

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΔΟΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Φείδας Χ., Κοκολάτος Γ., Γιαννακός Α.

*Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας*

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης της βαθμονομημένης τεχνικής Convective-Stratiform technique (CST) στη μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχόπτωσης στην Ελλάδα με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Η τεχνική εφαρμόστηκε σε ημίωρα υπέρυθρα δεδομένα του δορυφόρου Meteosat-7, για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν επίγεια δεδομένα από δίκτυο 34 βροχομετρικών σταθμών της ΕΜΥ. Γενικά, η CST παρουσίασε σημαντικό δυναμικό στην εκτίμηση της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχόπτωσης για την περίοδο και την περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενδοημερήσια μεταβολή της βροχόπτωσης παρουσιάζει ένα διακριτό κύκλο πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές με ένα σαφές μέγιστο βροχόπτωσης που εμφανίζεται μεταξύ 14:00 και 15:00 UTC (17:00 και 18:00 τοπική ώρα), το οποίο αποδίδεται σε θερμοδυναμική αστάθεια λόγω θέρμανσης του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία. Η βροχόπτωση τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης αποτελεί κατά μέσο όρο το 51% του ολικού όγκου βροχής ενώ η εμφάνισή της προηγείται της στρατόμορφης βροχόπτωσης κατά ½ έως 1 ώρα. Βρέθηκε ότι η φάση του ενδοημερήσιου κύκλου των δορυφορικών εκτιμήσεων τόσο για την ολική βροχόπτωση όσο και για τους δυο τύπους βροχόπτωσης (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης) είναι γενικά σύμφωνη με αυτή των επίγειων δεδομένων. Η CST αναπαριστά αποτελεσματικά τη βροχόπτωση τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης ενώ υπερεκτιμά τη στρατόμορφη βροχόπτωση. Επίσης υπερεκτιμά ελαφρώς την έκταση βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης, διαχωρίζει όμως αποτελεσματικά τους δυο τύπους βροχόπτωσης.

### STUDY OF THE DIURNAL VARIATION OF PRECIPITATION IN GREECE USING SATELLITE DATA

Feidas H., Kokolatos G., Giannakos A.

*University of the Aegean, Department of Geography*

### Abstract

In this study, the potential of using the Convective Stratiform technique (CST) in studying the diurnal variability of precipitation in Greece at high spatial and temporal resolution is examined. The CST is recalibrated over the Mediterranean basin and was applied in half-hourly infrared satellite data acquired by the Meteosat-7 for the period May-August 2005. Ground truth data from 34 rain gauges distributed evenly over Greece were used to verify the diurnal cycle derived by the CST estimates. In general, the CST showed enough potential to be usable in obtaining the diurnal cycle of precipitation for the period and the area tested in this study. A pronounced rainfall maximum was found over continental Greece at between 1400 and 1500 UTC (1700 and 1500 local time) which may be attributed to thermodynamic instability triggered by daytime heating. The satellite estimates reveal that the convective rainfall comprises 51%, in the mean, of the total rain volume for the same period. The timing of the diurnal cycle of the satellite estimates for both total rainfall and the division into convective and stratiform components is generally consistent with the analysis of ground truth data. CST reproduced efficiently the convective component of precipitation whereas the satellite estimates for the stratiform component of the rainfall overestimate the rain gauge

data. The calibrated CST overestimated slightly the convective rain area but it provided an efficient division between convective and stratiform rain.

**Λέξεις κλειδιά:** βροχόπτωση, ημερήσιος κύκλος, δορυφόροι.

**Key words:** precipitation, diurnal cycle, satellites.

## 1. Εισαγωγή

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των τεχνικών εκτίμησης βροχόπτωσης από υπέρυθρα δορυφορικά δεδομένα είναι η υψηλή χρονική ανάλυση στη λήψη των δεδομένων από τους γεωστάσιμους δορυφόρους (15 έως 30 min). Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει την εξαγωγή του ενδοημερήσιου κύκλου της βροχόπτωσης με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Η Convective-Stratiform Technique (CST) είναι μια δορυφορική τεχνική σχεδιασμένη για την εκτίμηση της βροχόπτωσης σε χωρική κλίμακα μεμονωμένων καταιγίδων με βάση δεδομένα στο κανάλι του θερμικού υπερύθρου. Η πρωτότυπη τεχνική (Adler and Negri, 1988) αναπτύχθηκε για την περιοχή της νότιας Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Οι παράμετροι της CST βαθμονομήθηκαν εκ νέου για τη Μεσόγειο με εφαρμογή στο κανάλι του υπερύθρου του Meteosat-7 από τους Feidas et. al (2006) με τη χρήση μετρήσεων βροχόπτωσης από το Precipitation Radar (PR) του Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Η εφαρμογή της βαθμονομημένης αυτής μεθόδου CST/Met-7 για την εκτίμηση της χωρικής κατανομής της αθροιστικής μηνιαίας και εποχιακής βροχόπτωσης στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου έδειξε ότι η CST/Met-7 μπορεί να αναπαραστήσει με πάρα πολύ καλά αποτελέσματα τη χωρική μεταβλητότητα της αθροιστικής βροχόπτωσης για τη θερμή περίοδο του έτους (Μάιο – Οκτώβριο) στην Ελλάδα, ιδιαίτερα αν οι εκτιμήσεις ολοκληρωθούν επιφανειακά (Φείδας και άλλοι, 2006).

