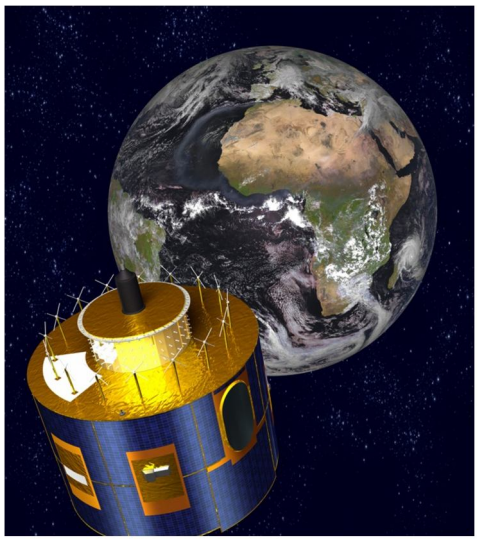
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ



ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ ΠΕΞΑΡΑΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Επιβλέπων: ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΦΕΙΔΑΣ,
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2012

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ ΠΕΞΑΡΑΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
που υποβλήθηκε στον Τομέα Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας
του Τμήματος Γεωλογίας
της Σχολής Θετικών Επιστημών
του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2012

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η ανάπτυξη και υποστήριξη της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης έγινε ενώπιον της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, στις **09-07-2012**.
Την Εξεταστική Επιτροπή αποτέλεσαν οι:

Χαράλαμπος Φείδας, Επίκουρος καθηγητής Α.Π.Θ, Επιβλέπων
Θόδωρος Καρακώστας, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ιωάννης Πυθαρούλης, Λέκτορας Α.Π.Θ.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης έχει τίτλο «Εντοπισμός αστάθειας στην περιοχή του ευρύτερου ελλαδικού χώρου με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων» και εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στον Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Γεωλογικού Τμήματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Η απόφαση παρακολούθησης του μεταπτυχιακού αυτού ήταν αποκλειστικά η βαθύτερη γνώση των μετεωρολογικών φαινομένων τα οποία αποτελούσαν αντικείμενο ερασιτεχνικής μου ενασχόλησης. Η εμπειρία παρακολούθησης των μαθημάτων του μεταπτυχιακού ξεπέρασε κάθε προσδοκία μου ενώ παράλληλα γνώρισα εξαιρετικούς ανθρώπους με τους οποίους ελπίζω να τους έχω κοντά μου στο μέλλον, είτε πρόκειται για διδάσκοντες είτε για τους συμφοιτητές μου σε όλα τα έτη.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Θεόδωρο Καρακώστα, καθηγητή και μέλος της εξεταστικής επιτροπής για αξιοθαύμαστη επιστημονική αλλά και την ιδιαιτέρως ανθρώπινη συμβολή του στις σπουδές μου, έναν άνθρωπο που δε διδάσκει μόνο τα γνωστικά του αντικείμενα αλλά συμπαραστέκεται και σε προσωπικό επίπεδο σε οποιαδήποτε δυσκολία προκύψει στους φοιτητές του Τομέα. Οι συμβουλές και οι προτροπές του με βοήθησαν σημαντικά όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Με πολλή εκτίμηση, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον κ. Ιωάννη Πυθαρούλη, λέκτορα και μέλος της εξεταστικής επιτροπής για τις συμβουλές του, την αμέριστη βοήθειά του επί παντός επιστητού της Μετεωρολογίας. Πάντοτε, ήτανε πρόθυμος να απαντήσει, ως καθηγητής και ως φίλος, οποιαδήποτε ώρα της ημέρας σε απορίες και διευκρινήσεις.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον κ. Χαράλαμπο Φείδα, επιβλέποντα της διατριβής διότι ήτανε πάντοτε παρών για μένα και με τις συμβουλές του μου έδειχνε το σωστό δρόμο. Ακόμα και όταν αμφέβαλλα για μερικές προσεγγίσεις κατά τη διάρκεια της εργασίας, αποδείχτηκε ότι οι υποδείξεις του ήτανε

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

πάντοτε στον ορθό δρόμο. Η ολοκληρωμένη του διδασκαλία στο μάθημα της Δορυφορικής Μετεωρολογίας γέννησε την αγάπη και το ενδιαφέρον μου για το συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο στο οποίο επέλεξα να εκπονήσω τη τελική μεταπτυχιακή μου διατριβή.

Εκτός από την εξεταστική επιτροπή, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στα υπόλοιπα μέλη ΔΕΠ του Τομέα, υπήρξαν πάντοτε κοντά μου σε ό,τι χρειάστηκα κατά τη διάρκεια των μαθημάτων, ενώ και η ανθρώπινη επαφή μας έκανε το μεταπτυχιακό αυτό μια ξεχωριστή εμπειρία που δεν πρόκειται να ξεχάσω.

Ιδιαίτερη αναφορά και ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Γιαννακό Απόστολο ο οποίος με βοήθησε πολλές φορές όχι μόνο στο γνωστικό αντικείμενο αλλά και σε προσωπικό επίπεδο. Όσο για τους συμφοιτητές μου, είναι όλοι τους φίλοι ξεχωριστοί μια και περάσαμε μαζί πολλές όμορφες στιγμές.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον πατέρα μου, τον αδερφό μου, την Αλεξάνδρα και τους υπόλοιπους κοντινούς μου φίλους για τη πολύτιμη βοήθειά τους όποτε τη χρειάστηκα.

Τέλος, είμαι σίγουρος ότι η μητέρα μου θα ήταν πολύ χαρούμενη για την απόφασή μου να πραγματοποιήσω μεταπτυχιακές σπουδές στο Τμήμα της Γεωλογίας και ιδιαιτέρως στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Η αγάπη της και το δέσιμό της με όλα τα μέλη ΔΕΠ του τμήματος αυτού ήτανε ιδιαιτέρως έντονη.

Στη μνήμη της, αφιερώνω την εργασία αυτή.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ……...9

1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ……...…12

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ……...14
2.1 Γενικά……14
2.2 Αστάθεια……....15
2.3 Δείκτες αστάθειας…….……17
2.3.1 Γενικά……...……17
i. Δείκτης Total Totals (TT)…….……17
ii. Δείκτης Lifted Index (LI)……..……18
iii. Δείκτης K-Index (KI)…… ….……..19
2.4 Ραδιοβολίσεις……..…..20
2.5 Στατιστικά μέτρα σύγκρισης……22
2.5.1 Γενικά…….…..22
2.5.2 Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (Pearson)…….....22
2.5.2 Στατιστικά Σφάλματα……...23
i. Μέσο Σφάλμα (ME)……..……23
ii. Μέσο απόλυτο σφάλμα……...…..24
iii. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)……....24
2.6 Μετεωρολογικοί δορυφόροι…….……25
2.6.1 Γενικά……....…..25
2.6.2 Είδη μετεωρολογικών δορυφόρων……..….26
2.6.3 Χαρακτηριστικά δορυφορικών αισθητήρων……..…..…27
2.6.4 Χαρακτηριστικά νεφών στις δορυφορικές εικόνες……..28
i. Ερμηνεία εικόνων στο κανάλι του ορατού (VIS)……..….28
ii. Ερμηνεία εικόνων στο κανάλι του υπέρυθρου (IR)…….….30
2.6.5 Δορυφορικές Ραδιοβολίσεις……31
i. Εξαγωγή κατακόρυφων κατατομών αερίων της ατμόσφαιρας…….32
ii. Εξαγωγή κατακόρυφων κατατομών τη θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας……...33
iii. Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας….…33
.
3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ…….....……...34
3.1 Δεδομένα…….…..34
3.1.1 Γενικά……..…....34
3.1.2 Ραδιοβολίσεις……...35
i. Γενικά…….....35
ii. Δεδομένα και περίοδος αξιολόγισης……..36
3.1.3 Εικόνες ορατού και υπέρυθρου καναλιού MSG…….….38
i. Γενικά…….....38
ii. Φασματικά κανάλια και ανάλυση δεδομένων……...39
iii. Δεδομένα Meteosat-8……....39

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

3.1.4 Ατμοσφαιρικά προϊόντα του MODIS……..40
i. Γενικά……40
ii. Φασματικά κανάλια και ανάλυση δεδομένων…….…..41
iii. Υπολογισμός δεικτών αστάθειας MODIS……42
α. Γενικά……42
β. Στατιστική μέθοδος ανάπτυξης αλγορίθμου…….…43
γ. Φυσική μέθοδος ανάπτυξης αλγορίθμου……44
δ. Ατμοσφαιρικά δεδομένα προγράμματος MODIS……..45
3.1.5 Ατμοσφαιρικά προϊόντα του MSG…….…..47
i. Γενικά……47
ii. Μέθοδοι υπολογισμού GII……47
α. Γενικά……47
β. Φυσική μέθοδος……..47
γ. Στατιστική μέθοδος……48
iii. Δεδομένα GII…….…….....49
3.2 Μεθοδολογία……50
3.2.1 Περιοχή και περίοδος μελέτης……50
3.2.2 Αξιολόγηση των δορυφορικών δεδομένων με τη βοήθεια ραδιοβολίσεων……..51
3.2.3 Χαρτογράφηση των δεικτών αστάθειας……...52
i. Προϊόντα MODIS……...52
ii. Προϊόντα MSG……...53

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ……....56
4.1 Γενικά……56
4.2 Αξιολόγηση δορυφορικών δεδομένων με τη χρήση ραδιοβολίσεων……56
4.2.1 Γενικά…….……..56
4.2.2 Αξιολόγηση δεδομένων MODIS…….…57
4.2.3 Αξιολόγηση δεδομένων GII…….…62
4.3 Αξιολόγηση δορυφορικών προϊόντων – Μελέτη τεσσάρων (4) περιπτώσεων έντονης αστάθειας…….…..66
4.3.1 Γενικά…….…66
4.3.2 Περίπτωση αστάθειας στις 17-06-2009
i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MGS…….…66
ii. Συνοπτική Ανάλυση……..68
iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS……69
vi. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν GII……71
v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών GII…….. …..77
4.3.3 Περίπτωση αστάθειας στις 20-06-2009
i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MGS……..……...80
ii. Συνοπτική Ανάλυση……..81
iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS……....82
vi. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν GII……84
v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών GII……91

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4.3.4 Περίπτωση αστάθειας στις 13-06-2010
i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MGS……..……..…..94
ii. Συνοπτική Ανάλυση……..95
iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS……96
vi. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν GII……....99
v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών GII……...105
4.3.5 Περίπτωση αστάθειας στις 11-07-2010
i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MGS……..……107
ii. Συνοπτική Ανάλυση……109
iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS……..110
vi. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν GII……..113
v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών GII……...119

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ……122

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ……127

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο ολοκληρωμένα δορυφορικά ατμοσφαιρικά προϊόντα, ο MODIS και ο GII με τα οποία αποτυπώνεται η ατμοσφαιρική αστάθεια μέσω γνωστών δεικτών αστάθειας και διερευνήθηκε η πιθανότητα χρησιμοποίησής τους σε επιχειρησιακή βάση. Ο MODIS υποστηρίζεται από δορυφόρους πολικής τροχιάς και ανήκει στη υπηρεσία της Nasa, ενώ ο GII υποστηρίζεται από τον γεωστατικό δορυφόρο MSG-8 της Eumetsat. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης των δεικτών αστάθειας του MODIS και του GII σε επιχειρησιακή βάση για πρόγνωση καταιγίδων.

Οι δείκτες αστάθειας που διατίθενται από τον MODIS είναι ο Total Totals (TT), ο Lifted Index (LI) και ο K-Index (KI) ενώ οι δείκτες αστάθειας του GII είναι ο Lifted Index και ο K-Index. Ο MODIS παρέχει δύο μετρήσεις την ημέρα για τον ελλαδικό χώρο, μία βραδινή περίπου στις 00:00 UTC και μία πρωινή περίπου στις 10-11:00 UTC ενώ ο GII παρουσιάζει μεγάλη χρονική συχνότητα με τέσσερις μετρήσεις ανά ώρα. Αρχικά, αξιολογήθηκαν οι δείκτες αστάθειας των δύο δορυφορικών προϊόντων για τον μήνα Ιούνιο του 2009 με τη βοήθεια των αντιστοίχων δεικτών από τις διαθέσιμες ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων της Θεσσαλονίκης, της Αθήνας και του Ηρακλείου για τις ώρες 00:00 και 12:00 UTC. Η συσχέτιση των δορυφορικών δεικτών του MODIS με τους αντίστοιχους των επίγειων μετρήσεων ήταν καλή για τους δείκτες TT και KI ενώ μικρή συσχέτιση εμφάνισε ο δείκτης LI. Αντιθέτως, τη μεγαλύτερη συσχέτιση εμφάνισαν οι δείκτες KI και LI του GII.

Στη συνέχεια επιλέχτηκαν τέσσερις ημέρες με χαρακτηριστικά υψηλής ατμοσφαιρικής αστάθειας στην Ελλάδα και αποτυπώθηκαν τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με τη βοήθεια εικόνων του MSG από τα κανάλια του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV) και του υπέρυθρου (IR10.8). Έπειτα, δημιουργήθηκαν χάρτες της Ελλάδας στους οποίους αποτυπώθηκαν για τις ημέρες αυτές οι δείκτες αστάθειας του MODIS και του GII. Η κατά

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

αντιπαράθεση χωροχρονική μελέτη των παραπάνω χαρτών έδειξε ότι ο MODIS είναι σε θέση να αποτυπώσει σε ικανοποιητικό βαθμό την ισχυρή αστάθεια των ημερών αυτών αλλά σε προγνωστικό επίπεδο δεν βοηθά ιδιαίτερα επειδή στη βραδινή καταγραφή απέχει αρκετές ώρες από την εκδήλωση της αστάθειας ενώ στη μεσημεριανή καταγραφή η αστάθεια έχει ήδη εν μέρει εκδηλωθεί. Ο GII, με την μεγάλη συχνότητα καταγραφών, επιτυγχάνει να αποτυπώσει και τη θερμική αστάθεια κυρίως λίγες ώρες πριν την εκδήλωσής της δηλαδή μετά τις 06:00 UTC, δίνοντας ένα χρήσιμο βοηθητικό σήμα για περιοχές όπου θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή τις επόμενες ώρες από τους προγνώστες μετεωρολόγους για την πιθανή εμφάνιση καταιγίδων.

ABSTRACT

Two integrate satellite atmospheric products; MODIS and GII in which atmospheric instability is impressed by known instability indices, are being examined in the present study. Moreover, the possibility of their use in short terms prediction is also investigated. MODIS is one project of NASA and is supported by two polar orbit meteorological satellites while GII is a project of Eumetsat and is supported by a geostationary meteorological satellite named MSG-8. The aim of this study is to investigate whether instability indices derived from MODIS and GII atmospheric profiles can be used in storm prediction.

MODIS's instability indices are Total Totals (TT), Lifted Index (LI) and K-Index (KI) while GII's instability indices are Lifted Index and K-Index. MODIS provides two measurements a day for Greece, one at about 00:00 UTC night time and another one in the morning at about 10- 11 UTC whereas GII has high time frequency with four record per hour. At first, the instability indices of these both atmospheric products are evaluated for June 2009, using the equivalent indices of available soundings at the airports of Thessaloniki, Athens and Heraklion for 00:00 and 12:00 UTC. The correlation between

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

MODIS' indices and the corresponding one from soundings was quite good for TT and KI while LI appeared to have a low correlation. On the contrary, KI and LI of GII product appeared with the highest correlation factor.

Then, four days with characteristics of high atmospheric instability in Greece were chosen and convective clouds were depicted using images from the MSG channels of high resolution visible (HRV) and infrared (IR10.8). After that, maps with spatial distribution of instability indices for both satellite products were examined and the results showed that MODIS succeeded to depict the severe atmospheric instability of those days but was proved to be ineffective in short terms prediction because the satellite night passage is a few hours far from morning thermal instability and at the morning passage, the instability has already been developed. GII with its high time frequency measurements succeeded to depict thermal instability a few hours before its appearance, after 06:00 UTC. For this reason, a helpful alert can be provided by GII to meteorologists in order to pay attention to regions that can develop high convection activity the next few hours.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένα από τα πλέον γνωστότερα φυσικά φαινόμενα στην ατμόσφαιρα αποτελούν οι καταιγίδες, η κύρια χρονική περίοδος των οποίων εντοπίζεται από τον Μάιο έως τον Σεπτέμβριο σε ετήσια βάση στην Ελλάδα. Οι καταιγίδες συνοδεύονται από έντονα και βίαια φαινόμενα, όπως ισχυροί τοπικοί άνεμοι μεταβλητής έντασης, έντονη βροχόπτωση, εμφάνιση αστραπών και βροντών ενώ σε αρκετές περιπτώσεις σημειώνεται και χαλαζόπτωση. Τα χαρακτηριστικά ογκώδη νέφη των καταιγίδων ονομάζονται σωρειτομελανίες ή cumulonimbus (Cb), είναι επιβλητικά, χρώματος γκρίζου και εκτείνονται καθ' ύψος σχεδόν σε όλη την τροπόσφαιρα. Κύριες προϋποθέσεις για τη δημιουργία μιας καταιγίδας είναι η ύπαρξη ικανοποιητικής ποσότητας υδρατμών καθώς και ύπαρξη ατμοσφαιρικής αστάθειας στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν τις καταιγίδες ως ένα από τα εντυπωσιακότερα και πιο βίαια φυσικά φαινόμενα στο κόσμο τα οποία από πολύ νωρίς είχαν εξάψει τη φαντασία των ανθρώπων. Η ελληνική μυθολογία αποδίδει τους κεραυνούς, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα μιας καταιγίδας ως όπλο του πατέρα των θεών - του Δία - το οποίο χρησιμοποιούσε κατά το δοκούν εναντίων αντιπάλων αλλά και όσων ήθελε να τιμωρήσει. Με τη γέννηση όμως των επιστημών στην Αρχαία Ελλάδα αλλά και μετέπειτα, με τη μεταλαμπάδευση του αρχαιοελληνικού πνεύματος στην περίοδο της Αναγέννησης στην Ευρώπη έως και σήμερα, οι καταιγίδες αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών.

Ενώ λοιπόν οι καταιγίδες είναι πράγματι ένα εντυπωσιακό και πανέμορφο φαινόμενο, τα αποτελέσματά τους είναι πολλές φορές δυσμενή για τον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του αφού σε πολλές των περιπτώσεων αφήνουν πίσω τους καταστροφές. Στις ειδήσεις αναφέρονται κατά καιρούς σε παγκόσμια κλίμακα πλημμύρες ή καταστροφές λόγω έντονων βροχοπτώσεων ή ισχυρών ανέμων που οφείλονται σε καταιγίδες ενώ σε αρκετές περιπτώσεις σημειώνονται και απώλειες ανθρωπίνων ζωών. Από όλα τα προηγούμενα γίνεται σαφές ότι η κατανόηση και τελικώς η πρόγνωση αυτών των έντονων φαινόμενων καθίσταται επιτακτική ανάγκη για τη καλύτερη αντιμετώπιση των συνεπειών τους. Στον τομέα αυτό έχει υπάρξει μεγάλη πρόοδος τα τελευταία χρόνια, τόσο σε ερευνητικό όσο και σε επιχειρησιακό επίπεδο. Για παράδειγμα, το μετεωρολογικό ραντάρ είναι σε θέση να εντοπίσει το σχηματισμό Cb σε μεγάλες αποστάσεις και συμβάλλει σε προγράμματα χαλαζικής προστασίας περιοχών με καλλιέργειες.

Ενώ η πρόγνωση του καιρού έχει κάνει άλματα τα τελευταία χρόνια, διάφοροι παράμετροι μειώνουν την ακρίβεια της πρόγνωσης σε λίγες μέρες. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές είναι η χαοτική φύση των καιρικών συνθηκών, η έλλειψη αξιόπιστων μετρήσεων σε όλες τις περιοχές της ατμόσφαιρας, η ελλιπής γνώση και παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών, η μαθηματική επίλυση των προγνωστικών εξισώσεων με τη

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

βοήθεια αριθμητικών μεθόδων στους υπολογιστές κ.λ.π. Στην περίπτωση των καταιγίδων, η μεσοπρόθεσμη (4-5 ημέρες) και η βραχυπρόθεσμη (4-24 ώρες) πρόγνωση αντιμετωπίζει περισσότερα προβλήματα αφού τις περισσότερες φορές τα φαινόμενα αυτά είναι τοπικά, μικρής κλίμακας, και επιπροσθέτως επηρεάζονται και από την ιδιαίτερη τοπολογία των περιοχών. Τέλος, μικρή διαφοροποίηση των αρχικών συνθηκών (π.χ. ελάχιστο σφάλμα μέτρησης θερμοκρασίας σε μετεωρολογικούς σταθμούς) είναι ικανές να οδηγήσουν τη πρόγνωση σε λάθος εκτίμηση.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας ακόμα κλάδος της Μετεωρολογίας ο οποίος με την εξέλιξη της τεχνολογίας λειτουργεί επικουρικά στην κατανόηση και στις μετρήσεις των φυσικών παραμέτρων κυρίως σε περιοχές που είναι πρακτικά αδύνατο να έχουμε μετρήσεις όπως πάνω από ωκεανούς ή και απομακρυσμένες ακατοίκητες περιοχές. Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι καταγράφουν συστηματικά την εξέλιξη του καιρού πάνω από το πλανήτη παρέχοντας ένα γιγαντιαίο σύνολο πληροφοριών για τη κατάσταση της ατμόσφαιρας ακόμα και στα πιο αφιλόξενα σημεία του πλανήτη. Βεβαίως, η αξιοπιστία των μετρητικών οργάνων καθώς και οι εγγενείς αδυναμίες των δορυφόρων, για παράδειγμα αδυναμία μετρήσεων κάτω από νεφικούς σχηματισμούς, καθιστούν την αξιολόγηση και αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων αναγκαία.

Τα δεδομένα των μετεωρολογικών δορυφόρων δεν περιορίζονται σε πρωτογενείς μετρήσεις αλλά σε επόμενο επίπεδο παρέχονται στο μελετητή ολοκληρωμένα προϊόντα τα οποία υπολογίζονται μέσω γνωστών μαθηματικών σχέσεων ή διαφόρων αλγορίθμων. Τα προϊόντα αυτά αφορούν μετεωρολογικές παραμέτρους όπως υετίσιμο ύδωρ, δείκτες αστάθειας, ατμοσφαιρική υγρασία κ.α. Ο σύγχρονος ερευνητής έχει λοιπόν στη διάθεσή του άλλη μία πηγή δεδομένων που συμβάλλει στην κατανόηση των φαινόμενων αλλά και στην πρόγνωση, κυρίως τη βραχυπρόθεσμη.

Πιο συγκεκριμένα, για τον εντοπισμό της εκδήλωσης αστάθειας η οποία μπορεί να οδηγήσει στην εκδήλωση καταιγίδας, έχουν αναπτυχθεί οι λεγόμενοι δείκτες αστάθειας. Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφοροι δείκτες αστάθειας από αρκετούς ερευνητές με σκοπό τον καλύτερο υπολογισμό των συνθηκών αστάθειας που ενδέχεται να οδηγήσουν στην εκδήλωση καταιγίδας. Στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης, οι δείκτες αστάθειας που μελετώνται είναι ο Total Totals, ο K – Index, ο Lifted Index ο οποίοι παρέχονται από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και διαστήματος των ΗΠΑ (NASA) και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Αξιοποίηση των δορυφορικών Δεδομένων (την EUMETSAT).

Σκοπός της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής ειδίκευσης είναι η εξέταση της δυνατότητας βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της αστάθειας – καταιγίδων με τη βοήθεια των δεικτών αστάθειας που παρέχονται ως ολοκληρωμένα προϊόντα από τα δορυφορικά δεδομένα. Ουσιαστικά, η εργασία αυτή προσπαθεί να δώσει μία απάντηση αν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε επιχειρησιακή βάση και κάτω από ποιες προϋποθέσεις τα δορυφορικά δεδομένα ως εργαλεία βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης καταιγίδων.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ατμοσφαιρική αστάθεια στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο με τη βοήθεια δορυφορικών δεδομένων. Τα δεδομένα διατίθενται με τη μορφή ολοκληρωμένων δορυφορικών ατμοσφαιρικών προϊόντων. Είναι γνωστό ότι η πρόγνωση της ατμοσφαιρικής αστάθειας δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση διότι οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι αρκετοί και συχνά δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Είναι βέβαιο πως ο ακριβής μηχανισμός ανάπτυξης νεφών κατακόρυφης αστάθειας, που οδηγεί τελικά σε καταιγιδοφόρα δραστηριότητα, δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητός και η έρευνα σε αυτό το τομέα εξελίσσεται συνεχώς.

Σχήματα πρόγνωσης της αστάθειας είναι ενσωματωμένα στα προγνωστικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού τα οποία όμως δεν είναι πάντα σε θέση να ανταποκριθούν με ακρίβεια στη πρόγνωσή της αστάθειας λόγω ελλιπούς παραμετροποίησης, ανακρίβειας αρχικών επίγειων μετρήσεων και πλήθος άλλων λόγων. Για την πρόγνωση των καταιγίδων προτάθηκαν και αναπτύχθηκαν κατά καιρούς διάφοροι δείκτες αστάθειας ώστε να προσδιοριστεί η αστάθεια και η πιθανότητα εμφάνισης καταιγιδοφόρων νεφών σε μία περιοχή. Ο υπολογισμός των δεικτών αστάθειας έχει να κάνει με τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας σε διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας, η δε τιμή τους συνδέεται ευθέως με τη πιθανότητα εμφάνισης καταιγίδων.

Με την εξέλιξη των μετεωρολογικών δορυφόρων, πραγματοποιούνται καθημερινά μετρήσεις ακτινοβολίας στο σύνολο της γήινης σφαίρας από εξειδικευμένα μετρητικά όργανα. Το πλήθος των μετρήσεων αυτών, που πραγματοποιούνται σε διάφορα σημεία του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μετατρέπεται με τη βοήθεια ειδικών αλγορίθμων σε ολοκληρωμένα ατμοσφαιρικά προϊόντα που δίνουν πλήθος μετεωρολογικών δεδομένων στη διάθεση των ερευνητών. Ένα υποσύνολο των δεδομένων αυτών αποτελούν και οι δείκτες αστάθειας οι οποίοι είναι σε θέση να συμβάλλουν δυνητικά ακόμα και στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της ατμοσφαιρικής αστάθειας σε μια περιοχή.

Με τη βοήθεια των δεικτών αστάθειας των ραδιοβολίσεων και της στατιστικής τους επεξεργασίας με τους αντίστοιχους των δορυφορικών προϊόντων ελέγχεται η μεταξύ τους συσχέτιση. Προτού αναλυθούν τα δεδομένα, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν θεωρητικά μερικοί όροι που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή όπως για παράδειγμα η αστάθεια, οι δείκτες αστάθειας, η ραδιοβόλιση, ο μετεωρολογικός δορυφόρος, κλπ. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μία περιγραφή των βασικών όρων που χρησιμοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

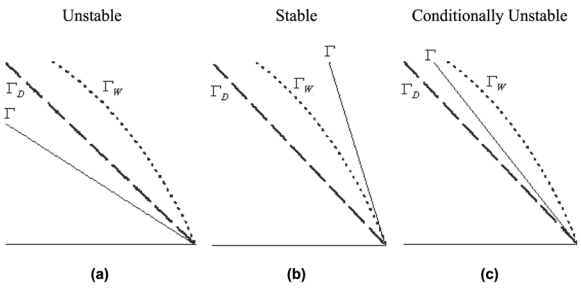
2.2 ΑΣΤΑΘΕΙΑ

Στο σύνολο της ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα στο κατώτερο όριο αυτής που ονομάζεται Τροπόσφαιρα, υπάρχουν μεγάλης έκτασης μάζες αέρα που εμφανίζουν σχετική οριζόντια ομοιογένεια, κυρίως ως προς τη θερμοκρασία και τη υγρασία τους και ονομάζονται αέριες μάζες. Για την Μετεωρολογία, έχει ιδιαίτερη σημασία η ισορροπία αυτών των αέριων μαζών που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευσταθής, ασταθής ή αδιάφορη. Αν σε οποιαδήποτε κατακόρυφη κίνηση μια αέριας μάζας εντός της ατμόσφαιρας αναπτύσσεται ροπή επαναφοράς δηλαδή εμφανίζονται επιβραδυνόμενες κινήσεις, τότε η αέρια μάζα λέγεται ότι εμφανίζει ευσταθή ισορροπία. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή με την κατακόρυφη μετακίνηση μιας αέρια μάζας εμφανίζονται επιταχυνόμενες δυνάμεις, τότε η αέρια μάζα εμφανίζει ασταθή ισορροπία. Αν τέλος, μετά από μία κατακόρυφη μετακίνηση της αέριας μάζας δεν εμφανίζεται καμία δύναμη, είτε επιβραδυνόμενη, είτε επιταχυνόμενη, τότε το είδος αυτό ισορροπίας ονομάζεται αδιάφορο (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 1994).

Στη Μετεωρολογία, η ισορροπία που εμφανίζει ενδιαφέρον στην ατμόσφαιρα, δηλαδή προκαλεί μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα βροχόπτωση, καταιγίδες, ισχυρούς ανέμους, είναι η ασταθής ισορροπία ή αλλιώς η αστάθεια. Με άλλα λόγια, αστάθεια ορίζεται εκείνη η κατάσταση της ατμόσφαιρας που χαρακτηρίζεται από έντονες ανοδικές κινήσεις των αέριων μαζών. Η αστάθεια, ανεξαρτήτως της αιτίας της, αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την δημιουργία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε καταιγίδες. Είναι, λοιπόν, πολύ σημαντικός ο εντοπισμός της αστάθειας σε κάθε σημείο της ατμόσφαιρας διότι οδηγεί δυνητικά σε μη αίθριο καιρό.

Τα κυριότερα είδη ατμοσφαιρικής αστάθειας είναι η αστάθεια «υπό συνθήκη» (conditional instability) (εικόνα 2.1), η δυναμική αστάθεια (Potential or convective instability), η απόλυτη αστάθεια (absolute instability) και η λανθάνουσα αστάθεια (latent instability) **(**Peppler, 1988).

Η πρώτη περίπτωση αστάθειας, η υπό συνθήκη αστάθεια, αφορά στην ανύψωση αέριας μάζας μέσα στο περιβάλλον ατμοσφαιρικό αέρα και συμβαίνει κάθε φορά που η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας γ είναι μικρότερη από τη ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα γ_d και μεγαλύτερη από την υγρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα γ_w (εικόνα 2.1c), δηλαδή ισχύει η σχέση:



Εικόνα 2.1 *Είδη ατμοσφαιρικής αστάθειας (a) απόλυτη αστάθεια, (b) ευστάθεια, (c) «υπό συνθήκη» αστάθεια http://o.quizlet.com/i/6yQIi1uSoCJ5ZtororNusw_m.jpg*

$$\gamma_d > \gamma > \gamma_w \qquad (2.1)$$

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Για την ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα γ_d, τη κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας γ και την υγρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα γ_w ισχύουν τα εξής:

$$\gamma_d = \frac{g}{C_{pa}},\ \gamma = \frac{-dT}{dz}, \gamma_w = \gamma_d(1 + \frac{r_s L}{R_a})/(1 + \frac{r_s L^2}{C_{pa} R_v T^2}) \qquad (2.2)$$

όπου:

C_{pa}: ειδική θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα υπό σταθερή πίεση

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

R_a: ειδική σταθερά για ξηρό αέρα

R_v: ειδική σταθερά για υγρό αέρα

r_s: κορεσμένη αναλογία μίγματος

L: λανθάνουσα θερμότητα νερού

Η επόμενη περίπτωση αστάθειας, η δυναμική αστάθεια, σχετίζεται με εκείνη τη περίπτωση ενός ακόρεστου στρώματος ή μιας ακόρεστης στήλης αέρα εντός του περιβάλλοντος, στην οποία η ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία Θ_e βαίνει μειούμενη με το ύψος:

$$\frac{\partial \Theta_e}{\partial z} < 0 \qquad (2.3)$$

Η ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία Θ_e είναι εκείνη η θερμοκρασία που αποκτά η υγρή αέρια μάζα όταν μεταφερθεί αδιαβατικά στη στάθμη των 1000 hPa και στη συνέχεια αφαιρεθεί όλη η ποσότητα των υδρατμών της μετά από ισοβαρική συμπύκνωση στη στάθμη των 1000 hPa (Μακρογιάννης, 2007). Αν ένα τέτοιο ακόρεστο στρώμα αέρος ανυψωθεί έως ότου καταστεί κορεσμένο στο σύνολό του, τότε αυτό καθίσταται ασταθές (Peppler, 1988). Η αστάθεια αυτού του είδους συνδέεται με την ανύψωση μιας αέριας μάζας που είναι υγρότερη στα κατώτερα επίπεδά της λόγω της θέρμανσής της στα κατώτερα στρώματα τη ατμόσφαιρας ή σύγκλισης τοπολογίας κ.λ.π.

Η περίπτωση της απόλυτης αστάθειας συνδέεται με εκείνη περίπτωση εκείνης της αέριας μάζας που η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα του είναι μεγαλύτερη από την ξηρή αδιαβατική (εικόνα 2.1a), δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\gamma > \gamma_d > \gamma_w \qquad (2.4)$$

Τέλος, η λανθάνουσα αστάθεια αναφέρεται σε εκείνο το στρώμα αέρος που είναι υπό συνθήκη ασταθές ή απόλυτα ασταθές και βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της ελεύθερης μεταφοράς (LFC, Level of Free Convection) και το δείγμα αέρα αναπτύσσει θετική άνωση και ανυψώνεται ελεύθερα. Το επίπεδο της ελεύθερης μεταφοράς ορίζεται ως εκείνο το επίπεδο στο οποίο ένα δείγμα

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

αέρα ανερχόμενο κατά τη ξηρή αδιαβατική ως τον κορεσμό του και στη συνέχεια κατά την υγρή αδιαβατική, γίνεται για πρώτη φορά θερμότερο και άρα αραιότερο από το περιβάλλον του. Η λανθάνουσα αστάθεια ενεργοποιείται στη περίπτωση της ύπαρξης μιας αρχικής ώθησης στο στρώμα αέρα η οποία δίνει την απαραίτητη κινητική ενέργεια ώστε να το ανεβάσει πάνω από το LFC.

Εκτός από το θεωρητικό υπόβαθρο της αστάθειας, σε πρακτικό επίπεδο έχουν προταθεί οι λεγόμενοι δείκτες αστάθειας οι οποίοι υπολογίζονται κατά βάση με απλές σχέσεις. Οι δείκτες αυτοί αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τους προγνώστες μετεωρολόγους και στη παρούσα εργασία μελετώνται τρεις δείκτες, ο Total Totals, ο Lifted Index και ο K-Index.

2.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ

2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι δείκτες αστάθειας είναι εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές για να εκτιμηθεί μαθηματικά η ευστάθεια ή η αστάθεια της ατμόσφαιρας και η πιθανότητα ή όχι δημιουργίας μιας καταιγίδας πριν την εμφάνισή της. Η εφαρμογή τους αφορά κυρίως στις περιπτώσεις όπου το αίτιο της αστάθειας δεν είναι δυναμικό, για παράδειγμα ύπαρξη μετωπική ύφεσης ή στροβιλισμού στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Αρκετοί από αυτούς τους δείκτες λαμβάνουν υπόψη τη θερμοκρασία και την υγρασία της ατμόσφαιρας καθώς και τον κατακόρυφο διατμητικό άνεμο (wind shear).

Μολονότι η ανάπτυξη αριθμητικών προγνωστικών μοντέλων μέσης κλίμακας για την πρόγνωση καταιγίδων είναι σημαντική, κρίνεται ακόμη χρήσιμη η εκτίμηση της αστάθειας με τον κλασσικό τρόπο των δεικτών αστάθειας. Η εκτίμηση της ατμοσφαιρικής αστάθειας με τη βοήθεια των δεικτών αυτών έγκειται σε απλές μαθηματικές σχέσεις θερμοδυναμικών παραμέτρων (Showalter, 1953; George, 1960; Boyden, 1963; Miller, 1967; Peppler, 1988 κ.α.). Για τον υπολογισμό των δεικτών αυτών χρησιμοποιούνται συχνά ερευνητικά ή επιχειρησιακά δεδομένα (π.χ. ραδιοβολίσεις).

Γενικότερα, πρέπει να σημειωθεί ότι οι δείκτες αστάθειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης καταιγίδων αλλά τα κατώφλια των τιμών τους που οριοθετούν τις πιθανότητες αυτές δεν είναι πλήρως αποσαφηνισμένα. Διάφοροι παράγοντες, όπως η γεωγραφική περιοχή (τοπολογία), οι εποχές του έτους και οι συνοπτικές καταστάσεις, παίζουν σημαντικό ρόλο (Michalopoulou and Jacovides, 1987; Prezerakos, 1989; Dalezios and Papamanolis, 1991; Haklander and Van Delten, 2003). Παρακάτω παρουσιάζονται οι δείκτες αστάθειας που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή και υπολογίζονται από τα δορυφορικά προϊόντα.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

i. Δείκτης Total Totals (TT)

Ο δείκτης Total Totals (Miller, 1967) είναι το άθροισμα δύο άλλων δεικτών, του Vertical Total (VT) και του Cross Totals (CT). Υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$TT = VT + CT = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{500}) \qquad (2.5)$$

$$\text{όπου } VT = (T_{850} - T_{500}) \text{ και } CT = (T_{d850} - T_{500}) \text{ και}$$

όπου T_{850}, T_{500} οι θερμοκρασίες στα ισοβαρικά επίπεδα των 850 και 500 hPa αντίστοιχα και T_{d850} η θερμοκρασία του σημείου δρόσου στο ισοβαρικό επίπεδο των 850 hPa. Οι θερμοκρασίες αυτές λαμβάνονται άμεσα από τις διαθέσιμες ραδιοβολίσεις και η μονάδα μέτρησης τους είναι βαθμοί κελσίου (^oC). Ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψη του τη θερμική αστάθεια του ατμοσφαιρικού στρώματος που ορίζεται ανάμεσα στα ισοβαρικά επίπεδα των 850 και 500 hPa καθώς και την υγρασία του κατώτερου επιπέδου της ατμόσφαιρας πάνω από το οριακό στρώμα.

Ανάλογα με την τιμή του δείκτη, στον πίνακα 2.1 δίνεται η πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας. Οι τιμές των δεικτών αστάθειας που παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1, 2.2, 2.3 είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σε επιχειρησιακή βάση από τον ΕΛΓΑ. Να σημειωθεί ότι ο δείκτης αυτός πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή και να ισχύει η προϋπόθεση της ύπαρξης κατάλληλης ποσότητας υδρατμών στο κατώτερο όριο της ατμόσφαιρας. Ενδέχεται να υπάρξει περίπτωση εμφάνισης μεγάλης τιμής του TT προερχόμενης από τον πρώτο όρο αυτού (VT) με μηδαμινή συνεισφορά από τον δεύτερο (CT). Αυτό σημαίνει ότι η συνεισφορά της υγρασίας στην τιμή του δείκτη είναι ελάχιστη και ενώ η τιμή του TT είναι μεγάλη, οι πιθανότητες εμφάνισης καταιγίδας είναι πολύ μικρές.

Πίνακας 2.1 *Κρίσιμες τιμές του Total Totals (TT) για την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)*

TT Index	**Εκδήλωση Καταιγίδας**
44≤TT≤45	Μεμονωμένες καταιγίδες
46≤TT≤47	Διάσπαρτες καταιγίδες (πιθανόν μερικές μέτριας έντασης)
48≤TT≤49	Διάσπαρτες καταιγίδες (πιθανόν μερικές μέτριας έντασης και μεμονωμένες ισχυρές)
50≤TT≤51	Διάσπαρτες καταιγίδες (πιθανόν μερικές ισχυρές και μεμονωμένοι σίφωνες)
52≤TT≤58	Διάσπαρτες έως και πολυάριθμες μέτριες καταιγίδες (πιθανόν διάσπαρτες ισχυρές και μερικοί σίφωνες)
59≤TT	Πολυάριθμες μέτριες καταιγίδες, διάσπαρτες ισχυρές και σίφωνες

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ii. Δείκτης Lifted Index (LI)

Ο δείκτης Lifted είναι η αλγεβρική διαφορά της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα 500 hPa και της θερμοκρασίας που αποκτά το δείγμα αέρα κατά την ανύψωσή του με τη μέση πίεση, θερμοκρασία και υγρασία: α) των κατώτερων 500 m από την επιφάνεια (Πανεπιστήμιο του Wyoming) ή β) των κατώτερων 100 m από τη στάθμη των 1000 hPa της ατμόσφαιρας ως τη στάθμη των 500 hPa (σχέση 2.6). Πιο συγκεκριμένα, η ανύψωση του αερίου δείγματος γίνεται αρχικά από τα 1000 hPa ως τη στάθμη συμπύκνωσης λόγω ανύψωσης (Lifting Condensation Level, LCL). Από το LCL το δείγμα ακολουθεί παράλληλα τη υγρή αδιαβατική μέχρι την ισοβαρική των 500 hPa. Η θερμοκρασία που προκύπτει στο σημείο εκείνο αποτελεί και τον δεύτερο όρο της αλγεβρικής διαφοράς. Υπολογίζεται λοιπόν από την παρακάτω σχέση:

$$LI = T_{500}^{env} - T_{mixed\ 100hPa \rightarrow 500hPa}^{parcel} \qquad (2.6)$$

Κρίσιμες τιμές του δείκτη LI δίνονται στο πίνακα 2.2 που ακολουθεί. Ένα μειονέκτημα του δείκτη είναι η εκτίμηση της αστάθειας σε ένα μόνο επίπεδο της ατμόσφαιρας και όχι στο σύνολο της τροπόσφαιρας.

Πίνακας 2.2 *Κρίσιμες τιμές του Lifted Index (LI) για την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)*

Lifted Index	**Εκδήλωση Καταιγίδας**
0 έως -2	Οριακά ασταθής – Πιθανότητα καταιγίδων
-3 έως -5	Αστάθεια – Ενδεχόμενη καταιγίδα
<-5	Πολύ ασταθής – Ισχυρό δυναμικό αστάθειας

iii. Δείκτης K (KI)

Ο δείκτης K δημιουργήθηκε αρχικά από τον Whiting και στη συνέχεια ο George του έδωσε τη τελική του μορφή (George, 1960). Ο υπολογισμός του δείκτη αυτού είναι το άθροισμα τριών όρων οι οποίοι μπορούν εύκολα να εξαχθούν από τα δεδομένα των ραδιοβολίσεων (σχέση 2.7). Ο πρώτος όρος εκφράζει την καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας, ο δεύτερος όρος την περιεκτικότητα σε υγρασία της κατώτερης τροπόσφαιρας και ο τρίτος την καθ' ύψος επέκταση του υγρού στρώματος. Υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850}) - (T_{700} - T_{d700}) \qquad (2.7)$$

Όπου T_{850}, T_{700}, T_{500} οι θερμοκρασίες στα ισοβαρικά επίπεδα των 850, 700 και 500 hPa αντίστοιχα ενώ T_{d850} και T_{d700} η θερμοκρασία δρόσου στα ισοβαρικά

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

επίπεδα των 850 και 700 hPa αντίστοιχα. Όλες οι θερμοκρασίες είναι εκφρασμένες σε βαθμούς κελσίου (^{o}C).

Κρίσιμες τιμές του δείκτη KI δίνονται στον πίνακα 2.3 που ακολουθεί. Συνίσταται η μη χρήση του δείκτη για την εκτίμηση της σφοδρότητας των καταιγίδων αλλά για την πιθανότητα εμφάνισής τους. Εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου.

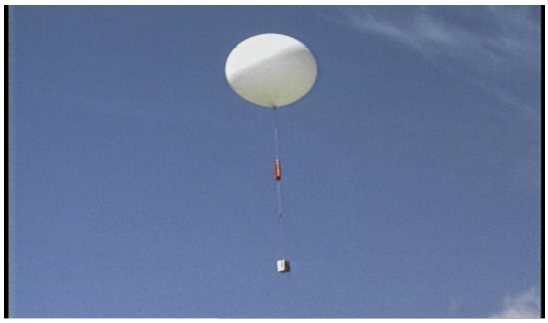
Πίνακας 2.3 *Κρίσιμες τιμές του K-Index (KI) για την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)*

K - Index	**Εκδήλωση Καταιγίδας**
K≤15	0% πιθανότητα καταιγίδας
15<K≤20	10% - 20% πιθανότητα καταιγίδας – σχεδόν καμία καταιγίδα
20<K≤25	20% - 40% πιθανότητα καταιγίδας – μεμονωμένες καταιγίδες
25<K≤30	40% - 60% πιθανότητα καταιγίδας – λίγες καταιγίδα
30<K≤35	60% - 80% πιθανότητα καταιγίδας – διάσπαρτες καταιγίδες
35<K≤40	80% - 90% πιθανότητα καταιγίδας – πολυάριθμες καταιγίδες

2.4 ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΙΣ

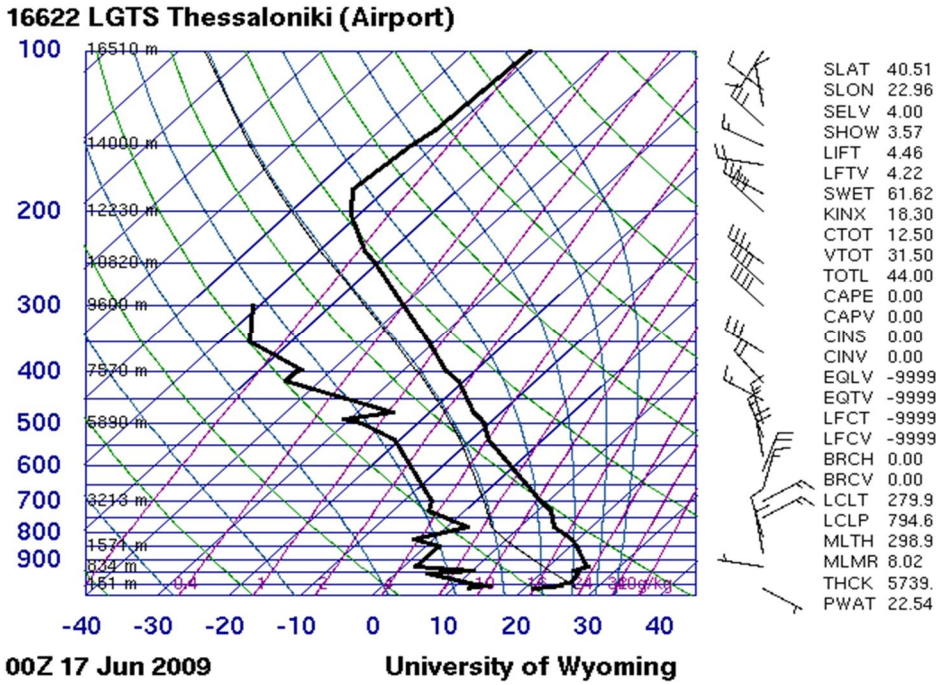
Η Ραδιοβόλιση είναι μια μέτρηση που πραγματοποιείται για τον καθορισμό του κατακόρυφου προφίλ μιας ή περισσοτέρων μετεωρολογικών μεταβλητών με τη χρήση οργάνων (ραδιοβολίδων) που ανέρχονται στην ατμόσφαιρα με τη βοήθεια ενός μπαλονιού (εικόνα 2.2). Το μπαλόνι αυτό περιέχει υδρογόνο και είναι σχεδιασμένο ώστε να «σκάει» όταν φτάσει σε ένα καθορισμένο ύψος (περίπου στα 20 km). Σπανιότερα, χρησιμοποιούνται και άλλα μέσα ανύψωσης της συσκευής μέτρησης όπως αεροσκάφος, χαρταετός, ανεμοπλάνο, ρουκέτα κ.α. Η ραδιοβολίδα φέρει επάνω της αισθητήρες οι οποίοι μετρούν μία ή περισσότερες μετεωρολογικές παραμέτρους όπως πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, άνεμο) και με ενσωματωμένο ραδιοπομπό αποστέλλει τις πληροφορίες αυτές σε ένα δέκτη στο έδαφος.

