

# ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BOLAM2000<sup>1</sup>

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΦΕΪΔΑΣ<sup>2</sup>, ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ ΚΟΝΤΟΣ<sup>2</sup>, ΣΟΥΛΑΚΕΛΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ<sup>2</sup>, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΑΓΟΥΒΑΡΔΟΣ<sup>3</sup>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης των λειτουργιών των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αυτοματοποιημένου συστήματος αξιολόγησης των προγνωστικών πεδίων βροχόπτωσης του αριθμητικού μοντέλου BOLAM2000 για την Ελλάδα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της βροχόπτωσης που προέρχεται από την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων Meteosat με τα αποτελέσματα του προγνωστικού μοντέλου BOLAM2000, με τη χρήση ενός αυτοματοποιημένου Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μια περίπτωση εντόνων βροχοπτώσεων στην Ελλάδα και τα αποτελέσματα αξιολογούνται.

## ABSTRACT

In this study, the possibility of implementing Geographic Information Systems (GIS) for developing an integrated and automated operational system for the evaluation of the precipitation forecasts of the numerical model BOLAM2000 in Greece, is examined. In fact, the precipitation estimations derived by the satellite Meteosat images processing are comparatively evaluated with the results of the numerical model BOLAM2000 for the short time prediction of precipitation through the use of a GIS tool. The developed tool is applied in a case of heavy precipitation event and the results are assessed.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Μετεωρολογικά Προγνωστικά Μοντέλα, Βροχόπτωση, Δορυφορικές Εικόνες Meteosat

**KEYWORDS:** Geographic Information Systems, Meteorological Prediction Models, Precipitation, Meteosat Satellite Images

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη επαναληψιμότητα (30 min) των εικόνων Meteosat επιτρέπει την παρακολούθηση των νεφικών συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Στην εργασία των Φείδα κ.α. (2000) χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από γεωστάσιμους δορυφόρους, όπως ο Meteosat, για την αξιολόγηση και την επαλήθευση, σε πραγματικό χρόνο, του πεδίου της βροχόπτωσης που υπολογίζεται από ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού. Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε μέσω της συσχέτισης της ανάπτυξης και εμμονής των νεφικών πυρήνων που εντοπίζονται σε μια περιοχή στις δορυφορικές εικόνες, όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή του αλγόριθμου των Feidas and Cartalis (2001), με την πρόγνωση μεγίστων βροχόπτωσης για την ίδια περιοχή από το αριθμητικό μοντέλο BOLAM2000. Η προηγούμενη διαδικασία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου μειονεκτούσε στο γεγονός ότι δεν ήταν αυτοματοποιημένη και δε βασιζόταν σε απευθείας ποσοτική σύγκριση των τιμών βροχόπτωσης των προγνώσεων του μοντέλου με τιμές βροχόπτωσης που εξήχθησαν από τις δορυφορικές εικόνες. Οι Griffith et al. (1981) ανέπτυξαν μια μέθοδο εκτίμησης της βροχόπτωσης στην περιοχή της Φλόριντας των ΗΠΑ, από το υπέρυθρο κανάλι (IR) των εικόνων γεωστάσιμων δορυφόρων, γνωστή ως GWT μέθοδος, η οποία απλοποιήθηκε από τους Negri et al. (1984), γνωστή ως μέθοδος NAWT. Οι Marrocu et al. (1993) και ο Φείδας (2002) εφάρμοσαν την μέθοδο αυτή για την γεωγραφική περιοχή της Σαρδηνίας και της Ελλάδας αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας εικόνες Meteosat, και βελτιστοποίησαν τη μέθοδο για τη γεωγραφική περιοχή εφαρμογής της.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αυτοματοποιημένου Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) για την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση και επαλήθευση, σε πραγματικό χρόνο, των προβλέψεων του αριθμητικού μοντέλου BOLAM2000 που αφορούν στη βροχόπτωση. Το σύστημα

1: DEVELOPMENT OF A GIS FOR THE EVALUATION OF THE METEOROLOGICAL MODEL BOLAM2000 PRECIPITATION FORECASTS

2: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαρ. Τρικούπη & Φάωνος, 81100, Μυτιλήνη

3: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Λόφος Νυμφών, Θησείο, 11810, Αθήνα.

εφαρμόζεται ενδεικτικά για την περίοδο 7-8/11/99, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες στη Ν. Ελλάδα.

## 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι προγνώσεις για το αθροιστικό ύψος βροχής (σε 3ωρη βάση) όπως αυτό προγνώστηκε από το μοντέλο BOLAM2000, σε συνδυασμό με τις εικόνες από το κανάλι IR του Meteosat, με ωριαία συχνότητα, κατά την περίοδο της 7<sup>ης</sup> και 8<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1999. Παράλληλα, για λόγους επαλήθευσης, χρησιμοποιήθηκαν 12ωρα αθροιστικά ύψη βροχής, για την ίδια περίοδο, καθώς και συνοπτικοί χάρτες για την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