Στην παρούσα εργασία, ενθαρρυμένοι από την καλή εφαρμογή της τεχνικής CST/Met-7 κατά τη θερμή περίοδο του έτους, έγινε προσπάθεια αξιοποίησής της για τη μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβλητότητας της βροχόπτωσης με την υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση που προσφέρουν τα δεδομένα του Meteosat-7. Ως περίοδος μελέτης επιλέχθηκε το διάστημα Μαΐου-Αυγούστου 2005 λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανίχνευση ενδοημερήσιου κύκλου βροχής είναι περισσότερο πιθανή αυτούς τους μήνες λόγω της απουσίας σημαντικών συνοπτικών συστημάτων στην περιοχή. Η κατάσταση αυτή ευνοεί την ανάπτυξη ατμοσφαιρικών συνθηκών θερμικής αστάθειας πάνω από τη ξηρά κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της θέρμανσης από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκαλεί την ανάπτυξη ανοδικών ρευμάτων κατά τις πρώτες μεταμεσημβρινές ώρες.

## 2. Δεδομένα και μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε την έκδοση της τεχνικής CST η οποία βαθμονομήθηκε για την περιοχή της Μεσογείου από τους Feidas et al. (2006) χρησιμοποιώντας μετρήσεις βροχόπτωσης από του PR του δορυφόρου TRMM για την “υγρή” περίοδο του υδρολογικού έτους 2003–2004. Η βαθμονόμηση των παραμέτρων της CST έγινε σε στατιστική βάση έτσι ώστε η τεχνική αυτή να είναι σε θέση να αναπαράγει για την περιοχή της Μεσογείου τον ολικό όγκο βροχής καθώς και το διαχωρισμό της σε στρατόμορφη και κατακόρυφη ανάπτυξης βροχή, σύμφωνα με τις μετρήσεις του PR, χρησιμοποιώντας δεδομένα στο κανάλι του υπερύθρου (IR) του δορυφόρου Meteosat-7. Η βαθμονομημένη τεχνική, καλούμενη εφεξής ως CST/Met-7, εφαρμόζεται σε πέντε διαδοχικά βήματα:

(1) Εντοπίζονται όλα τα τοπικά ελάχιστα της θερμοκρασίας λαμπρότητας ( $T_{min}$ ) στις IR εικόνες του Meteosat-7 με  $T_{min} < 253$  K.

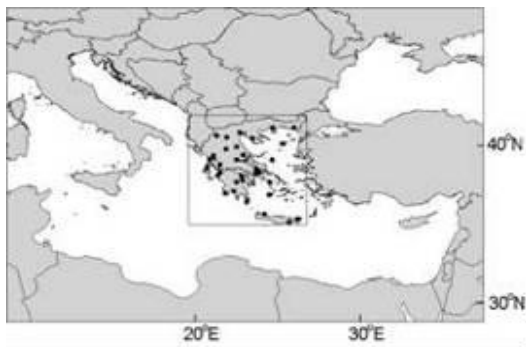
(2) Υπολογίζεται η απόκλιση της κάθε  $T_{min}$  από τη θερμοκρασία υποβάθρου (κλίση), δηλ. από τη μέση τιμή θερμοκρασίας των οκτώ γειτονικών εικονοστοιχείων.

(3) Το εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί σε κάθε τοπικό ελάχιστο θερμοκρασίας  $T_{min}$  θεωρείται ότι αποτελεί κέντρο κατακόρυφης ανάπτυξης του νέφους, με βάση μια συνάρτηση πιθανότητας η οποία καθορίζει την πιθανότητα να εμφανίζεται βροχή τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης για συγκεκριμένη τιμή  $T_{min}$  και κλίσης. Η διαδικασία αυτή καλείται έλεγχος κλίσης και χρησιμοποιείται για τον αποκλεισμό των ελάχιστων θερμοκρασίας που συνδέονται με μη βροχοφόρα νέφη τύπου cirrus.

(4) Αποδίδεται μια ένταση και έκταση βροχής σε κάθε εικονοστοιχείο  $T_{min}$ , το οποίο έχει περάσει τον έλεγχο κλίσης, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας  $T_{min}$  με βάση τις εκτιμήσεις του PR.