Οι ραδιοβολίσεις λαμβάνουν χώρα παγκοσμίως δύο φορές την ημέρα, στις 00:00 και 12:00 UTC κυρίως σε μεγάλα αεροδρόμια χωρών. Στις αναπτυγμένες οικονομικά χώρες, όπως στις χώρες της Ευρώπης, υπάρχει ένα πυκνό δίκτυο πραγματοποίησης ραδιοβολίσεων ενώ αντιθέτως στις οικονομικά ανίσχυρες χώρες της Αφρικής αλλά και της Ασίας το δίκτυο ραδιοβολίσεων είναι αραιό.



Εικόνα 2.2 *Ραδιοβολίδα όπου φαίνεται το μπαλόνι και το κουτί με τους αισθητήρες* http://www.meteoclub.gr/themata/egkyklopaideia/3511-prognostiki-radiovolisi

Σε κάποιες περιοχές όπου υπάρχει η δυνατότητα, πραγματοποιούνται ραδιοβολίσεις και στις 06:00 και 18:00 UTC. Η επεξεργασία των δεδομένων των ραδιοβολίσεων αποτυπώνεται σε ειδικά θερμοδυναμικά διαγράμματα, όπως το Tephigram , το Skew –T log – P και το Emegram (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 *Διάγραμμα Skew – T ραδιοβόλισης στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης την 17-06-2009 στις 00:00 UTC (Πανεπιστήμιο Wyoming, http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)*

Οι ραδιοβολίσεις δίνουν σημαντικότατες πληροφορίες για τη κατάσταση της ατμόσφαιρας (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία, δεδομένα ανέμου) και τα δεδομένα τους χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες σε αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Η ανάπτυξη ενός ευρέος πεδίου πραγματοποίησης τέτοιων μετρήσεων είναι αποφασιστικής σημασίας για τους μετεωρολόγους. Δυστυχώς, η πραγματοποίηση ραδιοβολίσεων είναι αρκετά δαπανηρή ενώ στους ωκεανούς είναι σχεδόν αδύνατη, οπότε τα κενά μετρήσεων στο μεγαλύτερο μέρος της γήινης σφαίρας αναλαμβάνουν οι δορυφόροι με τα εξελιγμένα συστήματα μετρήσεων και τους εξειδικευμένους αλγόριθμους παραγωγής κατακόρυφων προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας της ατμόσφαιρας.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2.5 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

2.5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τη σύγκριση των εκτιμημένων τιμών μιας παραμέτρου με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται διάφορα στατιστικά μέτρα σύγκρισης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ακρίβεια των δορυφορικών προϊόντων αστάθειας συγκρίνοντας τις τιμές για μια συγκεκριμένη περίοδο με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις των ραδιοβολίσεων. Στο πλαίσιο αυτό, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης συσχέτισης (Murhy, 1988; Kachigan, 1991; Jolliffe & Stephenson, 2003), το μέσο απόλυτο σφάλμα, το μέσο σφάλμα και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Jolliffe & Stephenson, 2003). Τα αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης και των σφαλμάτων δίνουν και την εκτίμηση της αξιοπιστίας των δορυφορικών δεδομένων της εργασίας αυτής.

2.5.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ (PEARSON)

Ο συντελεστής συσχέτισης μετρά και περιγράφει τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών. Σε επόμενη φάση, ο συντελεστής αυτός δύναται να χρησιμοποιηθεί, στο βαθμό που επιτρέπεται, για την πρόβλεψη των τιμών μιας μεταβλητής χρησιμοποιώντας τις γνωστές τιμές μιας άλλης. Η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών αποτυπώνεται σε διάγραμμα διασποράς το οποίο εκφράζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη σχέση δύο ποσοτικών μεταβλητών δηλαδή τη συνάφεια και την αλληλεπίδρασή τους.

Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής συσχέτισης βρίσκονται μεταξύ του κλειστού διαστήματος [-1, 1]. Αρνητικές τιμές υποδεικνύουν ότι αύξηση των τιμών της μιας μεταβλητής συνεπάγεται μείωση της άλλης και αντιστρόφως, ενώ θετικές τιμές υποδεικνύουν ότι αύξηση ή μείωση των τιμών της μιας μεταβλητής συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή και για την άλλη. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ δύο ισοπληθών σειρών X και Y συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα ρ και δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\boldsymbol{\rho_{x,y}} = \frac{\boldsymbol{Cov(X,Y)}}{\boldsymbol{\sigma_x . \sigma_y}} \qquad (2.7)$$

Όπου:

σ_x, σ_y: τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών x και y αντίστοιχα

$$Cov(X,Y) = \sum_{i=0}^{n} (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)$$

μ_x και μ_y: μέσες τιμές των μεταβλητών x και y αντίστοιχα.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ισχύουν οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Αν $\rho = \pm 1$ υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση.
- Αν $-0.3 \leq \rho < 0.3$ δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει άλλου είδους συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.
- Αν $-0.5 < \rho \leq -0.3$ ή $0.3 \leq \rho < 0.5$ υπάρχει ασθενής γραμμική συσχέτιση.
- Αν $-0.7 < \rho \leq -0.5$ ή $0.5 \leq \rho < 0.7$ υπάρχει μέση γραμμική συσχέτιση.
- Αν $-0.8 < \rho \leq -0.7$ ή $0.7 \leq \rho < 0.8$ υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση.
- Αν $-1 < \rho \leq -0.8$ ή $0.8 \leq \rho < 1$ υπάρχει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση.

Θετικές τιμές του ρ δεν υποδηλώνουν κατ' ανάγκην μεγαλύτερο βαθμό γραμμικής συσχέτισης από το βαθμό γραμμικής συσχέτισης που υποδηλώνουν αρνητικές τιμές του ρ. Ο βαθμός γραμμικής συσχέτισης καθορίζεται από την απόλυτη τιμή του ρ και όχι από το πρόσημο του ρ. Το πρόσημο του ρ καθορίζει το είδος, μόνο, της συσχέτισης (θετική ή αρνητική). Παρέχει, δηλαδή πληροφορία για το αν αύξηση της μιας μεταβλητής αντιστοιχεί σε αύξηση ή σε μείωση της άλλης.

2.5.3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Ο συντελεστής συσχέτισης δεν αποτελεί το μόνο κριτήριο για την εκτίμηση της συμφωνίας δύο μεταβλητών. Τα στατιστικά σφάλματα έρχονται να συμπληρώσουν την εικόνα της συμφωνίας των μεταβλητών αυτών. Μεγάλος θετικός συντελεστής συσχέτισης από τη μια και μικρά στατιστικά σφάλματα από την άλλη φανερώνουν ισχυρή συσχέτιση και συμφωνία μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών. Αντιθέτως, μικρός συντελεστής συσχέτισης και μεγάλα σφάλματα οδηγούν σε πολύ μικρή συμφωνία των μεταβλητών. Παρακάτω αναλύονται οι τύποι σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αξιολόγηση δορυφορικών δεδομένων και ραδιοβολίσεων.

i. Μέσο Σφάλμα (ΜΕ)

Το μέσο σφάλμα ΜΕ (Mean Error) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\boldsymbol{ME = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}(X_i - Y_i)} \qquad (2.8)$$

όπου n το πλήθος των ζευγαριών των μεταβλητών και X_i, Y_i οι τιμές των μεταβλητών. Στην εργασία, η X_i= τιμή δορυφορικού δείκτη και η Y_i= τιμή δείκτη ραδιοβόλισης).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Το μέσο σφάλμα δίνει μία εκτίμηση για τις διαφορές των τιμών μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών αλλά υπάρχει η περίπτωση να εμφανίζεται μηδενικό ενώ οι υπάρχουσες θετικές και αρνητικές διαφορές να αλληλοαναιρούνται.

ii. Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)

Το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE (Mean Absolute Error) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$\boldsymbol{MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}|(X_i - Y_i)|} \qquad (2.9)$$

Το μέσο απόλυτο σφάλμα σε συνδυασμό με το μέσο σφάλμα παρέχει πιο ασφαλή συμπεράσματα για τις διαφορές μεταξύ των μεταβλητών.

iii. Μέσο τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE)

Το μέσο απόλυτο σφάλμα RMSE (Root Mean Square Error) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\boldsymbol{RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}(X_i - Y_i)^2}} \qquad (2.10)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αποτελεί τον πιο διαδεδομένο δείκτη εκτίμησης της συμφωνίας μεταξύ δύο μεταβλητών και παρέχει ασφαλή συμπεράσματα σε συνδυασμό με τους δύο παραπάνω.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2.6 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ

2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι παρατηρήσεις με δορυφόρους ή αλλιώς δορυφορική Τηλεπισκόπηση υπήρξε η πιο εντυπωσιακή εξέλιξη στην ιστορία των μετεωρολογικών μετρήσεων. Ένα μεγάλο βήμα έγινε το 1959, όταν ένας αμερικανικός πύραυλος έστειλε φωτογραφίες νεφικών συστημάτων από ύψος 1.100 km. Η αληθινή όμως επανάσταση στον τομέα αυτό έγινε το 1960, με την τοποθέτηση σε τροχιά του αμερικανικού μετεωρολογικού δορυφόρου TIROS, το όνομα του οποίου προέρχεται από τις λέξεις Television and InfraRed Observation Satellite (δορυφόρος τηλεόρασης και παρατήρησης με υπέρυθρη ακτινοβολία). Ο πρώτος TIROS είχε δύο τηλεοπτικές μηχανές και μπορούσε να καλύψει με την περιστροφή του ένα μικρό μέρος της γήινης επιφάνειας (εικόνα 2.4). Όταν όμως παρόμοιοι δορυφόροι μπήκαν σε τροχιά, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο που κάλυψε και τις πιο απρόσιτες περιοχές.

Το 1964 δοκιμάστηκε ένας πιο εξελιγμένος τύπος, ο Nimbus, που έστελνε στη Γη περίπου 1.000 φωτογραφίες την ημέρα. Σήμερα, υπάρχουν σε τροχιά πολυάριθμοι μετεωρολογικοί δορυφόροι, οι οποίοι στέλνουν συνεχώς πολύτιμες πληροφορίες για τις συνθήκες της ανώτερης ατμόσφαιρας και παρακολουθούν κάθε στιγμή τις θύελλες που ξεσπούν σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη μας. Δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι πολλές ανθρώπινες ζωές σώθηκαν χάρη στην έγκαιρη πληροφόρηση που είχαν οι αρχές από τους δορυφόρους.

Εικόνα 2.4 *Η πρώτη μετεωρολογική εικόνα από το δορυφόρο TIROS 1 τον Απρίλιο του 1960*

Οι μετεωρολογικοί οργανισμοί που ελέγχουν τους δορυφόρους, όπως για παράδειγμα η Eumetsat στην Ευρώπη, δεν παρέχουν μόνο μετεωρολογικές μετρήσεις και παρατηρήσεις στους επιχειρησιακούς μετεωρολόγους. Σε δεύτερο στάδιο, επεξεργάζονται τις πρωταρχικές μετρήσεις και παράγουν ολοκληρωμένα δορυφορικά προϊόντα όπως κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας, υγρασίας στο σύνολο της Τροπόσφαιρας, εκτίμηση βροχόπτωσης, αναγνώριση τοπολογίας, είδη εδαφών κ.λ.π. Αναπτύχθηκαν επιπλέον και δορυφορικά προϊόντα που εκτιμούν το βαθμό αστάθειας της ατμόσφαιρας με την εφαρμογή εξειδικευμένων αλγορίθμων οι οποίοι μεταφράζουν μαθηματικά τις πρωταρχικές μετρήσεις των οργάνων των δορυφόρων και υπολογίζουν γνωστούς δείκτες αστάθειας (παράγραφος 2.3).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η τεχνολογία των μετεωρολογικών δορυφόρων σχετίζεται με το είδος της αποστολή τους, τα μετρητικά τους όργανα, τη συχνότητα μετρήσεων, το υψόμετρο της τροχιάς τους, τη διακριτική τους ικανότητα κ.α. Μερικές από τις βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία τους παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Η καθημερινή ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών των μετεωρολογικών δορυφόρων συμπληρώνει την κατανόηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας και αποτελούν χρησιμότατο εργαλείο όχι μόνο στους επιχειρησιακούς μετεωρολόγους αλλά και στους κλιματολόγους οι οποίοι μελετούν τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

2.6.2. ΕΙΔΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μετεωρολογικών δορυφόρων με κριτήριο το ύψος της τροχιάς τους (Φείδας και Καρτάλης, 2003). Το υψόμετρο των δορυφόρων κυμαίνεται συνήθως από 800 ως 1500 km ενώ υπάρχουν περιπτώσεις όπου το υψόμετρο είναι πολύ μεγαλύτερο και φτάνει τα 36.000 km. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς και στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι δορυφόροι υψηλής τροχιάς ή γεωστάσιμοι.

Οι **δορυφόροι χαμηλής τροχιάς** ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των τροχιών τους χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Ισημερινής τροχιάς (equatorial – orbiting satellites)** των οποίων η τροχιά βρίσκεται μέσα στο ισημερινό επίπεδο.
- **Πολικής τροχιάς (polar – orbiting satellites)** των οποίων η τροχιά βρίσκεται σε επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της γης, δηλαδή η απόκλιση της τροχιάς τους είναι 90°. Οι δορυφόροι αυτοί κινούνται από τον ένα πόλο της γης στο άλλο και κάθε διαδοχική τροχιά του διέρχεται από τον ισημερινό σε διαφορετική ηλιακή ώρα.
- **Πλάγιας ή σχεδόν πολικής τροχιάς (oblique – orbiting or near-polar orbit satellites)** των οποίων η απόκλιση της τροχιάς είναι διαφορετική των 90°.

Οι δορυφόροι υψηλής τροχιάς ή γεωστάσιμοι περιστρέφονται γύρω από τη γη σε μεγάλο ύψος (περίπου 36.000 km) στο επίπεδο του ισημερινού της γης. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι ταυτόσημη με αυτή του πλανήτη με αποτέλεσμα να αντικρίζει μονίμως το ίδιο παράθυρο του γήινου δίσκου. Συνεπώς, ο δορυφόρος εμφανίζεται στάσιμος πάνω από μία περιοχή και για αυτό το λόγο ονομάζεται γεωστάσιμος. Λόγω του μεγάλου ύψους της περιστροφής του πάνω από την επιφάνεια της γης, περιορίζεται σημαντικά η χωρική διακριτική ικανότητα των οργάνων μέτρησης που βρίσκονται επάνω σε αυτούς. Οι γεωστάσιμοι δορυφόροι χρησιμοποιούνται κατεξοχήν σε μετεωρολογικές εφαρμογές καθώς και στην παρακολούθηση της χρονικής

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

εξέλιξης μετεωρολογικών φαινομένων αφού είναι σε θέση να παρέχουν πληροφορίες κάθε 15 λεπτά της ώρας.

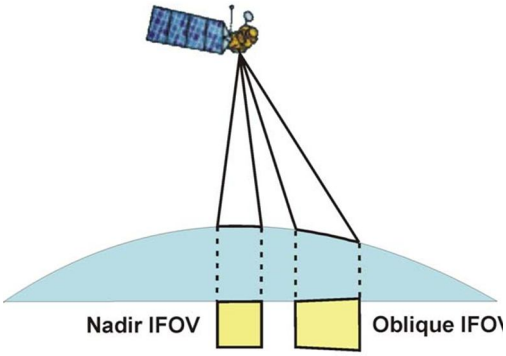
2.6.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Οι δορυφορικοί αισθητήρες είναι τα όργανα που καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από την επιφάνεια της γης και τα νέφη. Βασικό χαρακτηριστικό των δορυφορικών αισθητήρων ή αλλιώς απεικονιστών είναι η **διακριτική ικανότητά τους** (Φείδας - Καρτάλης, 2003) η οποία διακρίνεται σε:

- **Χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution).** Είναι η διακριτική εκείνη ικανότητα του απεικονιστή να ξεχωρίζει δύο ξεχωριστά αντικείμενα που βρίσκονται πολύ κοντά και χαρακτηρίζεται από το ελάχιστο εκείνο μέγεθος που έχει ένα σώμα για να μπορεί να ανιχνευτεί. Ένα άλλο μέγεθος που έχει σημασία είναι το στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης (Instantaneous Field of View, IFOV) που εκφράζει τη στερεά γωνία με την οποία ο αισθητήρας «βλέπει» και καθορίζει και την περιοχή της γήινης επιφάνειας που κατοπτρεύεται από συγκεκριμένο ύψος λήψης, σε μία δεδομένη στιγμή (εικόνα 2.5). Η περιοχή της γης που αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πεδίο κατόπτευσης ονομάζεται **κελί ανάλυσης (resolution cell)** και είναι αυτό που καθορίζει και τη χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα.

  Η απόλυτη τιμή της χωρικής διακριτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή εξαρτάται από το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου αλλά και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Οι γεωστατικοί δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλο ύψος, ενώ καταγράφουν μεγάλες περιοχές, έχουν μικρή διακριτική ικανότητα σε αντίθεση με τους αντίστοιχους πολικής τροχιάς που έχουν κατά κανόνα καλύτερη διακριτική ικανότητα λόγω μικρού ύψους τροχιάς.

  Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα εξαρτάται και από το μήκος κύματος της προσλαμβάνουσας ακτινοβολίας. Είναι γνωστό ότι η ενέργεια ακτινοβολίας μειώνεται με την αύξηση του μήκους κύματος, οπότε οι αισθητήρες που καταγράφουν ακτινοβολία στο θερμικό υπέρυθρο παρουσιάζουν μικρότερη διακριτική ικανότητα από τους αισθητήρες καταγραφής στο ορατό λόγω μικρότερου μήκους κύματος του τελευταίου.



Εικόνα 2.5 *Στερεά γωνία κατόπτευσης δορυφόρου (IFOV) (ναδίρ και πλάγια)* https://www.eeb.ucla.edu/test/faculty/nezlin/SatellitesAndSensors.htm

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

- **Φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution)** η οποία έχει να κάνει με το εύρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που καταγράφει ένας πολυφασματικός ανιχνευτής καθώς και με το πλήθος των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η φασματική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή τόσο μικρότερο το εύρος της φασματική περιοχής που καταγράφει. Το εύρος αυτό αντικατοπτρίζει μία ζώνη καταγραφής και όσο μικρότερες οι ζώνες καταγραφής, τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός ζωνών που καταγράφονται και παρέχουν περισσότερες πληροφορίες.

  Η φασματική διακριτική ικανότητα βοηθά στον καλύτερο εντοπισμό του είδους των επιφανειών. Κάθε αντικείμενο, ανάλογα με το είδος του, ακτινοβολεί σε μία συγκεκριμένη φασματική περιοχή που ονομάζεται και φασματική υπογραφή. Ένας ανιχνευτής που καταγράφει σε μεγάλο πλήθος φασματικών ζωνών είναι σε θέση να αναγνωρίσει περισσότερα αντικείμενα ή επιφάνειες.

- **Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometric Resolution)** ορίζεται ως η ευαισθησία του ανιχνευτή να ανιχνεύει διαφορές στην ισχύ του εισερχόμενου σήματος δηλαδή διαφορές στην μετρούμενη ισχύ της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης. Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή συνδέεται άμεσα με τη πραγματική πληροφορία που εμπεριέχεται στα δορυφορικά δεδομένα. Οποιαδήποτε μεταβολή στη ραδιομετρική ισχύ σχετίζεται άμεσα με τη δυνατότητα ανίχνευσης των όποιων μεταβολών στα φυσικά χαρακτηριστικά των επιφανειών.

- **Χρονική διακριτική ικανότητα (Temporal Resolution)** η οποία σχετίζεται με τη χρονική συχνότητα λήψης των δορυφορικών εικόνων για την ίδια περιοχή. Η χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τη τροχιά του δορυφόρου και κυμαίνεται από τα 15΄ της ώρας για τον MSG (γεωστατικός δορυφόρος) έως και μερικές εβδομάδες για τους δορυφόρους πολικής τροχιάς (π.χ. 18 ημέρες για τον Landsat-5). Η υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα είναι σημαντική για πλήθος εφαρμογών που εξελίσσονται γρήγορα (πυρκαγιών, πλημμύρες, καταιγίδες κ.λ.π.). Στην περίπτωση μελέτης χρήσης ή κάλυψης γης που αλλάζουν με μικρή χρονική συχνότητα, η υψηλή χρονική διακριτική ικανότητα παίζει δευτερεύον ρόλο.

2.6.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΝΕΦΩΝ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

i. Ερμηνεία εικόνων στο κανάλι του ορατού (VIS)

Οι αισθητήρες του ορατού (VIS) στους μετεωρολογικούς δορυφόρους καταγράφουν ακτινοβολία μήκους κύματος από 0.32 ως 0.72 μm η οποία

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ανταναακλάται από τις κορυφές των νεφών, την επιφάνεια της γης και σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα. Η λαμπρότητα θεωρείται ότι παρέχει το μέτρο της λευκαύγειας των περιοχών. Περιοχές με μεγάλη λευκαύγεια αποτυπώνονται στις εικόνες του ορατού με ανοιχτές αποχρώσεις του γκρι ενώ περιοχές με μικρή λευκαύγεια αποτυπώνονται με σκούρες αποχρώσεις.

α. Πάχος του νέφους

Η λαμπρότητα των νεφών επηρεάζεται από το πάχος τους. Για παράδειγμα, μετωπικές νεφώσεις με μεγάλο πάχος εμφανίζονται στις εικόνες VIS με έντονο λευκό χρώμα. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν τα stratocumulus που ενώ δεν έχουν μεγάλο πάχος, λόγω των μικρών υδροσταγονίδια τους παρουσιάζουν μεγάλη ανακλαστικότητα και έντονο λευκό χρώμα.

β. Μέγεθος υδροσταγονιδίων και περιεχόμενο του νέφους σε νερό

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των νεφών, όπως μέγεθος και πλήθος υδροσταγονιδίων καθώς και το περιεχόμενό τους σε νερό επηρεάζουν σημαντικά την ανακλαστικότητα που παρουσιάζουν στην εικόνα του ορατού. Για παράδειγμα, νέφη που αποτελούνται από μικρά υδροσταγονίδια (έως 5 μm) που το περιεχόμενό τους είναι μεγάλο σε νερό, η ανακλαστικότητα τους είναι ιδιαίτερα αυξημένη για πάχος νέφους ως 200 m, ενώ για μεγαλύτερο πάχος η αύξηση είναι μικρή. Για νέφη που αποτελούνται από μεγαλύτερες σταγόνες, η εξάρτηση της ανακλαστικότητας από το πάχος είναι μεγαλύτερη από ότι η εξάρτησή του από το περιεχόμενο σε νερό.

γ. Σύσταση του νέφους

Γενικά, τα νέφη που αποτελούνται από υδροσταγονίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερη λαμπρότητα από εκείνα που περιέχουν παγοκρυστάλλους για τις ίδιες συνθήκες φωτισμού.

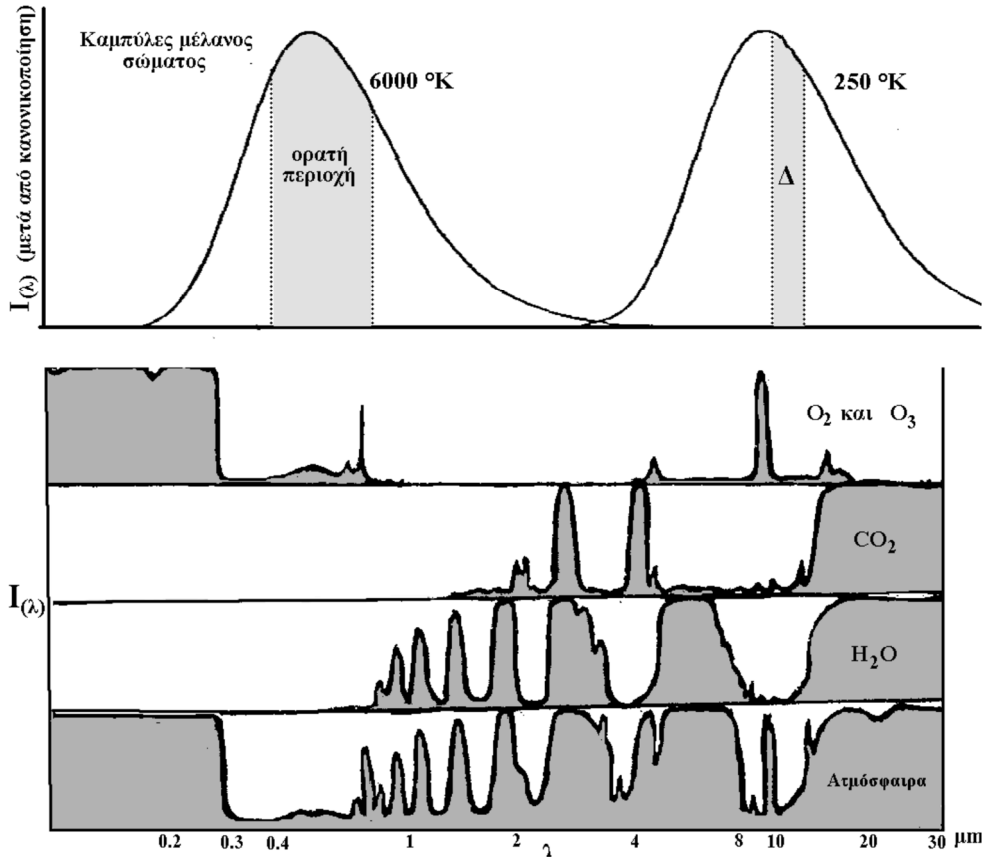
Όσο αφορά στις γήινες επιφάνειες, η λαμπρότητα του εδάφους στο ορατό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το είδος της βλάστησης, η σύνθεση του εδάφους και η χιονοκάλυψη. Σε γενικές γραμμές, εδάφη με αλκαλική σύνθεση, ερημικές ή ημι-ερημικές περιοχές εμφανίζουν μεγάλη ανακλαστικότητα ενώ περιοχές με πυκνή βλάστηση εμφανίζονται σκοτεινές. Το χιόνι εμφανίζεται από λευκό έως ελαφρώς γκρίζο ανάλογα με την ηλικία του και τις συνθήκες φωτισμού. Τέλος, θάλασσες και λίμνες αποτυπώνονται σκοτεινά στις εικόνες VIS.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ii. Ερμηνεία εικόνων στο κανάλι του υπέρυθρου (IR)

Οι αισθητήρες στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου καταγράφουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία της πηγής συνδέεται άμεσα με το ποσό της υπέρυθρης ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα (νόμος Steffan – Boltzmann). Γενικά, οι εικόνες στο υπέρυθρο κανάλι εμφανίζουν με ανοιχτό χρώμα τις ψυχρές επιφάνειες και με σκούρες αποχρώσεις τις θερμές επιφάνειες.

Οι μετρήσεις της ακτινοβολίας των νεφών πραγματοποιούνται στη περιοχή του φάσματος που καλείται ατμοσφαιρικό παράθυρο όπου η απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας είναι ελάχιστη. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των γήινων επιφανειών και της κορυφής των νεφών χρησιμοποιούνται τα ατμοσφαιρικά παράθυρα που εκτείνονται στις περιοχές με κέντρα τα 4 και 11 μm (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 *Φάσμα εκπομπής και απορρόφησης της ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας. Η σκιασμένη περιοχή Δ χρησιμοποιείται κυρίως από τη δορυφορική τηλεπισκόπιση (Φείδας – Καρτάλης, 2003)*

Σε γενικές γραμμές ισχύουν για τα νέφη τα παρακάτω:

- **Τα μεσαία και υψηλά νέφη** εντοπίζονται ευκολότερα με τη βοήθεια των εικόνων στο IR καθώς εμφανίζονται με αποχρώσεις γκρίζου ως λευκό. Η

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

αντίθεση μεταξύ των κορυφών των νεφών που εμφανίζονται ανοιχτόχρωμα σε σχέση με τις σκουρόχρωμες επιφάνειες της γης βοηθά στον ευκολότερο εντοπισμό τους. Εξαίρεση αυτού του κανόνα αποτελούν οι πολικές περιοχές.

- **Τα χαμηλά νέφη και κυρίως η ομίχλη** εντοπίζονται δύσκολα στις εικόνες IR καθώς η θερμοκρασία τους βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με αυτή της επιφανείας της γης. Για το λόγο αυτό, οι αποχρώσεις των χαμηλών νεφών είναι αποχρώσεις του γκρίζου και είναι παρόμοιες με αυτές της ξηράς.
- **Τα νέφη Cirrus (υψηλή νέφωση)** στις εικόνες IR είναι αρκετά δυσδιάκριτα σε σύγκριση με τα μεσαία νέφη λόγω των χαρακτηριστικών της διαπερατότητας των παγοκρυστάλλων που τα αποτελούν. Τα νέφη Cirrus εμφανίζονται ημιδιαφανή στην υπέρυθρη ακτινοβολία του ατμοσφαιρικού παραθύρου με κέντρο 11.5 μm και η διαπερατότητα τους σχετίζεται με το πάχος του νέφους και τη συγκέντρωση παγοκρυστάλλων σε αυτό. Τα λεπτά νέφη Cirrus είναι περισσότερο ημιδιαφανή από τα αντίστοιχα μεγαλύτερου πάχους.

2.6.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΙΣ

Με τους δορυφόρους τελευταίας τεχνολογίας είναι πλέον εφικτή η εκτέλεση ραδιοβολίσεων (soundings) στην ατμόσφαιρα, δηλαδή η μέτρηση και εξαγωγή κατακόρυφων κατατομών της θερμοκρασίας των διαφόρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, είναι σε θέση να εξαχθούν και κατακόρυφες κατατομές των συγκεντρώσεων διαφόρων ενώσεων ιδιαίτερα σημαντικών για τα μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως οι υδρατμοί και το όζον. Για τη διενέργεια ραδιοβολίσεων, χρησιμοποιούνται παθητικοί ανιχνευτές από τους δορυφόρους. Παθητικοί είναι εκείνοι οι ανιχνευτές που μετρούν είτε την εκπεμπόμενη είτε τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία σε διάφορα φασματικά κανάλια. Υπάρχουν δύο είδη τεχνικών ραδιοβόλισης με παθητικούς ανιχνευτές:

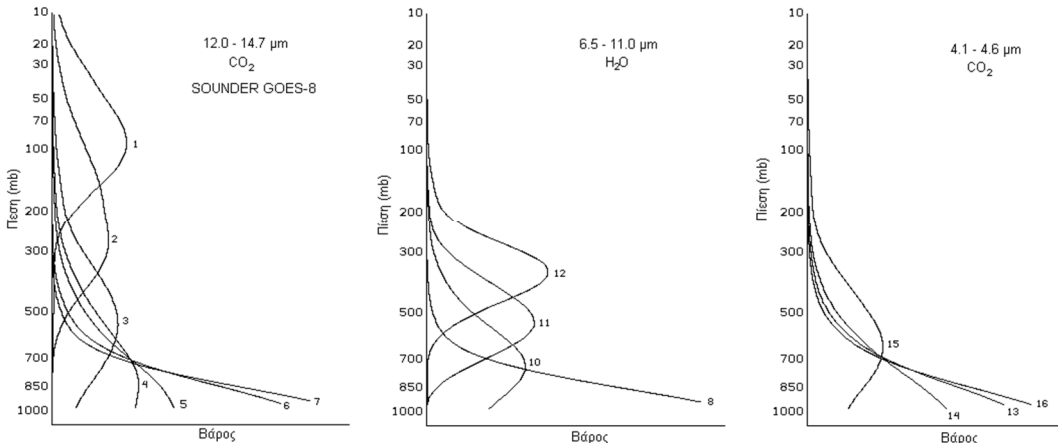
- **Συστήματα** που βλέπουν σε κατακόρυφη διεύθυνση στην επιφάνεια της γης και καταγράφουν την ακτινοβολία **(nadir instruments)** που εκπέμπεται και σκεδάζεται από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγάλης χωρικής ανάλυσης (που αντιστοιχεί σε μικρό pixel) ενώ στη κατακόρυφη διεύθυνση μετρά με μικρή χωρική ανάλυση (λίγα ατμοσφαιρικά στρώματα)
- **Συστήματα** που καταγράφουν την ακτινοβολία που προέρχεται μόνο από στρώματα της ατμόσφαιρας **(limb systems)** βλέποντας σε οριζόντια διεύθυνση και σε διάφορα ύψη. Τέτοιου είδους μετρήσεις επιτρέπουν καταγραφές με υψηλή κατακόρυφη ανάλυση (της τάξης των 10 km) αλλά πολύ μικρή οριζόντια ανάλυση (της τάξης των 300 km).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Όπως έχει αναφερθεί, η καταγραφόμενη από τον αισθητήρα ακτινοβολία προέρχεται από δύο πηγές, την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία που επικρατεί σε κάθε στρώμα της ατμόσφαιρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία της συγκέντρωσης των αερίων (trace gasses) που βρίσκονται στα διάφορα ύψη. Η δημιουργία του προφίλ των θερμοκρασιών των ατμοσφαιρικών στρωμάτων και της συγκέντρωσης των αερίων στα στρώματα αυτά βασίζεται στη μέτρηση της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας στις διάφορες φασματικές περιοχές.

i. Εξαγωγή κατακόρυφων κατατομών αερίων της ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία σε κάποια φασματική περιοχή προέρχεται κυρίως από συγκεκριμένο στρώμα της ατμόσφαιρας και η έντασή της εξαρτάται από τη συγκέντρωση του αερίου που την απορροφά και τη θερμοκρασία αυτού. Αυτή είναι η βασική αρχή με την οποία οι αισθητήρες είναι σε θέση να μετρήσουν την ποσότητα συγκεκριμένων αερίων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Για τον βέλτιστο υπολογισμό των συγκεντρώσεων αυτών χρησιμοποιείται η λεγόμενη συνάρτηση βαρύτητας η οποία υποδεικνύει κάθε φορά το στρώμα εκείνο της ατμόσφαιρας που συνεισφέρει περισσότερο στην καταγραφόμενη ακτινοβολία (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 *Οι συναρτήσεις βαρύτητας για τα κανάλια του Sounder του δορυφόρου GOES (Φείδας – Καρτάλης, 2003)*

Για παράδειγμα, η ακτινοβολία με μήκος κύματος 7.3 μm προέρχεται από τους υδρατμούς (μεσαίο σχήμα της εικόνα 2.5) από τα στρώματα 500-400, 600-500 και 850-700 με συντελεστές βαρύτητας 12, 11, και 10 αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα υδρατμών στα διάφορα στρώματα.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ii. Εξαγωγή κατακόρυφων κατατομών της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας

Για να μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία των διαφόρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας, θα πρέπει να είναι γνωστή η κατακόρυφη κατατομή της συγκέντρωσης ενός αερίου ώστε να εξαχθεί η κατακόρυφη κατατομή της θερμοκρασίας από την ακτινοβολία που καταγράφει ο δορυφορικός αισθητήρας στις διάφορες φασματικές περιοχές. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο αέρια με γνωστές ζώνες απορρόφησης, το CO_2 (με κέντρο τα 15 μm και 4.3 μm) και του O_2 του οποίου η συγκέντρωση στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας θεωρείται γνωστή και σταθερή.

iii. Κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασία και της υγρασίας

Αρκετοί δορυφόροι καταγράφουν τη θερμοκρασία καθ' ύψος, μέσω των αισθητήρων τους (sounders), μετρώντας είτε την υπέρυθρη είτε τη μικροκυματική ακτινοβολία που εκπέμπει η ατμόσφαιρα. Τέτοιοι αισθητήρες είναι ο TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) των δορυφόρων NOAA της NASA , το HIRS (High Resolution Infrared Sounder) με 20 κανάλια στο υπέρυθρο, πολύ καλή οριζόντια ανάλυση (20 km) αλλά μικρή χωρική κατακόρυφη ανάλυση και το MSU (Microwave Sounding Unit) με οριζόντια ανάλυση 105 km το οποίο έχει τη δυνατότητα μέτρησης παρουσίας νεφών καταγράφοντας μικροκυματική ακτινοβολία. Τα TOVS παράγουν το προφίλ της κατακόρυφης κατατομής της θερμοκρασίας σε μεγάλο εύρος ύψους, από λίγα χιλιόμετρα ως τη κορυφή της ατμόσφαιρας με ακρίβεια 2-3 ^{o}C.

Οι αισθητήρες HIRS του NOAA και το SOUNDER του GOES έχουν τη δυνατότητα καταγραφής της κατακόρυφης κατατομής της υγρασίας με τις ίδιες χωρικές αναλύσεις.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι με αντίστοιχη μεθοδολογία, οι δορυφορικές μετρήσεις έχουν τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης διαφόρων ατμοσφαιρικών αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου, τα οξείδια του θείου, το όζον, το οξυγόνο κ.α.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία είναι δορυφορικής προέλευσης αλλά και ραδιοβολίσεις από τα τρία μεγάλα αεροδρόμια της Ελλάδας, τη Θεσσαλονίκη, την Αθήνα και το Ηράκλειο (Πανεπιστήμιο Wyoming). Τα δορυφορικά στοιχεία ελήφθησαν από το μετεωρολογικό πρόγραμμα MODIS (or Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) της υπηρεσίας της NASA (http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html), το δορυφορικό προϊόν GII (Global Instability Index, http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/ html/MSG/PRODUCTS/GII/) αλλά και εικόνες από το ορατό και υπέρυθρο φάσμα του MSG-1 ή Meteosat-8 (Meteosat Second Generation) της ευρωπαϊκής υπηρεσίας Eumetsat (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites).

Η διαστημική υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, η Nasa, έχει αναπτύξει εκτός των άλλων και προγράμματα δορυφορικής μετεωρολογίας παρέχοντας δεδομένα μέσω των δορυφόρων της σε ερευνητές σε όλο τον κόσμο. Το πρόγραμμα MODIS αποτελείται από δύο δορυφόρους πολικής τροχιάς, τον Terra και τον Aqua, οι οποίοι σαρώνουν καθημερινά το πλανήτη δύο φορές την ημέρα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που διατίθενται μέσω του ατμοσφαιρικού προϊόντος γνωστό ως συλλογή MODIS αναπτύσσονται με βάση ειδικούς αλγόριθμους και ανανεώνονται ανάλογα με τις ερευνητικές εξελίξεις. Στην Ελλάδα, οι δορυφόροι του προγράμματος MODIS διέρχονται από τον εναέριο χώρο περίπου δύο ώρες μετά τα μεσάνυχτα και νωρίς το μεσημέρι τοπική ώρα.

Η Eumetsat είναι η ευρωπαϊκή υπηρεσία η οποία είναι υπεύθυνη για τους μετεωρολογικούς δορυφόρους και λειτουργεί και σε επιχειρησιακή βάση. Αποστολή της είναι να παρέχει στους ερευνητές των μελών - Κρατών δορυφορικά δεδομένα, προϊόντα και εικόνες σε 24ωρη βάση 365 μέρες το χρόνο. Οι δορυφόροι της καταγράφουν συνεχώς την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς αλλά και την επιφάνεια της γης παρέχοντας σημαντικά στοιχεία για την αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος. Η Eumetsat είναι ένας διεθνής οργανισμός με έτος ίδρυσης το 1986 και έχει θέσει σε τροχιά μετά το 2005 δύο δορυφόρους, τον Meteosat 8 και εφεδρικά τον Meteosat 9 ενώ προετοιμάζεται να θέσει σε τροχιά τον Meteosat τρίτης γενιάς έως τα τέλη του 2030.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Όπως κάθε κλάδος της επιστήμης αναπτύσσεται καθημερινά, έτσι και τα δορυφορικά δεδομένα εξελίσσονται μέρα με τη μέρα. Η εξέλιξη δεν έχει να κάνει μόνο με την τεχνολογία μετρήσεων των δορυφόρων δηλαδή των νέων μετρητικών οργάνων τους αλλά και με την ανάπτυξη των απαιτούμενων αλγορίθμων αλλά και προϊόντων που μετατρέπουν τις πρωταρχικές μετρήσεις των οργάνων σε μετεωρολογικές παραμέτρους.

Οι μετρήσεις και τα δεδομένα της ατμόσφαιρας από τους δορυφόρους είναι πολύτιμα για τη πρόγνωση του καιρού ενώ τα παραγόμενα αρχεία μετρήσεων βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση τόσο των διαδικασιών και των φαινομένων που συμβάλλουν στις κλιματικές αλλαγές όσο και στο μέγεθος των αλλαγών αυτών. Όλες οι μετρήσεις αλλά και η σύνθεση αυτών παίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση του κλίματος και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών κινδύνων όπως η μείωση του όζοντος στην στρατόσφαιρα, η μόλυνση της ατμόσφαιρας, η ανάπτυξη ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων.

Οι καταιγίδες αποτελούν σε αρκετές περιπτώσεις ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα και η παρατήρησή τους από τους δορυφόρους παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον. Ο έγκαιρος εντοπισμός των καταιγίδων και η βραχυπρόθεσμη πρόγνωσή τους αποτελεί ένα ζητούμενο για πολλές περιοχές του κόσμου οι οποίες πλήττονται από ακραία φαινόμενα. Υπάρχει λοιπόν μεγάλο ενδιαφέρον για ανάπτυξη αξιόπιστων δορυφορικών προϊόντων που θα βοηθήσουν προς την κατεύθυνση αυτή.

Για το σκοπό αυτό, εκτός των άλλων, το πρόγραμμα MODISπαρέχει καθημερινά ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων (θερμοκρασία, υγρασία, δείκτες αστάθειας, υετίσιμο ύδωρ κλπ) που είναι διαθέσιμο σε υψηλή χωρική ανάλυση δύο φορές την ημέρα. Επίσης, ο MSG της Eumetsat, ως γεωστατικός μετεωρολογικός δορυφόρος, παρέχει μετρήσεις και προϊόντα διαθέσιμα κάθε 15 λεπτά της ώρας σε χαμηλότερη χωρική ανάλυση σε σχέση με το πρόγραμμα MODIS.

3.1.2 ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΙΣ

i. Γενικά

Οι ραδιοβολίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη προέρχονται από τα τρία μεγαλύτερα αεροδρόμια της χώρας, αυτά της Θεσσαλονίκης, της Αθήνας και του Ηρακλείου. Οι μετρήσεις αυτές είναι χρησιμότατες στη πρόγνωση καιρού αφού είναι ουσιαστικά μία τομή της ατμόσφαιρας καθ' ύψος και παρέχουν πληροφορίες θερμοκρασίας, υγρασίας και ανέμου για τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας. Μέσω των ραδιοβολίσεων και με τις διαθέσιμες

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

μετρήσεις υπολογίζονται και οι δείκτες αστάθειας στην περιοχή όπου πραγματοποιούνται.

Οι ραδιοβολίσεις πραγματοποιούνται καθημερινά από συγκεκριμένα αεροδρόμια σε όλο τον κόσμο ανά τακτά χρονικά διαστήματα (συνήθως 00:00 και 12:00 UTC) και αποτελούν μέτρο σύγκρισης όσον αφορά στην αξιοπιστία των δορυφορικών μετρήσεων. Η σύγκριση των δεικτών αστάθειας των ραδιοβολήσεων από τη μια και των αντίστοιχων δεικτών των δορυφορικών προϊόντων από την άλλη για μία συγκεκριμένη περιοχή και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα βοηθά θετικά στην αξιολόγηση των διαθέσιμων δορυφορικών ατμοσφαιρικών προϊόντων.

ii. Δεδομένα και περίοδος αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των δορυφορικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δεδομένα επίγειων μετρήσεων (ραδιοβολίσεις) για την ίδιες περιοχές και τις ίδιες χρονικές περίοδοι (Retha, 2009).

Η χρονική περίοδος εξέτασης των δεδομένων τόσο του MODIS όσο και του GII με τα αντίστοιχα των διαθέσιμων ραδιοβολίσεων είναι ο Ιούνιος του 2009 στον ελλαδικό χώρο. Το διάστημα αυτό επιλέχθηκε διότι 2 από τις 4 περιπτώσεις ημερών έντονης αστάθειας που εξετάζονται στη μελέτη αυτή βρίσκονται εντός του μήνα αυτού. Καταγράφτηκαν, λοιπόν, οι διαθέσιμες μετρήσεις των ραδιοβολίσεων αναφορικά με τους δείκτες αστάθειας για τον Ιούνιο του 2009 για τα 3 αεροδρόμια (πίνακας 3.1). Η επιλογή των δεκτών αστάθειας που αξιολογήθηκαν με τη βοήθεια των ραδιοβολίσεων έγινε σε σχέση με τους διαθέσιμους αντίστοιχους δείκτες των δορυφόρων. Για τον MODIS οι εξεταζόμενοι δείκτες είναι ο Total Totals (TT), ο Lifted Index (LI) και ο K-Index (KI), ενώ για τον GII είναι ο K-Index και ο Lifted Index.

Κάθε δείκτης αστάθειας των δορυφορικών προϊόντων αξιολογήθηκε σε αντιπαραβολή με τον αντίστοιχο των ραδιοβολίσεων με τη βοήθεια στατιστικής επεξεργασίας. Στο πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών αστάθειας που προέρχονται από τις ραδιοβολίσεις των 3 μεγάλων αεροδρομίων της χώρας για το μήνα Ιούνιο του 2009.