## 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ BOLAM2000

Το μετεωρολογικό μοντέλο BOLAM99 αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Ατμοσφαιρικών και Ωκεανογραφικών Μελετών της Ιταλίας (Institute of Atmospheric and Oceanic Studies- CNR-Bologna). Το μοντέλο είναι υδροστατικό, τα δε κύρια χαρακτηριστικά της δυναμικής και της φυσικής του μοντέλου περιγράφονται από τους Buzzi et al. (1997; 1998). Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται από τον Σεπτέμβριο 1999 σε επιχειρησιακή βάση στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) για πρόγνωση καιρού 72ωρης διάρκειας σε δυο πλέγματα. Το εξωτερικό πλέγμα καλύπτει την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και έχει οριζόντια ανάλυση περίπου 21km x 21km. Το εσωτερικό πλέγμα καλύπτει την περιοχή της Ελλάδας και έχει οριζόντια ανάλυση πλέγματος 6 km x 6 km. Ως αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου χρησιμοποιούνται η ανάλυση και τα προγνωστικά πεδία (ανά έξι ώρες) από το ECWFM. Επίσης χρησιμοποιείται τοπογραφία και κατανομή ξηράς-θάλασσας ανάλυσης 30 arcsec καθώς και θερμοκρασία επιφάνειας της θάλασσας που αναπροσαρμόζεται κάθε μήνα.

### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ METEOSAT

Η μέθοδος υπολογισμού της βροχόπτωσης από τις δορυφορικές εικόνες βασίζεται στην μέθοδο NAWT των Negri et al. (1984), η οποία αποτελεί μια απλοποιημένη έκδοση της μεθόδου GWT των Griffith and Woodley (1981). Η μέθοδος αυτή βελτιστοποιήθηκε για την εφαρμογή της στην περιοχή της Ελλάδας με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Meteosat, από τον Φείδα (2002) και βασίζεται στην ανάλυση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης των νεφών στο κανάλι του υπέρυθρου που περικλείονται από την ισόθερμη των 253°K. Ακολούθως,

- (α) Μια θερμοκρασία  $T_{10\%}$  αποδίδεται στο ψυχρότερο 10% της έκτασης A του νέφους, η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του εικονοστοιχείου με την μικρότερη θερμοκρασία λαμπρότητας για την περιοχή αυτή. Ομοίως, μια θερμοκρασία  $T_{50\%}$  αποδίδεται στο ψυχρότερο 50% της έκτασης A του νέφους.
- (β) Στον αντίστοιχο χάρτη με τις θερμοκρασίες λαμπρότητας, το ολικό ύψος βροχόπτωσης R του νέφους θεωρείται ανάλογο της έκτασης του A, δηλ.  $R = k A$ .
- (γ) Το ύψος της βροχόπτωσης  $D_i$  που αντιστοιχεί σε κάθε εικονοστοιχείο  $i$  υπολογίζεται με βάση τη θερμοκρασία λαμπρότητας του  $T_i$  σε διαδοχικές ωριαίες εικόνες ως εξής:

αν	$T_i < T_{10\%}$	τότε	$D_i = 5.0 \text{ mm/ώρα}$
αν	$T_{10\%} < T_i < T_{50\%}$	τότε	$D_i = 1.3 \text{ mm/ώρα}$
αν	$T_i > T_{50\%}$	τότε	$D_i = 0.0 \text{ mm/ώρα}$

Η μέθοδος αυτή δίνει σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην εκτίμηση της γεωγραφικής κατανομής της βροχόπτωσης στην Ελλάδα, κάτι το οποίο ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία, αλλά η εφαρμογή της έχει περιορισμούς στην εκτίμηση της σημειακής βροχόπτωσης.

### 3.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ Σ.Γ.Π. ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η αξιολόγηση των προγνώσεων βροχόπτωσης ενός μετεωρολογικού μοντέλου σε πραγματικό χρόνο βοηθάει σημαντικά στην εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των μεγίστων βροχόπτωσης που προβλέπονται για το διάστημα που ακολουθεί. Ιδανική περίπτωση θα αποτελούσε η δυνατότητα σύγκρισης των προγνώσεων με τις μετρούμενες από επίγειους σταθμούς τιμές βροχόπτωσης. Τα δεδομένα αυτά όμως δεν είναι άμεσα

διαθέσιμα τουλάχιστον πριν τις 24 πρώτες ώρες πρόγνωσης του μοντέλου. Την αδυναμία αυτή θα μπορούσε να καλύψει η εκτίμηση της βροχόπτωσης από τις δορυφορικές εικόνες Meteosat, η υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα των οποίων (ανά 30΄) σε συνδυασμό με την άμεση διαθεσιμότητά τους επιτρέπει την άμεση επεξεργασία τους στον χρονικό ορίζοντα που απαιτείται για τον προηγούμενο σκοπό.

Η χωρική αποτύπωση και η ποιοτική αλλά και ποσοτική σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με τα δεδομένα του μοντέλου απαιτεί διαδικασίες, η αυτοματοποίηση των οποίων μπορεί να επιτευχθεί στα πλαίσια ενός Σ.Γ.Π. Η δομή ενός τέτοιου είδους πλήρως αυτοματοποιημένου Σ.Γ.Π., που αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στη γλώσσα προγραμματισμού Avenue του Arcview, περιλαμβάνει τις ακόλουθες επιμέρους διαδικασίες (Σχήμα 1):

#### 1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

α. Υπολογισμός βροχόπτωσης από δορυφορικές εικόνες. Με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε προηγουμένως, γίνεται εκτίμηση της βροχόπτωσης σε 3ωρη βάση για την περιοχή της Ελλάδας από δορυφορικές εικόνες Meteosat. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με τις συντεταγμένες x-y των εικονοστοιχείων της εικόνας σε αρχεία ASCII.