(5) Αποδίδεται μια έκταση στρατόμορφης βροχής γύρω από κάθε κέντρο κατακόρυφης ανάπτυξης του νέφους σε εκείνα τα εικονοστοιχεία που είναι ψυχρότερα από ένα κατώφλι θερμοκρασίας, και στα οποία δεν έχει ήδη αποδοθεί βροχή τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης στο προηγούμενο βήμα. Τέλος, μια σταθερή ένταση βροχής αποδίδεται σε όλα τα εικονοστοιχεία της περιοχής αυτής.

Η τεχνική CST/Met-7 εφαρμόστηκε σε ημίωρες εικόνες Meteosat-7 στο κανάλι του υπερύθρου (IR) για την περιοχή της ανατολικής Μεσόγειου, για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005. Για κάθε μισάωρο υπολογίστηκε η μέση τιμή της έντασης βροχής (mm/h) για όλη την περίοδο μελέτης. Επικεντρώνοντας στη μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στην Ελλάδα, οι μέσες χρονικές τιμές έντασης βροχής ολοκληρώθηκαν χωρικά σε μια περιοχή που καλύπτει την Ελληνική χερσόνησο (Εικόνα 1). Αρχικά, ελέγχθηκε η ύπαρξη ενδοημερήσιου κύκλου βροχόπτωσης στην Ελλάδα με τον υπολογισμό της ενδοημερήσιας μεταβολής της μέσης βροχόπτωσης ανά 30', ξεχωριστά πάνω από τη ξηρά και τη θάλασσα.



Εικόνα 1. Η περιοχή μελέτης. Το εσωτερικό πλαίσιο οριοθετεί την περιοχή και τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του ενδοημερήσιου κύκλου βροχής στην Ελλάδα.

Για την επαλήθευση των δορυφορικών εκτιμήσεων της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχής χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές έντασης βροχής από 34 βροχομετρικούς σταθμούς της ΕΜΥ ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιοχή της Ελλάδας (Εικόνα 1). Το δίκτυο των σταθμών αυτών περιλαμβάνει σταθμούς που βρίσκονται τόσο στην ηπειρωτική Ελλάδα όσο και σε παράκτιες περιοχές. Με στόχο την αξιολόγηση του δυναμικού της τεχνικής CST στην αναπαραστάση του ενδοημερήσιου κύκλου βροχής υπολογίστηκε η μέση ενδοημερήσια μεταβολή τριών παραμέτρων βροχής για την περιοχή της Ελλάδας, σε διαστήματα 30', και για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005, χρησιμοποιώντας τα επίγεια δεδομένα και τις δορυφορικές εκτιμήσεις:

α. η μέση ένταση βροχής, στις δυο συνιστώσες της (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης),

β. το ποσοστό της βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης, οριζόμενο ως το ποσοστό του συνολικού όγκου βροχής (ένταση βροχής x έκταση βροχής) που ανήκει σε αυτό τον τύπο βροχής, και

γ. το ποσοστό της έκτασης βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης, οριζόμενο ως το ποσοστό της έκτασης βροχής που χαρακτηρίζεται ως κατακόρυφης ανάπτυξης.

Οι δορυφορικές εκτιμήσεις των προηγούμενων παραμέτρων έγιναν με βάση τα 3 x 3 εικονοστοιχεία του Meteosat-7, με κέντρο το εικονοστοιχείο που αντιστοιχεί στη θέση του σταθμού. Συνεπώς, συνολικά 306 εικονοστοιχεία (34 σταθμοί x 9 εικονοστοιχεία) ανά δορυφορική εικόνα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τριών αυτών παραμέτρων. Αυτό έγινε για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκύπτει από το σταθερό σφάλμα γεωαναφοράς της εικόνας το οποίο είναι της τάξης του ενός εικονοστοιχείου. Οι παράμετροι για την εκτίμηση των οποίων απαιτείται πληροφορία για τη συνιστώσα της κατακόρυφης ανάπτυξης βροχόπτωσης υπολογίστηκαν με βάση το διαχωρισμό της βροχόπτωσης σε κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφη βροχόπτωση, από την τεχνική CST/Met-7.

