR. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson βρέθηκε ίσος με 0.812. Το RMSE υπολογίστηκε 0.46 cm, το οποίο υποδεικνύει μια πολύ καλή συμφωνία στις εκτιμώμενες και τις παρατηρούμενες τιμές.



**ΣΧΗΜΑ 2.** Χωρική κατανομή του PW με βάση καταγραφές του AVHRR. Για κάθε φάτνιο 5 x 5 km έχει υπολογιστεί η μέση τιμή για την περίοδο 2001 - 2005 για Ιανουάριο (α), Απρίλιο (β), Ιούλιο (γ) και Οκτώβριο (δ). Είναι εμφανής η χωρική μεταβλητότητα, καθώς και εποχιακή.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, εξήχθη η χωρική κατανομή του PW, με βάση δορυφορικές καταγραφές του AVHRR στο θερμικό υπέρυθρο. Η εξίσωση υπολογισμού του PW βαθμονομήθηκε με τη μέθοδο ευσταθούς γραμμικής παλινδρόμησης, με χρήση δορυφορικών δεδομένων MODIS και ελέγχθηκε με χρήση μετρήσεων ραδιοβολίσεων. Χρησιμοποιήθηκε δείγμα μεγάλου μεγέθους (29861 ζεύγη), και ο συντελεστής συσχέτισης Pearson υπολογίστηκε ίσος με 0.91. Η προαναφερθείσα εξίσωση εφαρμόστηκε σε καθημερινά δεδομένα ΔΤ για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο των ετών 2001 - 2005. Με αυτό τον τρόπο, προέκυψε η χωροχρονική κατανομή PW και εκτιμήθηκε η χωρική και χρονική του μεταβλητότητα. Τέλος, εκτιμήθηκε η αξιοπιστία των εξαγόμενων τιμών PW με χρήση μετρήσεων ραδιοβολίσεων, όπου παρατηρήθηκε πολύ καλή συμφωνία (RMSE=0.46 cm).

Παρατηρήθηκε αντιστοιχία των χωρικών κατανομών του προερχόμενου από το MODIS PW και του προερχόμενου από το AVHRR ΔΤ. Η επίδραση της τοπογραφίας ήταν εμφανής, αφού παρατηρήθηκαν χαμηλότερες τιμές PW και ΔΤ στο δυτικό κομμάτι της κεντρικής και νότιας Ελλάδας, στη κεντρική Πελοπόννησο, στις οροσειρές της Κρήτης, όπως και στις Τουρκίας, της Αλβανίας, της Βουλγαρίας και της FYROM. Σε ότι αφορά στη χωροχρονική μεταβλητότητα του PW, παρατηρήθηκαν σε επίπεδο φαντίου τα αναμενόμενα θερινά μέγιστα και χειμερινά ελάχιστα των τιμών του PW, καθώς η επίδραση της τοπογραφίας. Επιπλέον, τοπικά μέγιστα παρατηρήθηκαν στην περιοχή της Θεσσαλίας, της Κεντρικής Μακεδονίας, της Ανατολικής Θράκης, της Δυτικής Αλβανίας και σε άλλες λιγότερο εκτεταμένες περιοχές της Δυτικής Ελλάδας και της Δυτικής Τουρκίας, ιδιαίτερα το καλοκαίρι.

Συνοψίζοντας, η συμβολή της παρούσας εργασίας μπορεί να εντοπιστεί κυρίως:

- Στη μεθοδολογία για το συνδυασμό των καταγραφών MODIS και AVHRR.

- Στη βαθμονομημένη σχέση  $PW - \Delta T$  για την περιοχή μελέτης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση  $PW$  με την ανάλυση χρονοσειρών καταγραφών του ραδιομέτρου AVHRR στο θερμικό υπέρυθρο.
- Στην παραχθείσα χωρική κατανομή του  $PW$  για τον Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο για τη χρονική περίοδο 2001-2005, σε επίπεδο φατινίου 5 x 5 km.
- Στην εφαρμογή ευσταθών μεθόδων παλινδρόμησης για τη σχέση  $PW - \Delta T$ .
- Στη χρήση ενός εκτενούς συνόλου δεδομένων ελέγχου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cartalis C and Chrysoulakis N, 1997: Estimation of Precipitable water in Greece on the basis of radiosondes and satellite data. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 58, 163-171.
- Choudhury BJ, Dorman TJ and Hsu AY, 1995: Modeled and Observed Relations between the AVHRR Split Window Temperature Difference and Atmospheric Precipitable Water over Land Surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 51, 281 – 290.
- Chrysoulakis N and Cartalis C, 2000: Distribution of Precipitable Water in Southern Greece in support of Solar Radiation Models. *International Journal of Solar Energy*, 20, 197-206.
- Chrysoulakis N and Cartalis C, 2002: Improving the estimation of land surface temperature for the region of Greece: adjustment of a split window algorithm to account for the distribution of precipitable water. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 871-880.
- Chrysoulakis N, Herlin I, Prastacos P, Yahia H, Grazzini J and Cartalis C, 2007: An improved algorithm for the detection of plumes caused by natural or technological hazards using AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 108, 393–406.
- Chrysoulakis N, Kamarianakis Y, Xu L, Mitraka Z and Ding J, 2008: Combined use of MODIS, AVHRR and radiosonde data for the estimation of spatio-temporal distribution of Precipitable Water. *Journal of Geophysical Research* (in press).
- Chrysoulakis N, Proedrou M and Cartalis C, 2001: Variations and trends in annual and seasonal means of precipitable water in Greece as deduced from radiosonde measurements. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 84, 1 - 6.
- CLASS (2005), Comprehensive Large Array-data Stewardship System. The NOAA Satellite and Information Service (URL: <http://www.class.noaa.gov>).
- Dalu G, 1986: Satellite remote sensing of atmospheric water vapor. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1089-1097.
- Eck TF and Holben BN, 1994: AVHRR split window temperature differences and total precipitable water over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 567-582.
- Gao BC and Kaufman YJ, 2003: Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D13), 4389, doi:10.1029/2002JD003023.
- Hanssen RF, Feijt AJ and Klees R, 2001: Comparison of Precipitable Water Vapor Observations by Spaceborne Radar Interferometry and Meteosat 6.7- $\mu$ m Radiometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 756–764.
- Kaufman YJ and Gao BC, 1992: Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 871-884.
- Kleespies TJ and McMillin LM, 1990: Retrieval of precipitable water from observations in split window over various surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 851-862.
- LAADS, The Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, Goddard Distributed Active Archive Center (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>), 2007.
- Motell C, Porter J, Foster J, Bevis M and Businger S, 2002: Comparison of precipitable water over Hawaii using AVHRR-based split-window techniques, GPS and radiosondes. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2353-2339.
- Rousseeuw PJ and Leroy AM, 1987: *Robust regression and outlier detection*, New York: John Wiley & Sons, Inc.