β. Εισαγωγή των δεδομένων από τα αρχεία ASCII στο Σ.Γ.Π. και δημιουργία αρχείων τύπου καννάβου (raster-arcinfo grid format) για κάθε τρίωρο.

γ. Γεωμετρική διόρθωση των εικόνων τύπου καννάβου στις συντεταγμένες του πλέγματος του μοντέλου (decimal degrees). Εφόσον ο δορυφόρος Meteosat είναι γεωστάσιμος, η γεωμετρική διόρθωση βασίζεται στην εφαρμογή της εξίσωσης αλλαγής συντεταγμένων της δορυφορικής εικόνας σε συντεταγμένες γ. μήκος - γ. πλάτος, η οποία βρέθηκε κατά την προεργασία ανάπτυξης του συστήματος.

δ. Δημιουργία αρχείων τύπου καννάβου με δεδομένα βροχόπτωσης σε 6ωρα και 12ωρα χρονικά διαστήματα με βάση τα αρχεία με δεδομένα βροχόπτωσης 3ώρου.

ε. Στατιστική ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης σε 3ωρα, 6ωρα και 12ωρα χρονικά διαστήματα. Συγκεκριμένα υπολογίζονται για κάθε εικόνα η συνολική βροχόπτωση στην περιοχή, η μέση τιμή της βροχόπτωσης (επιφανειακή ολοκλήρωση), η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή.

#### 2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΓΝΩΣΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BOLAM2000

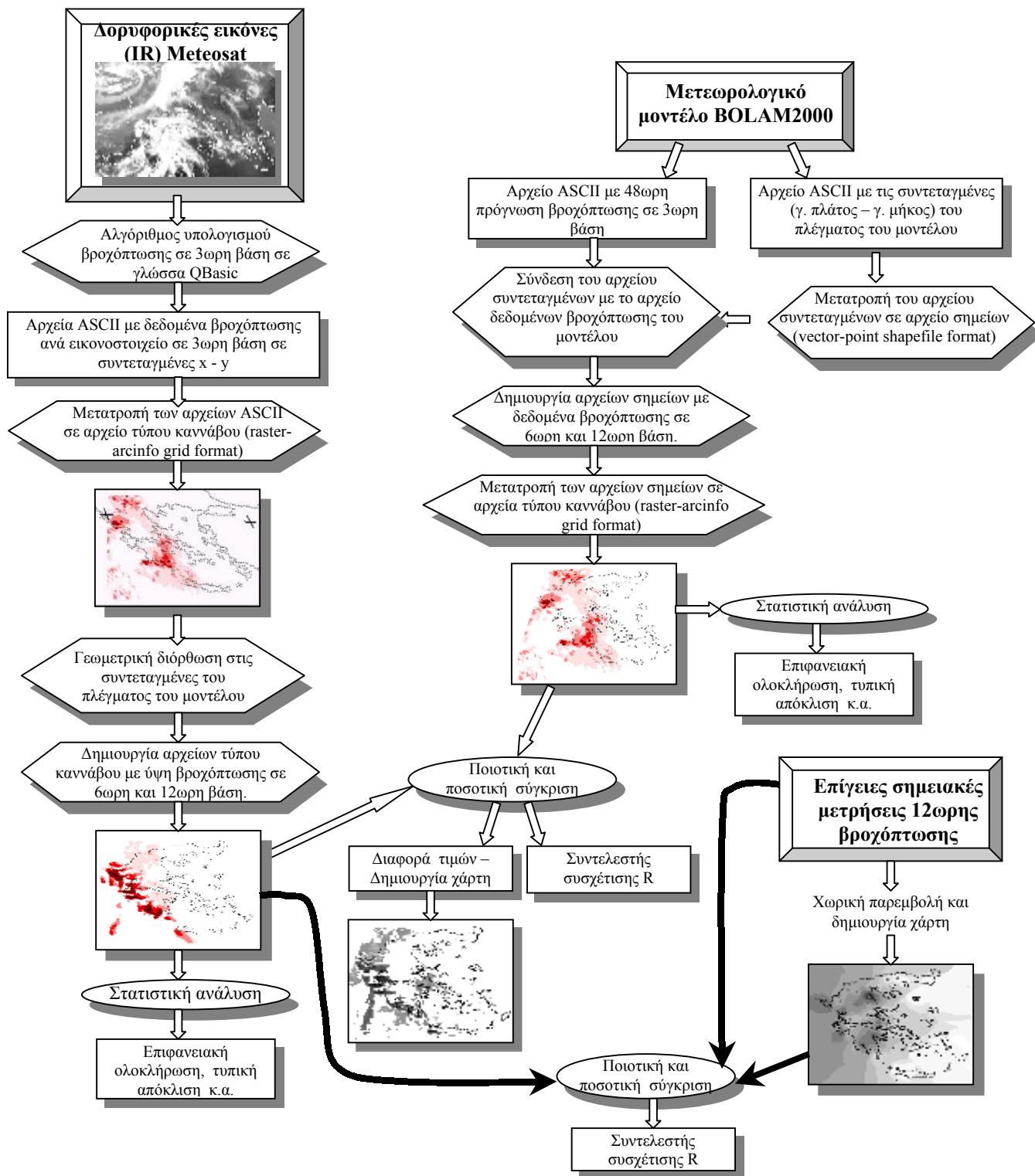
α. Σύνδεση του αρχείου συντεταγμένων με το αρχείο δεδομένων βροχόπτωσης του μοντέλου. Πραγματοποιείται η σύνδεση των δυο αρχείων ASCII που παράγει το μοντέλο, του αρχείου με τις συντεταγμένες του πλέγματος του σε γ. μήκος - γ. πλάτος και του αρχείου με τις προγνώσεις βροχόπτωσης του μοντέλου στα σημεία του πλέγματος ανά 3ωρο που αρχίζουν στις 6:00 UTC.