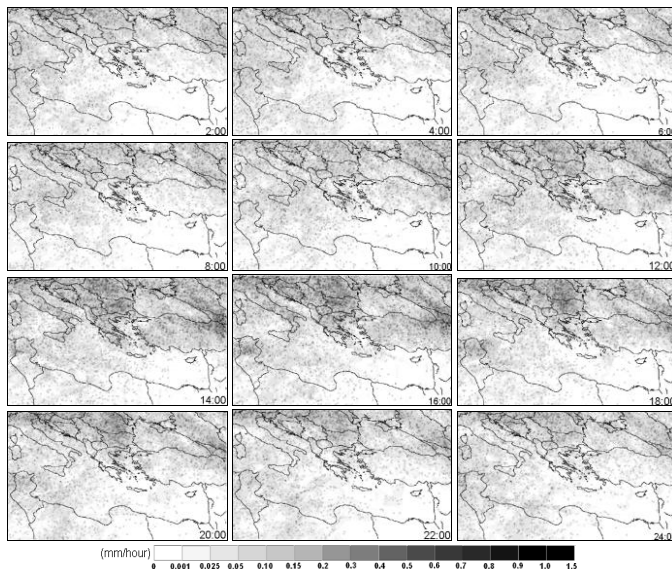
Για την εκτίμηση των ίδιων παραμέτρων με βάση τα επίγεια δεδομένα των σταθμών χρησιμοποιήθηκε το κατώφλι των 6 mm/h στην ένταση βροχής. Μέσες εντάσεις βροχής που καταγράφηκαν σε διάστημα 30' ταξινομούνται ως κατακόρυφης ανάπτυξης όταν οι τιμές τους ήταν μεγαλύτερη ή ίση από αυτό το κατώφλι, έχοντας όμως πάντοτε υπόψη ότι δεν υπάρχει ένα σταθερό κατώφλι έντασης βροχής το οποίο να διαχωρίζει με μεγάλη αξιοπιστία τους δύο τύπους βροχής. Το απλό αυτό κριτήριο ταξινόμησης έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές, με τιμές κατωφλίου που κυμαίνονται από 5 mm/h έως 10 mm/h (π.χ. Schumacher and Houze, 2003; Nzeukou et al., 2002; Tenório and Kwon, 2006; Atlas et al, 2002). Στον παρόν έργο επιλέχθηκε το κατώφλι των 6 mm/h με στόχο να γίνουν συγκρίσιμοι οι παράμετροι της κατακόρυφης ανάπτυξης βροχής που προέρχονται τόσο από τα δορυφορικά όσο και από τα επίγεια δεδομένα, καθώς αυτή η τιμή είναι η ελάχιστη τιμή έντασης βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης που αποδίδεται από τον αλγόριθμο CST/Met-7.

### 3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται υπό τη μορφή χαρτών τα αποτελέσματα της εφαρμογής του CST/Met-7 στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου ως μέσες τιμές για όλη την περίοδο μελέτης (Μάιος-Αύγουστος 2005), σε διαστήματα δυο ωρών. Τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία σε αυτή την παρουσίαση είναι τα ακόλουθα: (1) η έναρξη βροχοπτώσεων κατακόρυφης ανάπτυξης στα Βαλκάνια, γύρω στις 12:00 UTC (15:00 τοπική ώρα), οι οποίες μεγιστοποιούνται στο διάστημα 15:00-16:00 UTC (18:00-19:00 τοπική ώρα), κυρίως στη Βουλγαρία και στη Ρουμανία. (2) η εκδήλωση μικρότερης έντασης βροχοπτώσεων κατακόρυφης ανάπτυξης τις απογευματινές ώρες 12:00-16:00 UTC (15:00-19:00 τοπική ώρα) στις ηπειρωτικές περιοχές της Ελλάδας και Ιταλίας και κατά μήκος των κεντρικών οροσειρών, (3) ένα απογευματινό μέγιστο βροχοπτώσεων κατακόρυφης ανάπτυξης κατά μήκος των ορεινών όγκων του Καυκάσου και των νοτίων πλαγιών των Άλπεων, πιθανόν ως αποτέλεσμα τοπικής κυκλοφορίας ορέων/κοιλάδων.

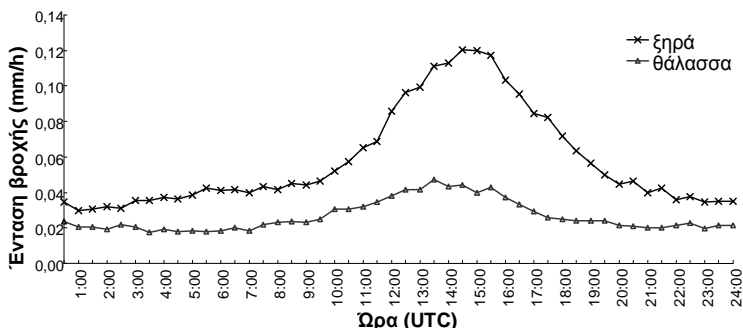
Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα, είναι φανερή η ύπαρξη ενδοημερήσιου κύκλου βροχής στην ανατολική Μεσόγειο, ο οποίος γίνεται πιο διακριτός με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Σκοπεύοντας στον εντοπισμό διακριτού ενδοημερήσιου κύκλου βροχής στην Ελλάδα, υπολογίστηκε η ενδοημερήσια μεταβολή της μέσης βροχόπτωσης σε διαστήματα 30' ξεχωριστά πάνω από τη ξηρά και τη θάλασσα στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας (Εικόνα 3). Το γράφημα για τη ξηρά αποτυπώνει ένα τυπικό ενδοημερήσιο κύκλο βροχόπτωσης με ένα μέγιστο μεταξύ 14:00 και 15:00 UTC (17:00 και 18:00 τοπική ώρα), ο οποίος χωρίς αμφιβολία αποτελεί αποτέλεσμα θερμοδυναμικής αστάθειας που δημιουργεί η θέρμανση του εδάφους κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις απογευματινές ώρες. Παρόμοιο ενδοημερήσιο κύκλο - αν και λιγότερο σαφή - παρατηρούμε και πάνω από τη θάλασσα, με μέγιστο το οποίο προηγείται κατά μια ώρα του αντίστοιχου μεγίστου πάνω από τη ξηρά. Η διαφορά αυτή φάσης των δυο κύκλων αποτελεί πιθανόν αποτέλεσμα των διαφορετικών φυσικών διεργασιών σχηματισμού βροχής πάνω από τη ξηρά και τη θάλασσα. Η εμφανής διαφορά στο εύρος των δυο κύκλων αποδεικνύει τη γνωστή θεωρία ότι η θερμική αστάθεια πάνω από τη ξηρά αποτελεί την κύρια αιτία δημιουργίας βροχής κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους.