Πίνακας 3.1 *Ραδιοβολίσεις Ιουνίου 2009 (πηγή: University of Wyoming, Department of atmospheric Science, http://weather.uwyo.edu/upperair/ sounding.html)*

ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΙΣ												
ΙΟΥΝΙΟΣ 2009		ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ				ΑΘΗΝΑ				ΗΡΑΚΛΕΙΟ		
ΜΕΡΑ	ΩΡΑ	LI	KI	TT		LI	KI	TT		LI	KI	TT
1	00UTC	4.43	25.20	42.20		3.56	19.10	41.20				
	12UTC	1.47	30.00	46.40						5.11	-3.50	20.60

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2	00UTC	-1.25	32.00	53.60	2.69	29.30	50.20	7.27	24.10	44.20
	12UTC	-2.54	20.70	51.00				0.58	22.30	46.60
3	00UTC	-2.68	23.20	54.50	-2.12	-21.70	25.60	1.78	27.70	47.00
	12UTC	-2.54	20.70	51.00				1.01	-0.90	46.40
4	00UTC	0.00	31.60	50.00	0.49	22.70	48.20	3.11	-1.30	43.00
	12UTC	3.83	24.30	47.00				2.04	8.00	48.10
5	00UTC	1.82	29.10	50.60	0.51	25.00	49.70	-0.11	-10.90	38.40
	12UTC	-0.45	17.30	42.40				0.79	-3.10	43.80
6	00UTC	2.66	15.30	46.60	3.40	14.30	43.00	3.90	-12.50	37.60
	12UTC	-0.01	13.70	36.40				6.51	-21.70	36.00
7	00UTC	-0.27	26.90	51.00	3.03	15.30	43.00	4.29	4.90	35.20
	12UTC	-3.30	15.90	42.80				5.27	9.30	34.80
8	00UTC	2.45	22.70	47.20	3.19	19.90	48.60	4.36	16.70	45.40
	12UTC	-4.05	19.10	48.80				3.13	13.50	44.80
9	00UTC	-0.16	29.70	50.40	-0.01	24.70	48.80	6.33	12.30	39.60
	12UTC							-0.79	14.50	43.20
10	00UTC	-0.03	27.30	44.20	1.52	21.90	44.80	2.04	15.50	42.00
	12UTC	-1.74	7.30	50.20				1.76	17.50	42.60
11	00UTC	1.31	31.70	55.00	1.02	19.10	50.00	0.43	10.70	42.80
	12UTC	-3.14	17.30	45.40				2.89	-20.30	24.40
12	00UTC	-2.19	35.40	48.20	-0.43	22.50	47.00	1.74	17.90	48.00
	12UTC	1.04	27.70	48.60				1.78	13.10	42.00
13	00UTC	7.66	15.30	39.00	2.41	25.30	45.20	1.38	7.30	41.20
	12UTC	2.28	24.80	41.80				-1.04	12.30	44.80
14	00UTC	4.32	24.40	40.20	9.74	23.90	38.60	1.96	14.30	42.80
	12UTC	9.38	-11.90	33.80				3.62	-7.90	31.40
15	00UTC	3.43	-2.90	39.00	10.07	7.90	35.40			
	12UTC	7.08	-0.10	38.60				4.86	-22.10	29.00
16	00UTC	10.70	12.90	36.60	10.62	-5.90	28.20	5.44	-15.70	30.40
	12UTC							5.24	-2.90	32.80
17	00UTC	4.46	18.30	44.00	9.71	16.70	35.80	7.75	-6.70	30.40
	12UTC	0.92	21.70	46.20				5.24	10.70	36.00
18	00UTC				1.02	28.90	48.00	2.87	22.30	47.00
	12UTC	-1.29	33.30	49.20				-0.22	25.70	47.20
19	00UTC				3.46	24.50	49.00	-2.85	15.70	48.20
	12UTC	4.06	24.50	41.60				5.35	-14.70	17.40
20	00UTC	4.10	30.30	47.20				2.85	-2.90	32.00
	12UTC	-1.47	32.50	52.00				8.80	17.30	42.00
21	00UTC							5.88	27.90	46.60
	12UTC							1.09	24.30	44.40
22	00UTC	-1.74	33.00	49.80	-3.89	26.70	49.00	3.03	25.30	46.60
	12UTC							-0.87	31.70	56.40
23	00UTC	2.59	30.20	46.40	-1.34	6.70	44.60	-0.85	28.10	48.20
	12UTC	1.92	28.10	47.60				-2.40	26.10	46.20
24	00UTC	-2.88	31.00	48.40				-2.69	20.50	44.40
	12UTC	0.51	31.80	49.90						
25	00UTC	0.17	20.10	46.60	0.11	28.80	48.20	1.44	25.30	42.20
	12UTC	1.94	26.10	45.40						
26	00UTC	-1.29	28.80	48.80	2.46	27.90	43.80	0.59	13.50	46.60
	12UTC									
27	00UTC	1.88	31.10	47.00	0.90	28.60	44.60	0.48	22.50	44.40
	12UTC									

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

28	00UTC 12UTC	-0.83	33.30	48.30				-3.36	25.90	42.40
29	00UTC 12UTC	-2.17	28.20	46.20				-2.79	19.50	49.20
30	00UTC 12UTC	0.85	30.80	46.60		0.48	23.70	46.20	-4.36	20.50	46.60

Στα δεδομένα του πίνακα 3.1 υπάρχουν κάποια κενά διότι δεν είναι διαθέσιμες όλες οι μετρήσεις των ραδιοβολίσεων για τα τρία αεροδρόμια. Η αξιολόγηση βασίστηκε στις διαθέσιμες μετρήσεις.

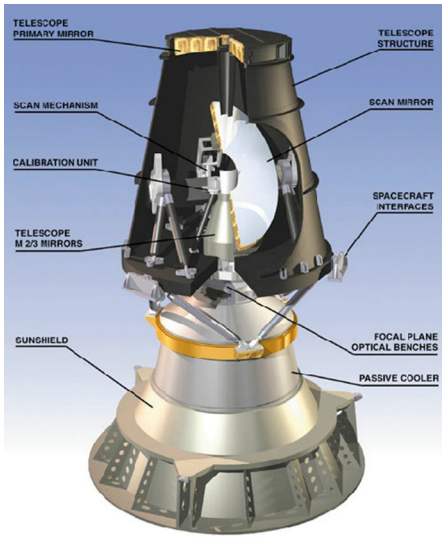
3.1.3 ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΑΤΟΥ ΚΑΙ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ MSG

i. Γενικά

Ο δορυφόρος MSG (Second Generation Satellite) είναι εξοπλισμένος με ένα ενισχυμένο σύστημα παρακολούθησης της γήινης σφαίρας. Είναι σχεδιασμένος ώστε να παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα για την αριθμητική πρόγνωση του καιρού, την παρακολούθηση των τρεχουσών μετεωρολογικών συνθηκών, την αλλαγή του κλίματος αλλά και για άλλα επιστημονικά πεδία.

Ο δορυφόρος MSG-1 ή Metesat 8 παρέχει δεδομένα από τον Αύγουστο του 2002 ενώ από τον Δεκέμβριο του 2005 τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος MSG-2 ή Meteosat 9 για την καλύτερη υποστήριξη του δορυφορικού προγράμματος και ως εφεδρεία σε περίπτωση βλάβης του Meteosat 8.

Το κύριο όργανο παρακολούθησης που διαθέτουν οι αυτοί οι δορυφόροι δεύτερης γενιάς είναι ο απεικονιστής με την ονομασία SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra– red Imager, Εικόνα 3.1). Το συγκεκριμένο όργανο μέτρησης παρακολουθεί τη γη σε 12 διαφορετικές φασματικές περιοχές ενώ καταγράφει πλήρως το γήινο δίσκο σε 15 λεπτά της ώρας,γεγονός πολύ σημαντικό για τη παρακολούθηση και εξέλιξη των μετεωρολογικών φαινομένων που εξελίσσονται γρήγορα χρονικά.



Εικόνα 3.1 *Ο απεικονιστής SEVIRI (http:/ /www.eumetsat.int/ Home/Main/Satellites/MeteosatSecondGeneration/Instruments/index.htm?l=en)*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

iii. Φασματικά κανάλια και ανάλυση δεδομένων

Για την καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της περιοχής του ορατού φάσματος, το όργανο SEVIRI διαθέτει 4 κανάλια, ενώ τα υπόλοιπα 8 αντιστοιχούν στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος (Πίνακας 3.2). Τέσσερα από τα οκτώ κανάλια του υπέρυθρου παρέχουν μετρήσεις θερμοκρασίας νεφών, των εδαφών και των ωκεανών και τα υπόλοιπα τέσσερα καταγράφουν την ατμοσφαιρική υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το όζον (O_3) της ατμόσφαιρας.

Οι διαστάσεις των εικόνων είναι 3712x3712 εικονοστοιχεία στα κανάλια 1 έως 11 και 5568x11136 στο υψηλής ανάλυσης ορατό κανάλι 12. Η χωρική διακριτική ικανότητα έχει βελτιωθεί στο 1 km για το κανάλι της υψηλής ανάλυσης στο ορατό (κανάλι 12) και στα 3 km για τα υπόλοιπα 11 κανάλια, πάντοτε στο ίχνος του δορυφόρου. Η αυξημένη χωρική διακριτική ικανότητα επετεύχθη με τη χρήση 9 ανιχνευτών στο κανάλι 12 και 3 ανιχνευτών στα κανάλια 1-11.

Πίνακας 3.2. *Φασματικές περιοχές του οργάνου SEVIRI του δορυφόρου Meteosat-8 (Φείδας – Καρτάλης, 2003)*

Κανάλι	**Μήκη κύματος (μm)**	**Φασματική Περιοχή**
1	0.56 – 0.71	Ορατό (κόκκινο)
2	0.71 – 0.95	Εγγύς υπέρυθρο
3	1.44 – 1.79	Μέσο υπέρυθρο
4	3.40 – 4.20	Θερμικό υπέρυθρο
5	5.35 – 715	Θερμικό υπέρυθρο (H_2O)
6	6.85 – 7.85	Θερμικό υπέρυθρο (H_2O)
7	8.30 – 9.10	Θερμικό υπέρυθρο
8	9.46 – 9.94	Θερμικό υπέρυθρο (O_3)
9	9.80 – 11.80	Θερμικό υπέρυθρο
10	11.00 – 13.00	Θερμικό υπέρυθρο
11	13.04 – 13.76	Θερμικό υπέρυθρο (CO_2)
12	0.50 – 0.90	Υψηλής ανάλυσης ορατό

iv. Δεδομένα METEOSAT-8

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν εικόνες του Meteosat-8 στο ορατό κανάλι υψηλής ανάλυσης (HRV) και το κανάλι 9 του θερμικού υπέρυθρου (IR10.8). Οι εικόνες αυτές αποτυπώνουν τη χωρική και χρονική εξέλιξη των εξεταζόμενων στην εργασία αυτή καταιγίδων στον ευρύτερο Ελλαδικό χώροόπου έλαβαν χώρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

παρέχονται 4 εικόνες την ώρα από το Meteosat 8 γεγονός που επιτρέπει πολύ καλή χρονική καταγραφή της εξέλιξης των φαινομένων.

Η καταγραφή της χρονικής εξέλιξης των νεφών από το κανάλι του ορατού και του θερμικού υπέρυθρου, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις εμφάνισης καταιγίδων, επιτρέπει τη συσχέτιση εμφάνισης των νεφικών σχηματισμών με τους δείκτες αστάθειας οι οποίοι δίνονται από τον MODIS και τον GII μερικές ώρες πριν την εκδήλωση των καταιγίδων. Τα δεδομένα παρέχονται από τη Meteosat και αποκωδικοποιούνται και καταγράφονται μέσω του προγράμματος (software) Xrit2pic.

3.1.4 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΟΥ MODIS

i. Γενικά

Το πρόγραμμα MODIS αποτελείται από δύο δορυφόρους πολικής τροχιάς, τον Aqua και τον Terra (Nasa, 2003). Η επιφάνεια του πλανήτη σαρώνεται καθημερινά κάθε μία ή δύο μέρες παρέχοντας μετεωρολογικά δεδομένα σε 36 φασματικά κανάλια. Ο μετρητικός εξοπλισμός του δορυφόρου είναι σε θέση να εκτιμά τη θερμοκρασία επιφανείας με χωρική ανάλυση 1 km. Επιπλέον, είναι εξοπλισμένος με κανάλια που μετρούν το χρώμα των ωκεανών από 415 ως 653 nm(χωρική ανάλυση 1 km), που προσδιορίζουν τη χλωροφύλλη στην επιφάνεια του νερού και μετρούν τη ποσότητά της. Εκτός αυτών, έχει τη δυνατότητα να παρέχει πληροφορίες για την βλάστηση, τη παγοκάλυψη και ανακλαστικότητα εδαφών σε χωρική ανάλυση 500 m. Ο MODIS παρέχει μετρήσεις κάλυψης νεφών με ανάλυση 500 mτην ημέρα και 1000 mτη νύχτα. Προσδιορίζει το είδος των νεφών και των αέριων σωματιδίων (aerosols), την καύση βιομάζας, την παγκόσμια κατανομή της ατμοσφαιρικής αστάθειας καθώς και το υετίσιμο ύδωρ. Μετρήσεις στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο πραγματοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια της μέρας ενώ οι ακτινοβολίες για το θερμικό υπέρυθρο (μπάντες 20-25, 27-36) μετρώνται αδιάκοπα.

Ενώ ο MODIS δεν είναι όργανο πραγματοποίησης ραδιοβολίσεων, είναι εφοδιασμένος με διάφορες φασματικές μπάντες στο υψηλής ανάλυσης ραδιόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας (High Resolution Infrared Radiation Sounder, το λεγόμενο HRIS). Για το λόγο αυτό είναι σε θέση να παράγει κατακόρυφα προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας στο σύνολο της ατμόσφαιρας και να μετρά το υετίσιμο ύδωρ, το όζον και την ατμοσφαιρική αστάθεια.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Μέχρι και σήμερα, το υπεύθυνο προσωπικό της Nasa έχει αναπτύξει 44 προϊόντα (MOD01-MOD44). Το προϊόν που εξετάζεται στην συγκεκριμένη εργασία είναι το ατμοσφαιρικό προφίλ MOD07 (MODIS Atmospheric Profile Product) και περιέχει διάφορες παραμέτρους όπως ατμοσφαιρική αστάθεια, ατμοσφαιρικούς υδρατμούς και προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας. Όλες αυτές οι παράμετροι είναι διαθέσιμοι μέρα νύχτα με χωρική ανάλυση για το επίπεδο 2 στα 5x5 km όταν δεν υπάρχει μεγάλη νεφοκάλυψη. Διατίθενται δεδομένα από δύο ατμοσφαιρικά προφίλ του επιπέδου 2 του MODIS. Το MOD07-L2 που περιέχει συλλογή δεδομένων από το δορυφόρο Terra και το MYD07-L2 που περιέχει τα αντίστοιχα από το δορυφόρο Aqua. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα και από τα δύο παραπάνω ατμοσφαιρικά προφίλ.

ii. Φασματικά κανάλια και ανάλυση δεδομένων

Ο MODIS είναι εφοδιασμένος με ένα φασματοραδιόμετρο (spectroradiometer) το οποίο διαθέτει 36 φασματικά κανάλια με μήκη κύματος ανάμεσα στα 0.62 και 14.385 μm (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3 *Φασματικές περιοχές μέτρησης του MODIS (http://modis.gsfc.nasa.gov/ /about/specifications.php)*

Πρωταρχική χρήση	Κανάλι	Μήκη κύματος[1]	Φασματική Ακτινοβολία[2]	Απαιτούμενο SNR[3]
Έδαφος/Νέφη/ Aerosols Όρια	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Έδαφος/Νέφη/ Aerosols Ιδιότητες	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Χρώμα ωκεανού/ Φυτοπλακτόν/ Βιογεωχημεία	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Ατμοσφαιρικοί υδρατμοί	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Πρωταρχική χρήση	Κανάλι	Μήκη κύματος[1]	Φασματική Ακτινοβολία[2]	Απαιτούμεμη NE[delta]T(K)[4]
Επιφάνεια/Νέφη Θερμοκρασία	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Θερμοκρασία ατμόσφαιρας	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Νέφη Cirrus Υδρατμοί	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Ιδιότητες Νεφών	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Όζον	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Επιφάνεια/Νέφη Θερμοκρασία	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Ύψος Κορυφής Νεφών	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

[1] Κανάλια 1 έως 19 είναι σε nm; Κανάλια 20 έως 36 είναι σε μm
[2] Τιμές φασματικής ακτινοβολίας σε [W/m^2 -μm-sr]
[3] SNR = Αναλογία σήματος – θορύβου
[4] NE(delta)T = Θόρυβος που αντιστοιχεί σε διαφορά θερμοκρασίας

Το υψόμετρο του δορυφόρου είναι 705 km και η πολική τροχιά του είναι μη σύγχρονη. Η χωρική ανάλυση είναι 250 m (Κανάλι 1-2), 500 m (κανάλια 3-7) και 1000 m (κανάλια 8-36). Τα κανάλια 25 και 27-36 χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο για την παραγωγή των ατμοσφαιρικών προϊόντων του MODIS. Αν και κάθε κανάλι προορίζεται για συγκεκριμένη ατμοσφαιρική εφαρμογή, και τα 11 κανάλια συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό των συντελεστών παλινδρόμησης (regression retrieval coefficients) που χρησιμοποιούνται διαδοχικά για τη δημιουργία των αλγορίθμων εκτίμησης των μετεωρολογικών προϊόντων.

iii. Υπολογισμός δεικτών αστάθειας MODIS

α. Γενικά

Η ατμοσφαιρική θερμοκρασία εξάγεται από δορυφορικές μετρήσεις θερμικής εκπομπής, η πηγή της οποίας πρέπει να είναι ένα αέριο γνωστής και σταθερής κατακόρυφης κατανομής στην ατμόσφαιρα. Τα δύο αέρια που έχουν τέτοια κατανομή και είναι κατάλληλα για μετρήσεις ως πηγές εκπομπής κάτω

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

από τα 100 km είναι το CO_2 και το O_2. Επιπροσθέτως, η γήινη ακτινοβολία πρέπει να προσμετράται για τα φασματικά κανάλια μέτρησης της γήινης επιφανείας.

Δε υπάρχει μία μόνο λύση για την λεπτομερή ανάλυση του κάθετου προφίλ της θερμοκρασίας διότι:

- Οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες προέρχονται από τα βαθύτερα στρώματα της ατμόσφαιρας
- Οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες που φτάνουν στα όργανα μέτρησης των δορυφόρωνπροέρχονται από επικαλυπτόμενα στρώματα της ατμόσφαιρας που πολύ συχνά δεν είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.
- Οι ίδιες οι μετρήσεις των οργάνων εμπεριέχουν σφάλματα.

Γενικά, έχουν αναπτυχθεί δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών προφίλ που υπολογίζονται από δορυφορικές μετρήσεις. Αμφότερες οι μέθοδοι επιλύουν διαφορετικά το πρόβλημα λεπτομερούς αναπαραγωγής του ατμοσφαιρικού προφίλ λόγω διαφορετικής προσέγγισης των εξισώσεων μεταφοράς της φασματικά ανεξάρτητης ακτινοβολίας στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας.

β. Στατιστική μέθοδος ανάπτυξης αλγορίθμου

Μία αξιόπιστη υπολογιστική μέθοδος προσδιορισμού των κατακόρυφων προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας από δορυφορικές ραδιοβολίσεις χρησιμοποιεί στατιστικές σχέσεις μεταξύ παρατηρουμένων (ή μοντελοποιημένων) ακτινοβολιών και των αντίστοιχων ατμοσφαιρικών προφίλ που υπολογίστηκαν με ιστορικά δεδομένα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για τη παραγωγή της πρωταρχικής εκτίμησης (first guess) του φυσικού αλγορίθμου (Borbas et al., 2011).

Θεωρητικά, οι μετρήσεις ακτινοβολίας από τα όργανα του MODIS χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα χωρο-χρονικά προφίλ ραδιοβολίσεων για να παραχθούν απευθείας οι συντελεστές παλινδρόμησης που βελτιστοποιούν το αποτέλεσμα. Στην περίπτωση αυτή, δε λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά ακτινοβολίας μεταξύ των ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Εναλλακτικά, οι συντελεστές αυτοί είναι δυνατό να παραχθούν από τις μετρούμενες ακτινοβολίες του MODIS σε συνδυασμό με ένα μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί ως προφίλ εισόδου ένα παγκόσμιο αρχείο δεδομένων ραδιοβολίσεων.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Κατά τη διαδικασία της στατιστικής παλινδρόμησης για τη παραγωγή του ατμοσφαιρικού προφίλ, οι πρωταρχικοί εκτιμητές είναι οι θερμοκρασίες από το φασματικό κανάλι του υπέρυθρου του MODIS. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί 11 υπέρυθρα κανάλια με μήκη κύματος ανάμεσα στα 4.2 και 14.2 μm. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος (retrieval algorithm) απαιτεί 1 km FOV (Field of view) ακτινοβολίες από το κανάλια 25 (4.2 mm, απορρόφησης CO_2), τα κανάλια 27-29 (6.72 έως 8.55 mm για υγρασία), το κανάλι 30 (9.73 mm για όζον), τα κανάλια 31,32 (11.03 και 12.02 split window) και τα κανάλια 33-36 (13.34, 13.64, 13.94, 14.24 mm κανάλι απορρόφησης CO_2).

Στη συνέχεια, οι τελικοί συντελεστές παλινδρόμησης παράγονται τόσο από τις υπολογιζόμενες ακτινοβολίες όσο και από τα ατμοσφαιρικά προφίλ που ταιριάζουν με αυτές. Για να παραχθεί η παλινδρόμηση, εφαρμόζεται η παρακάτω εξίσωση που συνδέει μετρήσεις με ατμοσφαιρικά προφίλ:

$$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}}\mathbf{R})^{-1}\boldsymbol{R}^{\boldsymbol{T}}\,\boldsymbol{T} \qquad (3.1)$$

Όπου:

(R^TR)=απόκλιση των παρατηρήσεων ακτινοβολίας R

(R^TT)= απόκλιση παρατηρήσεων ακτινοβολίας R με το ατμοσφαιρικό προφίλ T

Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν χρειάζεται η συσχέτιση των ακτινοβολιών του MODIS χωρο-χρονικά με δεδομένα ατμοσφαιρικών προφίλ αλλά μόνο ιστορικά αρχεία παρατηρήσεων. Εντούτοις, η στατιστική μέθοδος μέσω παλινδρόμησης εμπεριέχει υπολογισμούς μεταφοράς ακτινοβολίας μεταξύ των στρωμάτων της ατμόσφαιρας και συνεπώς είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μοντέλου ακριβείας (forward model) που να το πραγματοποιεί αυτό ώστε η εξίσωση παλινδρόμησης του αλγόριθμου να είναι αξιόπιστη. Στο προϊόν MOD07 του MODISπου εξετάζεται στην εργασία αυτή, οι ρυθμίσεις των συστηματικών σφαλμάτων της ακτινοβολίας δε λαμβάνονται υπόψη.

γ. Φυσική μέθοδος ανάπτυξης αλγορίθμου

Η μέθοδος παραγωγής του αλγορίθμου μέσω στατιστικής παλινδρόμησης έχει τα πλεονεκτήματα της αποτελεσματικότητας των υπολογισμών, της σταθεροποίησης των τιμών και απλότητα στη χρήση της. Εντούτοις, δεν εμπεριέχει τις φυσικές διεργασίες της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας (radiative transfer equation, RTE). Μετά τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

προφίλ μέσω των τεχνικών στατιστικής παλινδρόμησης, εφαρμόζεται ένας μη γραμμικός επαναληπτικός φυσικός αλγόριθμος που συχνά βελτιώνει τη λύση. Η προσέγγιση της φυσική μεθόδου δε χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακά δεδομένα επειδή χρειάζεται περισσότερο χρόνο υπολογισμού.

Η φυσική μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο ομαλοποίησης μειώνοντας το σφάλμα συνάρτησης που περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση, για τη μέτρηση του βαθμού συμφωνίας των μετρήσεων των φασματικών καναλιών του MODIS με την εξίσωση παλινδρόμησης της πρώτης εκτίμησης που είναι η εξής:

$$Y(X) = \|Y_m - Y(X)\|^2 + \gamma\|X - X_o\|^2 \qquad (3.2)$$

Όπου:

X: το ζητούμενο ατμοσφαιρικό προφίλ
X_o: η αρχική κατάσταση του ατμοσφαιρικού προφίλ
Y_m: το διάνυσμα της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας λαμπρότητας του MODIS που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία παλινδρόμησης
Y(X): το διάνυσμα της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας λαμπρότητας του MODIS για το X ατμοσφαιρικό προφίλ
γ: παράγοντας ομαλοποίησης

Η λύση αυτή εξασφαλίζει ισορροπία ανάμεσα στις μετρούμενες ακτινοβολίες του MODIS και στη πρώτη εκτίμηση. Σε περίπτωση που ο υπολογισμός της μεταφοράς ακτινοβολίας με τη πρωταρχική εκτίμηση σαν αρχική είσοδο (input) ταιριάζει καλά με τις μετρήσεις ακτινοβολίας του MODIS, δίνεται λιγότερο βάρος στις μετρήσεις για την εφαρμογή του μη γραμμικού επαναληπτικού αλγόριθμου και η λύση θα παρουσιάσει μικρή διαφοροποίηση από τη πρώτη εκτίμηση. Αν όμως, η πρώτη εκτίμηση δεν είναι σε συμφωνία με τις μετρήσεις τότε δίνεται μεγαλύτερο βάρος στο φυσικό επαναληπτικό αλγόριθμο που παράγει το προφίλ.

Για αυτό το λόγο, τα προφίλ θερμοκρασίας, υγρασίας και όζοντος καθώς και η θερμοκρασία επιφανείας τροποποιούνται για να παραχθούν οι καλύτερες δυνατές ταυτίσεις με τις μετρήσεις των φασματικών καναλιών του MODIS.

δ. Ατμοσφαιρικά δεδομένα προγράμματος MODIS

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το ατμοσφαιρικό προϊόν MOD07 του MODIS (Nasa, 2003). Τα προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας που

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

παράγονται από τις δύο παραπάνω μεθόδους, στατιστική και φυσική, εμπλέκονται στον υπολογισμό των δεικτών αστάθειας για κάθε σημείο μέτρησης του δορυφόρου. Το προϊόν υπολογίζει με τις γνωστές μαθηματικές σχέσεις τους δείκτες αστάθειας TT, LI και KI και τα δεδομένα αυτά παρέχονται για τη μελέτη της αστάθειας.

Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων του προγράμματος MODIS για τις ώρες που βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτές που πραγματοποιούνται οι ραδιοβολίσεις ώστε η αξιολόγηση αυτών να είναι αξιόπιστη. Όλα τα δεδομένα του MODIS που αντιπαραβάλλονται με τις επίγειες μετρήσεις προέρχονται από το δορυφόρο AQUA ο οποίος παρέχει μετρήσεις πιο κοντά στην ώρα των επίγειων μετρήσεων. Ο χρόνος διέλευσης του AQUA στην Ελλάδα όσο αφορά στην αξιολόγηση επιλέγεται να είναι κατά τις ώρες 23:40 έως 01:00 UTC το βράδυ και από τις 10:55 έως τις 12:30 UTC το πρωί. Τέθηκε δηλαδή το όριο της σχεδόν 1 ώρας πριν και μετά τις ώρες πραγματοποίησης ραδιοβολίσεων (00:00 και 12:00 UTC).

Όσο αφορά στη διερεύνηση χρησιμοποίησης των δεικτών αστάθειας του MODIS στην βραχυπρόθεσμη πρόγνωση καταιγιδοφόρων νεφών, ο δορυφόρος TERRA χρησιμοποιείται για τη πρωινή του μέτρηση (09:00 ως 10:30 UTC) διότι ο AQUA διέρχεται πιο αργά κατά 1,5 περίπου ώρα, περίπου στις 14:00 τοπική ώρα, όπου η θερμική αστάθεια έχει ήδη εκδηλωθεί. Όσο αφορά όμως στο βραδινό πέρασμα, ο TERRA διέρχεται νωρίς (20:00 έως 22:00 UTC) ενώ ο AQUA 1,5 ώρα αργότερα (περασμένα μεσάνυχτα, τοπική ώρα), οπότε είναι πιο κοντά στις ώρες ανάπτυξης νεφών και αποτυπώνει την ενδεχόμενη αστάθεια πιο αξιόπιστα. Σε περίπτωση νεφοκάλυψης είτε του TERRA είτε του AQUA, χρησιμοποιούνται αναγκαστικά τα διαθέσιμα προϊόντα.

Πρακτικά, για την περίοδο Ιουνίου 2009 αλλά και για τις περιπτώσεις των καταιγίδων που εξετάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν το πολύ 2 εικόνες την ημέρα για τον εντοπισμό των δεικτών αστάθειας. Σε περίπτωση εμφάνισης πολλών νεφών πάνω από τον Ελλαδικό χώρο και κυρίως πάνω από τα 3 εξεταζόμενα αεροδρόμια, δε ήταν δυνατή η καταγραφή τιμών από τον MODIS. Πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία δεκάδων εικόνων MODIS και για την επεξεργασία αυτών χρησιμοποιήθηκαν το προγράμματα (software) ERDAS και το ARCMAP.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

3.1.5. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ MSG

i. Γενικά

Τα πιο συνηθισμένα δεδομένα που συγκεντρώνει ο MSG βοηθούν στην επιτυχή πρόγνωση ακραίων καιρικών φαινομένων (καταιγίδες, τυφώνες, κ.λ.π). Αυτό αποτελεί μία πολύτιμη συνεισφορά στην βραχυπρόθεσμη πρόγνωση που προσφέρει η μετεωρολογική κοινότητα. Συνεπώς, αποστολή του MSG είναι και ο εντοπισμός αστάθειας με την ανάλυση κίνησης των αέριων μαζών. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της καταγραφής των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας μέσα στη τροπόσφαιρα με τα κανάλια του SEVIRI που καταγράφουν στο ατμοσφαιρικό παράθυρο απορρόφησης στο κανάλι υδρατμών (water vapor) και στο κανάλι του CO_2.

Μέσω των καταγραφών αυτών, μπορούν να υπολογιστούν ατμοσφαιρικοί δείκτες αστάθειας. Ο υπολογισμός των δεικτών αυτών πραγματοποιείται μέσω μετεωρολογικών προϊόντων - προγραμμάτων (Meteorological Products Extraction Facilities, ή αλλιώς MPEF) που αναπτύχθηκαν και εξελίσσονται στη Eumetsat (Eumetsat, 2007). Με τους δείκτες αυτούς να υπολογίζονται στο σύνολο του γήινου δίσκου, το προϊόν αυτό ονομάστηκε Δείκτης Παγκόσμιας Αστάθειας (Global Instability Indexή GII). Ο GII παράγεται σε οριζόντια ανάλυση 30 km περίπου και διανέμεται μέσω GTS (Global Telecommunications System) ή LRIT (Low Rate Image Transmission).

Ο GII, περιλαμβάνει τέσσερις δείκτες αστάθειας, το υετίσιμο ύδωρ και τη σχετική υγρασία ως παραμέτρους της ανάλυσης των αέριων μαζών. Οι δείκτες αστάθειας είναι ο Lifted Index, ο K-Index, ο KO Index και ο Maxim Buoyancy. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δύο πρώτοι, δηλαδή ο Lifted Indexκαι ο K-index για δύο λόγους. Ο πρώτος ήταν για να υπάρχει μία συσχέτιση με τους αντίστοιχους του MODIS και ο δεύτερος είναι η απουσία τιμών στον Ελλαδικό χώρο των δύο τελευταίων δεικτών για τα χρονικά διαστήματα των συγκεκριμένων καταιγίδων που μελετώνται εδώ.

ii. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ GII

α. Γενικά

Έχουν προταθεί δύο διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των παραμέτρων της αστάθειας από τον απεικονιστή SEVIRI του MSG:

- Η«φυσική» μέθοδος
- Η «στατιστική» μέθοδος

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Για την προετοιμασία του GII, ο οποίος όπως έχει αναφερθεί είναι μία εφαρμογή δορυφορικού προϊόντος (MPEF) αμφότερες οι μέθοδοι έχουν εγκατασταθεί και ελεγχθεί σε ένα τεχνητό περιβάλλον. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι αυτές παράγουν αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με την ατμοσφαιρική αστάθεια μόνο σε συνθήκες μηδενικής νεφοκάλυψης.

β. Η φυσική μέθοδος

Η φυσική μέθοδος προσπαθεί να υπολογίσει το προφίλ της πραγματικής θερμοκρασίας και υγρασίας από τις τιμές μέτρησης της ακτινοβολίας στα διάφορα φασματικά κανάλια. Σε δεύτερη φάση, οι παράμετροι της αστάθειας υπολογίζονται από το προφίλ των τιμών αυτών. Η μέθοδος αυτή δίνει μία εκτίμηση η οποία βασίζεται σε μία αντίστροφη τεχνική δηλαδή προσπαθεί να βρει εκείνο το ατμοσφαιρικό προφίλ το οποίο παράγει με επιτυχία τις παρατηρήσεις.

Γενικά, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος επιδέχεται πολλαπλές λύσεις και ένα βασικό προφίλ που ονομάζεται πρώτη εκτίμηση (first guess) χρησιμοποιείται ως αρχική συνθήκη για την επίλυση της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού. Ένα τυπικό δείγμα πρώτης προσέγγισης του πεδίου της first guess μπορεί να είναι μία βραχυπρόθεσμη πρόγνωση.

Ο πυρήνας της μεθόδου αυτής είναι η βασική εξίσωση (standard retrieval equation, Ma et al. 1999, Rodgers 1976):

$$x_{n+1} = x_0 + (S_x^{-1} + K_n^T . S_\varepsilon^{-1} . K_n)^{-1} \times K_n^T . S_\varepsilon^{-1} . \left[T_B - T_{B,n} + K_n(x_n - x_0)\right] \qquad (3.3)$$

Όπου:

x: το διάνυσμα της παρατήρησης (προφίλ θερμοκρασίας και υγρασίας)
n: βήμα, n=0 σημαίνει first guess
T_B: παρατηρούμενη θερμοκρασιακή λαμπρότητα
$T_{B,n}$: προσομοιωμένη θερμοκρασιακή λαμπρότητα για το προφίλ του βήματος της μεθόδου
S_x: συντελεστής συσχέτισης των σφαλμάτων της πρώτης εκτίμησης
K_n: Ιακωβιανός συντελεστής βαρύτητας
S_ε: σφάλμα συμμεταβλητότηταςτων παρατηρούμενων τιμών θερμοκρασιακής λαμπρότητας του μοντέλου ακτινοβολίας

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο SEVIRI του MSG, η φυσική μέθοδος χρησιμοποιεί 6 φασματικά κανάλια: τα 3 κανάλια του ατμοσφαιρικού

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

παραθύρου IR8.7, IR10.8 και IR12.0, τα δύο κανάλια υδρατμών IR6.2 και IR7.3 και το κανάλι του CO_2, το IR13.4. Ακολούθως, ο συντελεστής S_ε λαμβάνει υπόψη του το θόρυβο της μέτρησης της θερμοκρασίας στο όργανο σε αυτά τα 6 κανάλια συμπεριλαμβανομένου και της αβεβαιότητας του μοντέλου ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς της ακτινοβολίας μεταφοράς σε ένα μέγιστο αριθμό 43 ισοβαρικών επιπέδων.

Μεγάλοι περιορισμοί αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς και το γεγονός ότι τα υπολογιζόμενα προφίλ τείνουν να διατηρήσουν χαρακτηριστικά από τη first guess.

γ. Η στατιστική μέθοδος

Η στατιστική μέθοδος χρησιμοποιεί στατιστικές σχέσεις ανάμεσα στις δορυφορικές παρατηρήσεις και τις παραμέτρους αστάθειας. Τέτοιες σχέσεις μπορούν να βρεθούν από ιστορικά δεδομένα, για παράδειγμα ραδιοβολίσεις και αντίστοιχες δορυφορικές παρατηρήσεις θερμοκρασιακής λαμπρότητας, οι οποίες μπορούν να προσομοιωθούν με ένα μοντέλο μεταφοράς ακτινοβολίας. Ένα τέτοιο βασικό πακέτο δεδομένων (dataset) ονομάζεται training dataset και χρησιμοποιείται για να εντοπίσει με τη βοήθεια τεχνητών νευρωνικών δικτύων τις γεωφυσικές μαθηματικές σχέσεις μεταξύ παρατηρήσεων και διαφόρων μεταβλητών. Αυτό το βασικό πακέτο θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει πολλές περιπτώσεις διαφορετικών ατμοσφαιρικών συνθηκών, εποχών και περιοχών. Η επιτυχία της στατιστικής μεθόδου έγκειται στην ποιότητα του βασικού αυτού πακέτου.

iii. Δεδομένα GII

Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον GII τόσο για την αξιολόγησή τους σε σύγκριση με αυτά των ραδιοβολήσεων, όσο και για τον εντοπισμό της αστάθειας σε επιλεγμένες περιπτώσεις. Όσο αφορά στη σύγκριση των τιμών του GII με ραδιοβολίσεις χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των δεικτών αστάθειας του K-Index και του Lifted Index. Στις διαθέσιμες τιμές και ώρες των ραδιοβολίσεων των τριών αεροδρομίων της Ελλάδας σημειώθηκαν και οι τιμές του K-Index και του Lifted Index του GII δηλαδή κατά τις ώρες 00:00 και 12:00 UTC όλων των ημερών του Ιουνίου του 2009.

Επιπλέον, για τις τέσσερις περιπτώσεις καταιγίδων που μελετά η εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για 13 ώρες της ημέρας, δηλαδή κατά τις ώρες 00:00, 01:00, 02:00, 03:00, 04:00, 05:00, 06:00, 07:00, 08:00, 09:00, 10:00, 11:00 και 12:00 UTC. Όπως αναφέρθηκε, δε χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

GII για τον KO-Index και Maxim Buoyancy διότι δεν υπήρχαν διαθέσιμες τιμές στις συγκεκριμένες ημερομηνίες για τον ελλαδικό χώρο.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

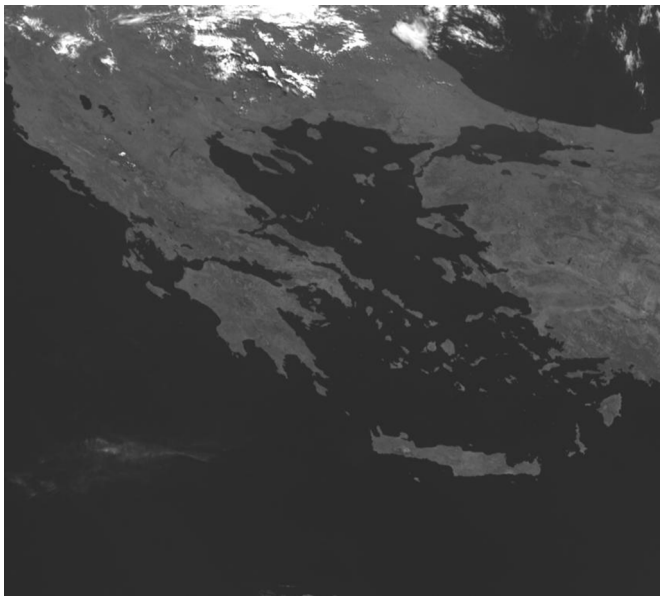
3.2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η εργασία εξετάζει 4 περιπτώσεις ισχυρών θερμικών καταιγίδων στη περιοχή του ευρύτερου Ελλαδικού χώρου (σχήμα 3.2). Η επιλογή των καταιγίδων αυτών έγινε με τα εξής κριτήρια:

- Εμφάνιση νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης μέσης κλίμακας (meso-scale Convective Systems, MSCs)
- Τόπος εμφάνισης MSCs: Ευρύτερος Ελλαδικός χώρος
- Έλλειψη νεφοκάλυψης κατά τις βραδινές ώρες ώστε να υπάρχουν δορυφορικές μετρήσεις

Από διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες του MSG, τόσο στο ορατό όσο και στο θερμικό υπέρυθρο, εξετάστηκαν πολλές περιπτώσεις εμφάνισης έντονης αστάθειας τα τελευταία τρία χρόνια στην Ελλάδα και επιλέχτηκαν τέσσερις περιπτώσεις οι οποίες σε μεγάλο βαθμό πληρούν τα παραπάνω κριτήρια. Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

- 17-06-2009
- 20-06-2009
- 13-6-2010
- 11-7-2010



Εικόνα 3.2 *Η περιοχή μελέτης του ευρύτερου Ελλαδικού χώρου*

Για τις παραπάνω ημέρες, εξετάστηκε αρχικά η συνοπτική μετεωρολογική κατάσταση στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ακολούθως, οι ημέρες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να εξεταστούν οι δείκτες αστάθειας των δορυφορικών δεδομένων και προϊόντων μερικές ώρες πριν την εκδήλωση της αστάθειας. Εξετάστηκε, δηλαδή, σε ποιο βαθμό είναι σε θέση τα δεδομένα αυτά να αποτυπώσουν πρώιμα τις συνθήκες εκδήλωσης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και να συνδράμουν στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση καταιγίδων μικρής ή μέσης κλίμακας.

3.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΩΝ

Για όλες τις ημέρες του Ιούνιου του 2009 και κοντά στις ώρες 00:00 και 12:00 UTC, μελετήθηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες για τους τρεις δείκτες αστάθειας του MODIS, δηλαδή του Total Totals, του Lifted Index και του K-Index και καταγράφηκαν οι τιμές τους στις περιοχές των τριών αεροδρομίων, της Θεσσαλονίκης, της Αθήνας και του Ηρακλείου. Η τιμή έκαστου δείκτη αστάθειας υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος 9 τιμών που αντιστοιχούν σε 9 σημεία πλέγματος με το σημείο του αεροδρομίου στο κέντρο του πλέγματος αυτού. Ο μέσος όρος κρίθηκε αναγκαίος λόγω χρονικής απόστασης μεταξύ των ραδιοβολίσεων και των μετρήσεων του MODIS καθώς και λόγω της χωρικής ακρίβειας του δορυφόρου. Όπως αναφέρθηκε, το πέρασμα του MODIS από τον εναέριο χώρο της Ελλάδας λαμβάνει χώρα κατά τις ώρες 23:40 έως 01:00 UTC το βράδυ και από τις 10:55 έως τις 12:30 UTC το πρωί, ενώ οι ραδιοβολίσεις πραγματοποιούνται στα αεροδρόμια στις 00:00 και 12:00 UTC.

Αντίστοιχη εργασία πραγματοποιήθηκε και για τις τιμές των δεικτών αστάθειας του GII, δηλαδή του K-Index και του Lifted Index. Μελετήθηκαν οι αντίστοιχοι χάρτες του GII και σημειώθηκαν οι τιμές των δεικτών πάνω από τα τρία αεροδρόμια χωρίς να υπολογιστεί ο μέσος όρος λόγω της μικρής χωρικής ανάλυσης των δεδομένων. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση αυτή είχαμε και απόλυτη χρονική ταύτιση των ραδιοβολίσεων με τα δεδομένα του GII διότι οι χάρτες του τελευταίου ήταν διαθέσιμοι για τις ώρες 00:00 και 12:00 UTC.

Στη συνέχεια, οι δορυφορικές τιμές και οι τιμές των ραδιοβολίσεων αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα του excel όπως αυτό της εικόνας 3.3 με στόχο τη ποιοτική σύγκρισή τους.

Ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία των τιμών των δεικτών αστάθειας δορυφόρων και των αντίστοιχων δεικτών των ραδιοβολίσεων για κάθε αεροδρόμιο εξετάζοντας τον συντελεστή συσχέτισης, το μέσο σφάλμα (BIAS), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE). Τέλος, ακολούθησε η συνολική στατιστική επεξεργασία και αξιολόγηση όλων

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

των τιμών για έκαστο δείκτη αστάθειας δορυφόρου-ραδιοβόλισης και των 3 αεροδρομίων μαζί. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε και για τον MODIS και για τον GII.

Εικόνα 3.3 *Διάγραμμα τιμών του K-Index των ραδιοβολίσεων και του K-Index του GII για το αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης τον Ιούνιο του 2009*

Σκοπός της συνολικής αυτής στατιστικής επεξεργασίας είναι η αξιολόγηση της ικανότητας των δορυφορικών δεδομένων ως προς τη χρήση τους σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες ραδιοβολίσεις. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής δεν αποτελούν σε καμία περίπτωση μία ολοκληρωμένη και πλήρης εργασία αλλά αφορούν στην εκτίμηση της αξιοπιστίας των δορυφορικών δεικτών για τη χρήση τους στις τέσσερις περιπτώσεις αστάθειας που εξετάζονται στη διατριβή αυτή.

3.2.3 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ

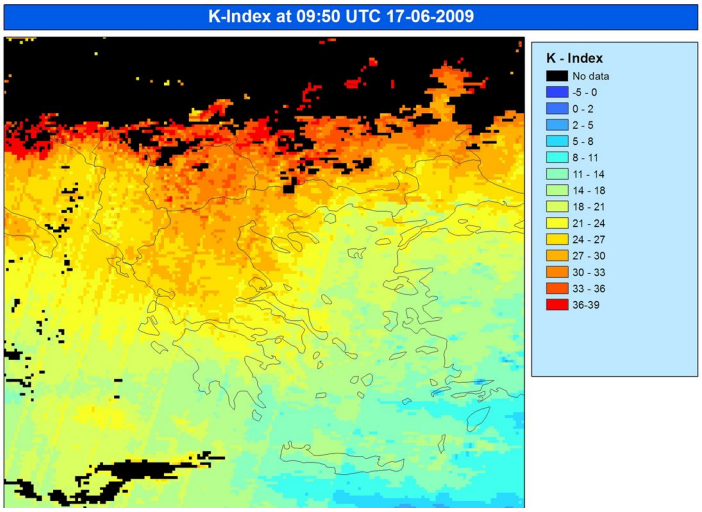
i. Προϊόντα MODIS

Για τις τέσσερις περιπτώσεις καταιγίδων που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία δημιουργηθήκαν χάρτες απεικόνισης των δεικτών αστάθειας, του Total Totals, του Lifted Index και του K-Index όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4. Για κάθε ημέρα αστάθειας, δύο χάρτες από κάθε δείκτη (συνολικά 6 χάρτες) αποτύπωσαν τις τιμές των δεικτών αστάθειας στον

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ελλαδικό χώρο για την αξιολόγηση του προγράμματος MODIS, από τη βραδινή και τη μεσημεριανή καταγραφή.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο δορυφόρος διέρχεται από τον εναέριο χώρο της Ελλάδας κατά τις 23:30 με 01:00 UTC το βράδυ και 09:00 με 11:00 UTC νωρίς το μεσημέρι. Οι χάρτες αυτοί είναι σε θέση να απεικονίσουν τη χωρική κατανομή των τιμών των δεικτών αστάθειας στις συγκεκριμένες ώρες.



Εικόνα 3.4 *Χάρτης τιμών του K-Index για τον ευρύτερο Ελλαδικό Χώρο με δεδομένα από τον MODIS*

Η εκτίμηση βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης με τη χρήση των δεικτών αστάθειας του MODIS μπορεί να επιτευχθεί με παράλληλη ποιοτική εξέταση των παραπάνω χαρτών με τις αντίστοιχες εικόνες στα κανάλια του ορατού υψηλής ανάλυσης και του θερμικού υπέρυθρου του MSG.

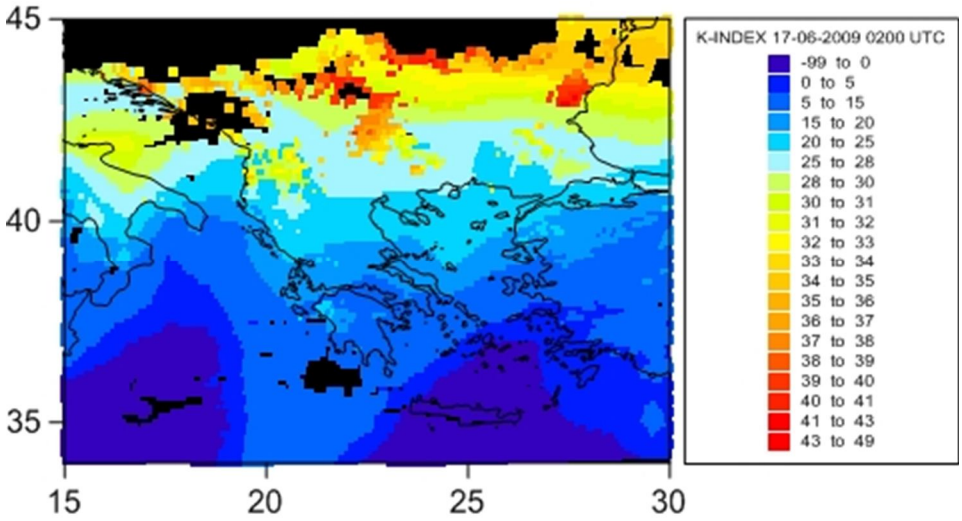
ii. Προϊόντα MSG

Κάτι ανάλογο με τον MODIS πραγματοποιήθηκε και με τα δεδομένα του προϊόντος του GII του MSG. Οι δείκτες αστάθειας που εξετάστηκαν εδώ ήταν ο K-Index και ο Lifted Index και στις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις (Εικόνα 3.5). Λόγω της διαθεσιμότητας 4 μετρήσεων ανά ώρα του GII, δημιουργήθηκαν 13 χάρτες ανά περίπτωση καταιγίδας και δείκτη αστάθειας δηλαδή 26 χάρτες των 2 δεικτών αστάθειας για κάθε ημέρα μελέτης. Οι χάρτες αυτοί παρήχθησαν ανά ώρα, δηλαδή στις 00:00, 01:00, 02:00, 03:00, 04:00, 05:00, 06:00, 07:00, 08:00, 09:00, 10:00, 11:00 και 12:00 UTC. Αυτό

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

επιτρέπει, εκτός των άλλων, την αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης των δεικτών.

Η εκτίμηση βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης με τη χρήση των δεικτών αστάθειας του GII μπορεί να επιτευχθεί αντίστοιχα με τον MODIS δηλαδή με παράλληλη ποιοτική εξέταση των παραπάνω χαρτών με τις αντίστοιχες εικόνες στα κανάλια του ορατού υψηλής ανάλυσης και του θερμικού υπέρυθρου του MSG.