γ. Στατιστική ανάλυση των προγνώσεων βροχόπτωσης για κάθε επιλεγόμενο χρονικό διάστημα με τρόπο ανάλογο με αυτόν των δορυφορικών δεδομένων.

β. Δημιουργία αρχείων σημείων με προγνώσεις βροχόπτωσης σε 6ωρα και 12ωρα χρονικά διαστήματα με βάση τα αρχεία με προγνώσεις βροχόπτωσης 3ώρου.

#### 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Χωρική παρεμβολή και δημιουργία χάρτη χωρικής κατανομής. Αν και οι επίγειες σημειακές μετρήσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο δίδεται η δυνατότητα σύγκρισης τους τόσο με τις προγνώσεις του μοντέλου όσο και με τις εκτιμήσεις των δορυφορικών εικόνων, που φυσικά θα πραγματοποιείται σε χρόνο που ακολουθεί το υπό παρακολούθηση φαινόμενο. Η χωρική παρεμβολή γίνεται με τη μέθοδο weighted inverse distance.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής του ολοκληρωμένου Σ.Γ.Π.  
Figure 1. Flowchart of the integrated G.I.S.

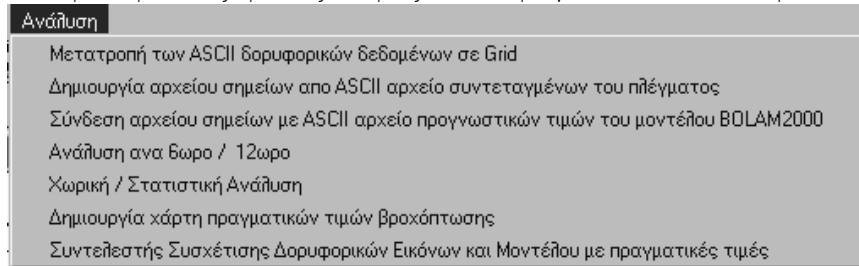
#### 4. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

α. Με την παράλληλη αποτύπωση της χωρικής κατανομής των δεδομένων βροχόπτωσης που προέρχονται από τις προγνώσεις του μοντέλου, από τις δορυφορικές εικόνες αλλά και από τις επίγειες μετρήσεις, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης, σε πραγματικό χρόνο, των προγνώσεων του μοντέλου με τις εκτιμήσεις από τις δορυφορικές εικόνες, αλλά και των δυο αυτών με τις επίγειες καταγραφές σε μη πραγματικό χρόνο.

β. Δημιουργία χάρτη με τη διαφορά των τιμών βροχοπτώσης του μοντέλου από τις αντίστοιχες τιμές που προέρχονται από τα δορυφορικά δεδομένα σε 3ωρη, 6ωρη, και 12ωρη βάση. Με τους χάρτες αυτούς δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της απόκλισης των προγνώσεων του μοντέλου από τα δορυφορικά δεδομένα. Η αξιολόγηση των προγνώσεων βροχοπτώσης σε πραγματικό χρόνο βοηθάει σημαντικά στην εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης των μεγίστων βροχοπτώσεων που προβλέπονται για το διάστημα που ακολουθεί.

γ. Υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης R μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων των εικόνων τύπου καννάβου των προγνώσεων του μοντέλου και των τιμών των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των εικόνων των δορυφορικών δεδομένων.

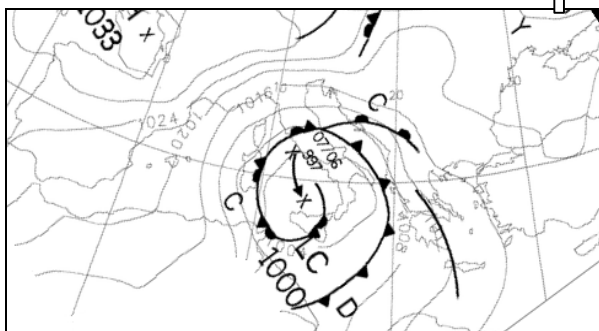
δ. Υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης R μεταξύ των τιμών των επίγειων σταθμών με τις μέσες τιμές των προγνώσεων του μοντέλου και των εκτιμήσεων των



δορυφορικών εικόνων που βρίσκονται σε ένα τετράγωνο διαστάσεων 20x20 km με κέντρο τη θέση του σταθμού. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το βασικό μενού της εφαρμογής που εμφανίζεται στη γραμμή εργαλείων της εφαρμογής.