Σύμφωνα με το διαχωρισμό της βροχόπτωσης, από τη τεχνική CST, στους δυο τύπους βροχής (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφη) (Εικόνα 4), η κατακόρυφης ανάπτυξης συνιστώσα αποτελεί το 51% περίπου της ολικής βροχόπτωσης, ποσοστό σημαντικά μικρότερο από το 67% που βρήκαν οι Negri et. al (2002) για τις τροπικές περιοχές της Αμαζονίας. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο αποτελεί η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κύκλων της κατακόρυφης ανάπτυξης και της στρατόμορφης βροχόπτωσης, με την πρώτη να προηγείται της δεύτερης από ½ έως 1 ώρα.

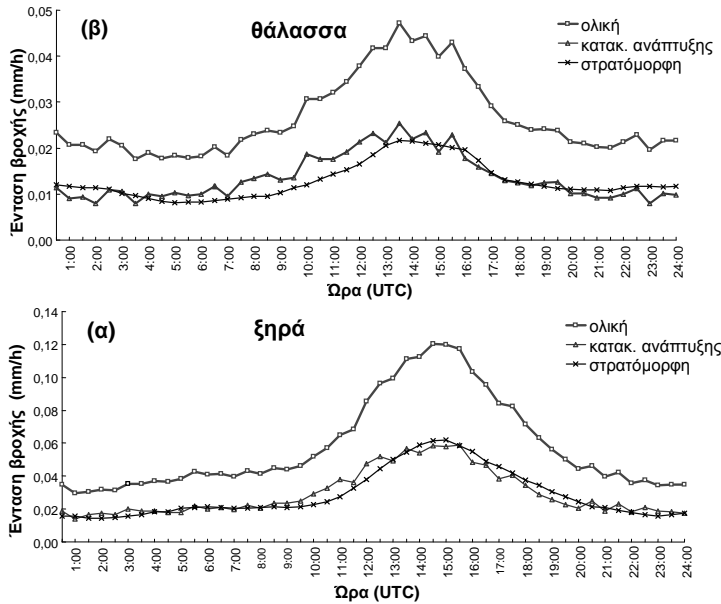


Εικόνα 2. Η μέση τιμή της βροχόπτωσης για την περίοδο Μαΐου – Αυγούστου 2005 με βάση τις εκτιμήσεις της τεχνικής CST/Met-7. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά δυο ώρες.

Για την επαλήθευση των προηγουμένων αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές έντασης βροχής από τους 34 βροχομετρικούς σταθμούς της ΕΜΥ (Εικόνα 1). Η αξιολόγηση του δυναμικού της τεχνικής CST/Met-7 στην αναπαράσταση του ενδοημερήσιου κύκλου βροχής εκτιμάται με τις τρεις παραμέτρους βροχής: μέση ένταση βροχής, ποσοστό της βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης και ποσοστό της έκτασης βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης.