Εικόνα 3.5 *Χάρτης τιμών του K-Index για τον ευρύτερο Ελλαδικό Χώρο με δεδομένα από τον GII*

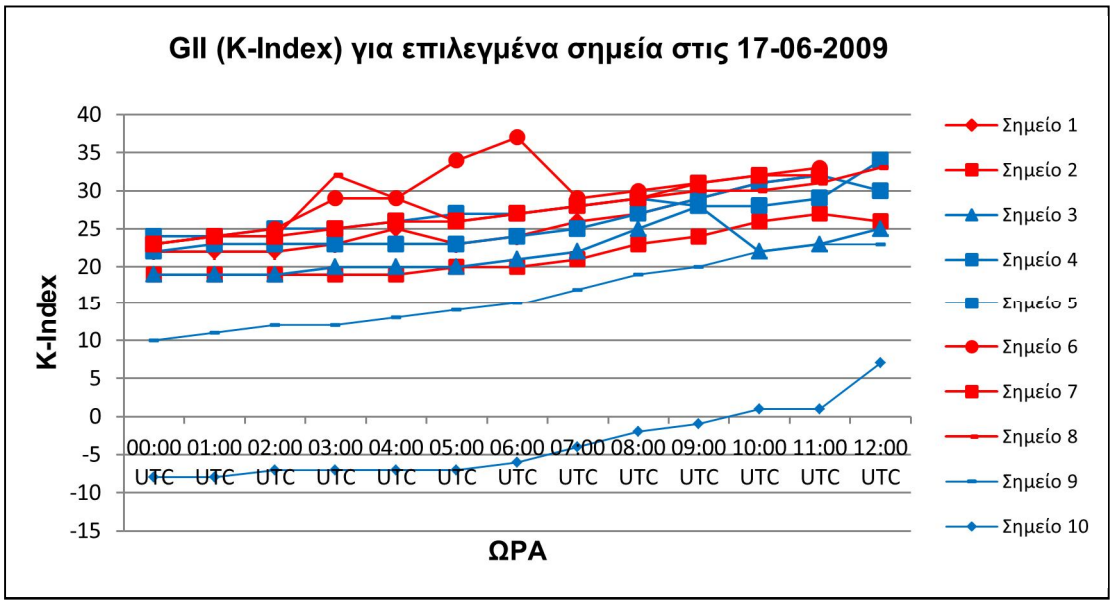
Επιπλέον, στην ανάλυση των δεδομένων του GII, εξετάστηκε και η χρονική εξέλιξη των δύο δεικτών αλλά και του υιετίσιμου ύδατος σε αρκετά σημεία. Στις τέσσερις καταιγιδοφόρες ημέρες, επιλέχτηκαν 9-10 σημεία στον Ελλαδικό χώρο έτσι ώστε 4-5 από αυτά να είναι εντός των περιοχών εμφάνισης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και τα υπόλοιπα εκτός περιοχών εμφάνισης νεφών. Από τους διαθέσιμους χάρτες του GII σημειώθηκαν οι τιμές των δεικτών αστάθειας και του υετίσιμου ύδατος και μελετήθηκαν συναρτήσει του χρόνου.

Για όλα τα σημεία αυτά καταγράφτηκαν οι τιμές των δεικτών αστάθειας ανά ώρα από τις 00:00 έως και τις 12 UTC. Δημιουργηθήκαν δηλαδή διαγράμματα τιμών δεικτών συναρτήσει του χρόνου για να καταγραφεί η εξέλιξη της αστάθειας με το χρόνο και βγουν συμπεράσματα αναφορικά με τη πρόοδο των φαινομένων (εικόνα 3.6 ενδεικτικά).

Για την καλύτερη κατανόηση της χρονικής εξέλιξης των δεικτών ώστε να μελετηθεί σε ποια περίπτωση οδηγούν ή όχι σε δημιουργία νεφών,

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

δημιουργηθήκαν αντίστοιχα διαγράμματα δεικτών αστάθειας συναρτήσει του χρόνου σε σημεία στα οποία εμφανίστηκαν νέφη και σε σημεία στα οποία δεν προέκυψαν νέφη.



Εικόνα 3.6 *Διάγραμμα 10 σημείων σε διάφορες περιοχές του Ελλαδικού Χώρου με τις τιμές του K-Index του GII στις 17-06-2009*

Αντίστοιχα διαγράμματα επιλεγμένων σημείων δημιουργήθηκαν για τη μελέτη της μεταβολής του υετίσιμο ύδατος του GII. Αυτό που ενδιαφέρει και θίγεται ακροθιγώς, εκτός από τη μεταβολή του δείκτη, είναι και η ποσότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών που κατά τη διάρκεια αστάθειας συμπυκνώνονται και δημιουργούν νέφη ή δίνουν καταιγίδες με έντονες βροχοπτώσεις (Αγγουριδάκης, 1976; Καρακώστας, 1992).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων που διατίθενται από τα δύο δορυφορικά προϊόντα, τον MODIS και το GII. Η εργασία εστιάζει αρχικά στην αξιοπιστία των δεικτών αστάθειας οι οποίοι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των μετρήσεων των απεικονιστών των δορυφόρων, των αλγορίθμων υπολογισμού των δεικτών και από τις υφιστάμενες καιρικές συνθήκες. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται, για όλες τις ημέρες του μήνα Ιουνίου του 2009, αξιολογώντας τους δείκτες αστάθειας των δορυφορικών προϊόντων με τη βοήθεια των αντίστοιχων δεικτών των επίγειων μετρήσεων των ραδιοβολίσεων.

Στη συνέχεια, επιλέχτηκαν τέσσερις περιπτώσεις ημερών με εμφάνιση αξιοσημείωτης αστάθειας στην Ελλάδα. Για τις περιπτώσεις αυτές, αξιολογήθηκαν οι δείκτες αστάθειας των δορυφορικών προϊόντων των δορυφόρων Aqua και Terra του MODIS και του προϊόντος GII του δορυφόρου MSG. Τα δεδομένα, τα οποία αφορούν στους δείκτες αστάθειας Total Totals, Lifted Index και K-Index, ελήφθησαν από την υπηρεσίες της Nasa (MODIS) και Eumetsat (GII) και με τη βοήθεια των κατάλληλων προγραμμάτων (Erdas, ArcGis, Xric2pic, Surfer, Excel, Linux Libraries) αποτυπώθηκαν σε χάρτες του ευρύτερου ελλαδικού χώρου.

Οι χάρτες με τους δείκτες αστάθειας των δορυφορικών προϊόντων εξετάστηκαν σε αντιπαράθεση με τις εικόνες των καναλιών ορατού υψηλής ανάλυσης και υπέρυθρου του MSG. Με αυτό τον τρόπο, διερευνάται η ικανότητα των δεικτών αστάθειας των δορυφόρων να ανιχνεύσουν πιθανή εκδήλωση θερμικών MSCs (Meso-Scale Convention Systems) λίγες ώρες πριν την εκδήλωσή τους. Πλεονέκτημα του MODIS αποτελεί η υψηλή χωρική ανάλυση των δεδομένων του που είναι διαθέσιμη δύο φορές την ημέρα. Αντιθέτως, το πλεονέκτημα του MSG είναι η υψηλή χρονική διαθεσιμότητα του δεδομένων του, 96 καταγραφές την ημέρα, με μικρότερη χωρική ανάλυση από αυτή του MODIS.

4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΟΒΟΛΙΣΕΩΝ

4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αρχικά, εξάχθηκαν από την ιστοσελίδα των ραδιοβολίσεων του Πανεπιστημίου του Wyoming, για όλες τις ημέρες του Ιούνιου 2009, οι δείκτες αστάθειας Total Totals, Lifted Index και K-Index για 00:00 και 12:00 UTC για τις διαθέσιμες ραδιοβολίσεις στα αεροδρόμια Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου (πίνακας 3.1). Ακολούθησε επεξεργασία, αποκωδικοποίηση και

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

αποτύπωση των διαθέσιμων δεικτών αστάθειας του MODIS και του GII σε χάρτες στον ελλαδικό χώρο.

Η διέλευση του MODIS από την Ελλάδα δεν πραγματοποιείται στις ακριβείς ώρες των ραδιοβολίσεων αλλά έχει μία χρονική διαφορά. Επιλέχτηκαν να μελετηθούν οι δορυφορικοί δείκτες των οποίων η χρονική απόκλιση να μην υπερβαίνει το όριο της 1 ώρας πριν ή μετά από εκείνη των ωρών των αντίστοιχων ραδιοβολίσεων ώστε η μεταξύ τους σύγκριση να είναι πιο έγκυρη. Για τον GII δεν παρουσιάστηκε τέτοιο θέμα αφού υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις στις ώρες πραγματοποίησης ραδιοβολίσεων. Τελικά, για την αξιολόγηση της ακρίβειας των προϊόντων, ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των τριών δεικτών αστάθειας του MODIS (Total Totals, Lifted Index και K-Index) και των δυο δεικτών αστάθειας του GII (Lifted Index και K-Index) σε συνδυασμό με τους αντίστοιχους δείκτες των ραδιοβολίσεων.

4.2.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ MODIS

Οι δείκτες αστάθειας του MODIS δεν είναι διαθέσιμοι για κάθε ημέρα του Ιούνιου διότι σε αρκετές περιπτώσεις υπήρχε νεφοκάλυψη στην περιοχή των σταθμών που εκτελούν ραδιοβολίσεις. Οι μέρες που εμφανίζουν τέτοιο πρόβλημα δε συμμετέχουν στην στατιστική ανάλυση. Επιπροσθέτως, για το σύνολο των ημερών του Ιουνίου, οι ραδιοβολίσεις του αεροδρομίου της Αθήνας για τις 12:00 UTC δεν ήτανε διαθέσιμες. Η επεξεργασία, λοιπόν, που ακολουθεί περιέχει μόνο τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα και από τον MODIS και από τις ραδιοβολίσεις.

Στην αρχή αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα η χρονική εξέλιξη των δεικτών αστάθειας του Total Totals τόσο για τον MODIS όσο και για τις ραδιοβολίσεις για τη Θεσσαλονίκη, την Αθήνα και το Ηράκλειο (εικόνα 4.1).

Ο δείκτης αστάθειας Total Totals παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης στην Αθήνα (0.787) ενώ έπεται το Ηράκλειο (0.473) και τελευταία η Θεσσαλονίκη (0.368). Τα συνολικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας φαίνονται στο πίνακα 4.1

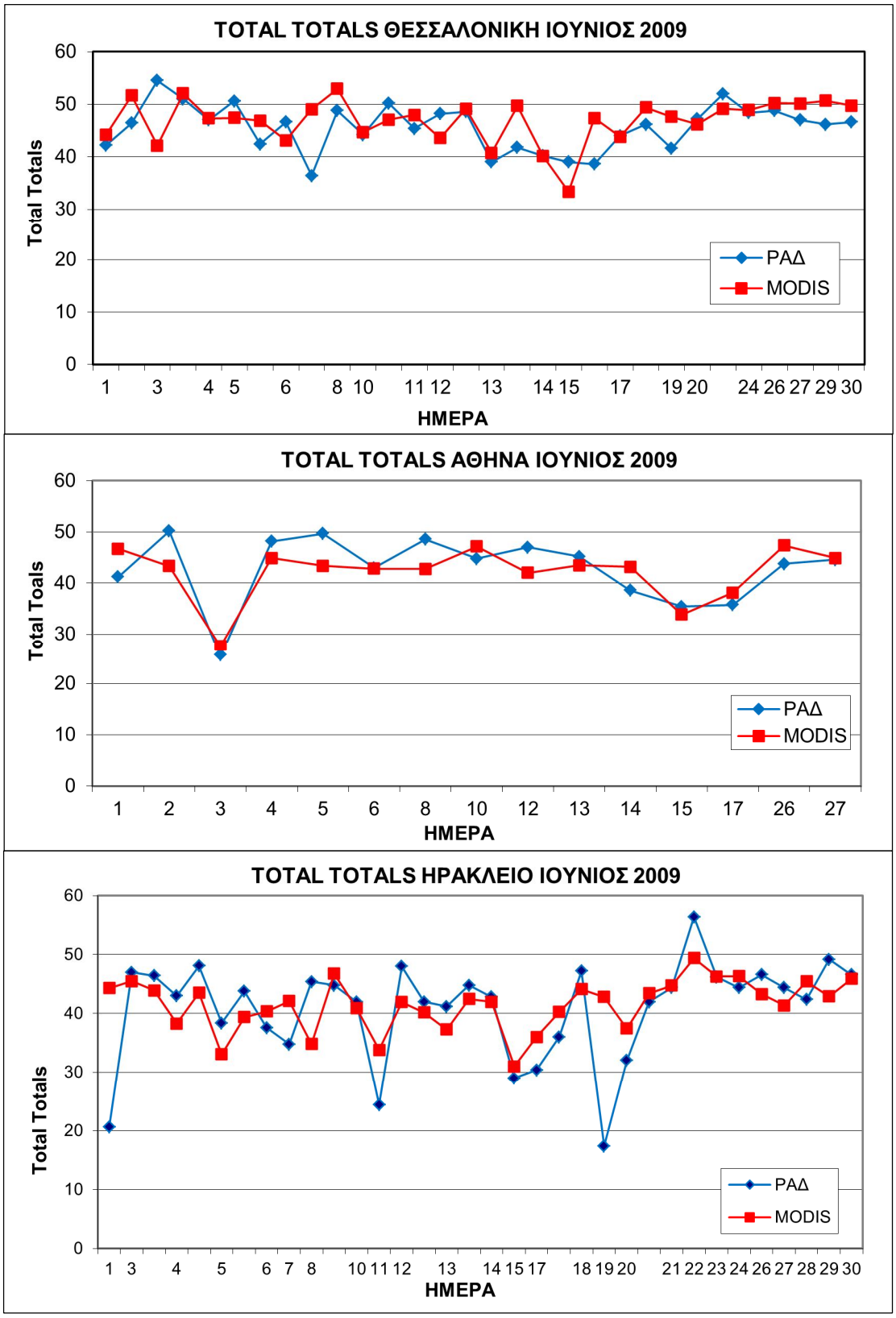
Πίνακας 4.1 *Στατιστικά αποτελέσματα της σύγκρισης του δείκτη αστάθειας Total Totals του MODIS συναρτήσει του Total Totals των ραδιοβολίσεων*

TOTAL TOTALS				
	Συντελεστής Συσχέτισης	**Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)**	**Μέσο σφάλμα (ME) (Δορ-Ραδ)**	**Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)**
Θεσσαλονίκη	0.368	3.680	1.234	4.884
Αθήνα	0.787	3.425	-0.663	4.011
Ηράκλειο	0.473	4.935	0.644	7.385
ΣΥΝΟΛΟ	0.559	3.680	1.234	4.884

Στο σύνολο των τιμών και των τριών πόλεων, ο συντελεστής συσχέτισης έχει τιμή 0.559 με μέσο απόλυτο σφάλμα 3.68, μέσο σφάλμα 1.234 και μέσο

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

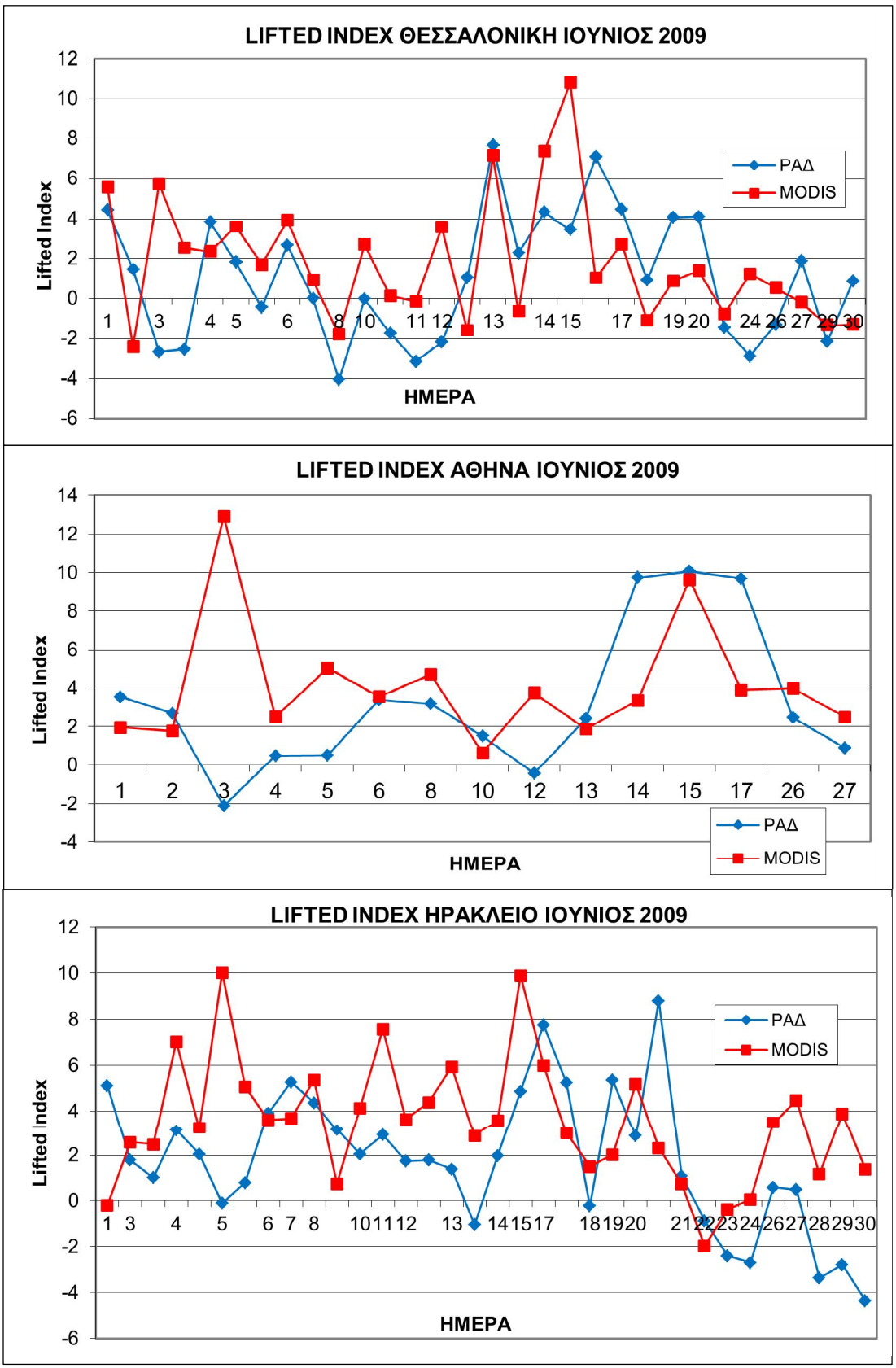
τετραγωνικό σφάλμα 4.884. Συνεπώς, η συσχέτιση τιμών δορυφόρου και επίγειων μετρήσεων παρουσιάζεται σχετικά μέτρια ενώ τα στατιστικά σφάλματα έχουν αρκετά χαμηλή τιμή.



Εικόνα 4.1 *Διάγραμμα τιμών Total Totals για MODIS – ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου για τον Ιούνιο του 2009*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ακολουθεί η αντίστοιχη επεξεργασία για τον Lifted Index. Τα διαγράμματα των τιμών του MODIS με τις ραδιοβολίσεις φαίνονται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 *Διάγραμμα τιμών Lifted Index για MODIS– ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείους για τον Ιούνιο του 2009*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ο δείκτης αστάθειας Lifted Index παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης στην Θεσσαλονίκη (0.402) ενώ έπεται το Ηράκλειο (0.299) και στο τέλος η Αθήνα με σχεδόν μηδενικό συντελεστή συσχέτισης (0.001). Τα συνολικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας φαίνονται στο πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 *Στατιστικά αποτελέσματα τη σύγκρισης του δείκτη αστάθειας Lifted Index του MODIS συναρτήσει του Lifted Index των ραδιοβολίσεων*

LIFTED INDEX				
	Συντελεστής Συσχέτισης	**Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)**	**Μέσο σφάλμα (ME)**	**Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)**
Θεσσαλονίκη	0.402	2.853	0.757	3.434
Αθήνα	-0.001	3.143	0.936	4.862
Ηράκλειο	0.299	3.136	1.674	3.771
ΣΥΝΟΛΟ	0.313	2.853	0.757	3.434

Στο σύνολο των τιμών και των τριών πόλεων, ο συντελεστής συσχέτισης έχει τιμή 0.313 με μέσο απόλυτο σφάλμα 2.853, μέσο σφάλμα 0.757 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα 3.434. Συνεπώς, η συσχέτιση των δορυφορικών εκτιμήσεων και των επίγειων μετρήσεων παρουσιάζεται χαμηλή, ιδιαίτερα για την Αθήνα, ενώ τα στατιστικά σφάλματα έχουν αρκετά υψηλή τιμή.

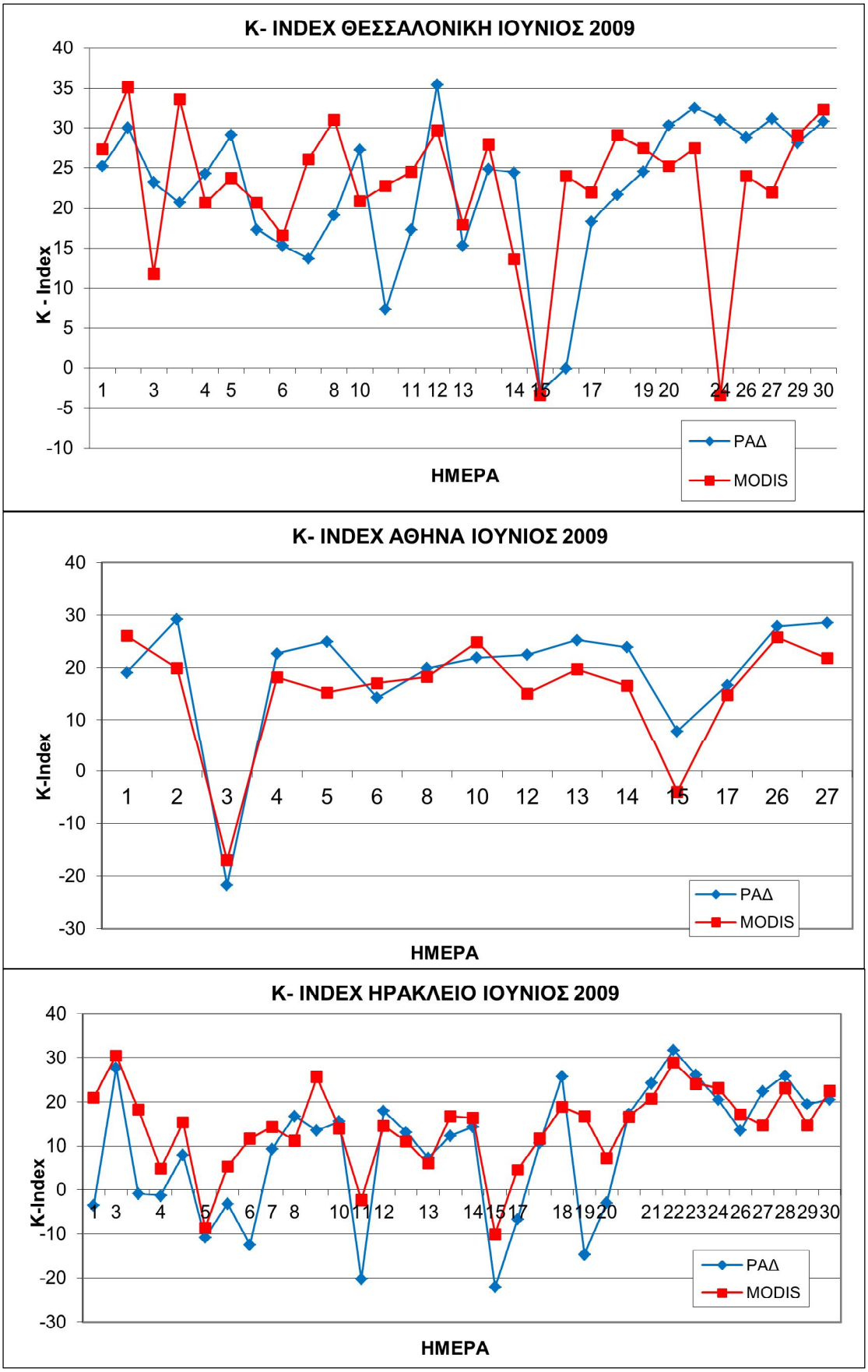
Ακολουθεί η αντίστοιχη επεξεργασία για τον K-Index. Τα διαγράμματα των τιμών του MODIS με τις ραδιοβολίσεις φαίνονται στην εικόνα 4.3.

Ο δείκτης αστάθειας K-Index παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης στην Αθήνα (0.891) ενώ έπεται το Ηράκλειο (0.761) και στο τέλος η Θεσσαλονίκη (0.589). Τα συνολικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας φαίνονται στο πίνακα 4.3

Πίνακας 4.3 *Στατιστικά αποτελέσματα τη σύγκρισης του δείκτη αστάθειας K-Index του MODIS συναρτήσει του K-Index των ραδιοβολίσεων*

K- INDEX				
	Συντελεστής Συσχέτισης	**Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)**	**Μέσο σφάλμα (ME)**	**Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)**
Θεσσαλονίκη	0.589	7.603	0.555	10.470
Αθήνα	0.891	5.713	-3.380	6.473
Ηράκλειο	0.761	9.500	4.874	10.646
ΣΥΝΟΛΟ	0.698	7.583	0.770	10.373

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 4.3 *Διάγραμμα τιμών K-Index για MODIS–ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου για τον Ιούνιο του 2009*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Στο σύνολο των τιμών και των τριών πόλεων, ο συντελεστής συσχέτισης έχει τιμή 0.698 με μέσο απόλυτο σφάλμα 7.583, μέσο σφάλμα 0.77 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα 10.373. Συνεπώς, η συσχέτιση των δορυφορικών εκτιμήσεων και των επίγειων μετρήσεων παρουσιάζεται αρκετά έως πολύ καλή ενώ το μέσο απόλυτο και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζουν αυξημένες τιμές με το μέσο σφάλμα να έχει πολύ μικρή τιμή.

4.2.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GII

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τα δεδομένα του MSG όσο αφορά στο προϊόν GII είναι η ίδια με αυτή της προηγούμενης παραγράφου. Πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των διαθέσιμων δεικτών αστάθειας του GII, δηλαδή του Lifted Index και του K-Index για όλες τις ημέρες του Ιουνίου του 2009. Οι δείκτες του GII, αντιθέτως με του MODIS, ελήφθησαν ακριβώς στις ώρες των ραδιοβολίσεων, δηλαδή στις 00:00 και 12:00 UTC. Για το σύνολο των ημερών του Ιουνίου εκτός από τη μη διαθεσιμότητα κάποιων ραδιοβολίσεων, παρουσιάστηκε και η μη διαθεσιμότητα κάποιων τιμών του GII λόγω ύπαρξης νέφωσης. Η επεξεργασία που ακολουθεί περιέχει μόνο τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα και από τον GII και από τις ραδιοβολίσεις.

Στην αρχή αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα η χρονική εξέλιξη των δεικτών αστάθειας του Lifted Index τόσο για τον GII όσο και για τις ραδιοβολίσεις για τη Θεσσαλονίκη, την Αθήνα και το Ηράκλειο (εικόνα 4.4).

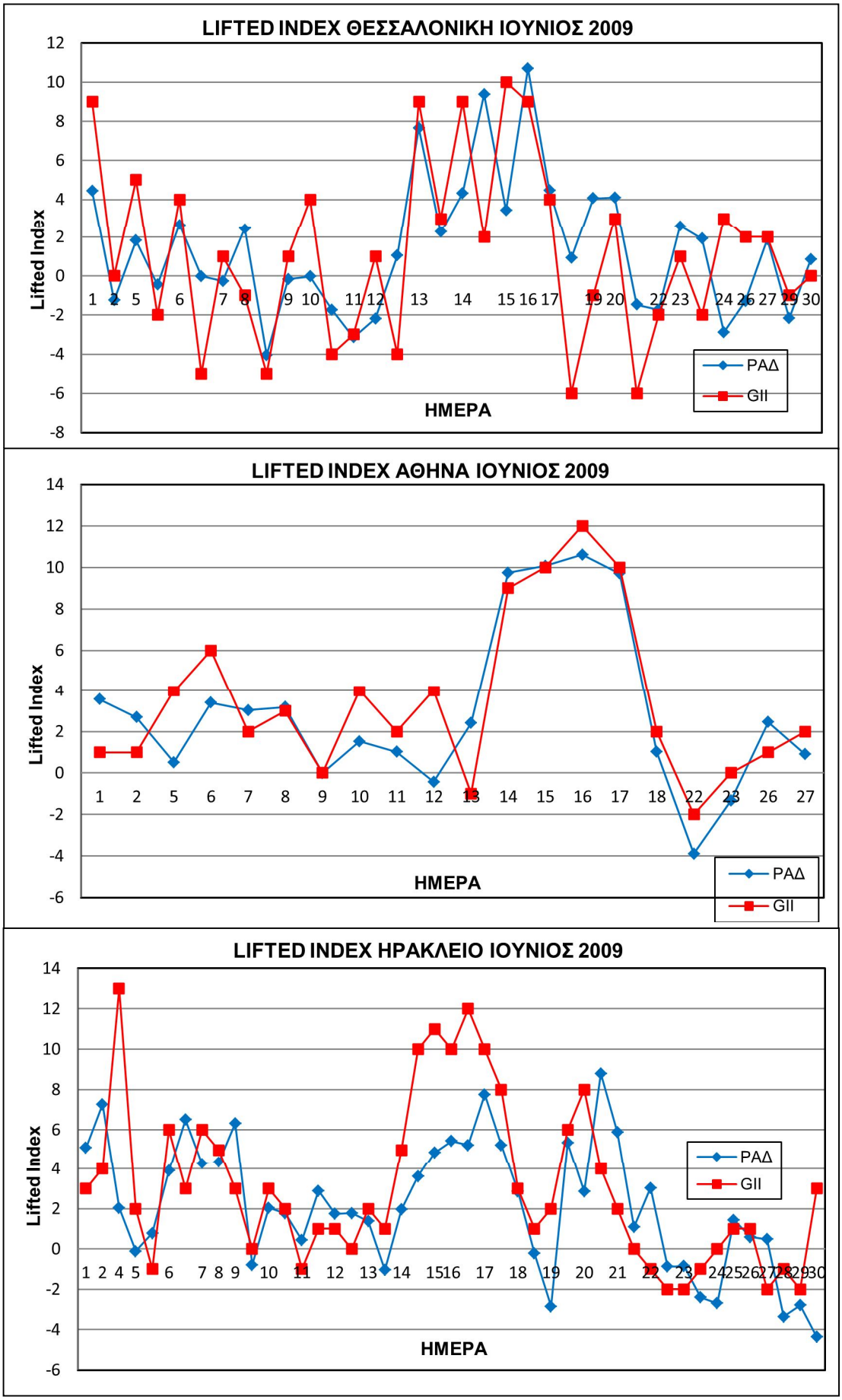
Ο δείκτης αστάθειας Total Totals παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης στην Αθήνα (0.876) ενώ έπεται η Θεσσαλονίκη (0.637) και στο τέλος το Ηράκλειο (0.588). Τα συνολικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας φαίνονται στο πίνακα 4.4

Στο σύνολο των τιμών και των τριών πόλεων, ο συντελεστής συσχέτισης έχει τιμή 0.669 με μέσο απόλυτο σφάλμα 2.505, μέσο σφάλμα 0.444 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα 3.245. Συνεπώς, η συσχέτιση τιμών δορυφόρου και επίγειων μετρήσεων παρουσιάζεται αρκετά έως πολύ καλή ενώ το μέσο απόλυτο και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζουν μικρές τιμές με το μέσο σφάλμα να έχει πολύ μικρή τιμή.

Πίνακας 4.4 *Στατιστικά αποτελέσματα τη σύγκρισης του δείκτη αστάθειας Lifted Index του GII συναρτήσει του Lifted Index των ραδιοβολίσεων*

LIFTED INDEX				
	Συντελεστής Συσχέτισης	**Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)**	**Μέσο σφάλμα (ME)**	**Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)**
Θεσσαλονίκη	0.637	3.016	-0.395	3.515
Αθήνα	0.876	1.677	0.377	2.951
Ηράκλειο	0.588	2.665	0.938	3.472
ΣΥΝΟΛΟ	0.669	2.505	0.444	3.245

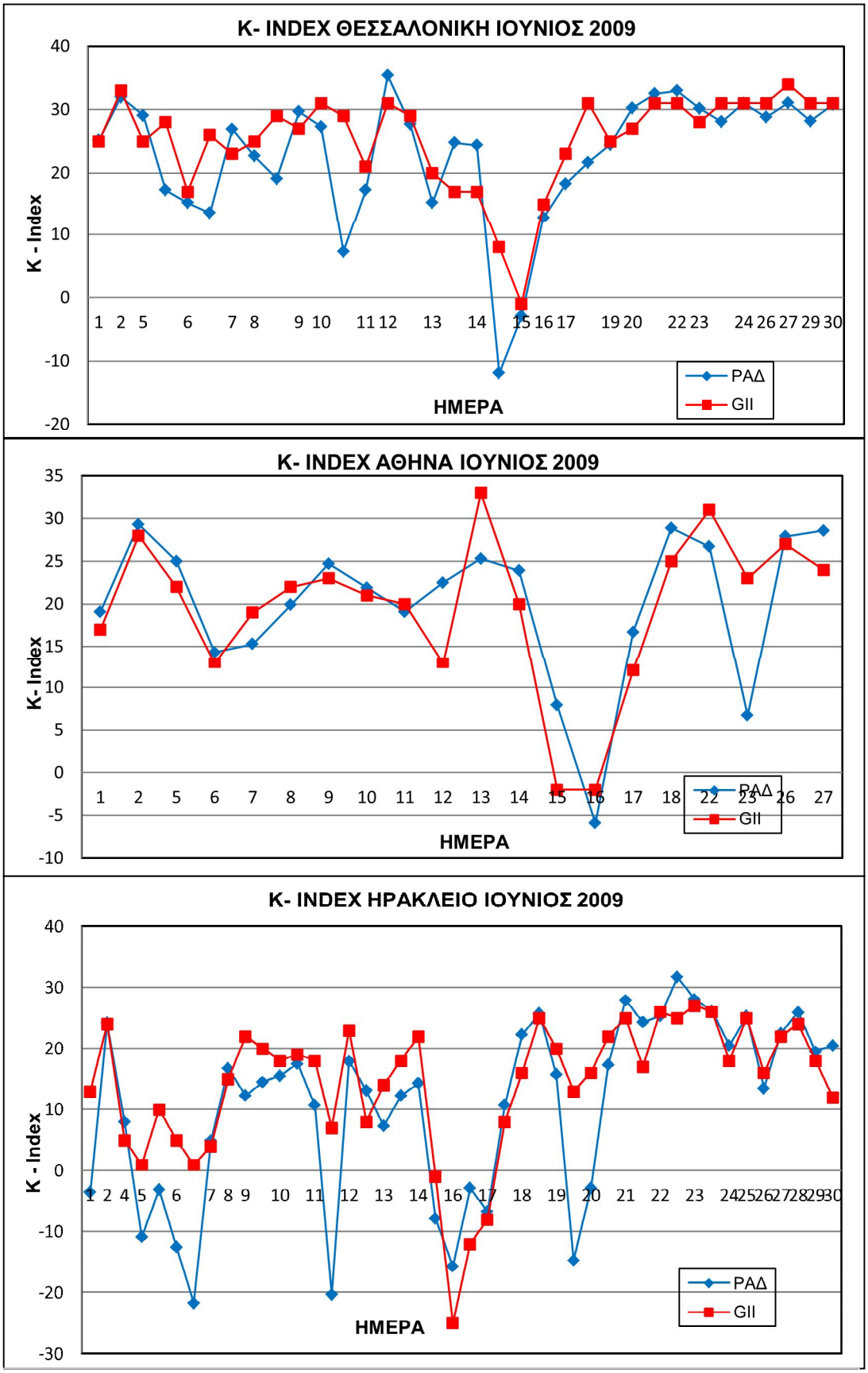
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 4.4 *Διάγραμμα τιμών Lifted-Index για GII–ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου για τον Ιούνιο του 2009*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ακολουθεί η αντίστοιχη επεξεργασία για τον K-Index. Τα διαγράμματα των τιμών του GII με τις ραδιοβολίσεις φαίνονται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 *Διάγραμμα τιμών K-Index για GII–ραδιοβολίσεις των αεροδρομίων Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου για τον Ιούνιο του 2009*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ο δείκτης αστάθειας Total Totals παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης στην Αθήνα (0789) ενώ έπεται το Ηράκλειο (0.776) και στο τέλος η Θεσσαλονίκη (0.77). Τα συνολικά αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας φαίνονται στο πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5 *Στατιστικά αποτελέσματα τη σύγκρισης του δείκτη αστάθειας K-Index του GII συναρτήσει του K-Index των ραδιοβολίσεων*

K- INDEX				
	Συντελεστής Συσχέτισης	**Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)**	**Μέσο σφάλμα (ME)**	**Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE)**
Θεσσαλονίκη	0.770	4.762	2.438	6.932
Αθήνα	0.789	3.092	0.716	2.064
Ηράκλειο	0.776	6.816	3.475	9.735
ΣΥΝΟΛΟ	0.810	5.596	2.316	8.122

Στο σύνολο των τιμών και των τριών πόλεων, ο συντελεστής συσχέτισης έχει τιμή 0.81 με μέσο απόλυτο σφάλμα 5.596, μέσο σφάλμα 2.316 και μέσο τετραγωνικό σφάλμα 8.122. Συνεπώς, η συσχέτιση τιμών δορυφόρου και επίγειων μετρήσεων παρουσιάζεται αρκετά έως πολύ καλή ενώ το μέσο απόλυτο και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζουν σχετικά μικρές τιμές με το μέσο σφάλμα να έχει πολύ μικρή τιμή.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ – ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ (4) ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΝΤΟΝΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ

4.3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Μετά την αξιολόγηση των δορυφορικών προϊόντων του MODIS και του GII με τη βοήθεια ραδιοβολίσεων, εξετάστηκε η ικανότητα των δεδομένων αυτών να συμβάλλουν στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της εμφάνισης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων στην Ελλάδα. Ο εντοπισμός της αστάθειας σε κάποια περιοχή προκύπτει από τις τιμές των δεικτών αστάθειας που διατίθενται από τα δορυφορικά προϊόντα για την περιοχή αυτή. Η ικανότητα των δεικτών αστάθειας των δορυφόρων προϊόντων να εντοπίσουν επιτυχώς την αστάθεια έγκειται στην εγκυρότητα των μετρητικών οργάνων των δορυφόρων και στην ορθότητα υπολογισμού αυτών μέσω των αλγορίθμων υπολογισμού των προϊόντων.

Επιλέχτηκαν, λοιπόν, τέσσερις περιπτώσεις μεγάλης ατμοσφαιρικής αστάθειας στην Ελλάδα με κριτήρια που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι περιπτώσεις αυτές αποτυπώθηκαν σε διαδοχικές εικόνες στο ορατό υψηλής ανάλυσης (HRV) του MSG για να καταδειχθεί το μέγεθος και η χρονική εξέλιξη των MSCs. Ελέγχθηκαν, επίσης, και οι συνοπτικές καταστάσεις των εξεταζομένων περιπτώσεων τόσο στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPα όσο και στη μέση στάθμη θάλασσας (MSLP).

Για να διερευνηθεί η δυνατότητα εντοπισμού των καταιγίδων, λίγες ώρες πριν την εκδήλωσή τους, δημιουργήθηκαν χάρτες με τους δείκτες αστάθειας του MODIS και του GII. Οι χάρτες των δεικτών αστάθειας των δορυφόρων συγκρίθηκαν ποιοτικά με τις εικόνες του ορατού και του θερμικού υπέρυθρου ως προς τη συσχέτιση της εμφάνισης νεφών με τις υψηλές τιμές των δεικτών αστάθειας, με κριτήριο την απόλυτη τιμή των δεικτών αλλά και τη χωρική τους κατανομή. Η μελέτη των τεσσάρων περιπτώσεων εμφάνισης ισχυρής αστάθειας πραγματοποιήθηκε για τις ακόλουθες ημέρες:

- 17-06-2009
- 20-06-2009
- 13-06-2010
- 11-07-2010

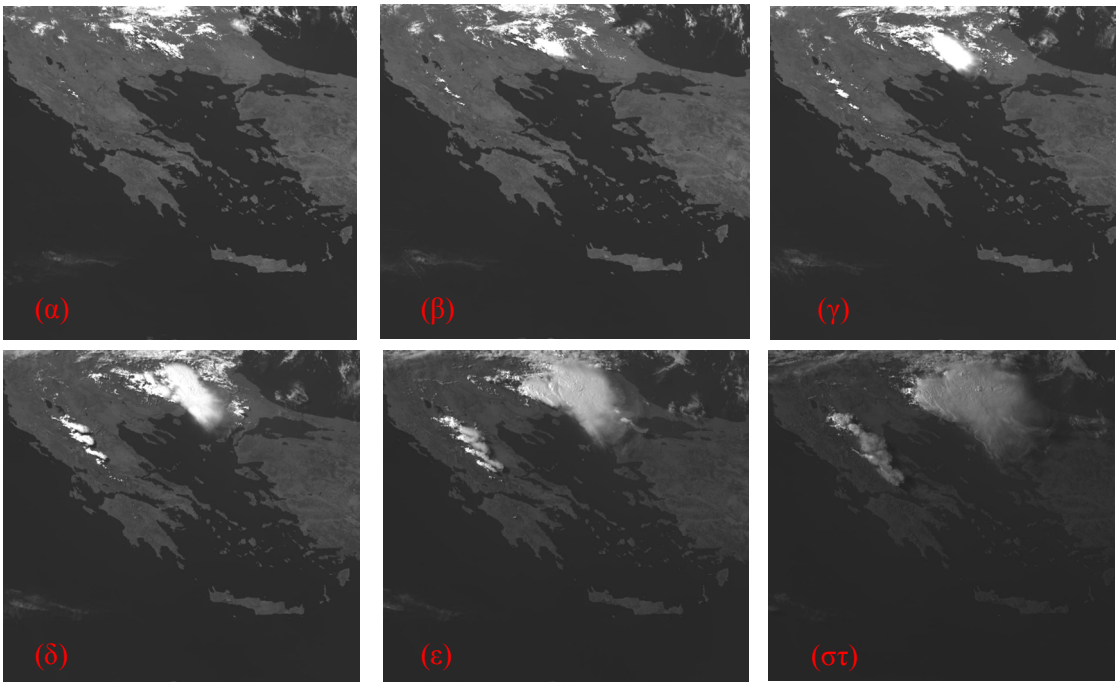
4.3.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΙΣ 17-06-2009

i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MSG

Η Περίπτωση της 17^{ης} Ιουνίου του 2009 είναι μία χαρακτηριστική περίπτωση εμφάνισης πολλαπλών θερμικών καταιγίδων κατά τις μεσημεριανές ώρες στην Ελλάδα. Αρχικά εμφανίζεται ένα μέσης κλίμακας νεφικό σύστημα κατακόρυφης ανάπτυξης (MCS) στην περιοχή του Έβρου το οποίο με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσεται σε μέγεθος. Αργότερα, αναπτύσσονται στην

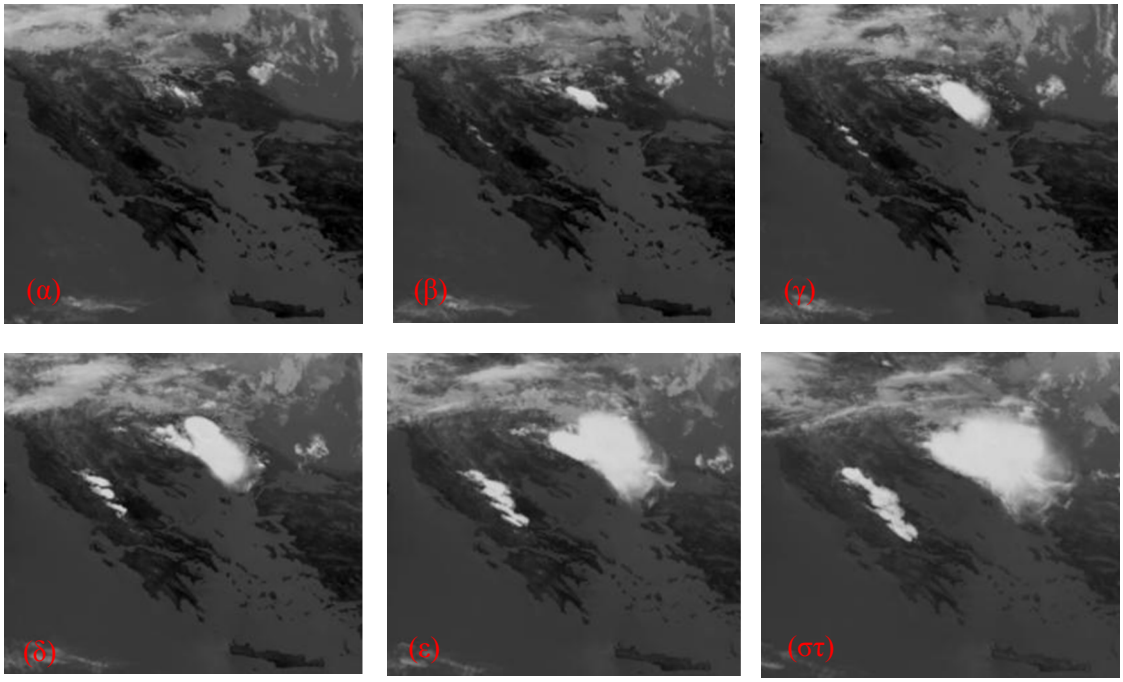
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

οροσειρά της Πίνδου νεφικά κύτταρα κατακόρυφης ανάπτυξης (convective cells) τα οποία επεκτείνονται και στις περιοχές της Θεσσαλίας και της ανατολικής Στερεάς Ελλάδας στις 16:00 UTC όπως φαίνονται στις εικόνες του καναλιού υψηλής ανάλυσης του MSG (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 17-06-2009 στο κανάλι ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV) του MSG κατά τις ώρες: α) 11:00 UTC, β) 12:00 UTC, γ) 13:00 UTC, δ) 14:00 UTC, ε) 15:00 UTC, στ)16:00 UTC.*

Ακολουθούν οι εικόνες από το θερμικό υπέρυθρο του MSG για την ίδια μέρα (εικόνα 4.7).

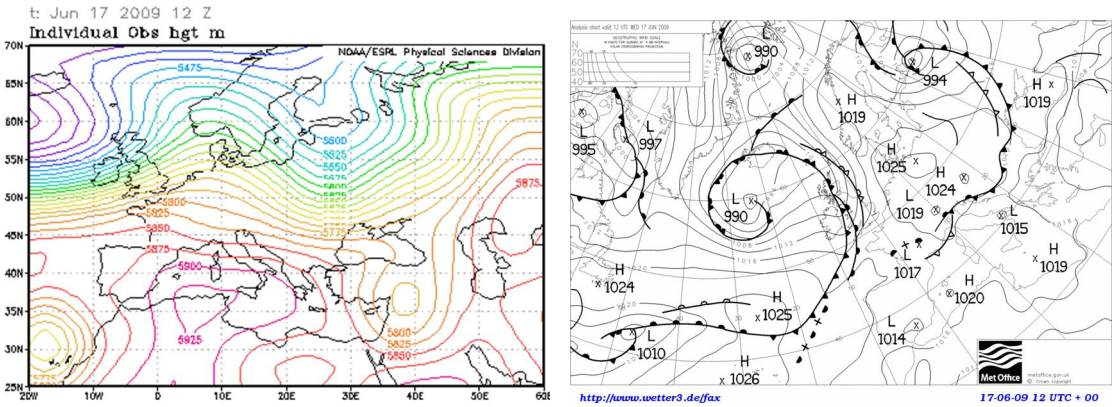


Εικόνα 4.7 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 17-06-2009 στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου (10.8μm) του MSG κατά τις ώρες: α) 11:00 UTC, β) 12:00 UTC, γ) 13:00 UTC, δ) 14:00 UTC, ε) 15:00 UTC, στ)16:00 UTC.*

Η λαμπρότητα των νεφών αντιστοιχεί σε χαμηλές θερμοκρασίες στην οροφή τους (-30 έως -40 ^{o}C) γεγονός που χαρακτηρίζει τη μεγάλη ανάπτυξή τους καθ' ύψος στη τροπόσφαιρα τόσο στην ευρύτερη περιοχή του Έβρου όσο και στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα.

ii. Συνοπτική Ανάλυση

Εξετάζεται η συνοπτική κατάσταση της περίπτωσης της 17^{ης} Ιουνίου του 2009 με τη βοήθεια των χαρτών του ισοβαρικού επιπέδου των 500 hPa και της επιφάνειας (MSLP) για τις12:00 UTC (εικόνα 4.8).