Σχήμα 2. Το βασικό μενού της εφαρμογής.  
Figure 2. The basic menu of the application

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ 7<sup>ΗΣ</sup> ΚΑΙ 8<sup>ΗΣ</sup> ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 1999



Σχήμα 2. Χάρτης επιφάνειας στις 18:00 UTC της 7ης Νοεμβρίου 1999.  
Figure 2. Mean sea level pressure map at 18:00 UTC on 7<sup>th</sup> November 1999.

Στις 18:00 UTC της 7<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1999 μία μετωπική ύφεση με κέντρο 997 hPa συσφίγγεται κινούμενη αργά νοτιοανατολικά (Σχήμα 2). Ταυτόχρονα, το ψυχρό μέτωπο που τη συνοδεύει προκάλεσε τις ισχυρές βροχοπτώσεις στη Κέρκυρα και τη Ζάκυνθο. Παράλληλα, η δυναμική ασυνέχεια που παρατηρείται ανατολικά της Πελοποννήσου αποτέλεσε την αιτία για την εκδήλωση των ισχυρών βροχοπτώσεων στην περιοχή αυτή.

##### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση της βροχοπτώσης από το μοντέλο BOLAM2000 ξεκίνησε στις 9:00 UTC της 7ης Νοεμβρίου 1999 και ήταν διάρκειας 48 ωρών. Η λήψη και η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων δεν διαρκεί πάνω από μια ώρα. Κατά συνέπεια οι εκτιμήσεις βροχοπτώσης από τις δορυφορικές εικόνες για το πρώτο τρίωρο (6:00–9:00 UTC) θα είναι διαθέσιμες το αργότερο μέχρι στις 10:00 UTC και για το πρώτο εξάωρο (6:00–12:00 UTC) θα είναι διαθέσιμες μέχρι στις 13:00 UTC. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αξιολόγηση των πρώτων αποτελεσμάτων του μοντέλου να μπορεί να γίνει λίγα λεπτά είτε μετά τις 10:00 UTC (για τρίωρη πρόγνωση) είτε μετά τις 13:00 UTC για εξάωρη πρόγνωση. Η δεύτερη περίπτωση είναι πιο ασφαλής καθώς οι εκτιμήσεις της βροχοπτώσης από τις εικόνες Meteosat δίνουν καλύτερα αποτελέσματα όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρονται.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κατανομή της εξάωρης αθροιστικής βροχοπτώσης που παρήχθη από το μοντέλο BOLAM2000 και από τις δορυφορικές εικόνες, όπως αυτές παρουσιάζονται από το αναπτυχθέν Σ.Γ.Π. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και ο χάρτης με

τη διαφορά των δυο εκτιμήσεων. Στην πρόγνωση του μοντέλου διακρίνεται ένα μέγιστο βροχόπτωσης (1), το οποίο εκτείνεται σε όλο το Ιόνιο Πέλαγος. Συγκρίνοντας τη πρόγνωση αυτή με την εκτίμηση από τις δορυφορικές εικόνες για το ίδιο διάστημα, διακρίνεται ότι το μέγιστο βροχόπτωσης (1) επαληθεύεται από τις δορυφορικές εικόνες ως προς το βόρειο άκρο του στην περιοχή της Κέρκυρας (σημείο Α), ενισχύοντας έτσι αρκετά την πιθανότητα εμφάνισης μέγιστου βροχόπτωσης τις προσεχείς ώρες, γεγονός που συσχετίζεται θετικά με το μέγιστο βροχόπτωσης (3), του εξαώρου 12:00 - 18:00 UTC (Σχήμα 4) και του μέγιστου (5) στα επόμενα δυο εξάωρα (δεν παρουσιάζονται) κυρίως στην περιοχή του βόρειου Ιονίου πελάγους. Ας σημειωθεί ότι και το μέγιστο βροχόπτωσης (2) στην περιοχή της Καλαμάτας επαληθεύεται από το μέγιστο βροχόπτωσης Β των δορυφορικών εικόνων (Σχήμα 3), προσδίδοντας ακόμη μεγαλύτερη βαρύτητα στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τις επόμενες ώρες. Στο χάρτη του Σχήματος 3 με τη διαφορά των δορυφορικών δεδομένων από τις προγνώσεις του μοντέλου διακρίνονται περιοχές για τις οποίες η πρόγνωση βροχόπτωσης δεν επαληθεύτηκε από τα δορυφορικά δεδομένα (π.χ. νότιο Ιόνιο, Αττική) και περιοχές όπου η βροχόπτωση εμφανίστηκε μετατοπισμένη χρονικά (π.χ. Κέρκυρα). Η στατιστική ανάλυση για κάθε βωρο δίνει επίσης τη δυνατότητα εκτίμησης της πρόγνωσης συνολικά για την περιοχή και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την ποσοτική εκτίμηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε συνεχή βάση. Έτσι για παράδειγμα, για το πρώτο εξάωρο φαίνεται ότι η βροχόπτωση του μοντέλου είναι συνολικά μικρότερη από αυτή των δορυφορικών δεδομένων αλλά κατανέμεται σε μικρότερης έκτασης περιοχές, με αποτέλεσμα η πρόγνωση να δίνει μεγαλύτερα μέγιστα (Σχήμα 5). Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι τα δορυφορικά δεδομένα δίνουν μια εκτίμηση της βροχόπτωσης και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν πραγματικές μετρήσεις. Δίνουν όμως μια σαφή εκτίμηση της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης και σε αυτή τη βάση θα πρέπει να γίνεται η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