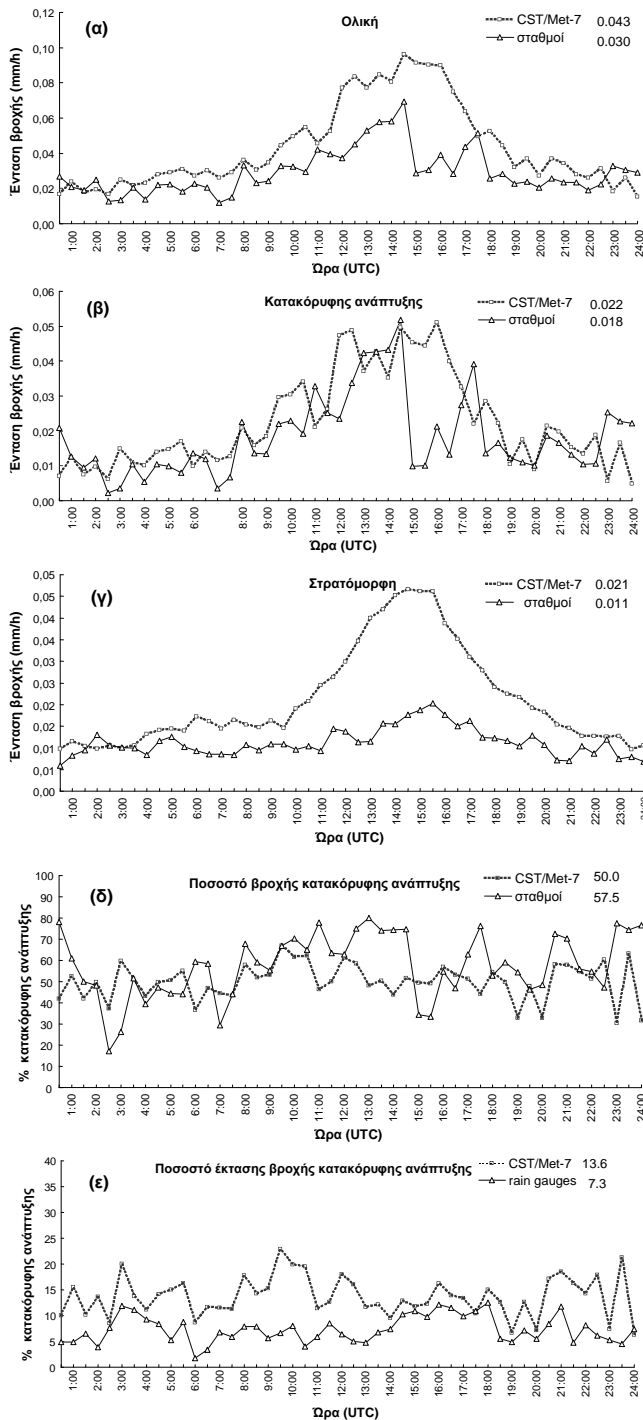
Εικόνα 3. Ενδοημερήσια μεταβολή της βροχόπτωσης, όπως αυτή εκτιμάται από την τεχνική CST/Met-7 για την περιοχή της Ελλάδας, πάνω από τη ξηρά και πάνω από τη θάλασσα, για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005.



Εικόνα 4. Ενδοημερήσια μεταβολή της ολικής, κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης βροχόπτωσης όπως αυτή εκτιμάται από την τεχνική CST/Met-7 για την περιοχή της Ελλάδας, (α) πάνω από τη ξηρά και (β) πάνω από τη θάλασσα, για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005.

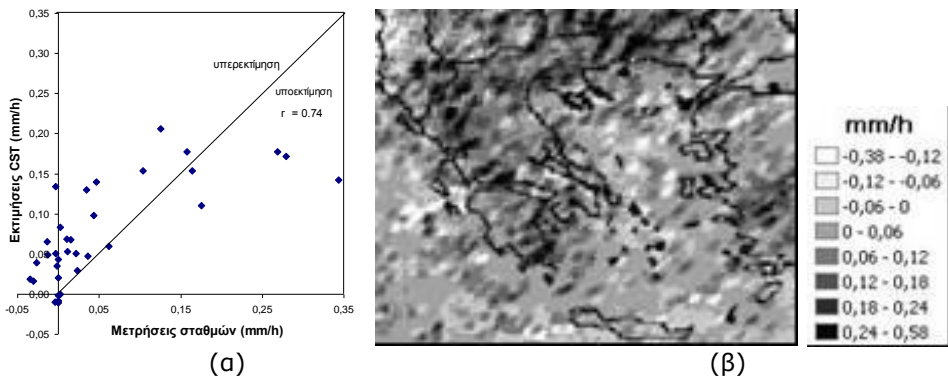
Η Εικόνα 5 παρουσιάζει την ενδοημερήσια μεταβολή των τριών παραμέτρων βροχής με βάση τις εκτιμήσεις του αλγόριθμου CST/Met-7 και τις καταγραφές των επίγειων σταθμών για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005 στην περιοχή της Ελλάδας. Η φάση του κύκλου των δορυφορικών εκτιμήσεων τόσο για την ολική βροχόπτωση όσο και για τους δύο τύπους βροχής (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης) είναι γενικά σύμφωνη με την ανάλυση των επίγειων δεδομένων (Εικόνα 5α,β,γ). Το μέγιστο της βροχόπτωσης εμφανίζεται μεταξύ 14:00 και 16:00 UTC (17:00 και 18:00 τοπική ώρα). Οι δορυφορικές μετρήσεις υπερεκτιμούν τη βροχόπτωση που καταγράφουν τα βροχόμετρα, αλλά το ενδιαφέρον μας εστιάζεται περισσότερο στην σωστή αναπαράσταση της φάσης του κύκλου παρά στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος bias. Στην Εικόνα 6α παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς του εύρους της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχόπτωσης (14:30 – 2:30 UTC) με βάση τις εκτιμήσεις του CST και τις μετρήσεις των σταθμών στην Ελλάδα. Το εύρος του ενδοημερήσιου κύκλου της βροχόπτωσης αναπαρίσταται ικανοποιητικά με σχετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης (0.74). Είναι όμως φανερή η υπερεκτίμηση του εύρους από τη CST με εξαίρεση τις πολύ υψηλές τιμές οι οποίες αντίθετα υποεκτιμώνται. Οι θετικές τιμές του εύρους παρατηρούνται κυρίως στην ηπειρωτική Ελλάδα με μια μικρή τάση αύξησης με το γεωγραφικό πλάτος (Εικόνα 6β). Οι μεγαλύτερες θετικές τιμές εμφανίζονται στις ορεινές περιοχές γεγονός που καταδεικνύει τη συνεισφορά του ορογραφικού παράγοντα στην εμφάνιση του ενδοημερήσιου κύκλου βροχόπτωσης. Αρνητικές τιμές εύρους εμφανίζονται μόνο πάνω από τη θάλασσα.