(α) (β)

Εικόνα 4.8 *(α) Γεωδυναμικά ύψη στα 500 hPa και (β) Πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας MSLP, για τις 17-06-2009 και 12:00 UTC*

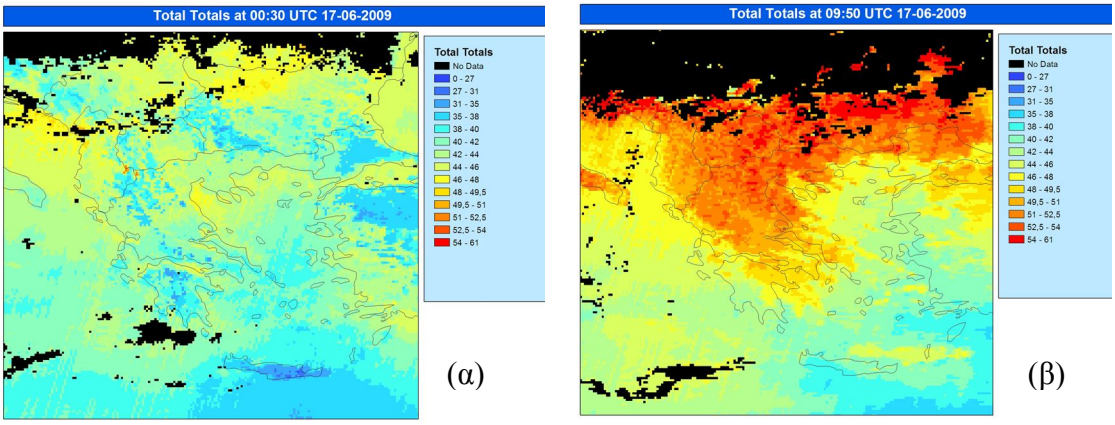
Στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για τις 12:00 UTC εντοπίζεται ένα κέντρο μεγάλων γεωδυναμικών υψών στη βόρεια Αλγερία που εκτείνεται από την Ισπανία μέχρι και την Ελλάδα. Στην περιοχή των κεντρικών Βαλκανίων ως τις Σκανδιναβικές χώρες εμφανίζεται ένας ισχυρός αυλώνας γεωδυναμικών υψών.

Στο χάρτη επιφανείας υπάρχει ένα ψυχρό μέτωπο που καταλήγει σε μετωπική ύφεση με κέντρο κοντά στην ανατολική Φιλανδία και εκτείνεται ως την ανατολική Ιταλία. Στον ελλαδικό χώρο, το μέτωπο βρίσκεται βόρεια της Ελλάδας και αναμένεται να κινηθεί προς αυτή τις επόμενες ώρες.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS

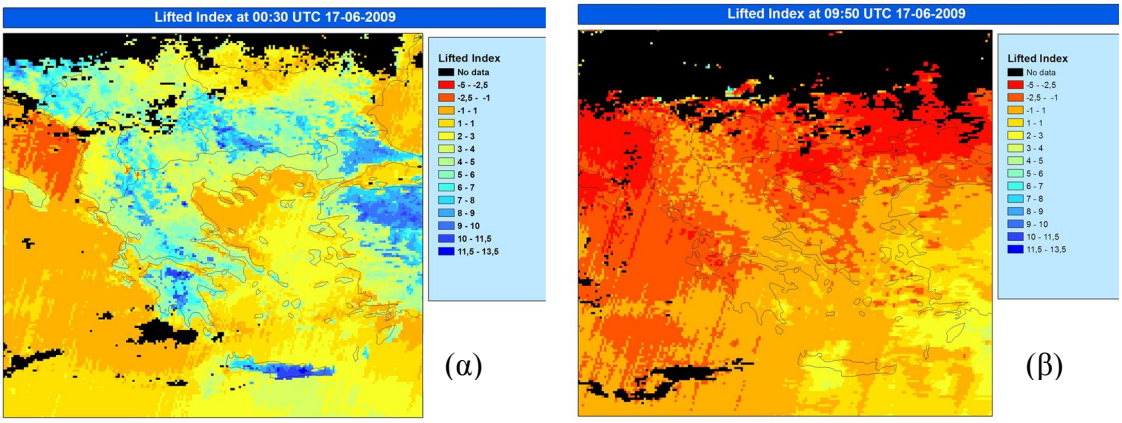
Στην εξεταζόμενη περίπτωση της 17^{ης} Ιουνίου, ο MODIS παρέχει δύο καταγραφές από το πέρασμά του στην Ελλάδα. Η βραδινή καταγραφή είναι στις 00:30 UTC ενώ η πρωινή στις 09:50 UTC. Αμφότερες καταγραφές δεν παρουσιάζουν μεγάλη νεφοκάλυψη και οι δείκτες αστάθειας αποτυπώνονται ικανοποιητικά στους χάρτες. Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται ο δείκτης Total Totals στις 00:30 και 09:50 UTC.



Εικόνα 4.9 *Δείκτης αστάθειας Total Totals του MODIS στις 17-06-2009 για α) 00:30 UTC και β) 09:50 UTC*

Στη βραδινή καταγραφή, ο δείκτης Total Totals εμφανίζεται υψηλός στην ηπειρωτική χώρα (31-46), κυρίως στις περιοχές της Ηπείρου της δυτικής Μακεδονίας και της ορεινής Πελοποννήσου, καταδεικνύοντας την ύπαρξη μεγάλης αστάθειας. Στη μεσημεριανή καταγραφή του δορυφόρου, ο δείκτης αστάθειας ΤΤεμφανίζεται υψηλότατος στην ηπειρωτική Ελλάδα πλην της Πελοποννήσου (49,5-61) γεγονός που προμηνύει την εμφάνιση ισχυρών καταιγίδων στα ηπειρωτικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο δείκτης Lifted Index (εικόνα 4.10) για τις αντίστοιχες ώρες



Εικόνα 4.10 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του MODIS στις 17-06-2009 για α) 00:30 UTC και β) 09:50 UTC*

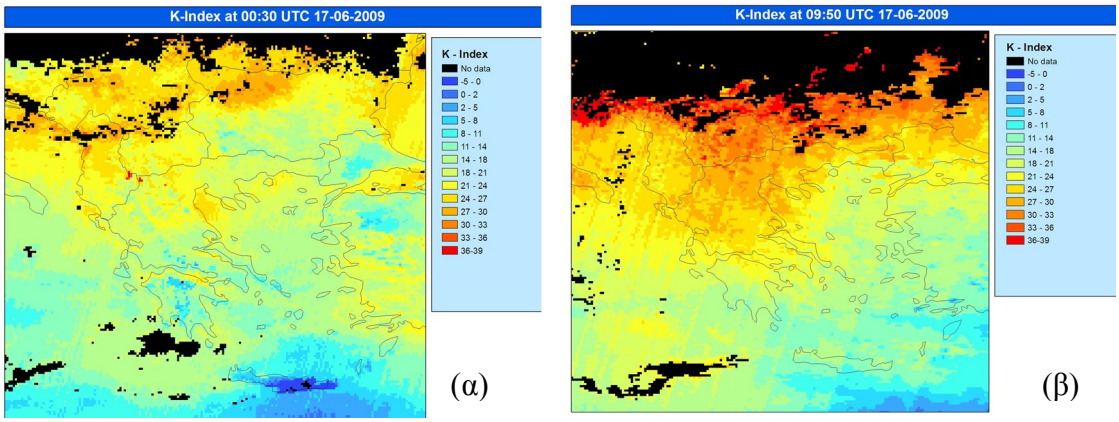
Στη βραδινή καταγραφή, ο δείκτης Lifted Index εμφανίζεται μικρός στην ηπειρωτική χώρα (2-7) καταδεικνύοντας πολύ μικρή πιθανότητα αστάθειας. Οι

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

περιοχές που εμφανίζουν χαμηλότερο αριθμητικά δείκτη, άρα υψηλότερη αστάθεια, είναι η κεντρική Μακεδονία και η περιοχή του Έβρου. Στη μεσημεριανή καταγραφή του δορυφόρου, ο δείκτης αστάθειας LI είναι υψηλός (-4 έως -1), κυρίως στην περιοχή του Έβρου, τη κεντρική Μακεδονία και τα κεντρικά ηπειρωτικά γεγονός που προμηνύει την εμφάνιση νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων στις περιοχές αυτές.

Αξιοπρόσεκτο γεγονός είναι οι υψηλές τιμές του δείκτη στις θαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου και του Ιονίου τόσο στη πρωινή (3 έως -1) όσο και στη μεσημεριανή καταγραφή (-1 έως -4). Οι καταγραφές αυτές πάνω από θαλάσσιες περιοχές δεν είναι αξιόπιστες - ίσως λόγω μεγάλης επίδρασης του κατώτερου στρώματος- και αποτελούν μειονέκτημα του MODIS όσο αφορά στον Lifted Index.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο τελευταίος δείκτης, ο K-index (εικόνα 4.11) για τις αντίστοιχες ώρες. Στη βραδινή καταγραφή, ο δείκτης K-Index εμφανίζεται μέτριος στην ηπειρωτική χώρα (8-24) καταδεικνύοντας μέτρια πιθανότητα αστάθειας.

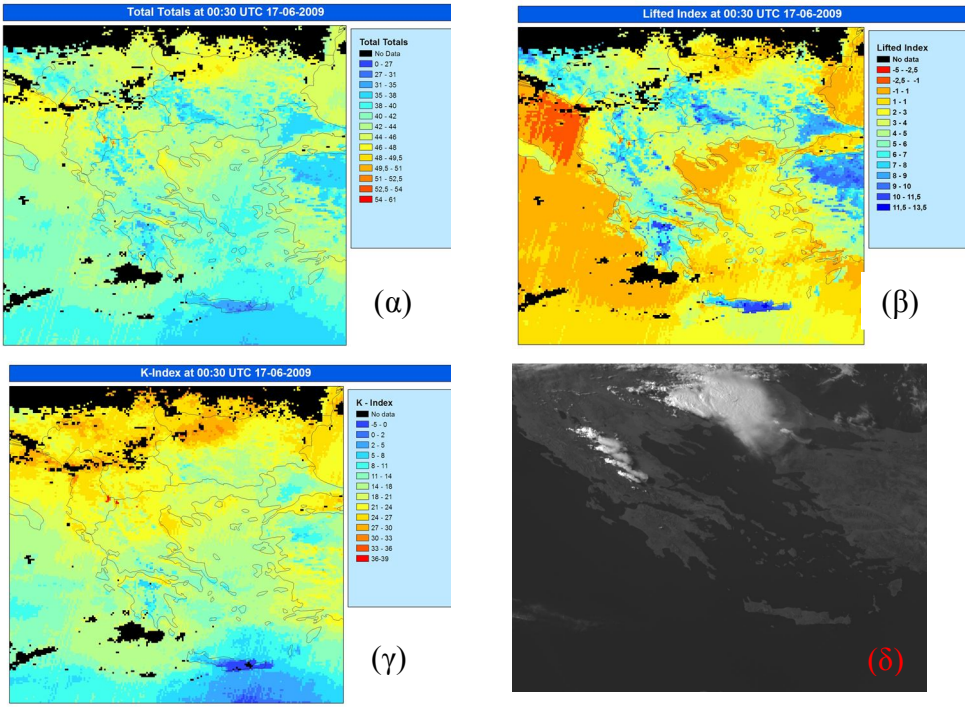


Εικόνα 4.11 *Δείκτης αστάθειας K-Index του MODIS στις 17-06-2009 για α) 00:30 UTC και β) 09:50 UTC*

Στη βραδινή καταγραφή, ο δείκτης K-Index εμφανίζεται μέτριος στην ηπειρωτική χώρα (8-24) καταδεικνύοντας μέτρια πιθανότητα αστάθειας Περιοχές στις οποίες καταγράφονται υψηλότερες τιμές του δείκτη είναι η Μακεδονία και ο Έβρος (18 - 24). Στη μεσημεριανή όμως καταγραφή του δορυφόρου, ο δείκτης αστάθειας KI είναι υψηλότατος (21έως 39), κυρίως στην περιοχή του Έβρου, της Μακεδονίας και της Θεσσαλίας γεγονός που προμηνύει την εμφάνιση νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων στις περιοχές αυτές. Ο TT και ο KI επιτυγχάνουν με επιτυχία την αποτύπωση της αστάθειας σε αντίθεση με τον LI όπου στη βραδινή καταγραφή δίνει μικρές πιθανότητες καταιγίδας.

Στην εικόνα 4.12 εμφανίζονται οι βραδινές καταγραφές των δεικτών του MODIS σε αντιπαραβολή με την εικόνα της 15:00 UTC στο κανάλι του ορατού. Οι δείκτες επιτυγχάνουν εν μέρει να αποτυπώσουν την ανάπτυξη νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης στην περιοχή του Έβρου αλλά αντιθέτως στη περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας δεν επιβεβαιώνεται κάτι αντίστοιχο.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

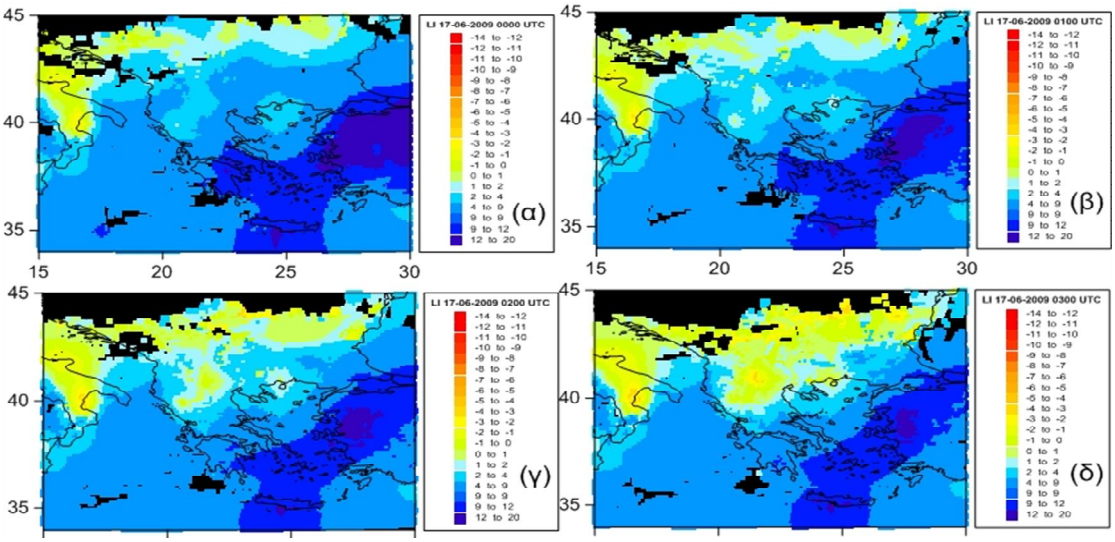


Εικόνα 4.12 *(α) Total Totals, (β) Lifted Index, (γ) K – Index στις 00:30 UTC και (δ) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 17-06-2009 και ώρα 15:00 UTC*

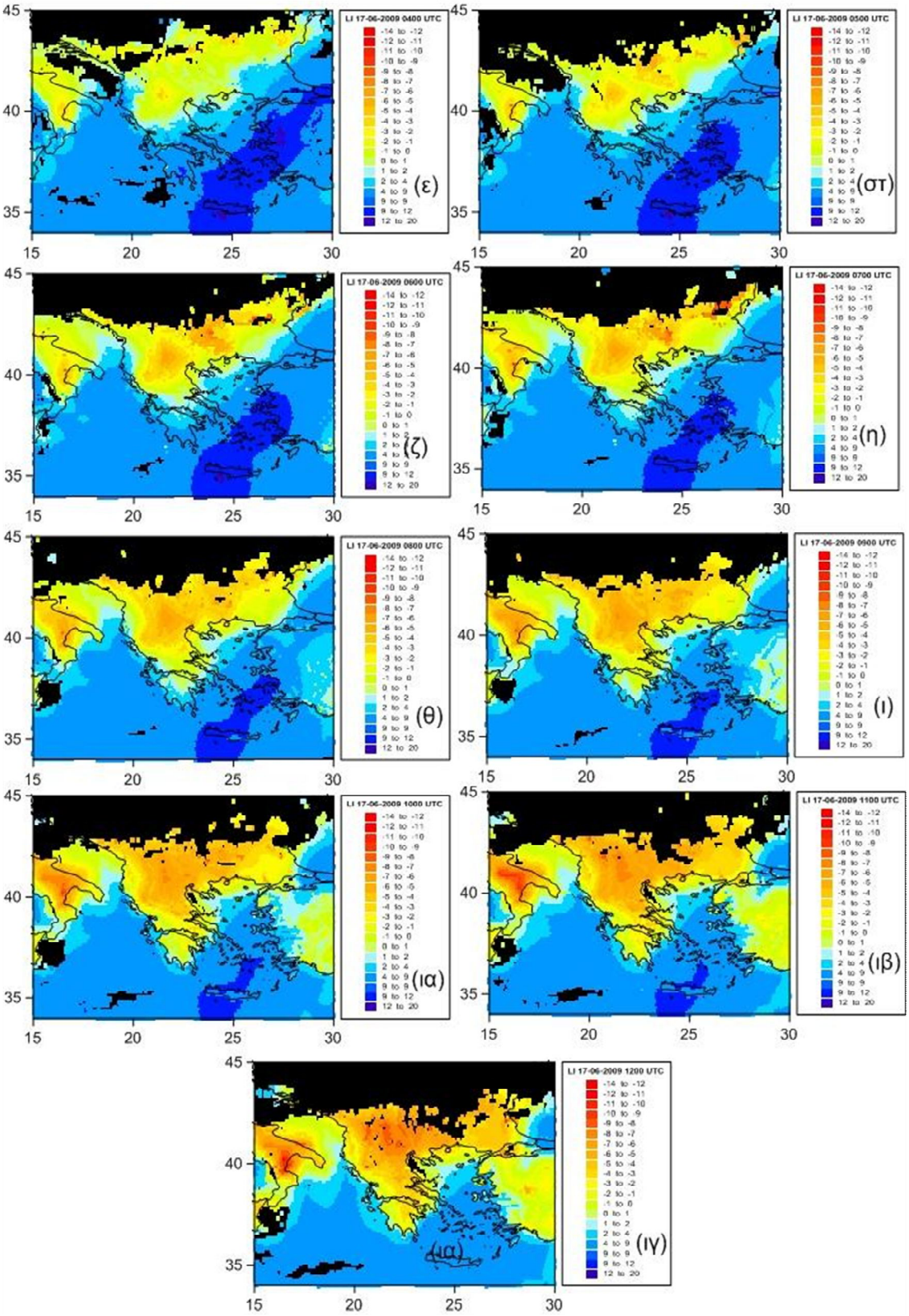
Στη περιοχή της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας, ο TT και ο LI δε δίνουν μεγάλη πιθανότητα αστάθειας σε αντίθεση με τον KI ο οποίος εμφανίζεται με τιμές από 18 έως 24.

iv. Μελέτη της αστάθειας με το προϊόν GII

Όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιώντας τον GII υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της ατμοσφαιρικής αστάθειας ανά 15 λεπτά της ώρας. Επιλέχτηκε η πραγματοποίηση της καταγραφής αυτής να γίνει ανά ώρα, δηλαδή από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC ώστε να αποτυπωθεί και χρονικά η εξέλιξη της αστάθειας. Αρχικά δημιουργήθηκαν οι χάρτες του GII για τον Lifted Index (Εικόνα 4.13).



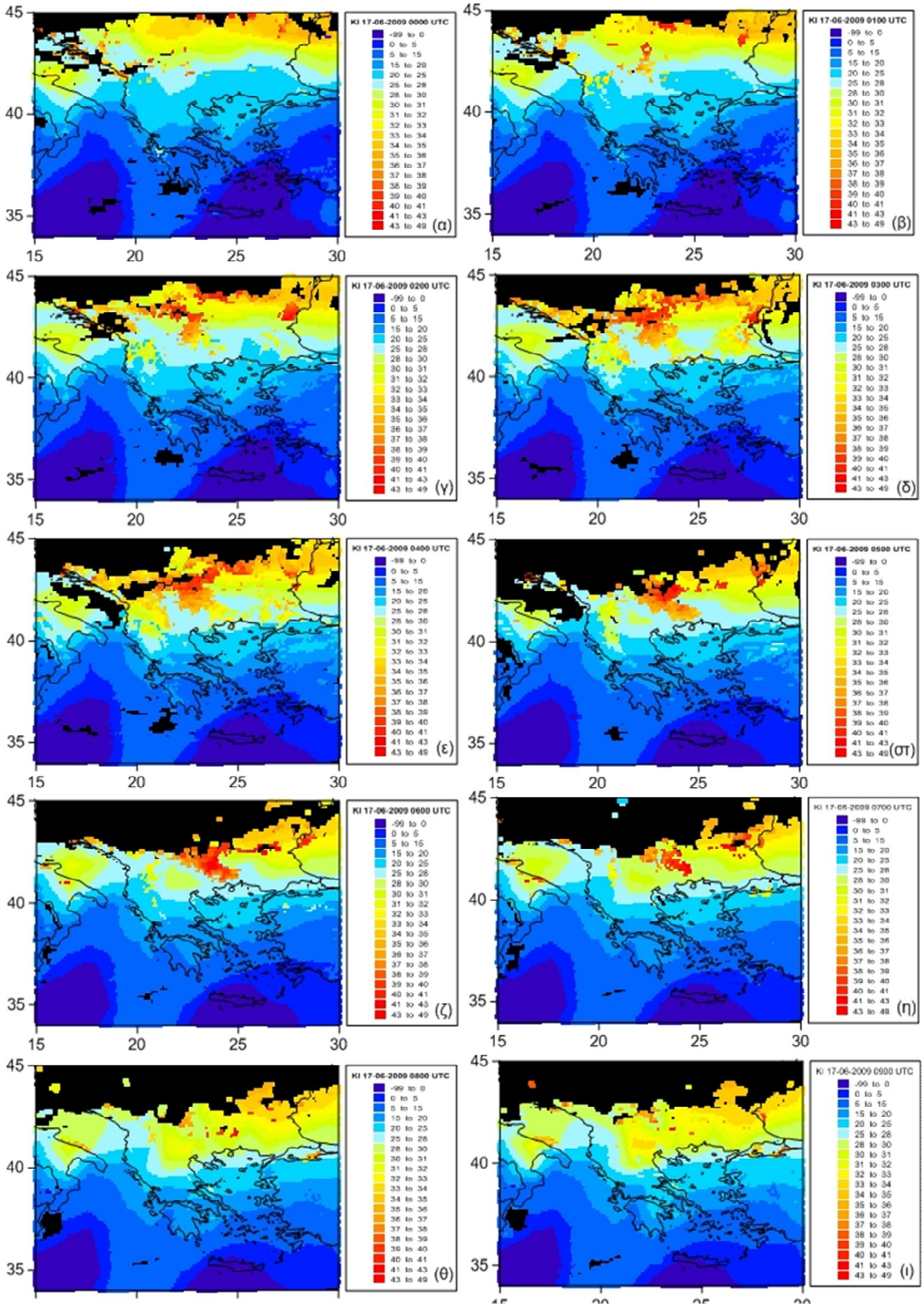
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



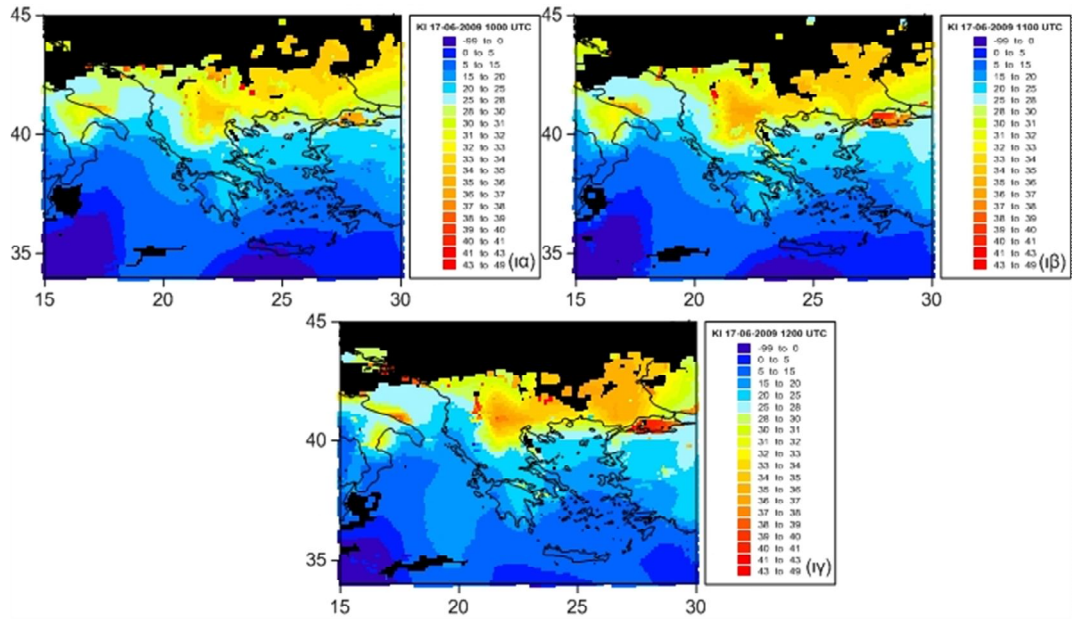
Εικόνα 4.13 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του GII στις 17-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC,ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η χρονική εξέλιξη του δείκτη από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC δείχνει τη σταδιακή μείωση της τιμής του LI που ξεκινά από την Ήπειρο, συνεχίζει στη Μακεδονία και αργότερα υφίσταται για όλη την ηπειρωτική χώρα. Η τιμή του δείκτη στις μεσημεριανές ώρες κυμαίνεται από -5 έως -8 στις στην Ηπείρου, στης Μακεδονίας και στη Θεσσαλίας. Αντιστοίχως, η ίδια καταγραφή για τις ίδιες ώρες μελέτης ακολουθεί και για τον δείκτη του K-Index του GII. Οι χάρτες του GII για τον K-Index αποτυπώνονται στην Εικόνα 4.14.



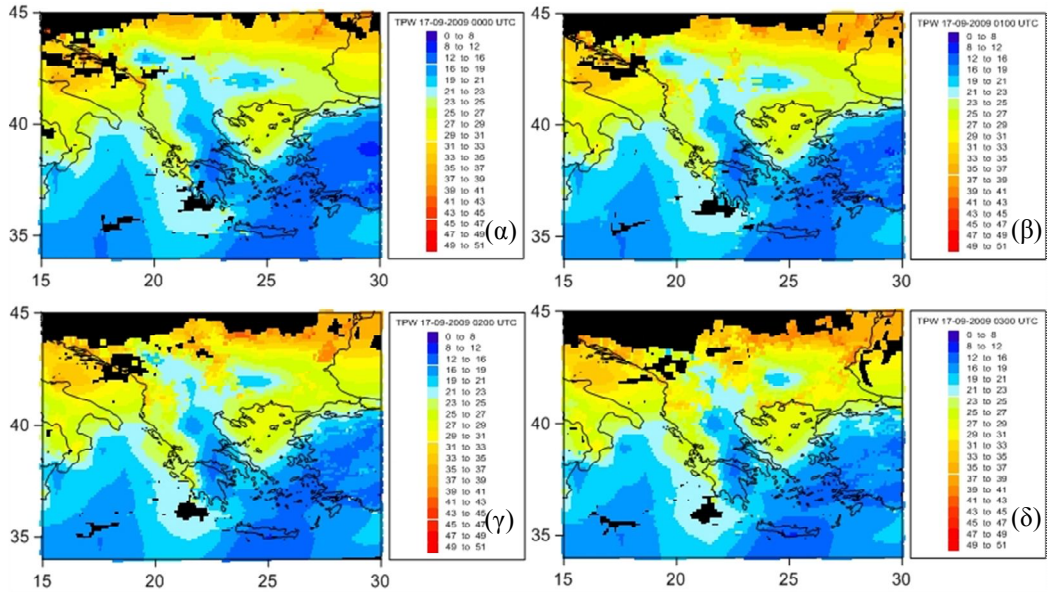
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

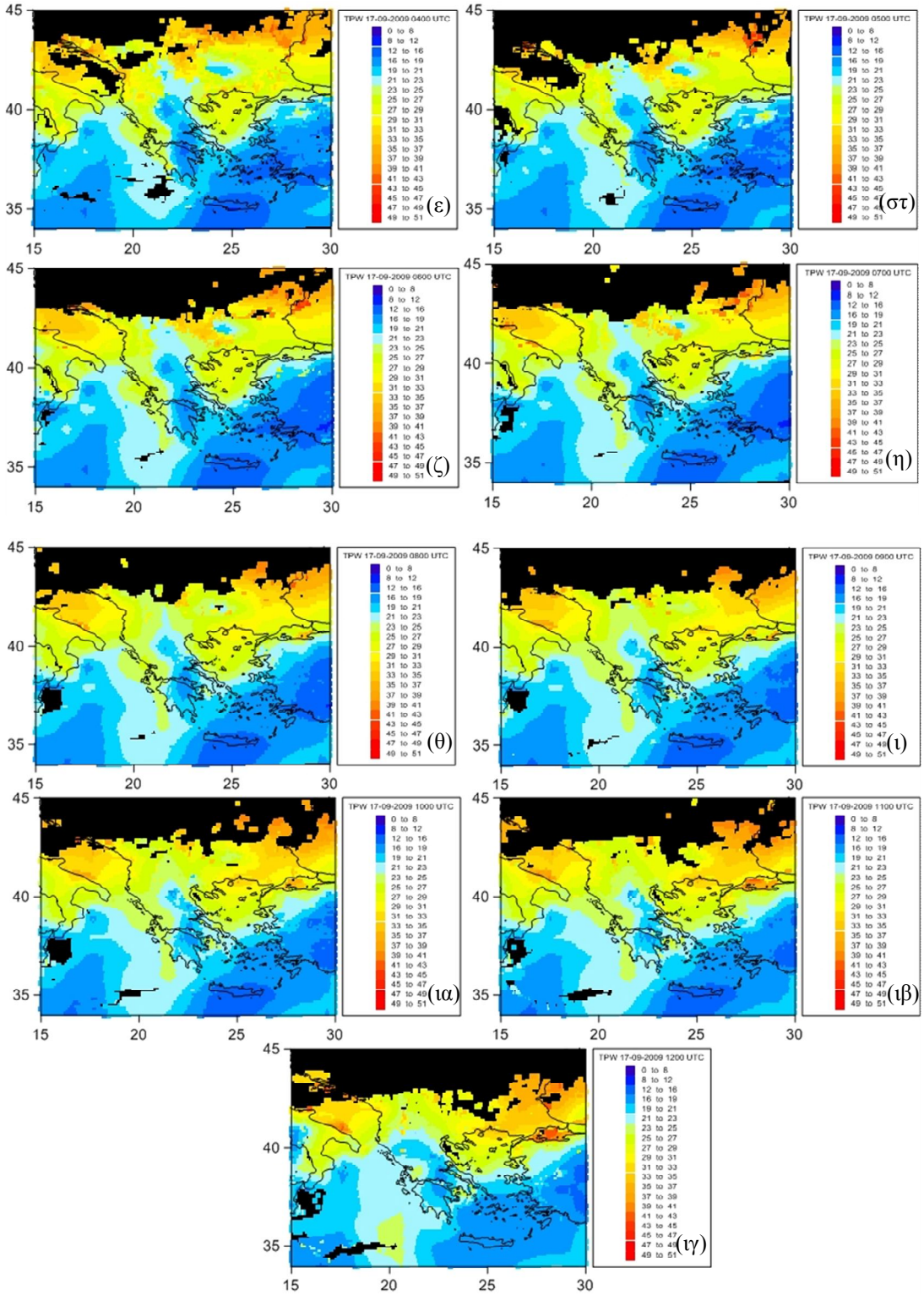


Εικόνα 4.14 *Δείκτης αστάθειας K-Index του GII στις 17-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC,ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

Η χρονική εξέλιξη και του δείκτη αυτού από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC δείχνει την σταδιακή αύξηση της τιμής του KI. Τιμές του δείκτη αυτού μεγαλύτερες από 20, αντιστοιχούν σε συνθήκες αστάθειας γεγονός που αποτυπώνεται στους χάρτες. Η αστάθεια εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή της Βόρειας Ελλάδας, συμπεριλαμβανομένης Θράκης, Δυτικής Μακεδονίας και της Θεσσαλίας όπου στις εικόνες του ορατού του MSG εμφανίζονται τα κελιά των MSCs. Αμφότεροι οι δείκτες αστάθειας του GII, ο Lifted-Index και ο K-Index, φαίνεται ότι επιτυγχάνουν την καταγραφή της αστάθειας στον Ελλαδικό χώρο με επιτυχία μερικές ώρες πριν από την εμφάνισή τους.

Ο GII παρέχει και την εκτίμηση της συνολικής στήλης ύδατος, το TWP (Total Precipitable Water). Η παράμετρος αυτή υπολογίζει το υετίσιμο ύδωρ που περιέχεται στη στήλη ύδατος ανά τετραγωνικό μέτρο. Στην εικόνα 4.15 φαίνονται χαρτογραφημένα τα αποτελέσματα του TPW για τις 17-06-2009.





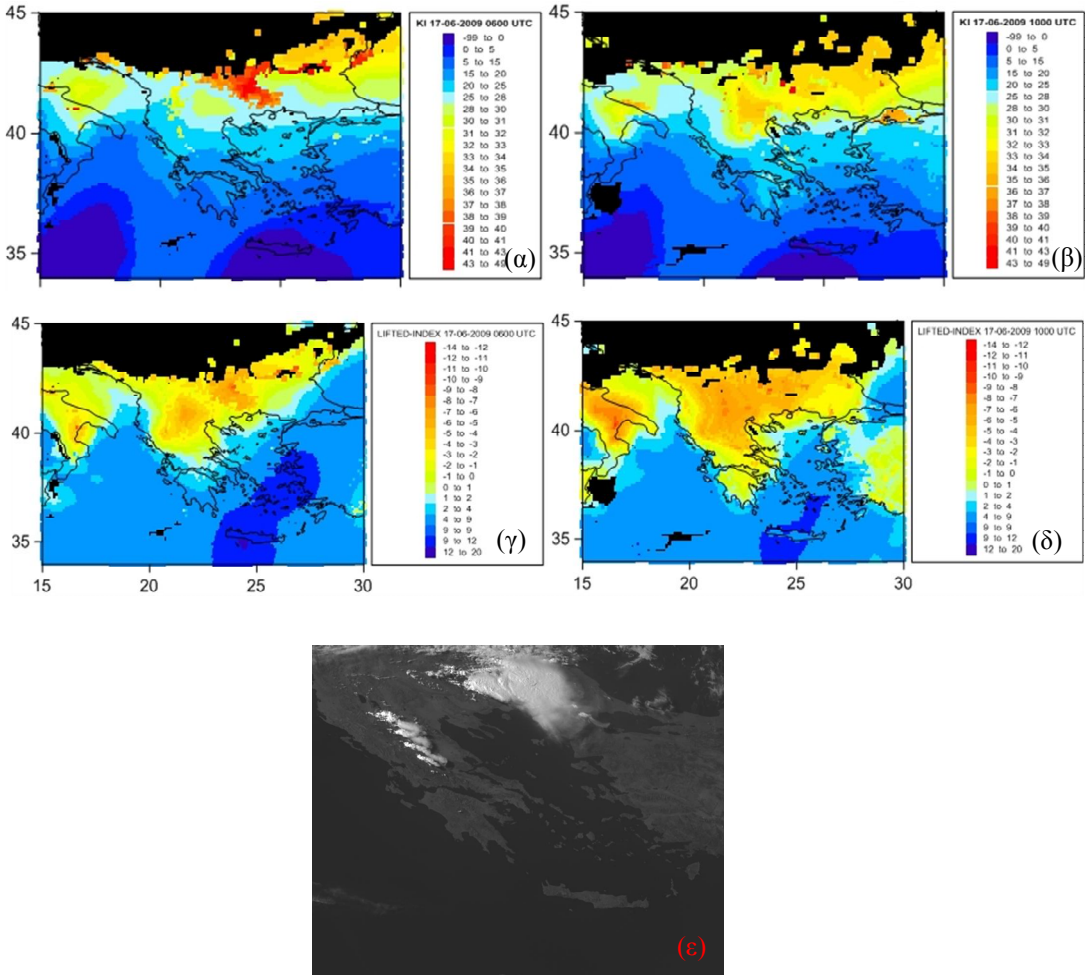
Εικόνα 4.15 *Total Precipitable Water (TWP) του GII στις 17-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC,ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

Οι χάρτες του TWP δείχνουν αρχικά για τη Θράκη και τη δυτική Ελλάδα μέτριες τιμές της στήλης ύδατος (27-31 kg/m^2) ενώ στη κεντρική και ανατολική ηπειρωτική Ελλάδα οι τιμές είναι χαμηλότερες (16-21 kg/m^2). Με το πέρασμα του χρόνου, ανεβαίνει αρκετά η τιμή του TWP στη Θράκη (35-39

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

kg/m^2), όπου εμφανίζονται νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης σε ευρεία κλίμακα. Αντιθέτως, στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα, η στήλη ύδατος βαίνει μειούμενη (19-23 kg/m^2), γεγονός που ενδεχομένως εξηγεί και τη μικρότερη έκταση των νεφών που δημιουργούνται.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες του Lifted Index και του K-Index του GII σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.16 *(α) Lifted Index του GII στις 06:00 UTC, (β)Lifted-Index του GII στις 10:00 UTC, (γ) K-Index του GII στις 06:00 UTC, (δ) K-Index του GII στις 10:00 UTC, (ε) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 17-06-2009 και ώρα 15:00 UTC*

Ο δείκτης LI εμφανίζει υψηλές τιμές στις 06:00 UTC και κυρίως στη δυτική και ανατολική Μακεδονία και Έβρο (-3 έως -6) ενώ στις 10:00 UTC αποτυπώνει την έντονη αστάθεια σε όλη τη βόρεια Ελλάδα (-3 έως -8, εικόνα 4.16 α, β). Αντίστοιχα, ο δείκτης KI υποδεικνύει υψηλότατη αστάθεια στην ανατολική Μακεδονία και Έβρο (38 έως 49, εικόνα 4.16 γ) γεγονός που συμπίπτει πλήρως με τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης της εικόνας του ορατού

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

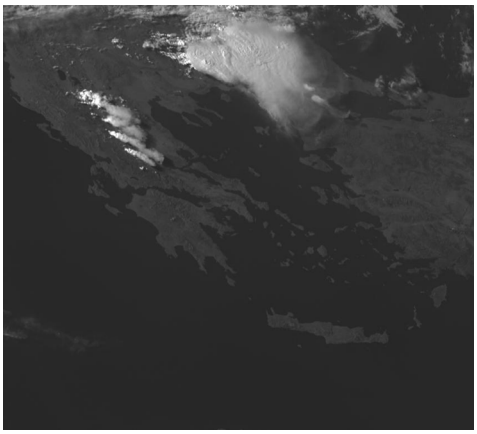
(εικόνα 4.16 ε), ενώ στις 10:00 UTC αποτυπώνει έντονη αστάθεια πάνω από τη δυτική Μακεδονία και τον Έβρο (33 έως 37, εικόνα 4.16 δ).

Ο GII φαίνεται ότι προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις περιοχές όπου μερικές ώρες μετά εμφανίζονται νέφη. Ο δείκτης KI δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον δείκτη LI εντοπίζοντας τις περιοχές του Έβρου και της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας όπου είναι ύποπτες για έντονη αστάθεια και δημιουργία μεγάλων νεφικών συστημάτων κατακόρυφης ανάπτυξης. Ωστόσο, ενώ δίνουν τιμές υψηλές στη κεντρική Μακεδονία, τόσο ο KI όσο και ο LI δε δημιουργούνται νέφη τις επόμενες ώρες.

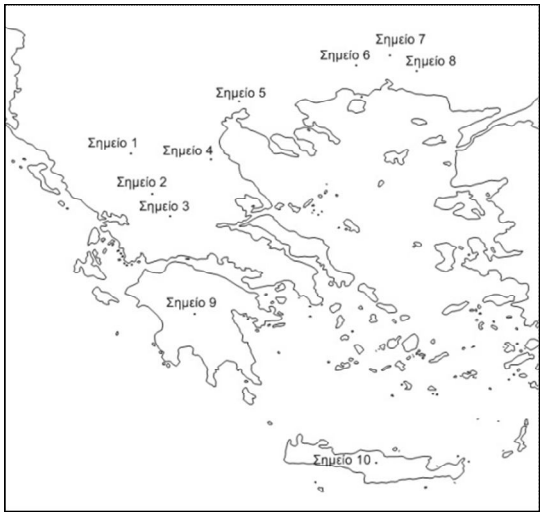
v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών του GII

Ο GII παρέχει δεδομένα με μεγάλη χρονική ανάλυση, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα καταγραφής και ανάλυσης της χρονικής εξέλιξης των τιμών των δεικτών αστάθειας. Στόχος είναι η καταγραφή των τιμών αλλά και των μεταβολών τους συναρτήσει του χρόνου ώστε να εντοπιστούν σημαντικές τάσεις. Για τη χρονική μελέτη, επιλέχτηκαν συγκεκριμένα σημεία στον Ελλαδικό χώρο, μερικά από αυτά εντός των περιοχών αστάθειας, της περιοχών δηλαδή εμφάνισης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και μερικά εκτός των περιοχών εμφάνισης νεφών.

Στην εικόνα 4.17 εμφανίζεται ο χάρτης με τα επιλεγμένα σημεία καθώς και η εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης του MSG.



(α)



(β)

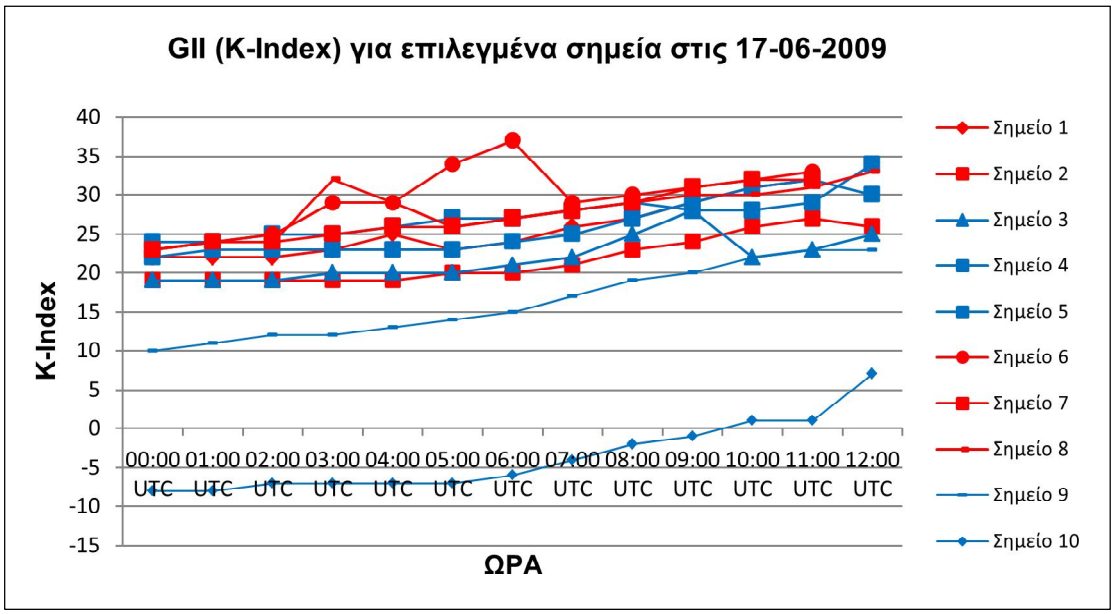
Εικόνα 4.17 *(α) Εικόνα ορατού υψηλής ανάλυσης για τις 17-06-2009 και (β) χάρτης Ελλάδας με τα επιλεγμένα σημεία για χρονική μελέτη.*

Τα σημεία 1,2,6,7,8, βρίσκονται εντός περιοχών εμφάνισης νεφών ενώ στα σημεία 3, 4, 5,9 και 10 δεν αναπτύσσονται νέφη. Στις επόμενες εικόνες αποτυπώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα των δεικτών αστάθειας συναρτήσει του χρόνου.

Από τη σύγκριση των τιμών στο διάγραμμα της εικόνας 4.18 προκύπτει αυξητική τάση του δείκτη K-Index σε όλα τα σημεία. Στα σημεία που

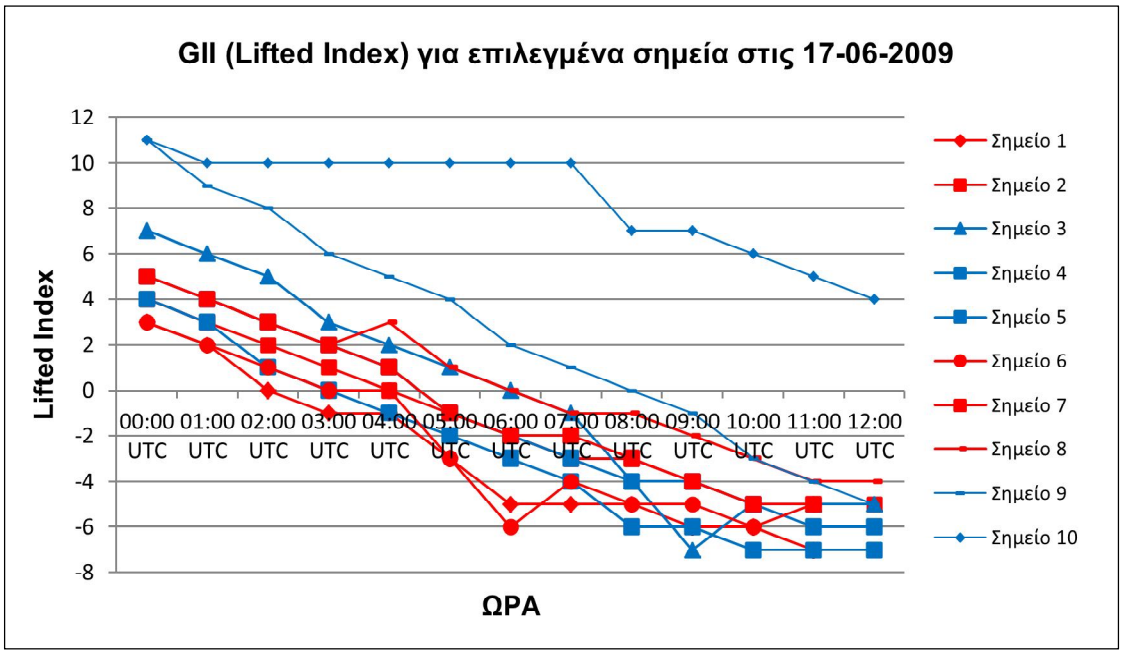
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

εμφανίζονται νέφη (1,2,6,7 και 8, κόκκινο χρώμα), ο δείκτης παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες τιμές (μεγαλύτερες του 30) μετά τις 10:00 UTC εκτός από το σημείο 2. Σε γενικές όμως γραμμές προκύπτει αντίστοιχη εικόνα για όλα τα σημεία, δηλαδή είτε πρόκειται για σημεία με νεφοκάλυψη, είτε για σημεία εκτός αυτής (3,4, 5, 9 και 10, μπλε χρώμα).