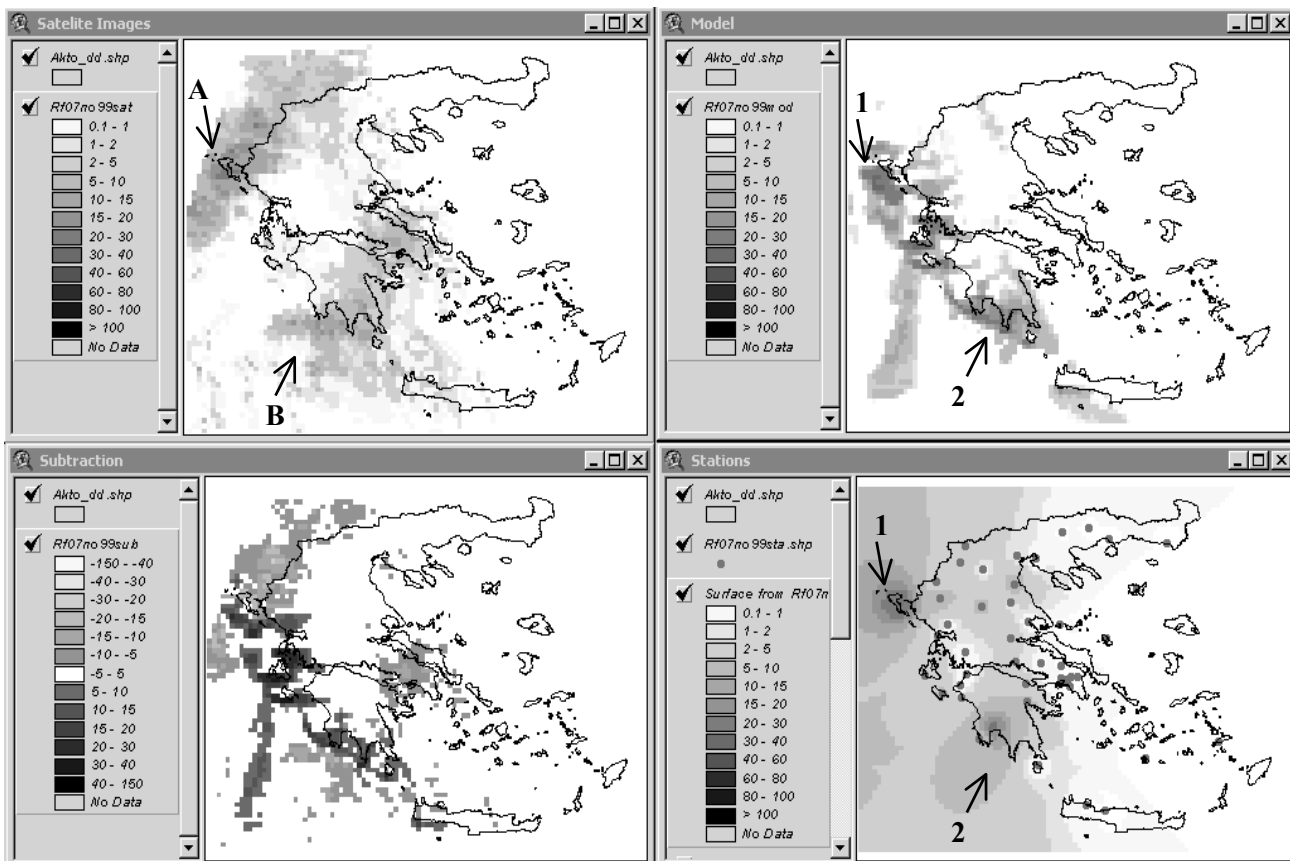
Οι εκτιμήσεις που προέρχονται από τις δορυφορικές εικόνες συνδέονται άμεσα με τα μέγιστα της βροχόπτωσης που καταγράφηκαν, όπως για παράδειγμα τα μέγιστα (1) και (2) που καταγράφηκαν στην Κέρκυρα και στην Καλαμάτα συσχετίζονται με τα μέγιστα βροχόπτωσης Α και Β (Σχήμα 3). Ας σημειωθεί ότι η αντιστοίχιση αυτή δεν επαληθεύεται σε όλες τις περιοχές καθώς η ακρίβεια της αποτύπωσης της κατανομής της βροχόπτωσης από το δίκτυο των σταθμών εδάφους εξαρτάται άμεσα από την πυκνοτήτά τους, κυρίως στις ορεινές περιοχές. Αυτό φαίνεται και στο συντελεστή συσχέτισης της βροχόπτωσης του μοντέλου με την πραγματική ο οποίος δεν είναι υψηλός (0.56) για το πρώτο εξάωρο της πρόγνωσης (Σχήμα 5).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του μέγιστου βροχόπτωσης (4) που εμφανίζεται στην πρόγνωση για την ανατολική Πελοπόννησο, στο βωρο από 12:00 έως 18:00 UTC της 7<sup>ης</sup> Νοεμβρίου (Σχήμα 4) και ο οποίος συσχετίζεται θετικά με το μέγιστο της βροχόπτωσης των δορυφορικών εικόνων (σημείο Γ) δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να δώσουμε ιδιαίτερο βάρος στο μέγιστο της βροχόπτωσης που εμφανίζεται στην πρόγνωση του επόμενου βωρου (δεν παρουσιάζεται). Το μέγιστο αυτό προκάλεσε τις ισχυρές βροχοπτώσεις στο Άργος και στη Μάνδρα Αττικής. Τα προηγούμενα αποτελέσματα ταυτίζονται με αυτά της εργασίας των Φείδα κ.α. (2000).