Ένα ενδιαφέρον εύρημα είναι η πολύ καλή συμφωνία των δορυφορικών εκτιμήσεων της βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης με τις μετρήσεις των βροχομέτρων (Εικόνα 5β). Ο κύκλος που βασίζεται στις μετρήσεις των σταθμών εμφανίζει απότομες μεταβολές λόγω του σχετικά μικρού αριθμού σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν. Εξετάζοντας μόνο της συνιστώσα της στρατόμορφης βροχόπτωσης (Εικόνα 5γ), βρίσκουμε ότι οι δορυφορικές εκτιμήσεις υπερεκτιμούν τη βροχόπτωση που καταγράφουν τα βροχόμετρα, γεγονός το οποίο εξηγεί το μεγαλύτερο ποσοστό της υπερεκτίμησης της ολικής βροχόπτωσης που παρατηρήθηκε στην Εικόνα 5α.



Εικόνα 5. Ενδοημερήσια μεταβολή των τριών παραμέτρων βροχής με βάση τις εκτιμήσεις του αλγόριθμου CST/Met-7 και τις καταγραφές των επίγειων σταθμών για την περίοδο Μαΐου-Αυγούστου 2005 στην περιοχή της Ελλάδας. Η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου αναγράφεται στο άνω δεξιά τμήμα του κάθε γραφήματος. (α) Μέση ένταση βροχής χωρισμένη σε (β) κατακόρυφης ανάπτυξης και (γ) στρατόμορφη συνιστώσα. (δ) Ποσοστό της βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης. (ε) Ποσοστό της έκτασης βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης.

Καλή συμφωνία βρίσκουμε επίσης στην ενδοημερήσια μεταβολή των δυο παραμέτρων που σχετίζονται με τη βροχόπτωση κατακόρυφης ανάπτυξης (ποσοστό της βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης και ποσοστό της έκτασης βροχόπτωσης κατακόρυφης ανάπτυξης) (Εικόνα 5δ,ε), γεγονός που υποστηρίζει το προηγούμενο εύρημα ότι η τεχνική CST/Met-7 αναπαράγει αποτελεσματικά τη βροχόπτωση κατακόρυφης ανάπτυξης. Οι δορυφορικές εκτιμήσεις φανερώνουν ότι μόνο το 14% της έκτασης βροχής συνδέεται με βροχόπτωση κατακόρυφης ανάπτυξης ενώ το 50% του όγκου βροχής αποτελεί βροχόπτωση αυτού του τύπου. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τα επίγεια δεδομένα είναι 7 και 57%, αντίστοιχα. Η σύγκριση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν και η τεχνική CST/Met-7 υπερεκτιμά ελαφρώς την έκταση βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης, διαχωρίζει όμως αποτελεσματικά τους δυο τύπους βροχόπτωσης (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης). Η διπλάσια τιμή της έκτασης βροχόπτωσης κατακόρυφης ανάπτυξης (7% έναντι 14%), αν και μπορεί να δικαιολογηθεί από τις μικρές τιμές της παραμέτρου, υποδεικνύει ότι είτε η τεχνική CST/Met-7 υπολογίζει μεγαλύτερο αριθμό κέντρων κατακόρυφης ανάπτυξης ή ότι η διαδικασία βαθμονόμησης της τεχνικής αυτής υπερεκτίμησε τη μέση τιμή της έκτασης βροχόπτωσης τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης που αποδίδεται σε κάθε κέντρο ανοδικών κινήσεων.



Εικόνα 6. (α) Διάγραμμα διασποράς του εύρους της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχόπτωσης (14:30 – 2:30 UTC) με βάση τις εκτιμήσεις της CST/Met-7 και τις μετρήσεις των σταθμών στην Ελλάδα. (β) Η χωρική κατανομή του εύρους στην Ελλάδα.