Εικόνα 4.18 *Διάγραμμα του K-Index (GII) για τις 17-06-2009 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συναρτήσει της ώρας*

Το ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και για τον δείκτη Lifted Index του GII στην εικόνα 4.19 για τα ίδια ακριβώς σημεία (κόκκινο για νεφοκάλυψη, μπλε για τη μη νεφοκάλυψη).

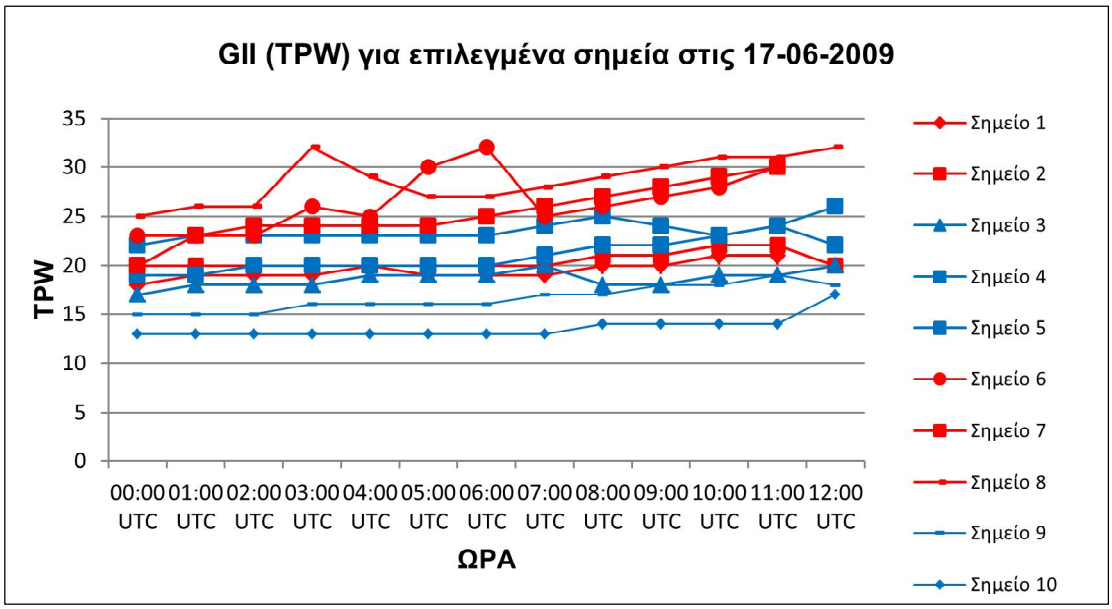


Εικόνα 4.19 *Διάγραμμα του Lifted-Index (GII) για τις 17-06-2009 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συναρτήσει του χρόνου*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αντιστοίχως και ο δείκτης Lifted Index παρουσιάζει πτωτική τάση, δηλαδή σηματοδοτεί έντονη αστάθεια, για όλα τα σημεία. Τα σημεία στα οποία αναπτύχθηκαν νέφη παρουσιάζουν σχετικά μικρότερη τιμή και μεγαλύτερη μεταβολή στις πρώτες μεταμεσονύκτιες ώρες αλλά προς το μεσημέρι τα σημεία στα οποία δεν υπάρχει νεφοκάλυψη παρουσιάζουν μικρότερες αρνητικές τιμές.

Αντίστοιχο διάγραμμα τιμών για το συνολικό υετίσιμο ύδωρ (TPW) συναρτήσει των ωρών δημιουργήθηκε (εικόνα 4.20) ώστε να μελετηθεί η εξέλιξη του υετίσιμου ύδατος.



Εικόνα 4.20 *Διάγραμμα του Total Precipitable Water (TPW) του GII για τις 17-06-2009 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συναρτήσει του χρόνου*

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι τα περισσότερα σημεία σε περιοχές με νέφη (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζουν μεγαλύτερο TPW από τα υπόλοιπα (μπλε χρώμα) χωρίς όμως αυτό να ισχύει για το σημείο 1 και 2. Τα δε σημεία 4 και 5 που βρίσκονται σε καθαρές από νέφη περιοχές παρουσιάζουν μεγαλύτερο TPW από τα σημεία 1 και 2. Η εικόνα του TPW δεν είναι ξεκάθαρη όσο αφορά στο σχηματισμό νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης. Τα νέφη φαίνεται να σχηματίζονται σε μία ασταθή ατμόσφαιρα όταν υπάρχει TPW πάνω από 20 kg/m^2 χωρίς όμως αυτό να αποτελεί κανόνα.

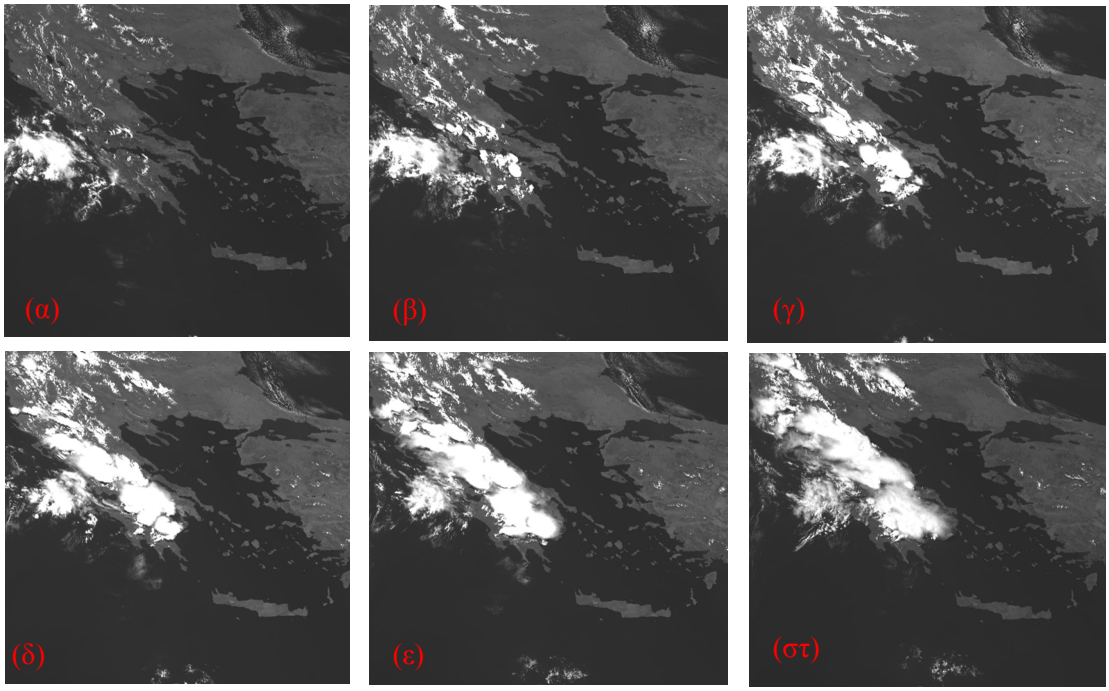
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4.3.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΙΣ 20-06-2009

i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MSG

Στην περίπτωση αστάθειας της 20^{ης} Ιουνίου του 2009, τα πρώτα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης εμφανίζονται στην οροσειρά της Πίνδου τις πρώτες μεσημεριανές ώρες (εικόνα 4.21α) ενώ η νέφωση στο Ιόνιο πέλαγος αποτελείται από χαμηλά νέφη (εικόνα 4.21α του υπέρυθρου). Με τη πάροδο του χρόνου, δημιουργούνται κελιά αστάθειας σε όλο το κορμό της ηπειρωτικής Ελλάδας πάνω από τη κορυφογραμμή της Πίνδου εκτεινόμενα από τη δυτική Μακεδονία, την Ήπειρο, τη Στερεά έως και την Πελοπόννησο (εικόνα 4.21β).

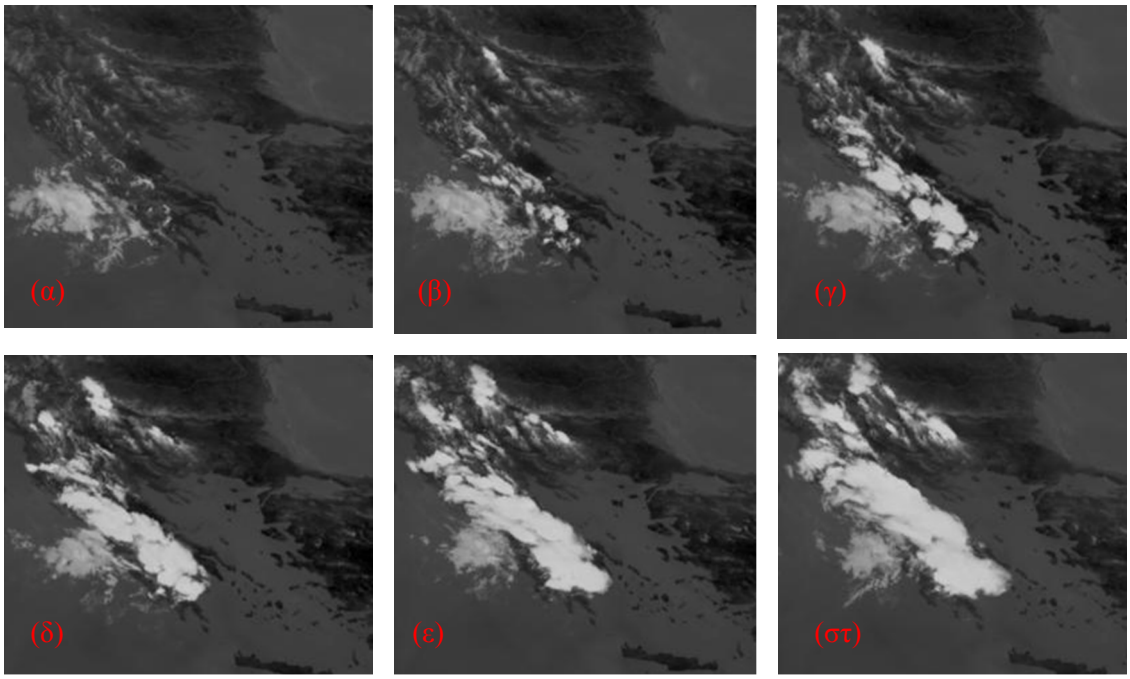
Τα κελιά αστάθειας μεγαλώνουν με τις επόμενες ώρες σχηματίζοντας μία μεγάλη νέφωση που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της κεντρικής και δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας όπως φαίνονται στις εικόνες του καναλιού υψηλής ανάλυσης του MSG (εικόνα 4.21 δ, ε, στ).



Εικόνα 4.21 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 20-06-2009 στο κανάλι ορατού υψηλής ανάλυσης του MSG κατά τις ώρες: α) 09:00 UTC, β) 10:00 UTC, γ) 11:00 UTC, δ) 12:00 UTC, ε) 13:00 UTC, στ)14:00 UTC.*

Ακολουθούν οι αντίστοιχες εικόνες από το θερμικό υπέρυθρο του MSG για την ίδια μέρα (εικόνα 4.22). Η νέφωση που εμφανίζεται πάνω από το κεντρικό Ιόνιο είναι πιο γκρίζα στο υπέρυθρο που σημαίνει ότι αποτελείται από μέσα ή χαμηλά νέφη. Με τη πάροδο του χρόνου, δεν εξελίσσεται καθ' ύψος γεγονός που σημαίνει ότι δεν σχετίζεται με την υφιστάμενη αστάθεια. Αντιθέτως, οι κορυφές των σχηματιζόμενων νεφών στην ηπειρωτική Ελλάδα έχουν λευκό χρώμα γεγονός που μαρτυρά χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλη ανάπτυξη καθ' ύψος της ατμόσφαιρας. Πρόκειται δηλαδή για νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης που είναι αποτέλεσμα της υφιστάμενης αστάθειας.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

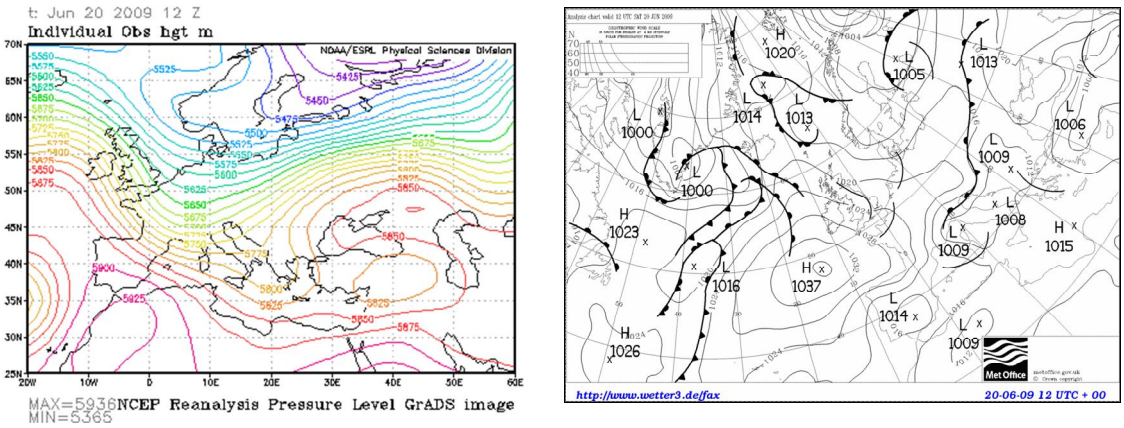


Εικόνα 4.22 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 20-06-2009 στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου (10.8μm) του MSG κατά τις ώρες: α) 09:00 UTC, β) 10:00 UTC, γ) 11:00 UTC, δ) 12:00 UTC, ε) 13:00 UTC, στ)14:00 UTC.*

Η λαμπρότητα των νεφών αντιστοιχεί σε χαμηλές θερμοκρασίες στον οροφή τους (-30 έως -40 ^{o}C) γεγονός που χαρακτηρίζει και σε αυτή τη περίπτωση την μεγάλη ανάπτυξή τους καθ' ύψος στη τροπόσφαιρα στην ευρύτερη περιοχή της κεντρικής και δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας.

ii. Συνοπτική Ανάλυση

Εξετάζεται η συνοπτική κατάσταση της περίπτωσης της 20^{ης} Ιουνίου του 2009 με τη βοήθεια των χαρτών του ισοβαρικού επιπέδου των 500 hPa και της επιφάνειας (MSLP) για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.21).



(α) (β)

Εικόνα 4.23 *(α) Γεωδυναμικά ύψη στα 500 hPa και (β) Πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας MSLP, για τις 20-06-2009, 12:00UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

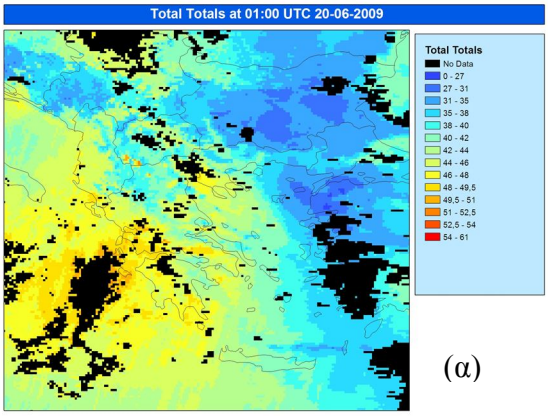
Στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.23α), παρατηρείται αυλώνας χαμηλών γεωδυναμικών υψών πάνω από την Ελλάδα, ο οποίος εκτείνεται από τις Σκανδιναβικές χώρες ως τη Βαλκανική. Ανατολικά της Ελλάδας, στη περιοχή της ανατολικής Τουρκίας διακρίνεται ένα αποκομμένο χαμηλό ενώ στη βορειοδυτική Αφρική υφίσταται ένα υψηλό με κέντρο του πάνω από το Μαρόκο. Ο αυλώνας πάνω από την Ελλάδα ευνοεί την ανάπτυξη αστάθειας αφού αυξάνει το θετικό στροβιλισμό στη κατώτερη ατμόσφαιρα και δημιουργεί χαμηλό βαρομετρικό στη επιφάνεια.

Στο χάρτη επιφανείας (εικόνα 4.23β), χαμηλές πιέσεις υφίστανται πάνω από την Ελλάδα και την Τουρκία με ένα υψηλό βαρομετρικό να βρίσκεται νοτιοδυτικά της Κρήτης. Στη βόρεια βαλκανική εμφανίζεται ένα ψυχρό μέτωπο το οποίο βρίσκεται σε επαφή με ένα θερμό μέτωπο στη βόρεια Ιταλία.

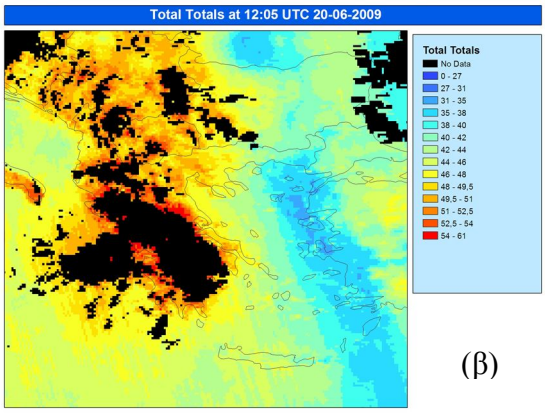
iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS

Στην εξεταζόμενη περίπτωση της 20^{ης} Ιουνίου, ο MODIS παρέχει δυο καταγραφές από το πέρασμά του στην Ελλάδα. Η βραδινή καταγραφή είναι στη 01:00 UTC ενώ η πρωινή στις 12:05 UTC. Η νυχτερινή καταγραφή πραγματοποιείται με ελάχιστη νεφοκάλυψη ενώ η μεσημεριανή έχει αποτυπώσει ήδη την ύπαρξη εκτεταμένης αστάθειας αλλά και εκτεταμένης νεφοκάλυψης στην περιοχή της Ελλάδας.

Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται ο δείκτης Total Totals στις 01:00 και 12:05 UTC. Ο δείκτης Total Totals εμφανίζεται ήδη από τη βραδινή εικόνα του MODIS αρκετά αυξημένος με τιμές από 35 έως 48 κυρίως στη δυτική Ελλάδα και πάνω από το Ιόνιο πέλαγος (εικόνα 4.24α). Στη μεσημεριανή καταγραφή (εικόνα 4.24β) έχει ήδη αναπτυχθεί έντονη αστάθεια που καλύπτει όλη τη δυτική Μακεδονία, κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και Πελοπόννησο, ενώ ο δείκτης αστάθειας που αποτυπώνονται σε περιοχές χωρίς νέφη είναι πολύ υψηλός (46-61).



(α)



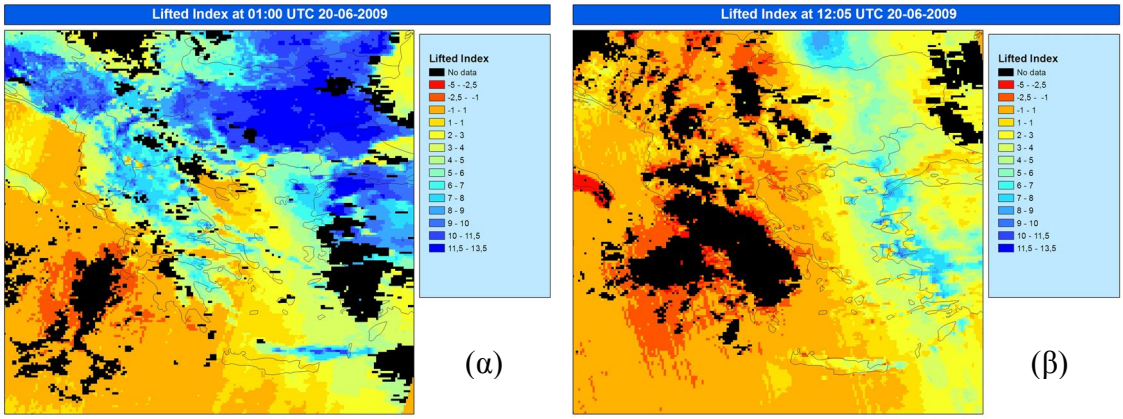
(β)

Εικόνα 4.24 *Δείκτης αστάθειας Total Totals του MODIS στις 20-06-2009 για α) 01:00 UTC και β) 12:05 UTC*

Με την ελάχιστη βραδινή νεφοκάλυψη, ο δορυφόρος MODIS αποτυπώνει με επιτυχία την αστάθεια της επόμενης ημέρας που αναπτύσσεται

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

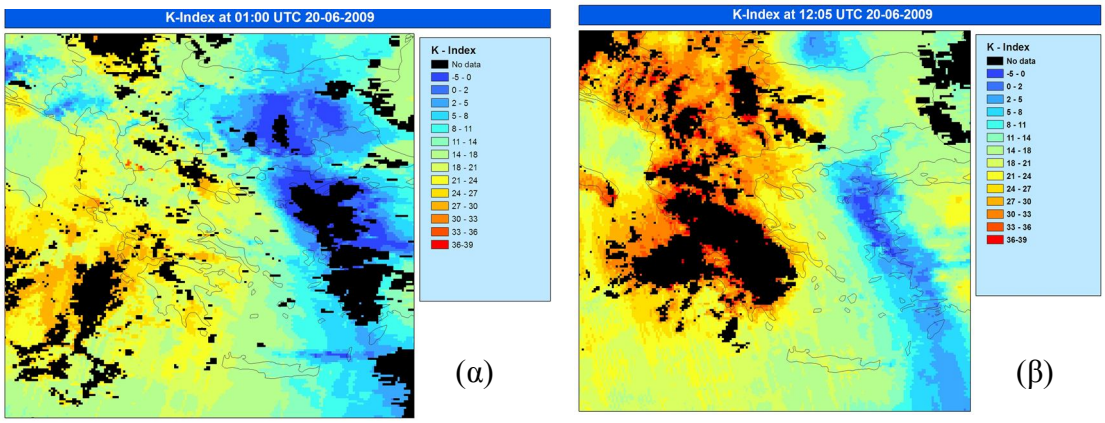
στον Ελλαδικό χώρου και ξεκινά από τα δυτικά. Η μεσημεριανή όμως μέτρηση του δορυφόρου πραγματοποιείται αρκετά αργά όταν η αστάθεια έχει ήδη αναπτυχθεί και βρίσκεται σε εξέλιξη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες του Lifted Index για τις αντίστοιχες ώρες (εικόνα 4.25).



Εικόνα 4.25 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του MODIS στις 20-06-2009 για α) 01:00 UTC και β) 12:05 UTC*

Τα αποτελέσματα του LI είναι ποιοτικά αντίστοιχα με αυτά του TT. Η βραδινή καταγραφή του LI (3 έως -1) αποτυπώνει την αστάθεια που βρίσκεται στη δυτική Ελλάδα και κυρίως πάνω από το Ιόνιο πέλαγος, ενώ στη πρωινή καταγραφή εμφανίζονται αρνητικές τιμές του LI (-1 έως -5) σε μεγάλη έκταση της Ελλάδας και αποτυπώνει με επιτυχία την υψηλή αστάθεια στην εξεταζόμενη περιοχή. Η περιοχή του Έβρου εμφανίζει χαμηλές τιμές που κυμαίνονται από 3 έως 8.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο τελευταίος δείκτης, ο K-index (εικόνα 4.26) για τις αντίστοιχες ώρες.



Εικόνα 4.26 *Δείκτης αστάθειας K-Index του MODIS στις 20-06-2009 για α) 01:00 UTC και β) 12:05 UTC*

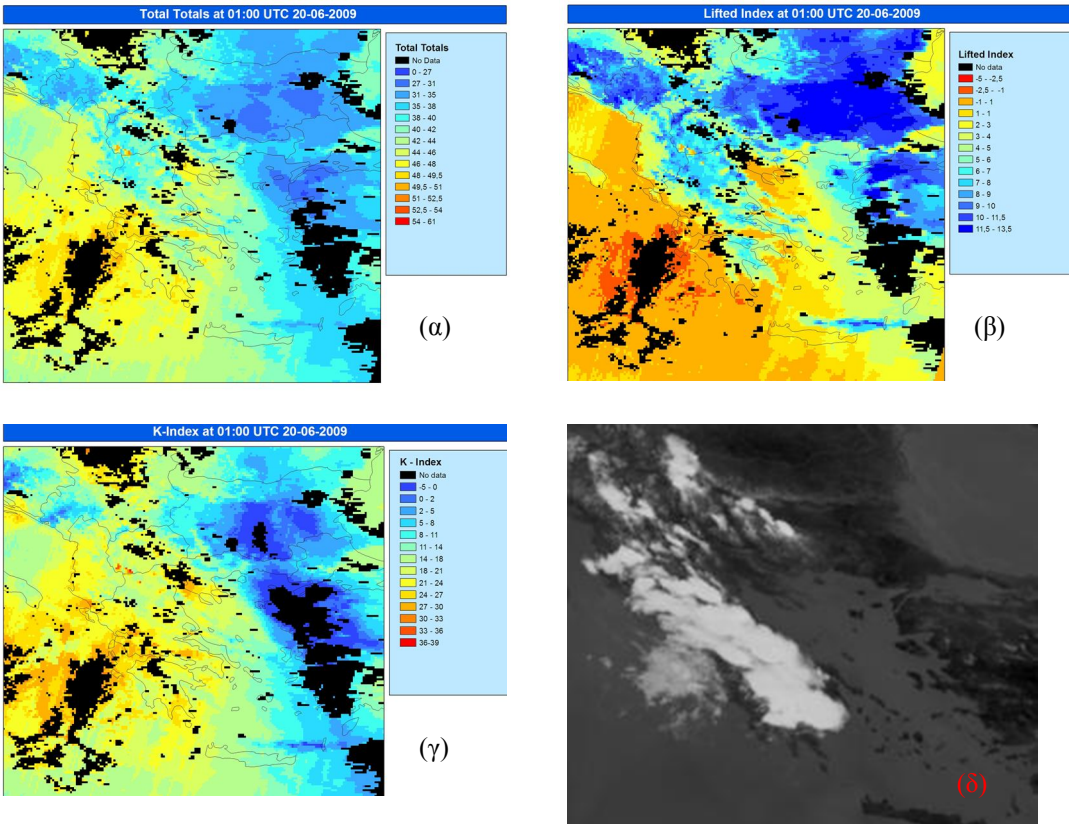
Ο τελευταίος δείκτης, ο K-Index, εμφανίζει αντίστοιχη εικόνα με τους άλλους δύο, με τη βραδινή του καταγραφή να παρουσιάζει μεγάλες τιμές του KI (21-30) στην δυτική Ελλάδα και κυρίως πάνω από το Ιόνιο. Σημαντική αστάθεια εντοπίζεται και στην ηπειρωτική Ελλάδα πλην ανατολικής

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Μακεδονίας και Έβρου με τιμές που κυμαίνονται από 11 έως 27 . Η πρωινή καταγραφή παρουσιάζει υψηλότατες τιμές του KI (27-39) στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας πλην του Έβρου.

Η εικόνα και των δεικτών αστάθειας είναι ποιοτικά αντίστοιχη τόσο στη βραδινή όσο και στη μεσημεριανή καταγραφή. Όλοι οι δείκτες εντοπίζουν το βράδυ την αστάθεια που βρίσκεται στα δυτικά στης χώρας ενώ το μεσημέρι καταγράφονται υψηλότατες τιμές όλων των δεικτών στην ηπειρωτική Ελλάδα στην οποία έχουν ήδη εμφανιστεί νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης μεγάλης έκτασης. Ο ανέφελος βραδινός καιρός και οι δείκτες αστάθειας που παρέχει το προϊόν MODIS είναι σε θέση να αποτυπώσουν την ισχυρή αστάθεια που πρόκειται να αναπτυχθεί την επόμενη ημέρα. Η αστάθεια της περίπτωσης της 20η Ιουνίου οφείλεται κυρίως σε συνοπτικά αίτια, με εισβολή ψυχρών αέριων μαζών από τα δυτικά, αλλά και σε θέρμανση του εδάφους στη διάρκεια της ημέρας. Οι δείκτες είναι σε θέση να εντοπίσουν από τη βραδινή καταγραφή την αλλαγή στην ευστάθειας της ατμόσφαιρας σηματοδοτώντας την έναρξη της αστάθειας από τα δυτικά και συγκεκριμένα από τη θαλάσσια περιοχή του Ιονίου.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες τουTotal Totals, του Lifted Index και του K-Index του MODIS σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



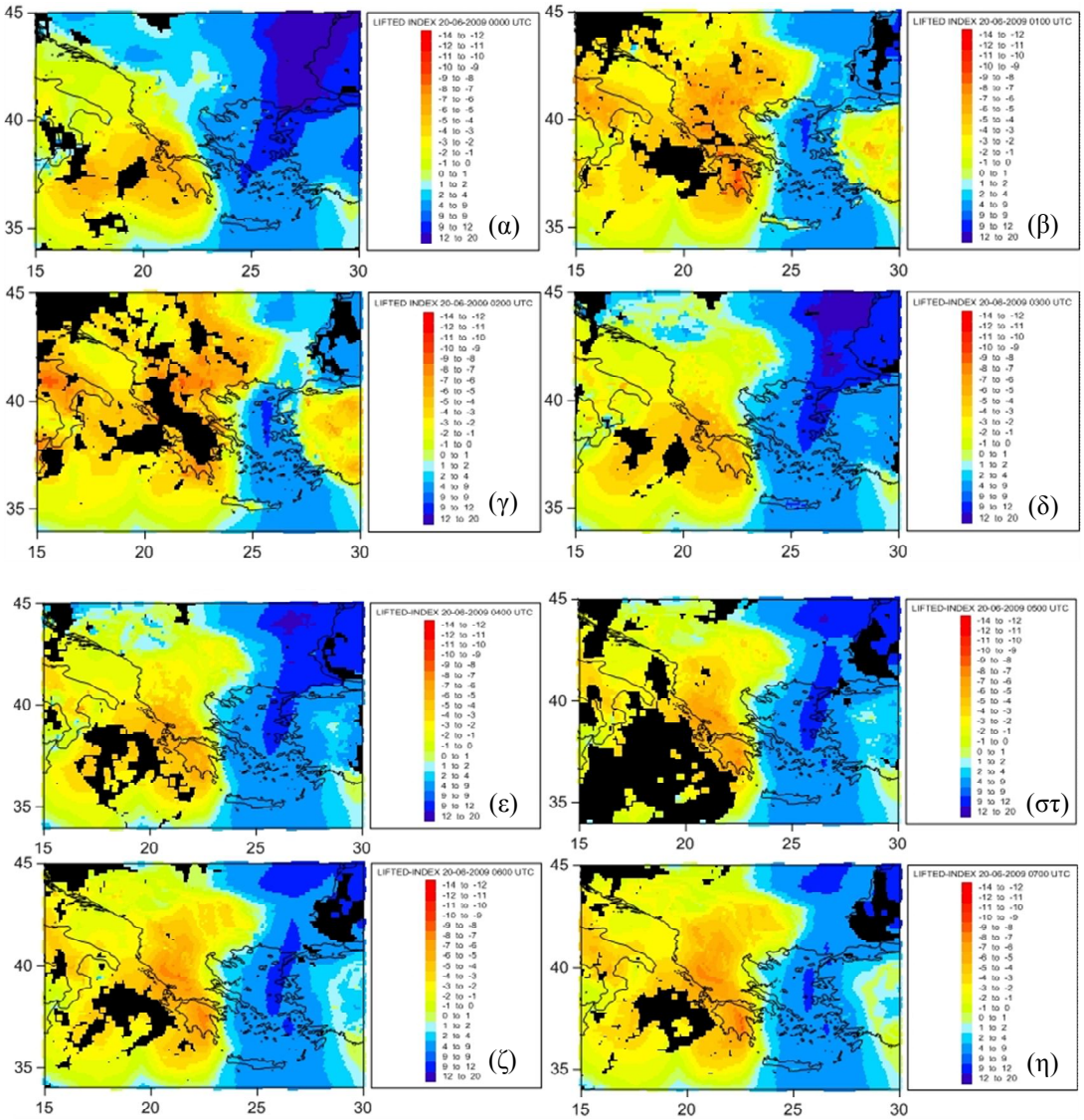
Εικόνα 4.27 *(α) Total Totals, (β) Lifted Index, (γ) K – Index στις 01:00 UTC και (δ) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 20-06-2009 και ώρα 12:00 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

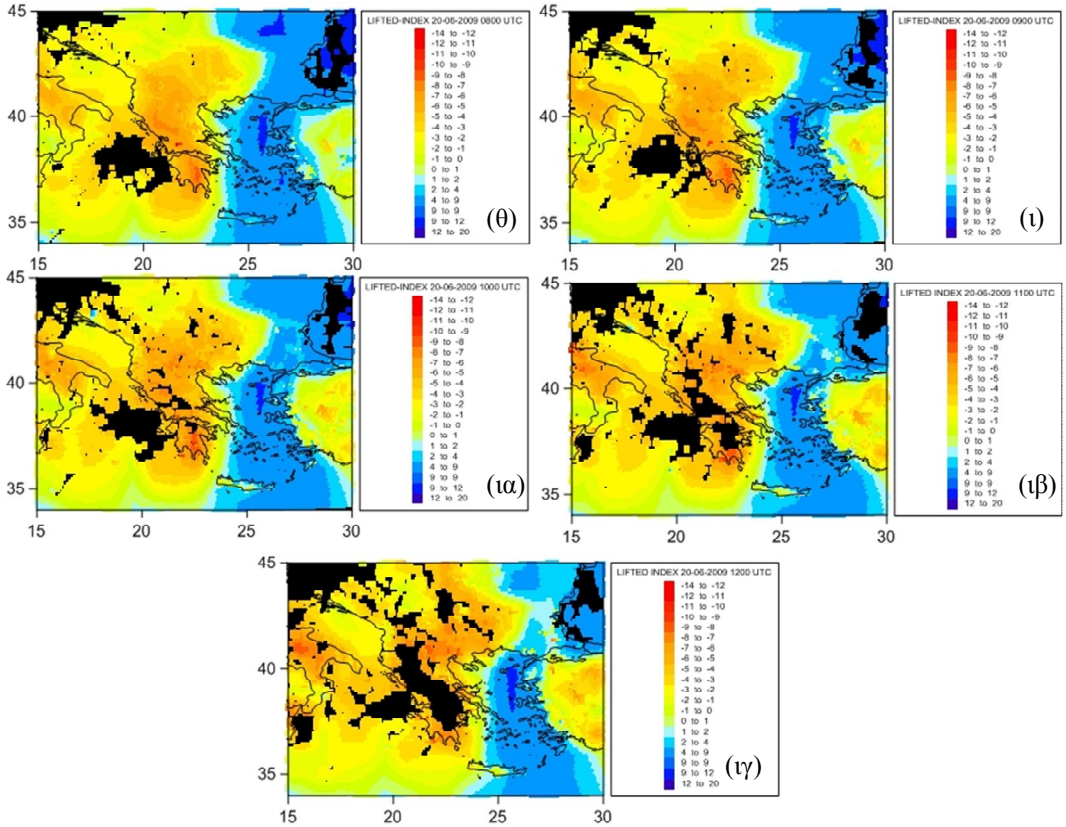
Στις βραδινές καταγραφές του MODIS εμφανίζονται υψηλές τιμές στα δυτικά και στους τρεις δείκτες αστάθειας. Ο LI εμφανίζει στις δυτικές ακτές της Ελλάδας τιμές από 2 έως 3 καταγράφοντας μικρές τιμές. Ο TT εμφανίζει υψηλές τιμές, από 44 έως 49,5 σε μεγαλύτερη από τον LI έκταση της δυτικής Ελλάδας ενώ ο KI εμφανίζει αστάθεια σχεδόν σε όλη την δυτική και κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα με τιμές που κυμαίνονται από 14 έως 30. Όσο αφορά στη σύγκριση με την εικόνα του ορατού στις 12:00 UTC, ο KI προσεγγίζει τις περιοχές εμφάνισης νεφών με σχετική ακρίβεια, ενώ έπεται ο TT και ο LI δε δίνουν ξεκάθαρο σήμα αστάθειας για τις επόμενες ώρες.

iv. Μελέτη αστάθειας με το προϊόν GII

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, επιλέχτηκε η χαρτογράφηση του GII να πραγματοποιηθεί ανά ώρα δηλαδή από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC ώστε να αποτυπωθεί και χρονικά η εξέλιξη της αστάθειας. Αρχικά, δημιουργήθηκαν οι χάρτες του GII για τον Lifted Index (Εικόνα 4.28).



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

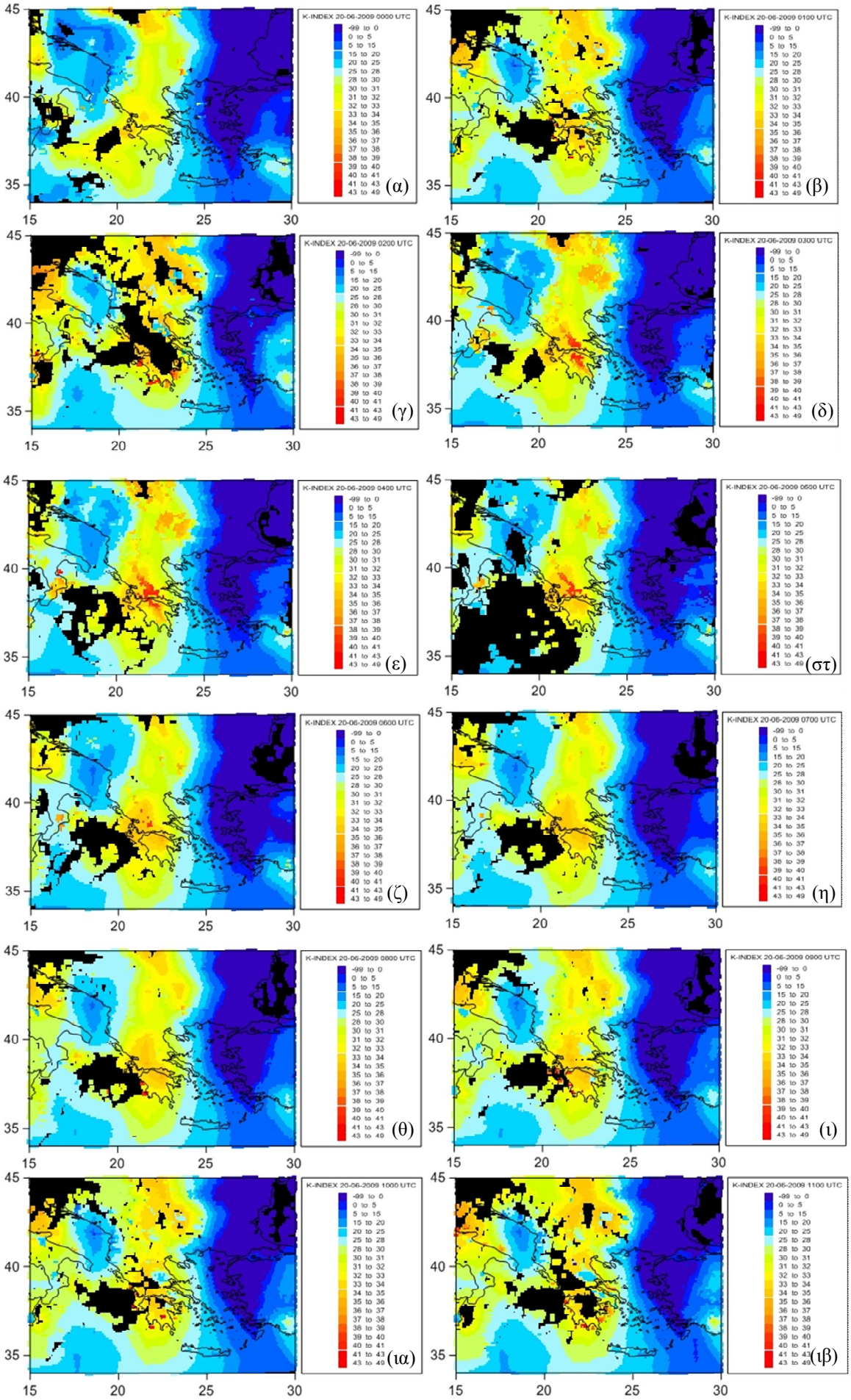


Εικόνα 4.28 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του GII στις 20-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, ζ) 05:00 UTC, στ) 06:00 UTC η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

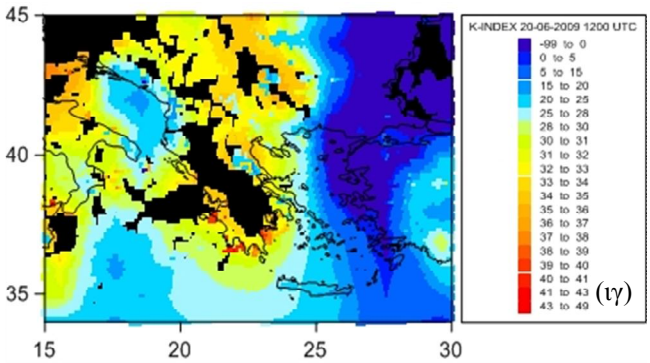
Η χρονική εξέλιξη του δείκτη από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC δείχνει την σταδιακή μείωση της τιμής του LI που ξεκινά από τα δυτικά και σταδιακά καλύπτει όλη την περιοχή της Ελλάδας εκτός της θαλάσσιας περιοχής του Αιγαίου. Αρνητικός δείκτης LI αντιστοιχεί σε συνθήκες αστάθειας γεγονός που αποτυπώνεται στους χάρτες για το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας. Μικρές τιμές του LI, άρα αυξημένη αστάθεια εντοπίζεται αρχικά στη δυτική Ελλάδα και στο Ιόνιο πέλαγος (εικόνα 4.24α) ενώ σταδιακά καλύπτει όλη την Ελλάδα. Τις πρώτες πρωινές ώρες έως το μεσημέρι, ο κεντρικός πυρήνας ελάχιστων τιμών του LI εντοπίζεται στην Μακεδονία, κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και Πελοπόννησο.

Αντιστοίχως, η ίδια καταγραφή για τις ίδιες ώρες μελέτης ακολουθεί και για τον δείκτη του K-Index του GII. Οι χάρτες του GII αποτυπώνονται στην εικόνα 4.29 όσο αφορά στον K- Index. Από τις 00:00 UTC καταγράφονται υψηλές τιμές του KI (30-32) στο Ιόνιο και την κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα. Με τη πάροδο του χρόνου, οι τιμές του KI αυξάνονται ελαφρά ενώ στις 03:00, 04:00, 05:00 και 06:00 UTC εμφανίζονται πυρήνες με υψηλότατες τιμές του KI (37-43) στη κεντρική Στερεά και στη βόρεια Πελοπόννησο. Τέλος, στις μεσημεριανές καταγραφές, ο δείκτης παρουσιάζει υψηλές τιμές σε όλη την Ελλάδα ενώ στη Πελοπόννησο διακρίνονται νέοι πυρήνες υψηλότατων τιμών (37-43) του δείκτη έξω και περιμετρικά από τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



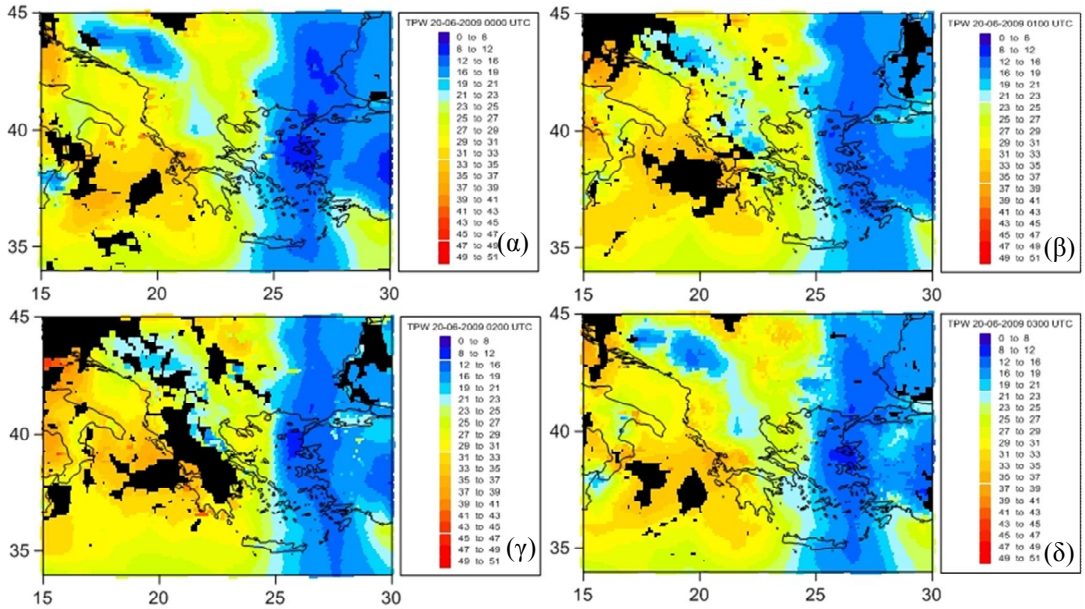
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



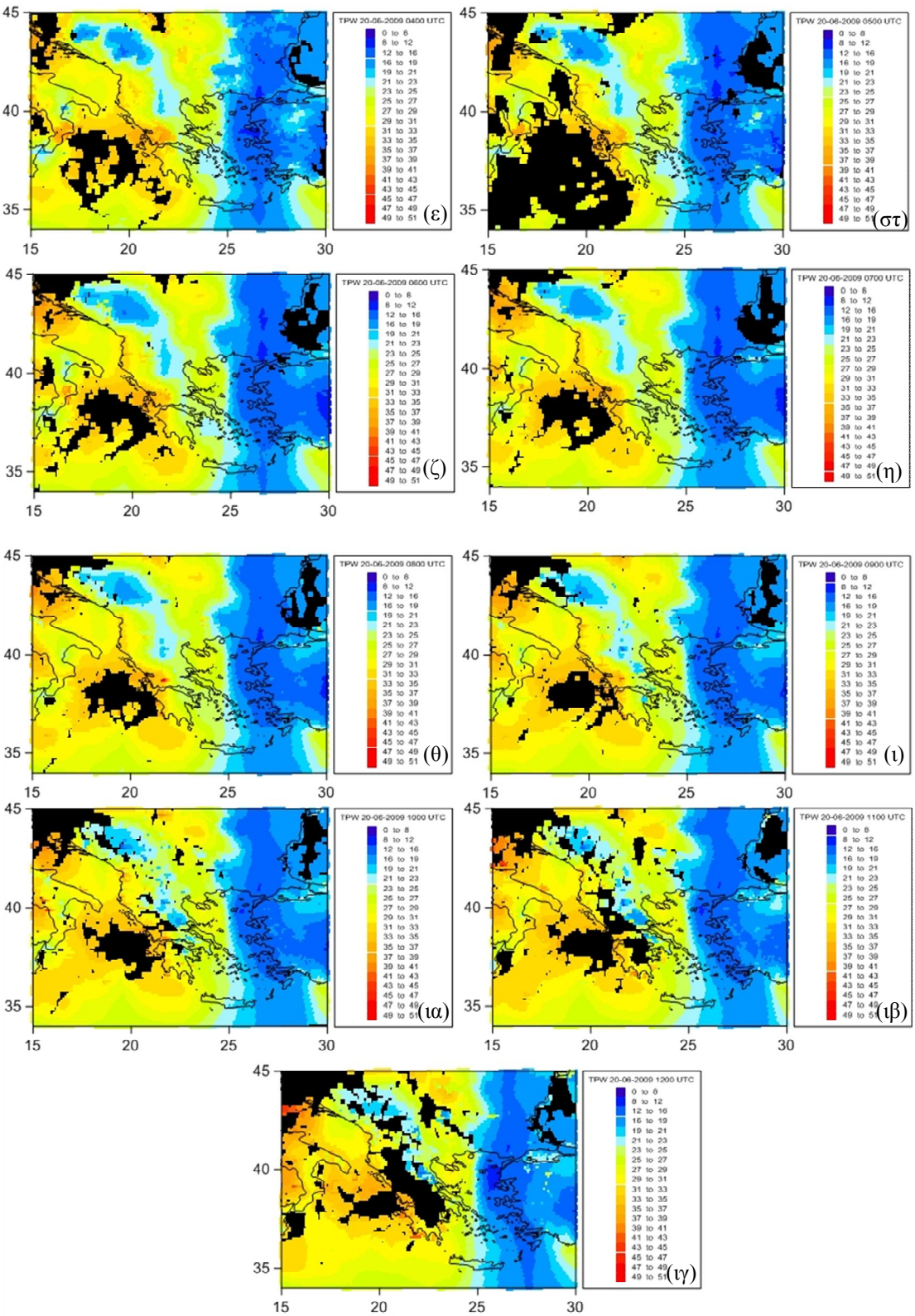
Εικόνα 4.29 *Δείκτης αστάθειας K-Index του GII στις 20-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, ζ) 05:00 UTC, στ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

Αμφότεροι οι δείκτες αστάθειας του GII, ο Lifted-Index και ο K-Index, φαίνεται ότι επιτυγχάνουν την καταγραφή της αστάθειας στον Ελλαδικό χώρο με επιτυχία από τις βραδινές ακόμα ώρες της προηγούμενης ημέρας.