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

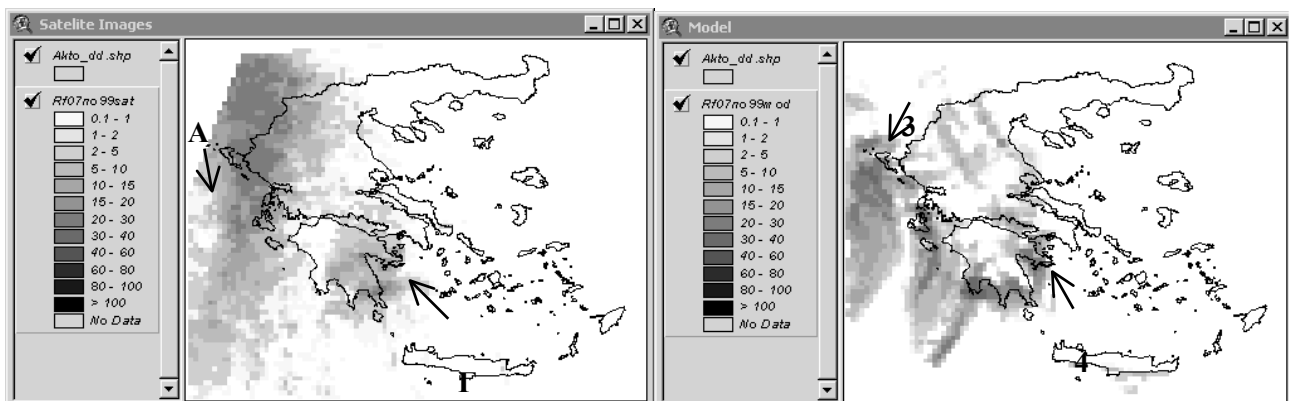
Στην παρούσα εργασία διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή του ολοκληρωμένου και αυτοματοποιημένου Σ.Γ.Π. που αναπτύχθηκε, βοηθά στην ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση και επαλήθευση, σε πραγματικό χρόνο, των προγνώσεων βροχόπτωσης του αριθμητικού μοντέλου BOLAM2000, με βάση δορυφορικά δεδομένα. Η χωρική αποτύπωση και η ποιοτική αλλά και ποσοτική σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με τα δεδομένα του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί στα πλαίσια ενός Σ.Γ.Π. Εκτός αυτού όμως, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον ποιοτικό και ποσοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων του μοντέλου με βάση τις επίγειες μετρήσεις βροχόπτωσης. Ας σημειωθεί ότι το αναπτυχθέν σύστημα αποτελεί εξολοκλήρου πρωτότυπη προσπάθεια τουλάχιστον για τον Ελληνικό χώρο.

Τέλος, τα αποτελέσματα της εφαρμογής που παρουσιάστηκαν με συνοπτικό τρόπο, ανέδειξαν τη δυνατότητα εφαρμογής του Σ.Γ.Π, σε επιχειρησιακή βάση, για την παρακολούθηση και τη μικρής διάρκειας πρόβλεψη της βροχόπτωσης στην Ελλάδα.