#### 4. Συμπεράσματα

Βρέθηκε ότι τεχνικές εξαγωγής βροχόπτωσης από τα υψηλής χρονικής ανάλυσης υπέρυθρα δεδομένα γεωστάσιμων δορυφόρων, όπως η CST, παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό για τη μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβολής της βροχόπτωσης στην Ελλάδα κατά τη θερμή περίοδο του έτους, όταν αυτές έχουν βαθμονομηθεί στα ιδιαίτερα γεωκλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου CST/Met-7 στην Ελλάδα για την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου 2005 έδειξαν ότι η ενδοημερήσια μεταβολή της βροχόπτωσης παρουσιάζει ένα διακριτό κύκλο πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές με ένα σαφές μέγιστο βροχόπτωσης που εμφανίζεται μεταξύ 14:00 και 15:00 UTC (17:00 και 18:00 τοπική ώρα), το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη θέρμανση του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία προκαλεί θερμοδυναμική ατμοσφαιρική αστάθεια και ισχυρά ανοδικά ρεύματα. Για τον ίδιο λόγο οι θετικές τιμές του εύρους του ενδοημερήσιου κύκλου βροχής παρατηρούνται κυρίως στην ηπειρωτική Ελλάδα με μια μικρή τάση αύξησης με το γεωγραφικό πλάτος. Η βροχόπτωση τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης αποτελεί κατά μέσο όρο το 51% του ολικού όγκου βροχής ενώ η εμφάνισή της προηγείται της στρατόμορφης βροχόπτωσης κατά ½ έως 1 ώρα.

Η σύγκριση των δορυφορικών εκτιμήσεων με επίγεια δεδομένα βροχόπτωσης από δίκτυο 34 βροχομετρικών σταθμών στην Ελλάδα έδειξε ότι η φάση του ενδοημερήσιου κύκλου των



δορυφορικών εκτιμήσεων τόσο για την ολική βροχόπτωση όσο και για τους δυο τύπους βροχόπτωσης (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης) είναι γενικά σύμφωνη με αυτή των επίγειων δεδομένων. Η τεχνική CST/Met-7 αναπαριστά αποτελεσματικά τη συνιστώσα της βροχόπτωσης που είναι τύπου κατακόρυφης ανάπτυξης. Εξετάζοντας μόνο της συνιστώσα της στρατόμορφης βροχόπτωσης, βρίσκουμε ότι οι δορυφορικές εκτιμήσεις υπερεκτιμούν τη βροχόπτωση που καταγράφουν τα βροχόμετρα. Η βαθμονομημένη τεχνική CST επίσης υπερεκτιμά ελαφρώς την έκταση βροχής κατακόρυφης ανάπτυξης, διαχωρίζει όμως αποτελεσματικά τους δυο τύπους βροχόπτωσης (κατακόρυφης ανάπτυξης και στρατόμορφης).

## Βιβλιογραφία

Adler R.F., Negri A.J., 1988: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27 (1), 30-51.

Atlas D., Ulbrich C.W., Marks Jr. F.D., 2002: Reply to comment by S.E. Yuter and R.A. Houze Jr. on "Partitioning tropical oceanic convective and stratiform rains by draft strength" by D. Atlas et al. *J Geophys Res*, 107(D1), 4006

Feidas H., Kokolatos G., Negri A., Manyin M., Chrysoulakis N., 2006: A TRMM-Calibrated infrared technique for rainfall estimation: Application on rain events over eastern Mediterranean. *Advances in Geosciences*, 7: 181-188.

Negri A.J., Adler R.F., Xu. L., 2002: A TRMM calibrated rainfall algorithm applied over Brazil. *J. Geophys. Res.*, 107, 8048-8062.

Nzeukou A., Sauvageot H., Ochou A.D., Kebe M.F., 2002. Raindrop size distribution and radar parameters at Cape Verde. *J Appl Meteorol*, 42, 1031-1034.

Schumacher C., Houze Jr R.A., 2003: Stratiform Rain in the Tropics as Seen by the TRMM Precipitation Radar. *J. Climate*, 16, 1739-1756.

Tenório R.S., Kwon B-H., 2006: Z-R relationship and a severe rainfall observed by C-band radar in eastern coast of northeastern Brazil. In Proceedings of 4th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, ERAD, Barcelona, 18-22 September 2006.

Φείδας Χ, Κοκολάτος Γ., Negri A.J., Manyin M., Χρυσουλάκης Ν., 2006: Βαθμονόμηση και εφαρμογή μιας υπέρυθρης δορυφορικής τεχνικής εκτίμησης της βροχόπτωσης για την περιοχή της Μεσογείου. Πρακτικά του 8ου Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Αθήνα , 25-27 Μαΐου 2006, (In press).