Τέλος, παρουσιάζεται και η εκτίμηση του GII για τη στήλη ύδατος (TPW) κατά τις αντίστοιχες ώρες με αυτές των δεικτών αστάθειας (εικόνα 4.30). Τις πρώτες βραδινές ώρες εμφανίζονται αυξημένες τιμές του υετίσιμου ύδατος (29-35 kg/m^2) στη περιοχή του Ιονίου πελάγους και δυτικής Ελλάδας. Με τη πάροδο του χρόνου, δεν εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές του TPW με τις τιμές αυτού να παραμένουν αυξημένες σε Ιόνιο και δυτική Ελλάδα. Όλες οι εικόνες εμφανίζουν μία ξηρή περιοχή στη περιοχή του ανατολικού Αιγαίου και στη δυτική Τουρκία που εκτείνεται από το βορρά ως το νότο.



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

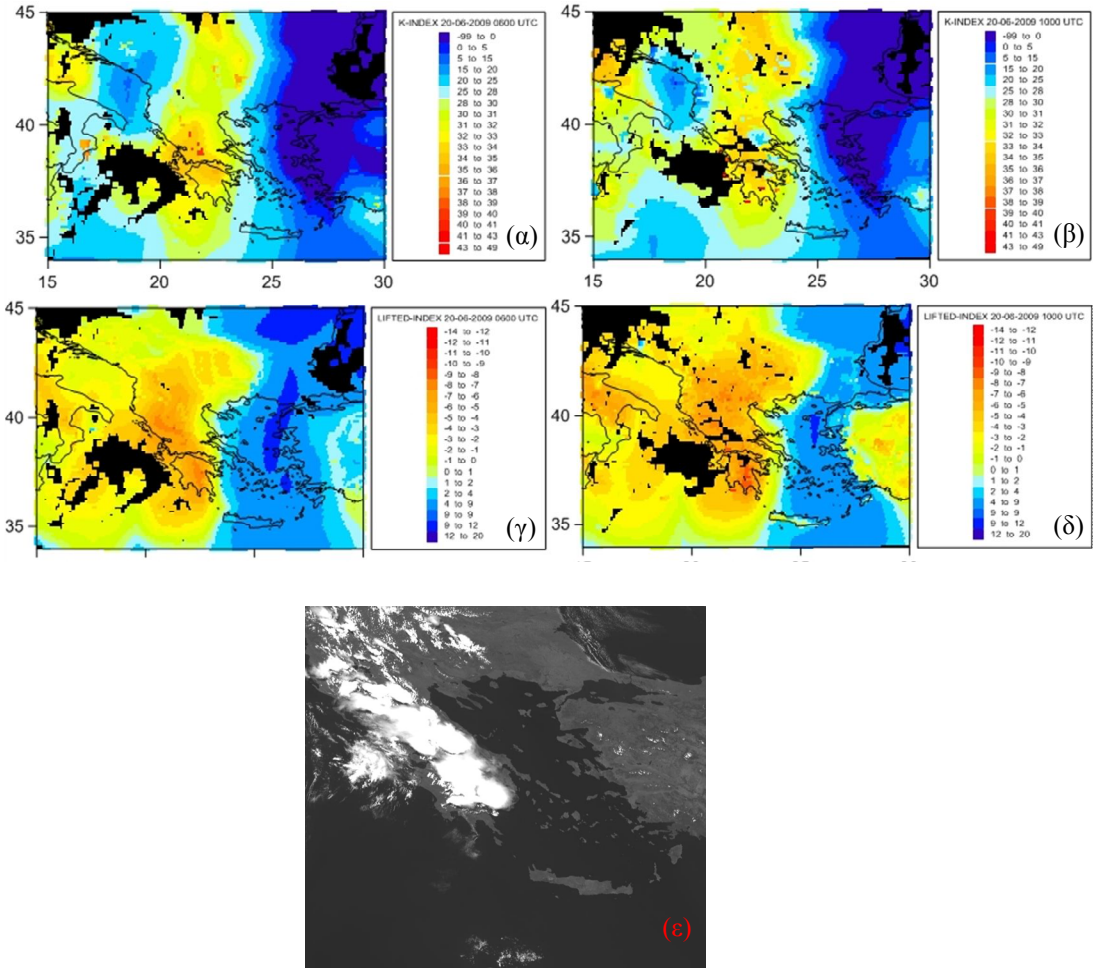


Εικόνα 4.30 *Total Precipitable Water (TWP) του GII στις 20-06-2009 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες διακρίνονται ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές του TWP ενώ στη περιοχή της οροσειράς της Πίνδου και ανατολικότερα εμφανίζεται μία λωρίδα ξηρότερη (εικόνα 4.26 περίπτωση ια, ιβ,ιγ). Σε γενικές γραμμές, η στήλη υετίσιμου ύδατος παραμένει χωρίς μεγάλες μεταβολές στη διάρκεια του χρόνου μελέτης με ελαφριά αυξητική τάση.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες του Lifted Index και του K-Index του GII σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.31 *(α) Lifted Index του GII στις 06:00 UTC, (β)Lifted-Index του GII στις 10:00 UTC, (γ) K-Index του GII στις 06:00 UTC, (δ) K-Index του GII στις 10:00 UTC, (ε) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 20-06-2009 και ώρα 13:00 UTC*

Ο δείκτης KI εμφανίζει υψηλές τιμές στις 06:00 UTC και κυρίως στη κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και τη βόρεια Πελοπόννησο (34 έως 40) ενώ στις 10:00 UTC αποτυπώνει την έντονη αστάθεια σε όλη την Ελλάδα πλην του Έβρου (32 έως 40, εικόνα 4.31 α, β). Αντίστοιχα, ο δείκτης LI υποδεικνύει υψηλότατη αστάθεια σχεδόν σε όλη την Ελλάδα (-2 έως -9, εικόνα 4.16 γ) ενώ

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

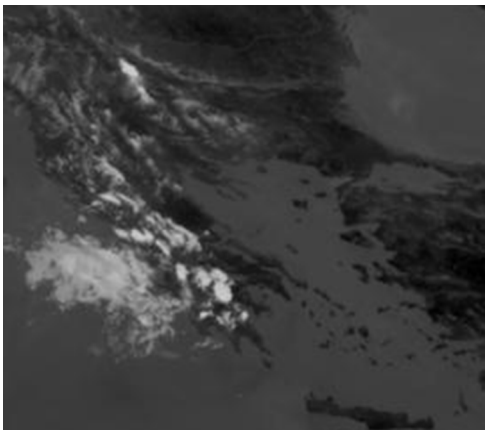
στις 10:00 UTC οι τιμές του είναι ακόμα πιο υψηλές και καλύπτουν το σύνολο της ηπειρωτικής χώρας.

Ο GII φαίνεται ότι προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις περιοχές όπου μερικές ώρες μετά εμφανίζονται νέφη, κυρίως στις καταγραφές του KI όπου οι υψηλές τιμές στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα συμπίπτουν με τις νεφώσεις στο κανάλι του ορατού. Ο δείκτης LI δίνει υψηλές τιμές στις καταγραφές του στα σημεία όπου αναπτύχθηκαν νέφη, όμως δίνει υψηλές τιμές και στη κεντρική Μακεδονία η οποία παρουσιάζεται ανέφελη στο κανάλι του ορατού.

v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών του GII

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, επιλέχτηκαν μερικά σημεία στον Ελλαδικό χώρο, κάποια από αυτά εντός των περιοχών εμφάνισης νεφών και μερικά εκτός των περιοχών εμφάνισης νεφών. Η μεταβολή των δεικτών αστάθειας με το χρόνο δίνει το μέτρο μεταβολής της αστάθειας σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή κατά την ημέρα της 20^{ης} Ιουνίου 2009.

Στην εικόνα 4.32 εμφανίζεται ο χάρτης με τα επιλεγμένα σημεία σε περιοχές εντός ή εκτός νεφώσεων καθώς και η εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης του MSG όπου διακρίνονται οι περιοχές αυτές.



(α)

(β)

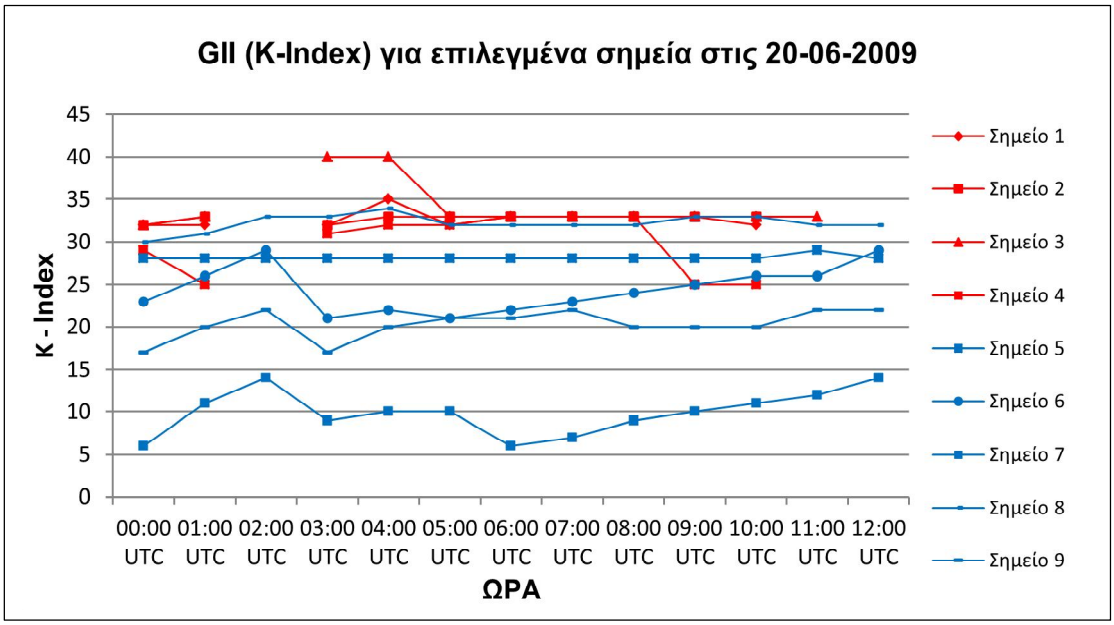
Εικόνα 4.32 *(α) Εικόνα ορατού υψηλής ανάλυσης για τις 20-06-2009 και (β) χάρτης Ελλάδας με τα επιλεγμένα σημεία για χρονική μελέτη.*

Τα σημεία 1, 2, 3 και 4 βρίσκονται εντός περιοχών εμφάνισης νεφών ενώ στα σημεία 5, 6, 7, 8 και 9 δεν αναπτύσσονται νέφη. Στην επόμενες εικόνες αποτυπώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα τιμής δεικτών συναρτήσει του χρόνου.

Από τη σύγκριση των τιμών στο διάγραμμα της εικόνας 4.33 προκύπτει αυξητική τάση του δείκτη K-Index σε όλα τα σημεία, κυρίως τις μεσημεριανές

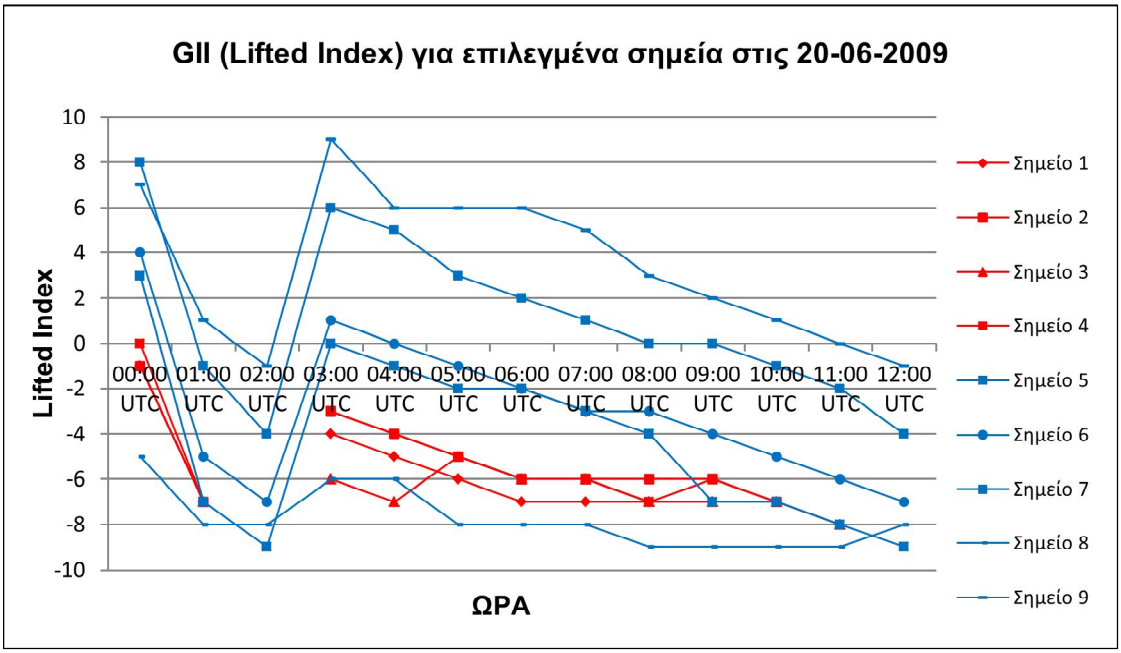
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ώρες. Στα σημεία που εμφανίζονται νέφη (1,2,3 και 4, κόκκινο χρώμα), ο δείκτης παρουσιάζει σε όλες τις ώρες αυξημένες τιμές (μεγαλύτερες του 30) εκτός από το σημείο 4. Στα σημεία εκτός νεφοκάλυψης (μπλε χρώμα), ο δείκτης KI εμφανίζεται αισθητά μικρότερος (<30) ενώ στο σημείο 7 είναι εξαιρετικά μικρός. Αυτό, ενδεχομένως, εξηγεί το λόγο που στα σημεία 5,6, 7 και 8 δεν εμφανίζονται νέφη.



Εικόνα 4.33 *Διάγραμμα του K-Index(GII) για τις 20-06-2009 σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9 συναρτήσει της ώρας*

Το ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και για τον δείκτη Lifted Index του GII στην εικόνα 4.34 για τα ίδια ακριβώς σημεία (κόκκινο για νεφοκάλυψη, μπλε για τη μη νεφοκάλυψη).

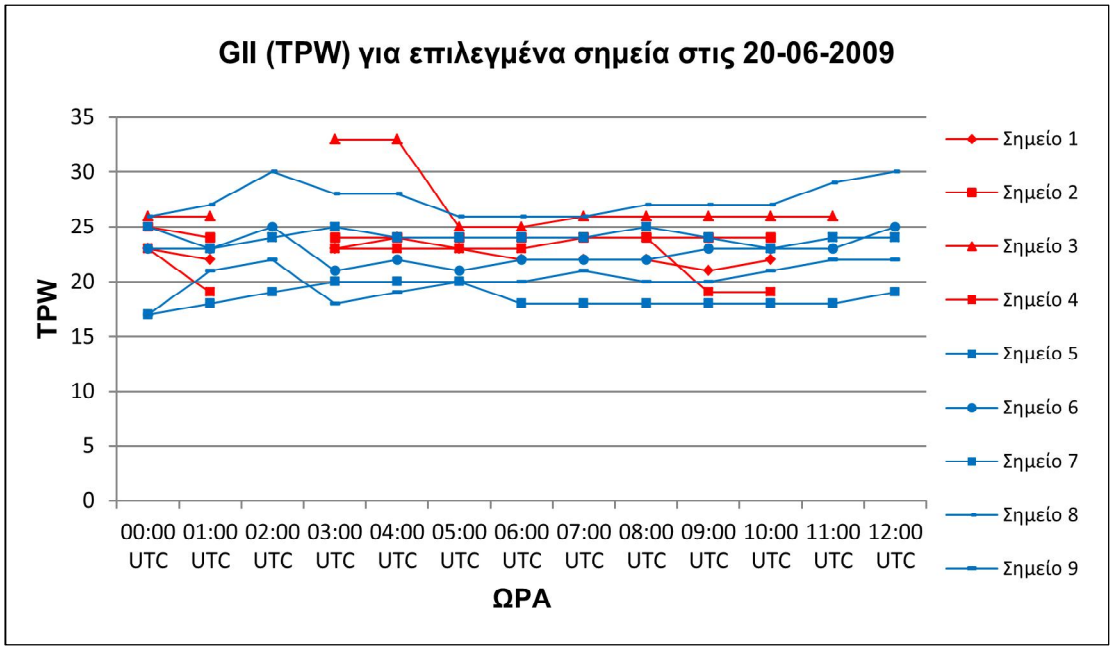


Εικόνα 4.34 *Διάγραμμα του Lifted-Index (GII) για τις 20-06-2009 σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9 συναρτήσει του χρόνου*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αντιστοίχως και ο δείκτης Lifted Index παρουσιάζει πτωτική τάση, δηλαδή σηματοδοτεί έντονη αστάθεια, για όλα τα σημεία, με ελάχιστες τιμές καθώς πλησιάζουν οι μεσημεριανές ώρες. Τα σημεία στα οποία αναπτύχθηκαν νέφη παρουσιάζουν μικρότερη τιμή τις περισσότερες ώρες. Τα σημεία στα οποία δεν αναπτύχθηκαν νεφώσεις, εμφανίζουν δείκτη LI με μειούμενη μεταβολή συναρτήσει του χρόνου αλλά με τιμές σαφώς μεγαλύτερες από αυτές των σημείων με νεφώσεις. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα σημεία 5 και 6 (εκτός νεφώσεων) εμφανίζουν τις 2 τελευταίες ώρες (11:00 και 12:00 UTC) τιμές εξαιρετικά μικρές, μικρότερες ακόμα και από τα σημεία στα οποία αναπτύσσονται νέφη.

Τέλος, στα ίδια σημεία αποτυπώνεται και το υετίσιμο ύδωρ και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.35 συναρτήσει του χρόνου (κόκκινο για νεφοκάλυψη, μπλε για τη μη νεφοκάλυψη).



Εικόνα 4.35 *Διάγραμμα του Total Precipitable Water (TPW) του GII για τις 20-06-2009 σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9 συναρτήσει του χρόνου*

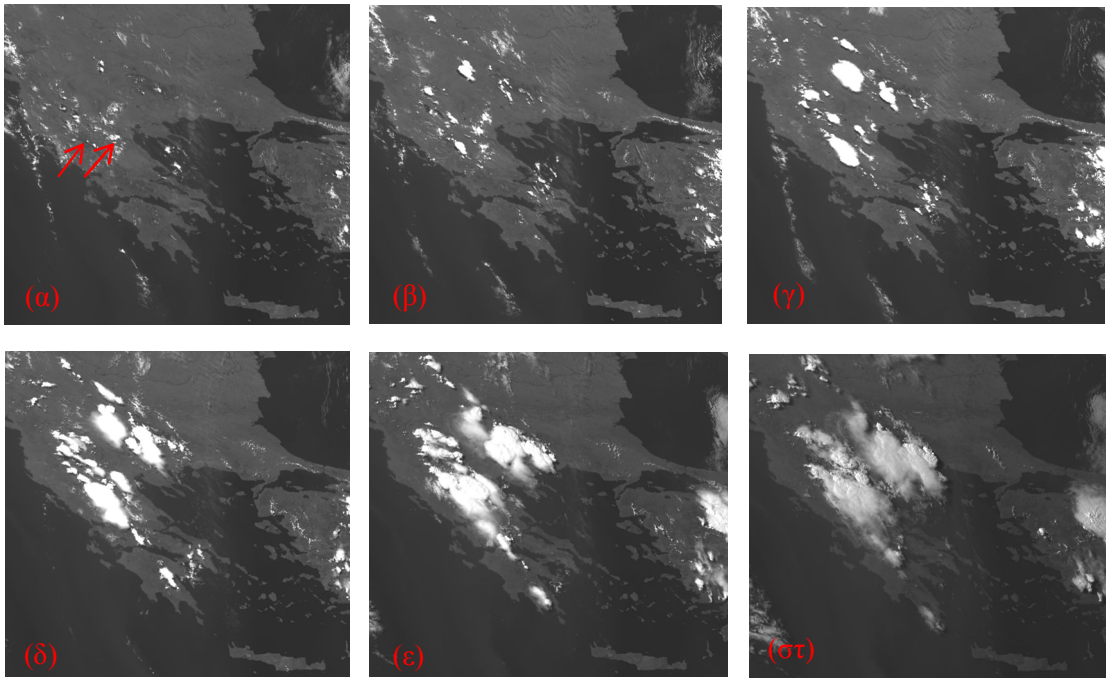
Τα σημεία εμφάνισης νεφώσεων (1,2,3 και 4) εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές στήλης ύδατος από τα μη νεφοκαλυπτώμενα σημεία. Εντούτοις, από το διάγραμμα δε προκύπτει σαφής ένδειξη για τις τιμές ή τις μεταβολές του TPW που να οδηγούν με ασφάλεια στη δημιουργία ή μη νεφών. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι οι τιμές των σημείων 5 και 6 συμπίπτουν με τις τιμές των νεφοκαλυπτώμενων σημείων κατά τις ώρες 11:00 και 12:00 UTC.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4.3.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΙΣ 13-06-2010

i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MSG

Στην περίπτωση της 13^{ης} Ιουνίου του 2010, τα πρώτα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης εμφανίζονται τις πρωινές ώρες στη δυτική Μακεδονία και Ήπειρο (εικόνα 4.36 α). Με τη πάροδο του χρόνου, τα νεφικά κύτταρα στην Ήπειρο αναπτύσσονται περισσότερο ενώ δημιουργούνται νέα στη κεντρική και ανατολική Μακεδονία. Αργότερα, στις 13:00 UTC, ο MSG καταγράφει δύο μεγάλα νέφη, το ένα στη κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα και το άλλο στη κεντρική Μακεδονία. Τις απογευματινές ώρες, οι δύο μεγάλοι σχηματισμοί κατακόρυφης ανάπτυξης μεγαλώνουν περισσότερο τείνοντας να ενοποιηθούν καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος της Μακεδονίας, της Θεσσαλίας της Ηπείρου και ένα μέρος της Στερεάς Ελλάδας (εικόνα 4.36 στ).

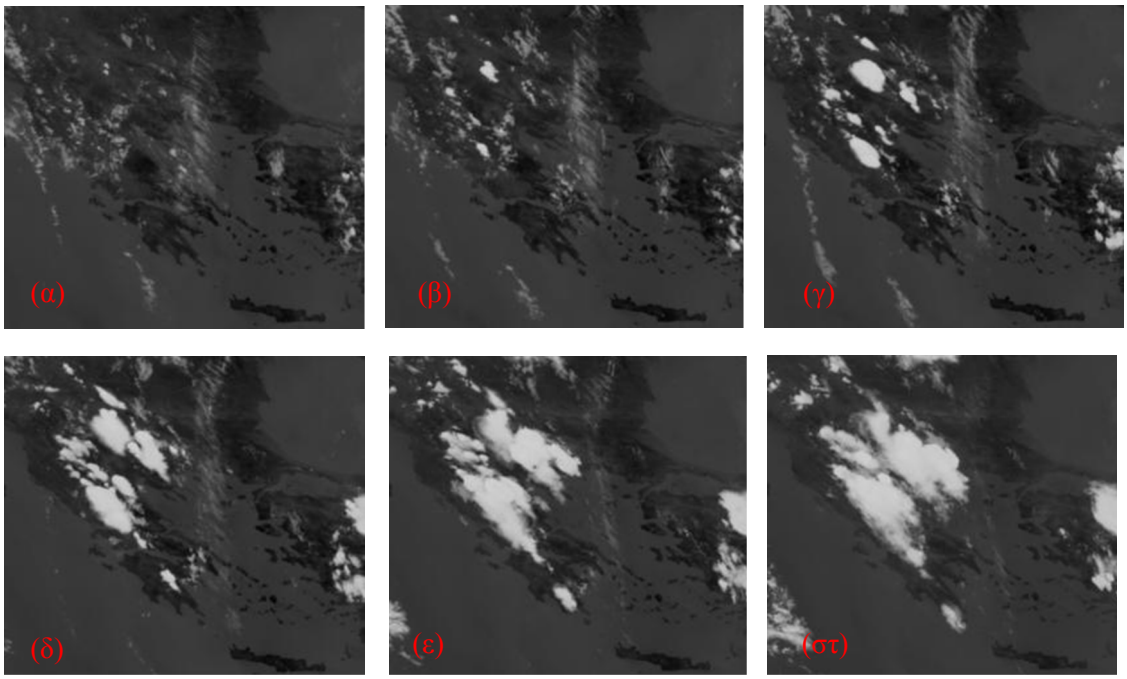


Εικόνα 4.36 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 13-06-2010 στο κανάλι ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV) του MSG κατά τις ώρες: α) 10:00 UTC, β) 11:00 UTC, γ) 12:00 UTC, δ) 13:00 UTC, ε) 14:00 UTC, στ)15:00 UTC.*

Ακολουθούν οι και οι αντίστοιχες εικόνες από το θερμικό υπέρυθρο του MSG για την ίδια μέρα (εικόνα 4.37). Στις 10:00 UTC (εικόνα 4.37α), τα πρώτα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης απεικονίζονται με γκρίζο χρώμα διότι βρίσκονται ακόμα σε φάση ανάπτυξης και η οροφή τους είναι ακόμα σε μικρό ύψος με την αντίστοιχη θερμοκρασία τους σε μέτριο επίπεδο. Στις επόμενες όμως ώρες, η κορυφή των νεφών βρίσκεται σε μεγάλο ύψος και παρουσιάζει λευκότερο χρώμα αφού η θερμοκρασία της κορυφής τους παρουσιάζει πλέον πολύ χαμηλή θερμοκρασία (εικόνα 4.37γ). Στις τελευταίες εικόνες, τα νέφη

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

έχουν αναπτυχθεί πλήρως με τις κορυφές τους να πλησιάζουν στο άνω όριο της τροπόσφαιρας.

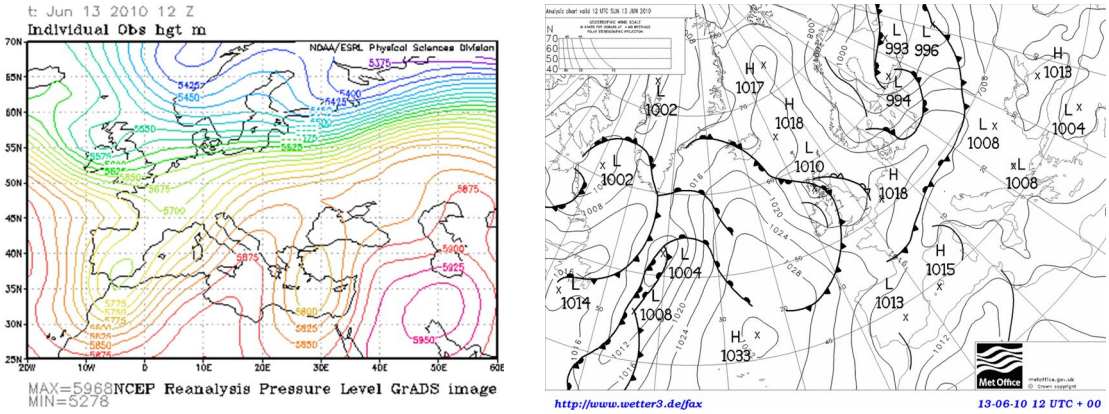


Εικόνα 4.37 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 13-06-2010 στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου (IR 10.8μm) του MSG κατά τις ώρες: α) 10:00 UTC, β) 11:00 UTC, γ) 12:00 UTC, δ) 13:00 UTC, ε) 14:00 UTC, στ)15:00 UTC.*

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η λαμπρότητα των νεφών αντιστοιχεί σε χαμηλές θερμοκρασίες στον ορόφή τους (-30 έως -40 ^{o}C) . Οι θερμοκρασίες της κορυφής των νεφών στην εικόνα 4.37 είναι πολύ χαμηλές διότι παρουσιάζονται με λευκό χρώμα.

ii. Συνοπτική Ανάλυση

Εξετάζεται η συνοπτική κατάσταση της περίπτωσης της 13^{ης} Ιουνίου του 2010 με τη βοήθεια των χαρτών του ισοβαρικού επιπέδου των 500 hPa και της επιφάνειας (MSLP) για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.38).



(α) (β)

Εικόνα 4.38 *(α) Γεωδυναμικά ύψη στα 500 hPa και (β) Πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας MSLP, για τις 13-06-2010, 12:00UTC*

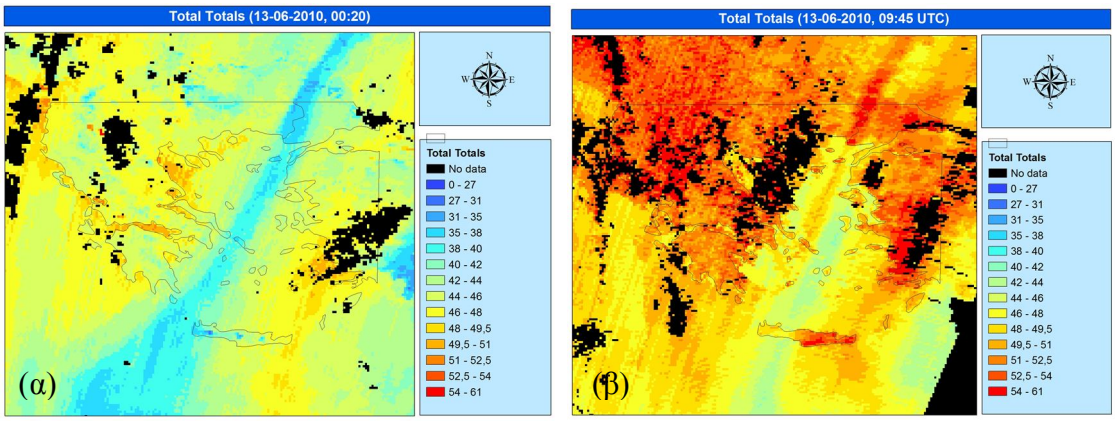
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.38α), η Ελλάδα βρίσκεται σε ράχη που έχει κέντρο τη βόρεια Αφρική και καλύπτει όλη τη περιοχή των Βαλκανίων. Το ανατολικό Αιγαίο και η δυτική Τουρκία βρίσκονται εντός περιοχής που χαρακτηρίζεται από ένα κλειστό χαμηλό με κέντρο λίγο ανατολικότερα των Δωδεκανήσων. Η αστάθεια που παρατηρείται την επόμενη ημέρα έχει περισσότερο θερμικά αίτια και λιγότερο δυναμικά λόγω του αποκομμένου χαμηλού στα ανατολικά.

Στο χάρτη επιφανείας (εικόνα 4.38 β), χαμηλές πιέσεις υφίστανται πάνω από την Ελλάδα και την Τουρκία με ένα υψηλό βαρομετρικό να βρίσκεται δυτικά της Ιταλίας. Στη βόρεια βαλκανική υφίσταται ένα ψυχρό μέτωπο το οποίο ξεκινά από τη Γαλλία διακόπτεται από ένα στάσιμο πάνω από την Αυστρία, συνεχίζει πάνω από τη βόρεια Βαλκανική και εκτείνεται ως τη Λευκορωσία και τη Φιλανδία.

iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS

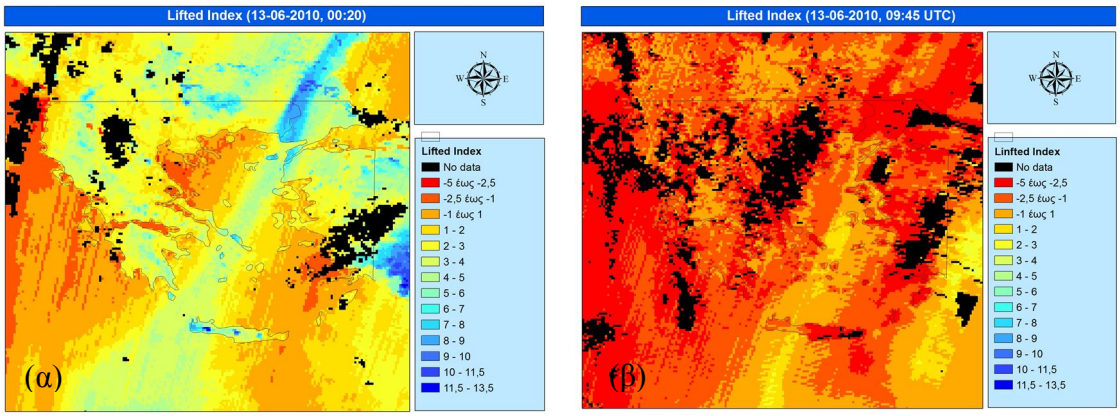
Στην εξεταζόμενη περίπτωση της 13^{ης} Ιουνίου, ο MODIS παρέχει δυο καταγραφές από το πέρασμά του στην Ελλάδα. Στην εικόνα 4.39 παρουσιάζεται ο δείκτης Total Totals στη βραδινή καταγραφή, στις 00:20 UTC και στη μεσημεριανή καταγραφή, στις 09:45 UTC. Η νυχτερινή καταγραφή πραγματοποιείται με μικρή νεφοκάλυψη στη δυτική Μακεδονία ενώ η μεσημεριανή έχει αποτυπώσει και στη περίπτωση αυτή την ύπαρξη εκτεταμένης αστάθειας. Ο δείκτης Total Totals εμφανίζεται ήδη από τη βραδινή εικόνα του MODIS (εικόνα 4.39α) αρκετά αυξημένος με τιμές 38 έως 48 σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα (εικόνα 4.39α). Στη μεσημεριανή καταγραφή (εικόνα 4.39β) έχει ήδη αναπτυχθεί έντονη αστάθεια που καλύπτει όλη την Ελλάδα με υψηλότατες τιμές στη δυτική Μακεδονία, Ήπειρο και Θεσσαλία και Έβρο. Ο δείκτης αστάθειας TT που αποτυπώνεται σε περιοχές χωρίς νέφη είναι πολύ υψηλός με τιμές από 48 έως 61.



Εικόνα 4.39 *Δείκτης αστάθειας Total Totals του MODIS στις 13-06-2010 για α) 00:20 UTC και β) 09:45 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

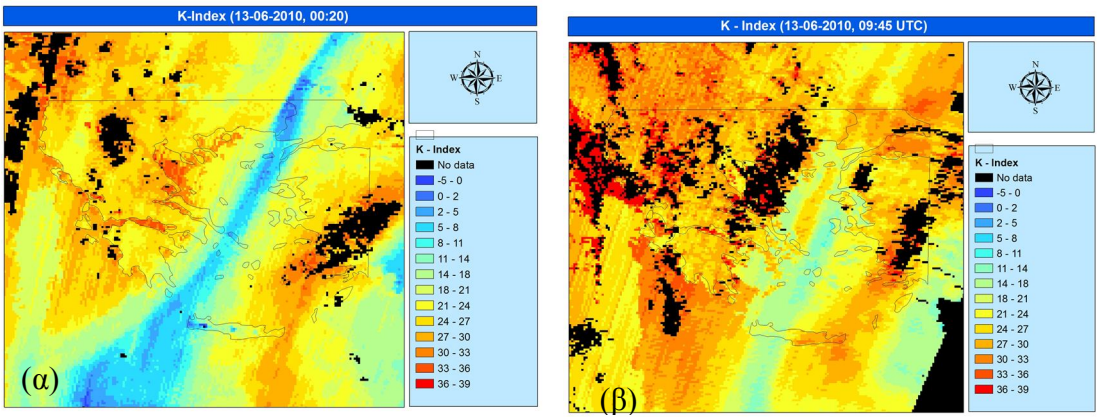
Με την ελάχιστη βραδινή νεφοκάλυψη, ο δορυφόρος MODIS αποτυπώνει με επιτυχία την υφιστάμενη αστάθεια που αναπτύσσεται στον Ελλαδικό χώρο δίνοντας σαφείς ενδείξεις για την αστάθεια της επόμενης. Η μεσημεριανή μέτρηση του δορυφόρου πραγματοποιείται νωρίς όταν η αστάθεια δημιουργεί τα πρώτα νέφη και οι τιμές του TT που καταγράφονται προμηνύουν την έντονη εξέλιξη των νεφικών συστημάτων των επομένων ωρών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες του Lifted Index για τις αντίστοιχες ώρες (εικόνα 4.40).



Εικόνα 4.40 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του MODIS στις 13-06-2010 για α) 00:20 UTC και β) 09:45 UTC*

Τα αποτελέσματα του LI είναι ελαφρώς διαφοροποιημένα με αυτά του TT στη βραδινή καταγραφή όπου ο LI με τιμές από 6 έως 2 αποτυπώνει μικρή πιθανότητα αστάθειας με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη Μακεδονία και Θεσσαλία. Στη πρωινή καταγραφή εμφανίζονται σε συντριπτικό βαθμό αρνητικές τιμές του LI (1 έως -5) σε όλη την ηπειρωτική και όχι μόνο Ελλάδα και αποτυπώνουν με επιτυχία την υψηλή αστάθεια που πρόκειται να πυροδοτήσει την ανάπτυξη εκτεταμένων νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης μετά τις πρώτες μεσημεριανές ώρες.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο τελευταίος δείκτης, ο K-index (εικόνα 4.41) για τις αντίστοιχες ώρες.



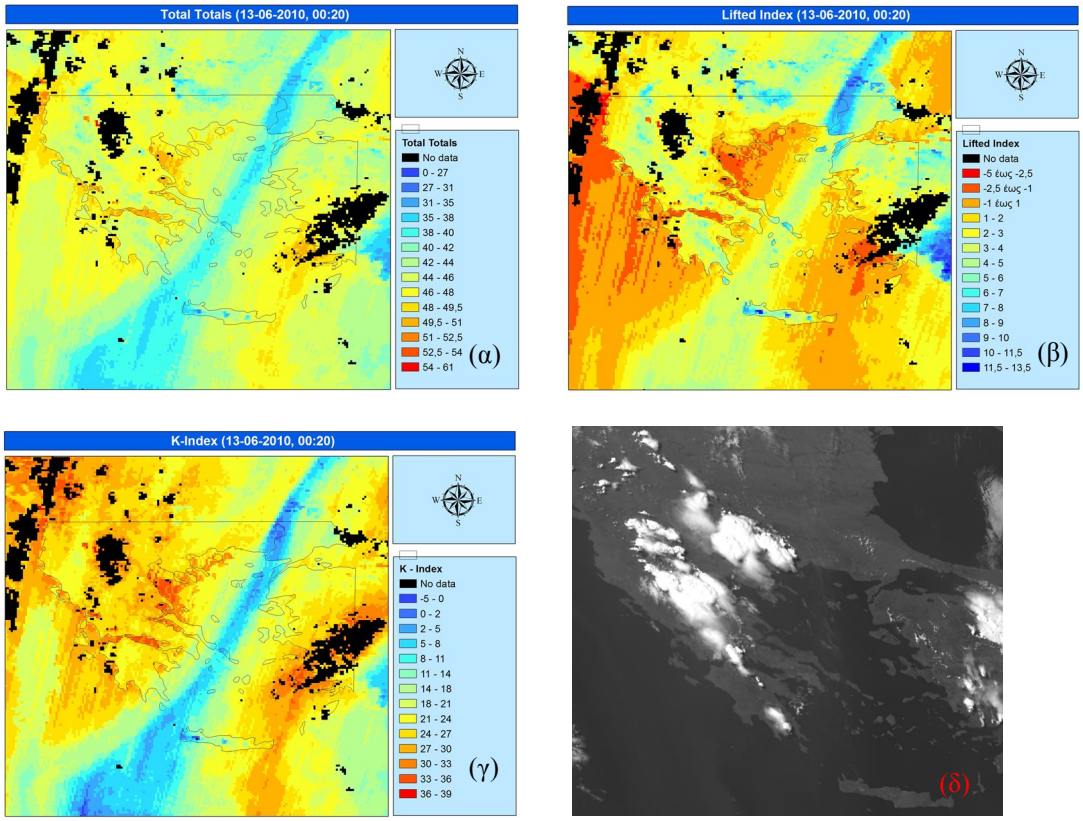
Εικόνα 4.41 *Δείκτης αστάθειας K-Index του MODIS στις 13-06-2010 για α) 00:20 UTC και β) 09:45 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ο τελευταίος δείκτης, ο K-Index, εμφανίζει αντίστοιχη εικόνα με τον TT όσο αφορά τη βραδινή καταγραφή και αντίστοιχη εικόνα και με τους δύο άλλους δείκτες στη μεσημεριανή καταγραφή. Η βραδινή καταγραφή παρουσιάζει μεγάλες τιμές του KI (21-36) με τις μεγαλύτερες τιμές στην Ήπειρο και δυτική Μακεδονία. Η πρωινή καταγραφή παρουσιάζει υψηλότατες τιμές του KI (48-61) κυρίως σε Ήπειρο, Θεσσαλία και Μακεδονία.

Η εικόνα και των δεικτών αστάθειας TT και KI είναι ποιοτικά αντίστοιχη τόσο στη βραδινή όσο και στη μεσημεριανή καταγραφή, ενώ ο LI παρουσιάζει αντίστοιχη εικόνα με τους άλλους δύο μόνο στη μεσημεριανή καταγραφή. Οι δείκτες TT και KI εντοπίζουν θετικά την αστάθεια της ατμόσφαιρας από το βράδυ ενώ το μεσημέρι καταγράφονται υψηλότατες τιμές όλων των δεικτών στη Ήπειρο και δυτική Μακεδονία στην οποία έχουν ήδη αρχίσει να εμφανίζονται νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες τουTotal Totals, του Lifted Index και του K-Index του MODIS σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.42 *(α) Total Totals, (β) Lifted Index, (γ) K – Index στις 00:20 UTC και (δ) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 13-06-2010 και ώρα 14:00 UTC*

Στις βραδινές καταγραφές του MODIS εμφανίζονται υψηλές τιμές στην ηπειρωτική Ελλάδα τόσο στον TT όσο και στον KI (εικόνα 4.42α, γ). Ο LI εμφανίζει στην ηπειρωτική Ελλάδα μικρές τιμές. Ο TT και ο LI εμφανίζουν μικρές τιμές σε μία λωρίδα στην κεντρική οροσειρά της Πίνδου σε αντίθεση με τον KI που δίνει υψηλές τιμές και στην προαναφερθείσα κορυφογραμμή. Από

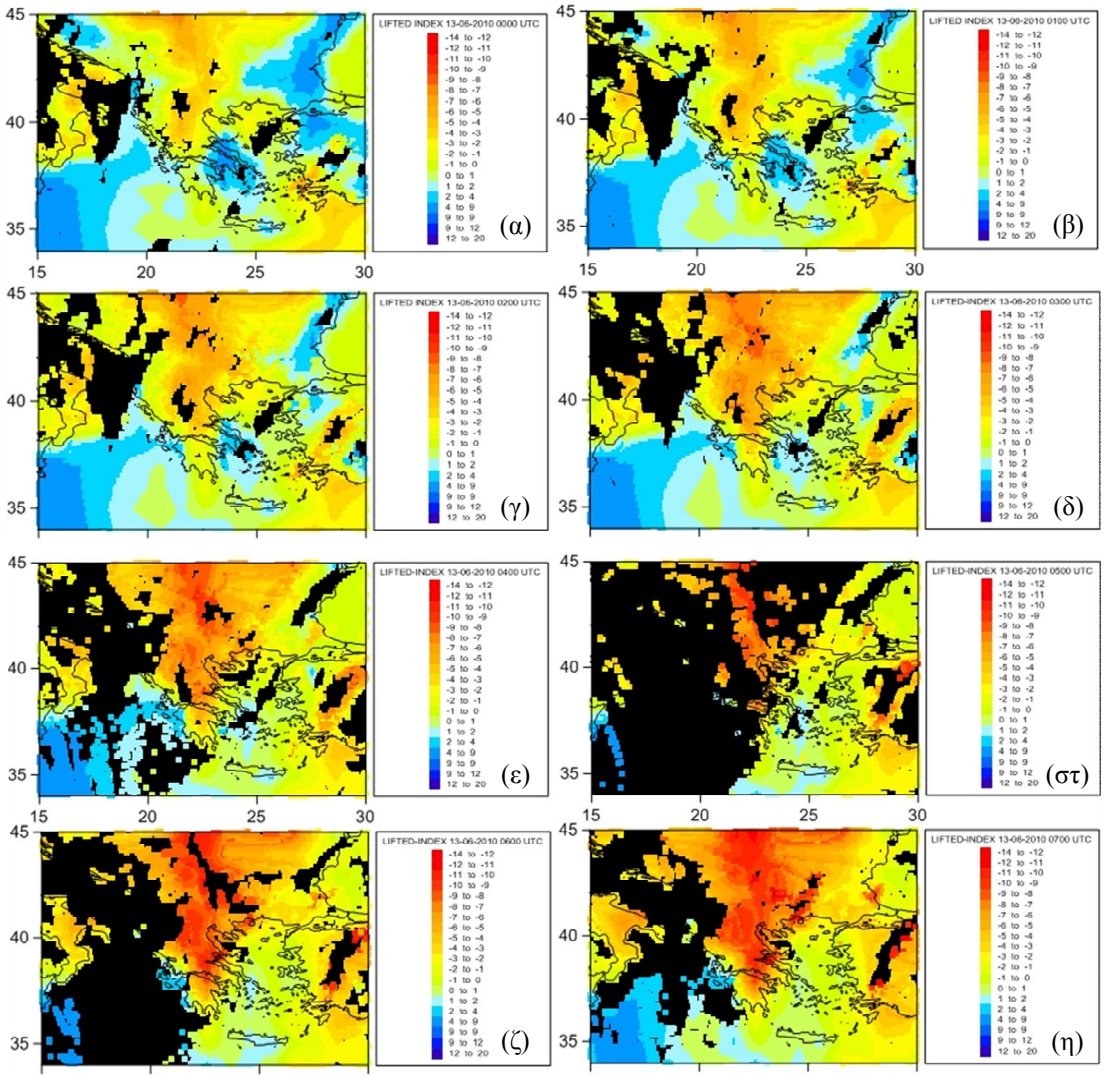
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

τη σύγκριση με το κανάλι του ορατού, φαίνεται ο KI να προδιαγράφει καλύτερα τη γεωγραφική ανάπτυξη νεφών λίγες ώρες μετά με δύο περιοχές υψηλών του τιμών στην δυτική και ανατολική Μακεδονία. Οι δύο άλλοι δείκτες έπονται σε ακρίβεια αναφορικά με τη γεωγραφική κατανομή των νεφών τις επόμενες ώρες.