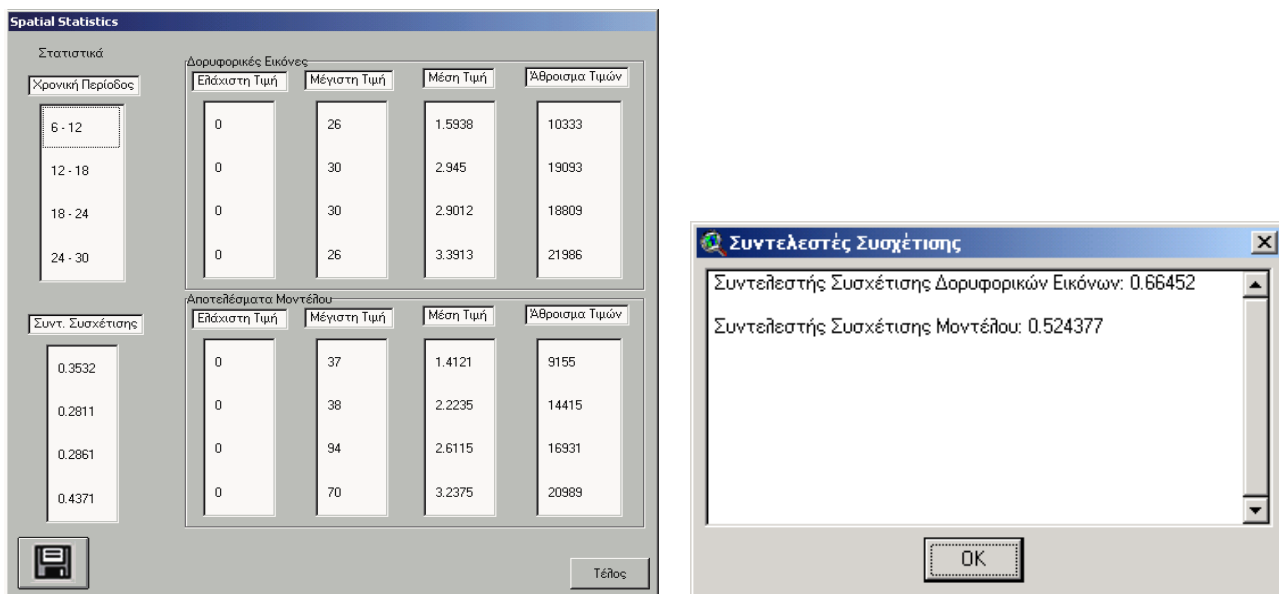
Σχήμα 3. Η οθόνη της εφαρμογής του Σ.Γ.Π. Πάνω: Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης από δορυφορικές εικόνες (αριστερά) και από το μοντέλο BOLAM2000 (δεξιά) για το δωρο 6:00-12:00 UTC της 7/11/99. Κάτω αριστερά η διαφορά των δυο προηγούμενων και δεξιά η χωρική παρεμβολή των πραγματικών τιμών βροχόπτωσης από επίγειους σταθμούς για το 12ωρο 6:00-18:00 UTC.

Figure 3. The screen of the G.I.S. application. Top: The spatial distribution of the precipitation derived by satellite data (left) and model prediction (right) for the 6hour period 6:00-12:00 UTC on 7/11/99. Bottom: The difference of the previous images (left) and the spatial interpolation of the ground truth data (right) for the 12hour period 6:00-18:00 UTC.



Σχήμα 4. Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης από δορυφορικές εικόνες (αριστερά) και από το μοντέλο BOLAM2000 (δεξιά) για το δωρο 12:00-18:00 UTC της 7/11/99.

Figure 4. The spatial distribution of the rainfall from the satellite data (left) and model forecast (right) for the period 12:00-18:00 UTC on 7/11/99.



Σχήμα 5. Αριστερά: Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των προγνώσεων του μοντέλου και των αντίστοιχων εκτιμήσεων από τα δορυφορικά δεδομένα σε 6ωρη βάση. Δεξιά: Ο συντελεστής συσχέτισης των προγνώσεων του μοντέλου και των αντίστοιχων εκτιμήσεων από τα δορυφορικά δεδομένα με τα πραγματικά δεδομένα για το 1<sup>ο</sup> 6ωρο. Figure 5. Left: The results of the statistic analysis of the model forecasts and the corresponding estimations from satellite data in 6hour intervals. Right: The correlation coefficient of the model forecasts and the corresponding estimations from satellite data with ground truth data for the first 6hour period.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]Buzzi, A., Cadelli, R., Malguzzi, P., 1997: Low level jet simulation over the Antarctic ocean. *Tellus*, **49 A**, 263-276.
- [2]Buzzi A., Tartaglione, N., Malguzzi, P., 1998: Numerical Simulations of the 1994 Piedmont Flood. Role of Orography and Moist Processes. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2369-2383.
- [3]Feidas, H., Cartalis, C., 2001: Monitoring mesoscale convective cloud systems associated with heavy storms with the use of Meteosat imagery. *Journal of Applied Meteorology*, **40**, pp. 491-512.
- [4]Griffith, C.G., Augustine, J.A., Woodley, W.L., 1981: Satellite rain estimation in the U.S. High Plains. *Journal of Applied Meteorology*, **20**, 53-66.
- [5]Marrocu, M., Pompei, A., Dalu, G., Liberti, G.L., and Negri, A., 1993: Precipitation estimation over Sardinia from satellite infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 115-134.
- [6]Negri, A.J., Adler, R.F., and Wetzal, P.J., 1984, Satellite rain estimation: An analysis of the Griffith-Woodley technique. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 103-116.
- [7]Φείδας, Χ., Λαγουβάρδος Κ. και Β. Κοιρώνη, 2000: Συνδυασμένη χρήση αυτόματου αλγόριθμου δορυφορικής παρακολούθησης νεφικών συστημάτων και αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου BOLAM99. *Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, Θεσσαλονίκη, 28-30 Σεπτεμβρίου 2000.
- [8]Φείδας, Χ., 2002: Εκτίμηση της βροχόπτωσης στην Ελλάδα από δορυφορικές εικόνες Meteosat. *Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας -Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας*, Ιωάννινα, 26-28 Σεπτεμβρίου 2002.