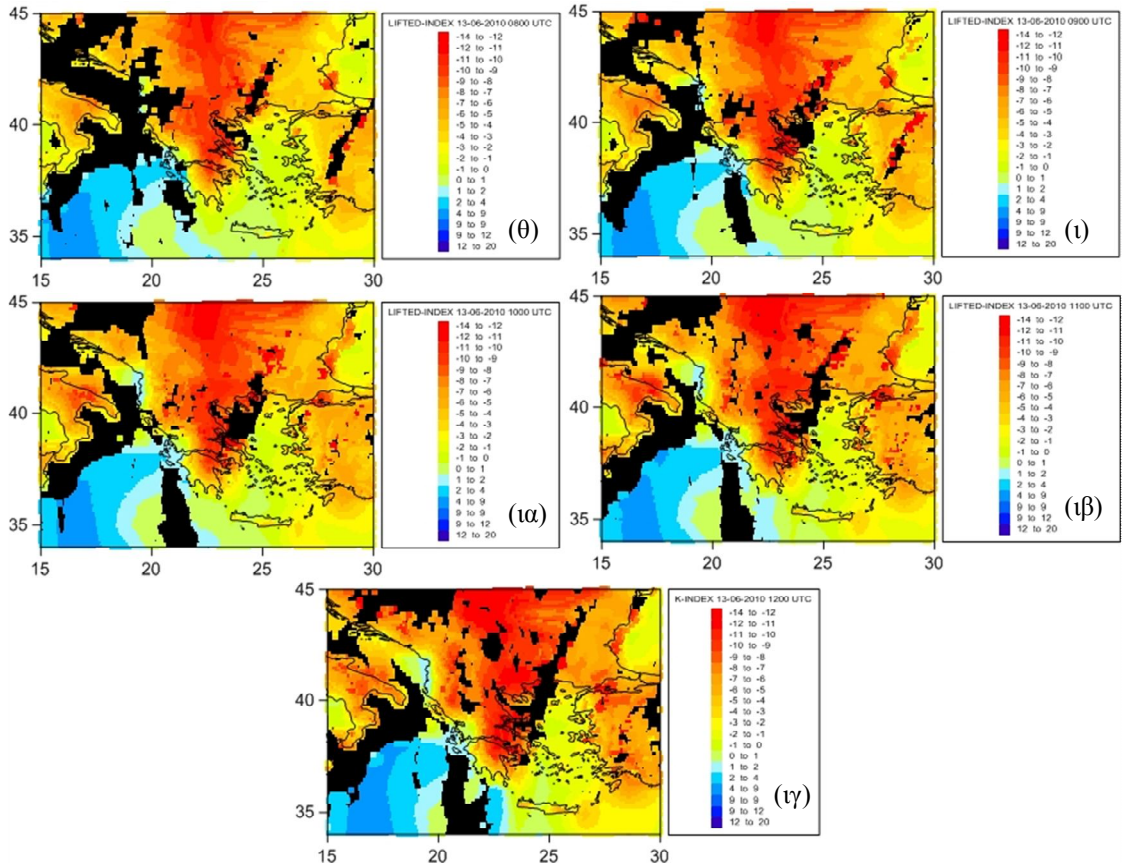
Οι δείκτες αστάθειας που παρέχει το προϊόν MODIS είναι σε θέση να αποτυπώσουν σε μικρό βαθμό την αστάθεια που πρόκειται να αναπτυχθεί την επόμενη ημέρα και εντοπίζουν με σχετική ακρίβεια τις περιοχές ανάπτυξης νεφών. Το προειδοποιητικό σήμα για την επόμενη ημέρα είναι ασθενές αφού φαίνεται να αποτυπώνει το δυναμικό αίτιο της αστάθειας και όχι το θερμικό της επόμενης μέρας αλλά οπωσδήποτε υπαρκτό.

iv. Μελέτη αστάθειας με το προϊόν GII

Όπως σε όλες τις περιπτώσεις, επιλέχτηκε η αποτύπωση της καταγραφής του GII να πραγματοποιηθεί ανά ώρα δηλαδή από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC ώστε να καταδειχτεί και χρονικά η εξέλιξη της αστάθειας. Αρχικά, δημιουργήθηκαν οι χάρτες του GII για τον Lifted Index (Εικόνα 4.43).



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

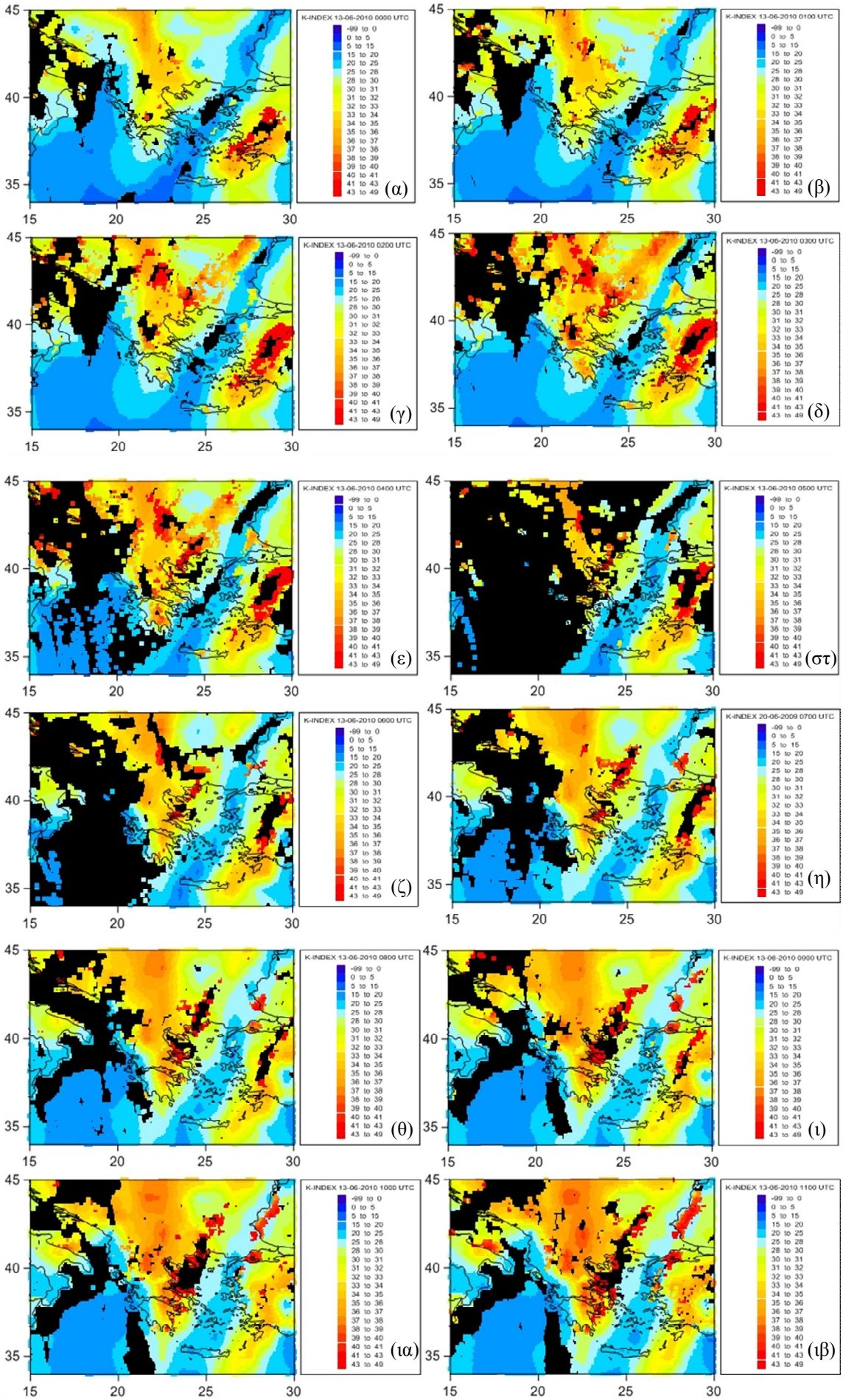


Εικόνα 4.43 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του GII στις 13-06-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

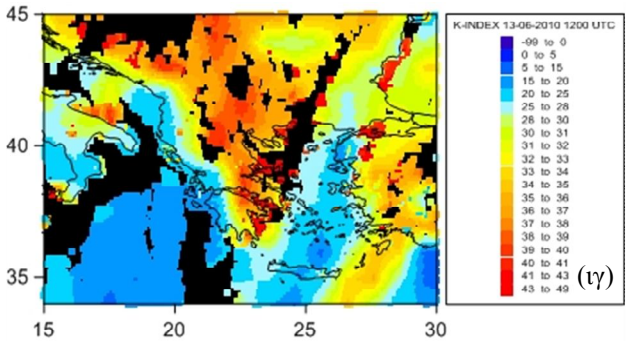
Η χρονική εξέλιξη του δείκτη από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC δείχνει για μια ακόμα φορά την σταδιακή μείωση της τιμής του LI. Όπως έχει αναφερθεί, αρνητικός δείκτης LI αντιστοιχεί σε συνθήκες αστάθειας γεγονός που αποτυπώνεται στους χάρτες για το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας. Μικρές τιμές του LI (-1 έως -5), άρα αυξημένη αστάθεια εντοπίζεται αρχικά στη βόρεια και κεντρική Ελλάδα (εικόνα 4.37 α, β, γ, δ) ενώ σταδιακά καλύπτει όλη την Ελλάδα. Τις πρώτες πρωινές ώρες έως το μεσημέρι, καταγράφονται ιδιαίτερα αρνητικές τιμές του δείκτη LI (-2 έως -14) στο σύνολο της ηπειρωτικής χώρας. Ο δείκτης LI από τις πρώτες βραδινές ώρες επιτυγχάνει να αποτυπώσει με επιτυχία την αστάθεια που αναπτύσσεται.

Αντιστοίχως, η ίδια καταγραφή για τις ίδιες ώρες μελέτης ακολουθεί και για τον δείκτη του K-Index του GII (εικόνα 4.44). Από τις 00:00 UTC καταγράφονται υψηλές τιμές του KI (31-35) στην Μακεδονία και τη κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα. Με τη πάροδο του χρόνου, οι τιμές του KI αυξάνονται ελαφρά ενώ στις 02:00, 03:00 και 04:00 UTC εμφανίζονται πυρήνες με υψηλότατες τιμές του KI (37-43) στην ανατολική Μακεδονία και Χαλκιδική. Τέλος, στις μεσημεριανές καταγραφές, ο δείκτης KI παρουσιάζει υψηλότατες τιμές, από 36 έως 49, σε όλη την Ελλάδα και, κυρίως στη Μακεδονία, κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα, ανατολική Στερεά και ανατολική Πελοπόννησο.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

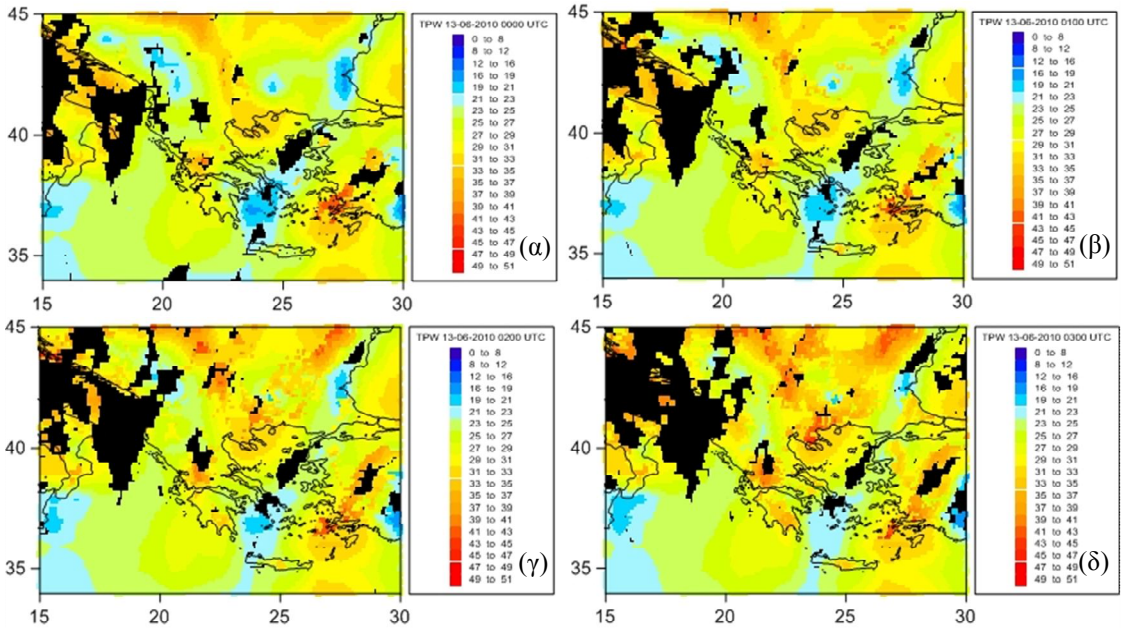


Εικόνα 4.44 *Δείκτης αστάθειας K-Index του GII στις 13-06-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

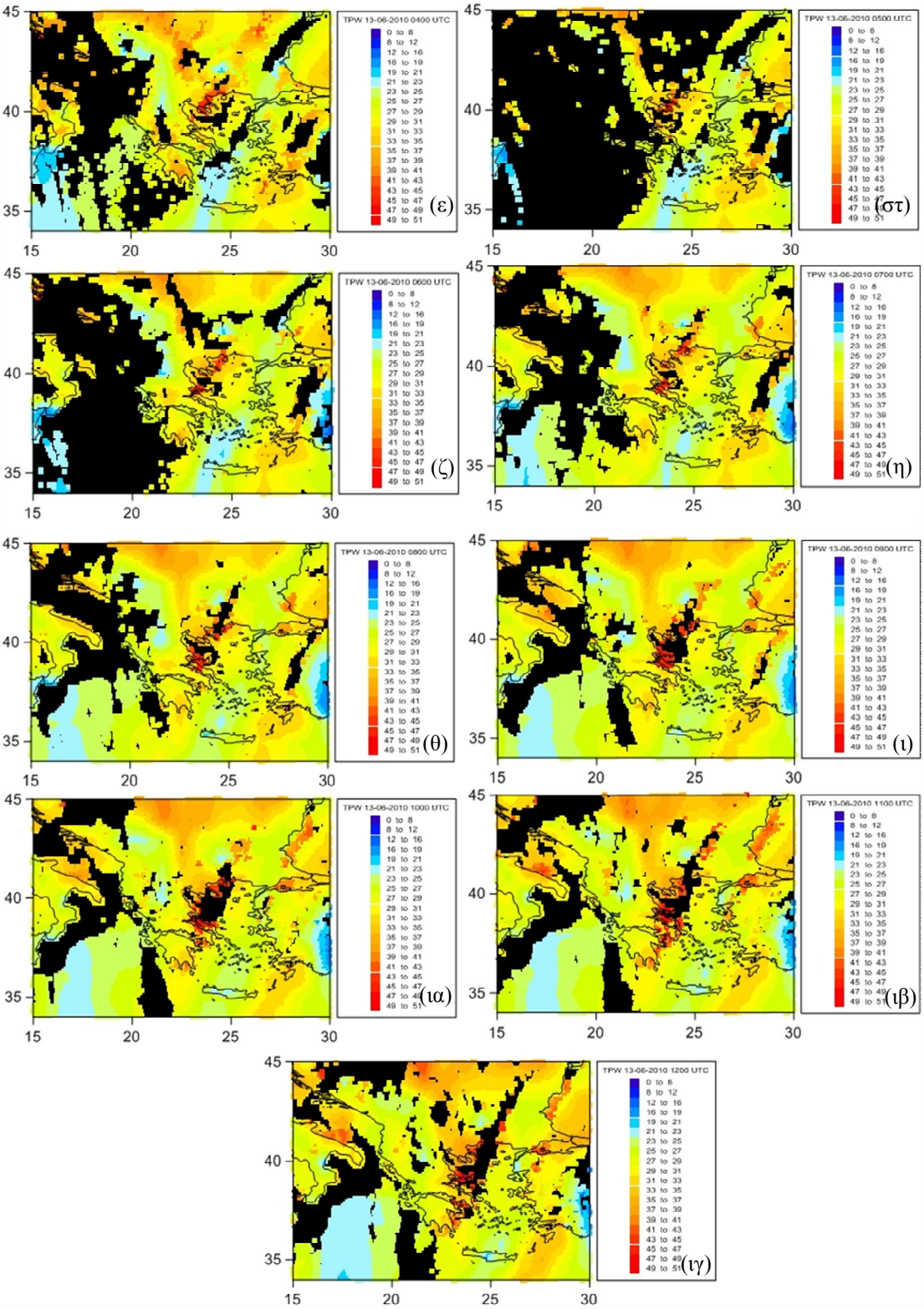
Αμφότεροι οι δείκτες αστάθειας του GII, ο Lifted-Index και ο K-Index σηματοδοτούν την αστάθεια στον Ελλαδικό χώρο από τις βραδινές ακόμα ώρες της προηγούμενης ημέρας.

Τέλος, παρουσιάζεται και η εκτίμηση του GII όσο αφορά στη στήλη ύδατος (TPW) κατά τις αντίστοιχες ώρες με αυτές των δεικτών αστάθειας (εικόνα 4.45). Τις πρώτες βραδινές ώρες εμφανίζονται αυξημένες τιμές του υετίσιμου ύδατος (29-37 kg/m^2) στη περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας και της δυτικής Στερεάς. Με τη πάροδο του χρόνου, παρατηρείται αύξηση του TPW στη κεντρική Μακεδονία, δυτική Στερεά και Πελοπόννησο (4.45 δ).

Τις επόμενες ώρες δεν υπάρχουν αξιόλογες μεταβολές έως τις μεσημεριανές ώρες. Υπάρχει, ωστόσο, μία αξιοπρόσεκτη λωρίδα αυξημένου υετίσιμου ύδατος που ξεκινά από τα βόρεια βαλκάνια και καταλήγει κατά σειρά στους νομούς Κιλκίς, Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής (κυρίως στην εικόνα 4.45 θ, ι).



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

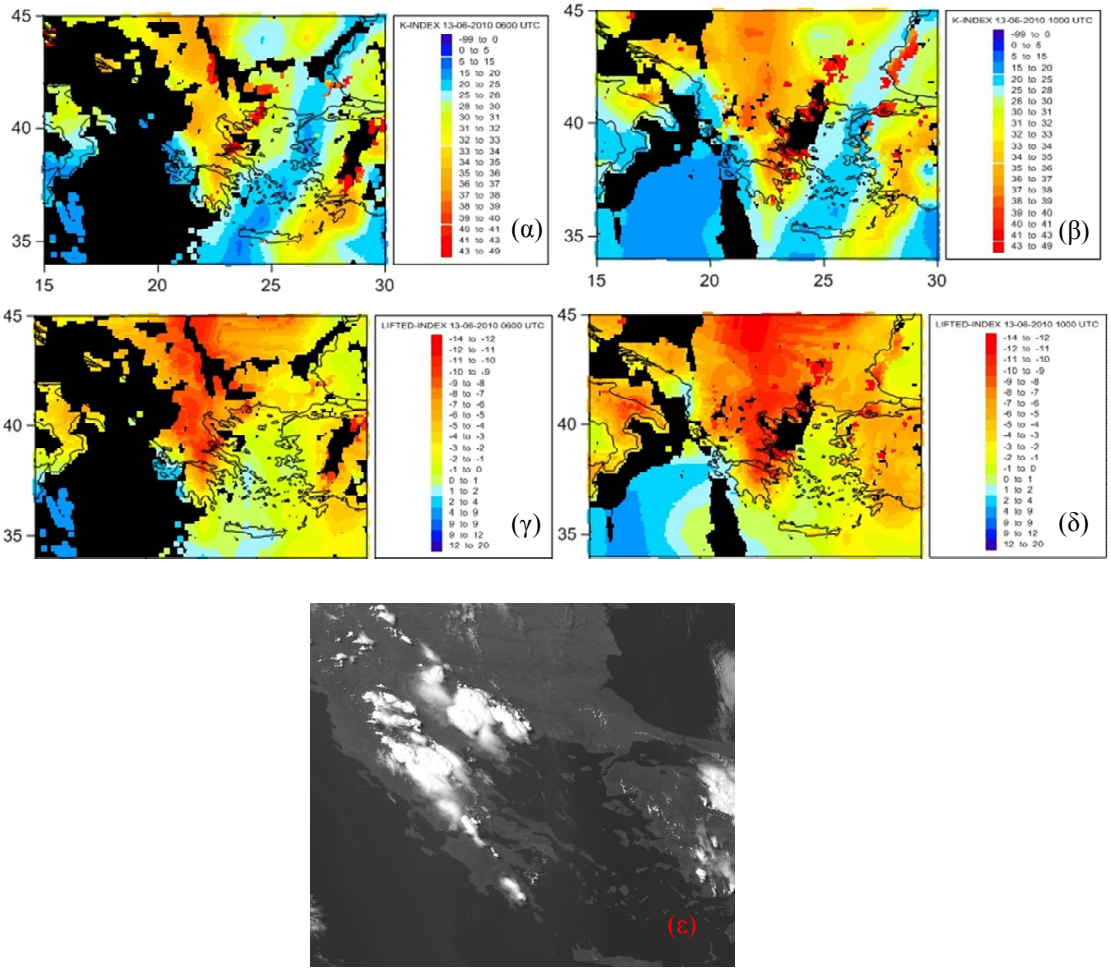


Εικόνα 4.45 *Total Precipitable Water (TWP) του GII στις 13-06-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC,ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η λωρίδα αυτή παρουσιάζει τιμές TPW από 31 έως 41 kg/m^2 ενώ στο θαλάσσιο χώρο των βόρειων Σποράδων καταγράφονται υψηλότατες τιμές της τάξης των 45 με 51 kg/m^2.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες του Lifted Index και του K-Index του GII σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.46 *(α) K-Index του GII στις 06:00 UTC, (β)K-Index του GII στις 10:00 UTC, (γ) Lifted-Index του GII στις 06:00 UTC, (δ) Lifted-Index του GII στις 10:00 UTC, (ε) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 13-06-2010 και ώρα 14:00 UTC*

Ο δείκτης KI εμφανίζει υψηλές τιμές στις 06:00 UTC σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα πλην της δυτικής ηπειρωτικής (31 έως 37) ενώ στις 10:00 UTC αποτυπώνει την έντονη αστάθεια κυρίως στη Μακεδονία και την ανατολική Στερεά (εικόνα 4.46β). Αντίστοιχα, ο δείκτης LI υποδεικνύει υψηλότατη αστάθεια στις ίδιες περιοχές (-7 έως -12, εικόνα 4.46 γ) ενώ στις 10:00 UTC οι τιμές του είναι ακόμα πιο υψηλές (-7 έως -14) και καλύπτουν και όλη τη Μακεδονία και τον Έβρο

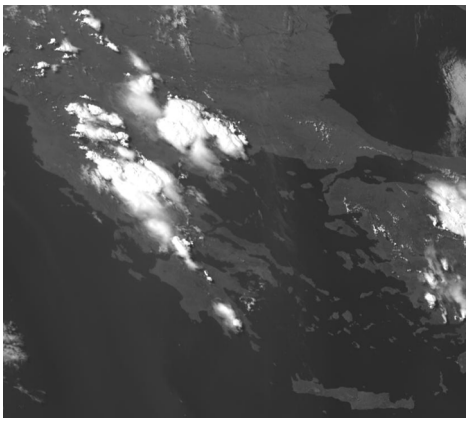
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Ο GII με τους δείκτες αστάθειας φαίνεται ότι προσεγγίζει με σχετική ακρίβεια τις περιοχές της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας όπου μερικές ώρες μετά εμφανίζονται νέφη (εικόνα 4.46δ). Αμφότεροι δείκτες δίνουν υψηλές τιμές στην καταγραφή στις 06:00 UTC τόσο στην ανατολική Μακεδονία όσο και κεντρική Ελλάδα όπου αναπτύσσονται νέφη τις επόμενες ώρες με καλύτερη γεωγραφική αποτύπωση για τον LI κυρίως στην καταγραφή στις 10:00 UTC.

v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών του GII

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, επιλέχτηκαν κάποια σημεία στον Ελλαδικό χώρο, μερικά από αυτά εντός των περιοχών αστάθειας, των περιοχών δηλαδή εμφάνισης των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και μερικά εκτός των περιοχών εμφάνισης νεφών. Η μεταβολή των δεικτών αστάθειας με το χρόνο δίνει το μέτρο μεταβολής της αστάθειας σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή κατά την ημέρα της 13^{ης} Ιουνίου 2010.

Στην εικόνα 4.47 εμφανίζεται ο χάρτης με τα επιλεγμένα σημεία σε περιοχές εντός ή εκτός νεφώσεων καθώς και η εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης του MSG όπου διακρίνονται οι περιοχές αυτές.



(α)

(β)

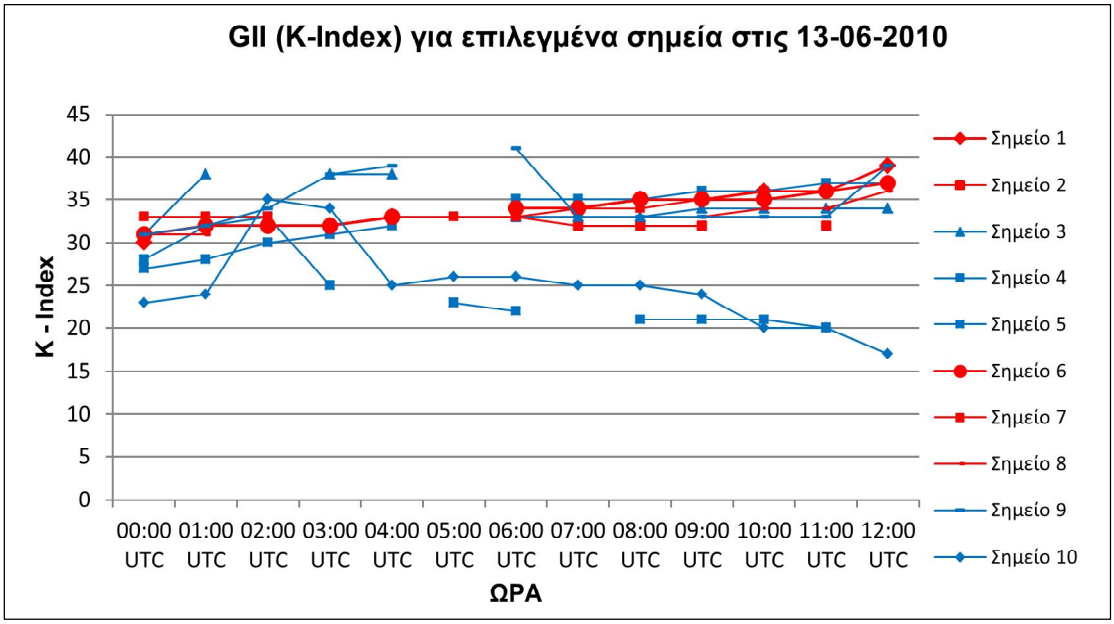
Εικόνα 4.47 *(α) Εικόνα ορατού υψηλής ανάλυσης για τις 13-06-2010 και (β) χάρτης Ελλάδας με τα επιλεγμένα σημεία για χρονική μελέτη.*

Τα σημεία 1, 2, 3, 6 και 7 βρίσκονται εντός περιοχών εμφάνισης νεφών ενώ στα σημεία 4, 5, 8, 9 και 10 δεν αναπτύσσονται νέφη (εικόνα 4.47β). Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα τιμής δεικτών συναρτήσει του χρόνου.

Από τη σύγκριση των τιμών στα παρακάτω διάγραμμα 4.48 προκύπτει αυξητική τάση του δείκτη K-Index σε όλα τα σημεία, κυρίως τις μεσημεριανές ώρες. Στα σημεία που εμφανίζονται νέφη (1, 2, 3, 6 και 7 κόκκινο χρώμα), ο δείκτης παρουσιάζει σε όλες τις ώρες αυξημένες τιμές (μεγαλύτερες του 30)

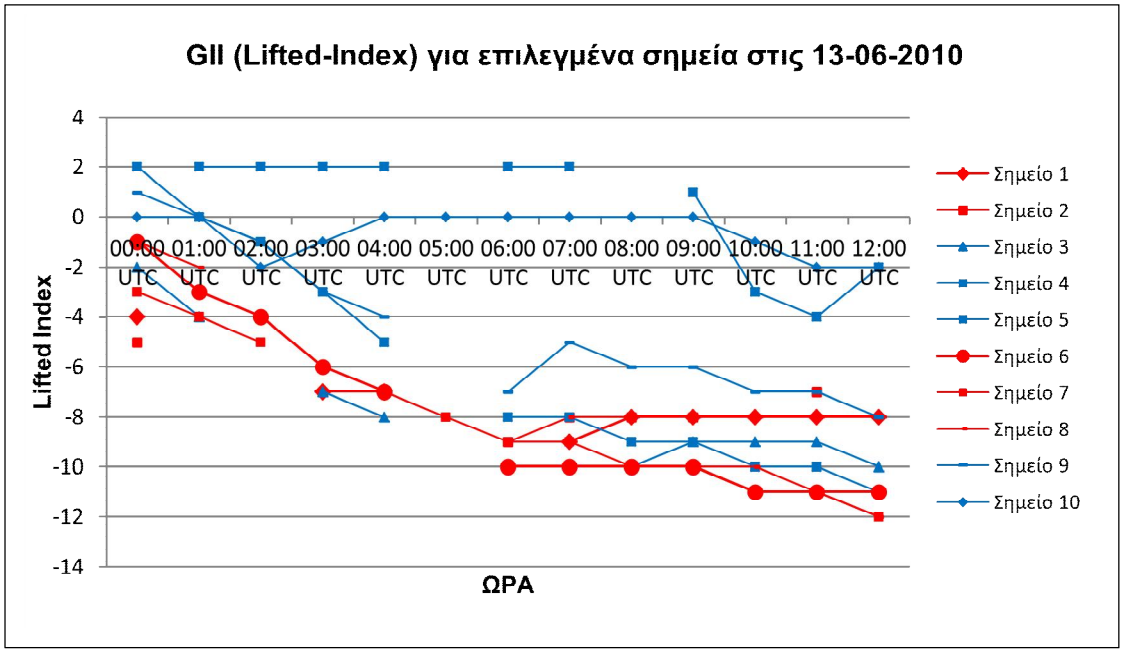
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ενώ στα σημεία εκτός νεφοκάλυψης (μπλε χρώμα), ο δείκτης KI εμφανίζεται μικρότερος (<30) μόνο στα σημεία 4 και 10 (βόρεια Πελοπόννησο και Κρήτη) όπου παρουσιάζουν και μειούμενη τάση. Ο δείκτης δε παρουσιάζει ξεκάθαρη εικόνα σχετικά με την ανάπτυξη ή μη καταιγιδοφόρων νεφών.



Εικόνα 4.48 *Διάγραμμα του K-Index (GII) στις 13-06-2010 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6,7, 8, 9 και 10 συναρτήσει της ώρας*

Το ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και για τον δείκτη Lifted Index του GII στην εικόνα 4.49 για τα ίδια επιλεγμένα σημεία με κόκκινο τα σημεία με νέφη και μπλε τα σημεία χωρίς νέφη.

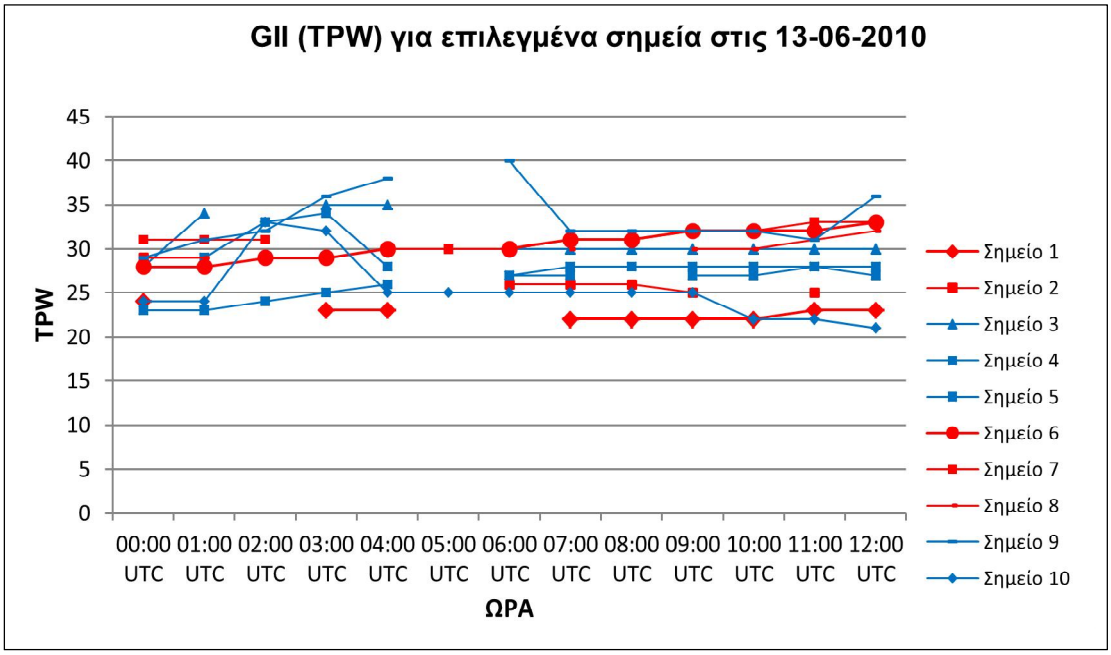


Εικόνα 4.49 *Διάγραμμα του Lifted-Index (GII) στις 13-06-2010 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συναρτήσει του χρόνου*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αντιστοίχως και ο δείκτης Lifted Index παρουσιάζει πτωτική τάση, δηλαδή σηματοδοτεί έντονη αστάθεια, για όλα τα σημεία με αρνητικές τιμές, με τις ελάχιστες τιμές στις μεσημεριανές ώρες. Τα σημεία στα οποία αναπτύχθηκαν νέφη παρουσιάζουν αντίστοιχη τιμή με εκείνα στα οποία δεν εμφανίστηκαν νέφη καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης της περίπτωσης αυτής. Τα σημεία στα οποία δεν αναπτύχθηκαν νεφώσεις, εμφανίζουν και αυτά δείκτη LI με μειούμενη μεταβολή συναρτήσει του χρόνου και μόνο το σημείο 4 παρουσιάζει μικρό δείκτη LI. Συνεπώς, η εικόνα του LI είναι αντίστοιχη με αυτή του KI δηλαδή δε δικαιολογεί την εμφάνιση ή μη των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης.

Τέλος, στα ίδια σημεία αποτυπώνεται και το TPW (υετίσιμο ύδωρ) και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.50 συναρτήσει του χρόνου, με κόκκινο τα σημεία με νέφη και μπλε τα σημεία χωρίς νέφη.



Εικόνα 4.50 *Διάγραμμα του Total Precipitable Water (TPW) του GII στις 13-06-2010 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6,7 και 8 συναρτήσει του χρόνου*

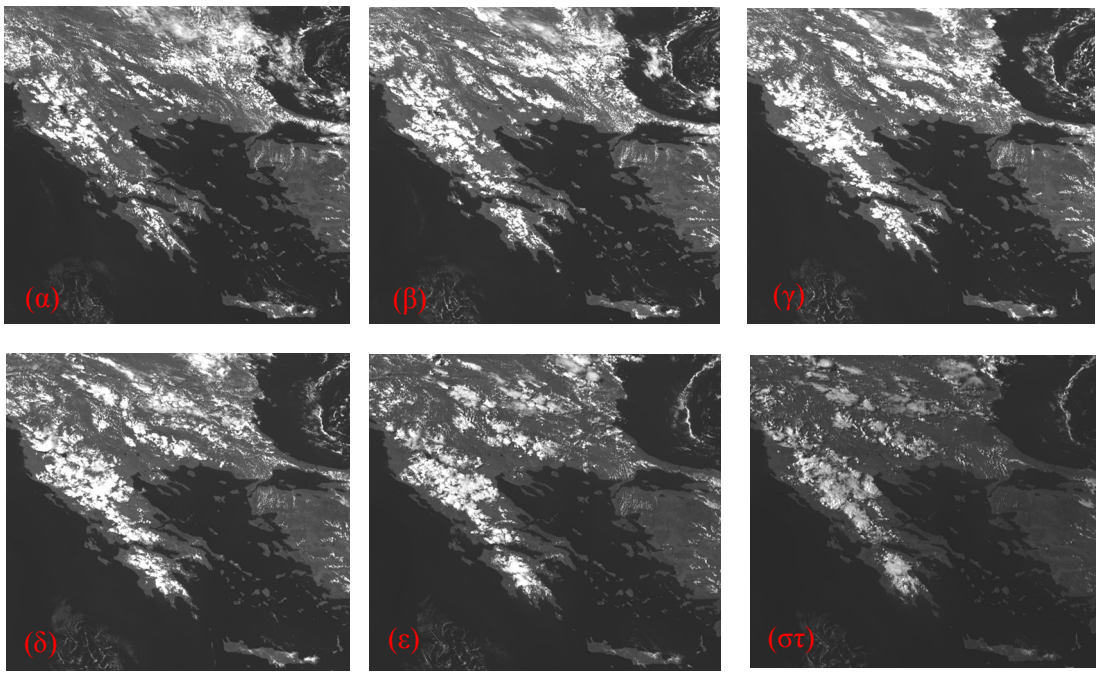
Τα σημεία εμφάνισης νεφώσεων παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές στήλης ύδατος σε σχέση με τα μη νεφοκαλυπτώμενα σημεία εκτός του σημείου 4 και 10. Εντούτοις, για άλλη μια φορά, από το παραπάνω διάγραμμα δε προκύπτει σαφής ένδειξη για τις τιμές ή τις μεταβολές του TPW που να οδηγεί με ασφάλεια στη δημιουργία ή μη νεφών. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι οι τιμές του σημείου 10 (εκτός νεφών, Κρήτη) είναι ιδιαίτερα υψηλές κυρίως στις πρωινές ώρες (04:00, 07:00 και 12:00 UTC).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4.3.5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΙΣ 11-07-2010

i. Ανάπτυξη νεφών στα κανάλια υψηλής ανάλυσης ορατού και υπέρυθρου του MSG

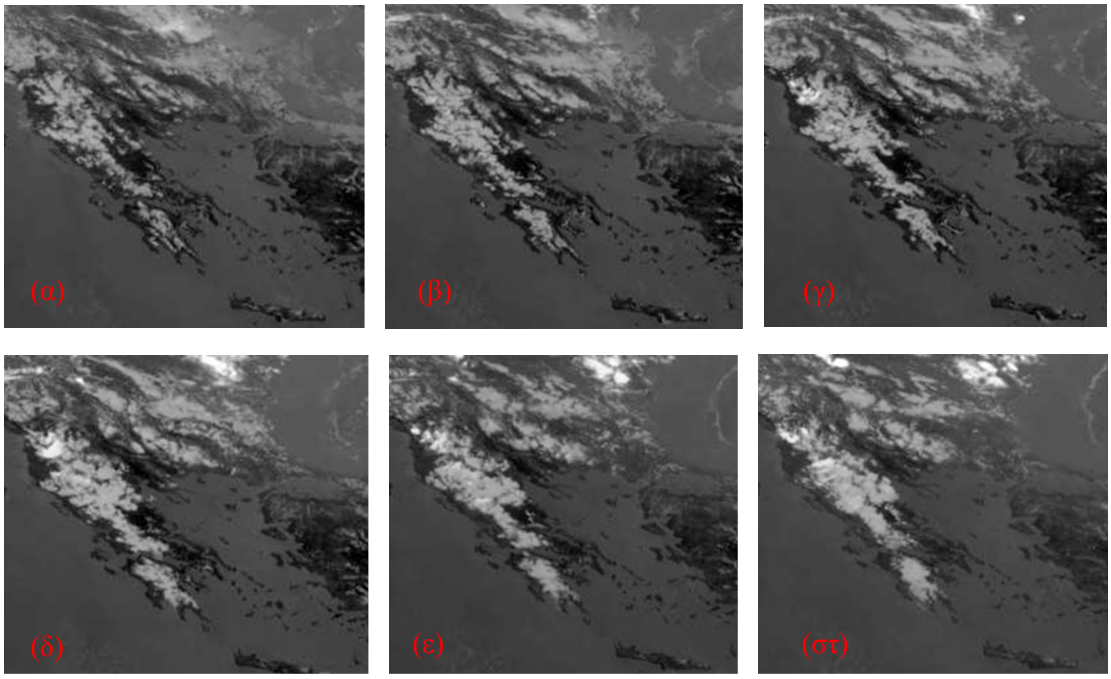
Στην περίπτωση αστάθειας της 11^{ης} Ιουλίου του 2010, τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης αναπτύσσονται τις πρωινές ώρες στη περιοχή της Ηπείρου, στη δυτική Στερεά και τη κεντρική Πελοπόννησο (εικόνα 4.51 α). Με τη πάροδο του χρόνου, τα νεφικά κύτταρα των συγκεκριμένων περιοχών αναπτύσσονται σε έκταση καταλαμβάνοντας σχεδόν όλη τη κεντρική Ελλάδα πλην ανατολικής Θεσσαλίας και ανατολικής Στερεάς. Αργά το απόγευμα τα νέφη μεγαλώνουν σε έκταση ακόμα περισσότερο και καλύπτουν πλέον την Ήπειρο, τη Θεσσαλία, τη δυτική Στερεά και όλη τη κεντρική Πελοπόννησο (εικόνα 44 στ). Κάποια μεμονωμένα νέφη σχηματίζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και στην ανατολική Κρήτη.



Εικόνα 4.51 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 11-07-2010 στο κανάλι ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV) του MSG κατά τις ώρες: α) 10:00 UTC, β) 11:00 UTC, γ) 12:00 UTC, δ) 13:00 UTC, ε) 14:00 UTC, στ)15:00 UTC.*

Ακολουθούν οι και οι αντίστοιχες εικόνες από το θερμικό υπέρυθρο του MSG για την ίδια μέρα (εικόνα 4.45). Τα νέφη σε όλη την Ελλάδα παρουσιάζονται με μέση λαμπρότητα διότι οι θερμοκρασίες των κορυφών τους δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Αυτό σημαίνει ότι τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης δεν έχουν φτάσει στο άνω όριο της τροπόσφαιρας αλλά παραμένουν σε μέσο ύψος. Εξαίρεση είναι η εμφάνιση cumulonimbus στα σύνορα Ελλάδας Αλβανίας (εικόνα 4.52 στ) του οποίου το λευκό χρώμα είναι διακριτό ανάμεσα στα πιο γκρίζα γειτονικά νέφη.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

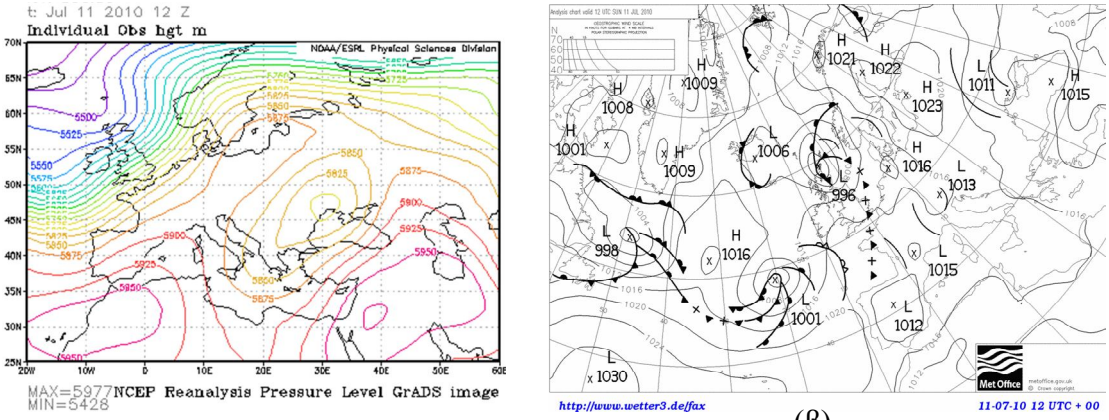


Εικόνα 4.52 *Εξέλιξη των νεφικών συστημάτων στις 11-07-2010 στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου (IR 10.8μm) του MSG κατά τις ώρες: α) 10:00 UTC, β) 11:00 UTC, γ) 12:00 UTC, δ) 13:00 UTC, ε) 14:00 UTC, στ)15:00 UTC.*

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας στην κορυφή των νεφών στον Ελλαδικό χώρο μπορεί να γίνει μέσω του υπέρυθρου καναλιού βάσει της λαμπρότητας και κυμαίνεται μεταξύ -10 και -20 ^{o}C. Στην περίπτωση αστάθειας της 11^{ης} Ιουλίου 2010, δημιουργήθηκαν νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης τα οποία δεν αναπτύχθηκαν πλήρως σε όλο το ύψος της τροπόσφαιρας.

ii. Συνοπτική Ανάλυση

Εξετάζεται η συνοπτική κατάσταση της περίπτωσης της 11^{ης} Ιουλίου του 2010 με τη βοήθεια των χαρτών του ισοβαρικού επιπέδου των 500 hPa και της επιφάνειας (MSLP) για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.53).



(α) (β)

Εικόνα 4.53 *(α) Γεωδυναμικά ύψη για τις 11-07-2010, 12:00 UTC στα 500 hPa και (β) Πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας MSLP.*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

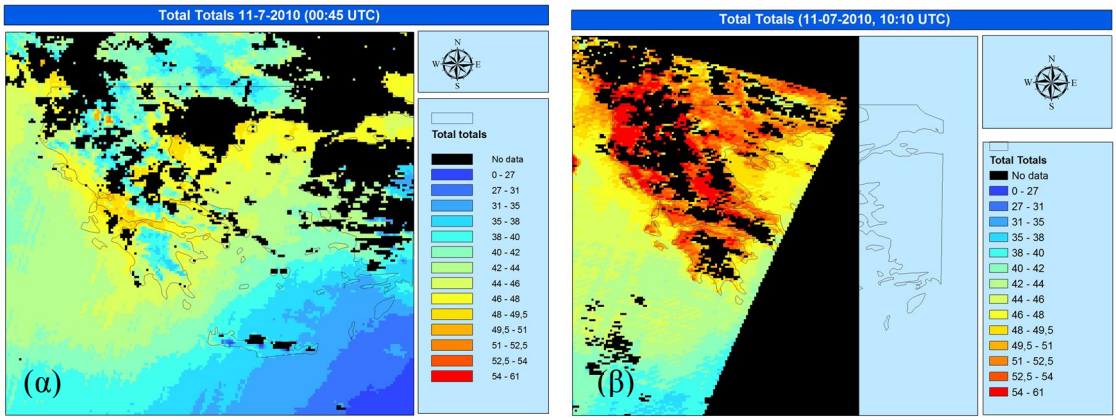
Στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για τις 12:00 UTC (εικόνα 4.53 α), υπάρχει ένα κλειστό χαμηλό πάνω από την Ελλάδα με κέντρο λίγο δυτικότερα της χερσονήσου της Κριμαίας (Ουκρανία). Το χαμηλό αυτό επηρεάζει τον καιρό στην επιφάνεια της Ελλάδας δημιουργώντας δυναμικά αίτια ενίσχυσης της υπάρχουσας αστάθειας.

Στο χάρτη επιφανείας (εικόνα 4.53β), η Ελλάδα βρίσκεται στη μέση ενός χαμηλού με κέντρο τη βόρεια Ιταλία και ενός υψηλού με κέντρο τον ανατολικό τομέα της Μαύρης Θάλασσας. Στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο επικρατούν υψηλές πιέσεις (1016 hPa).

iii. Μελέτη της αστάθειας με το ατμοσφαιρικό προϊόν MODIS

Στην εξεταζόμενη περίπτωση της 11^{ης} Ιουνίου, ο MODIS παρέχει δυο καταγραφές από το πέρασμά του στην Ελλάδα. Στην εικόνα 4.47 παρουσιάζεται ο δείκτης Total Totals στη βραδινή καταγραφή, στις 00:45 UTC και στη μεσημεριανή καταγραφή, στις 10:10 UTC. Η νυχτερινή καταγραφή πραγματοποιείται με μεγάλη νεφοκάλυψη στην κεντρική και ανατολική Μακεδονία ενώ η μεσημεριανή έχει αποτυπώσει και στη περίπτωση αυτή την ύπαρξη εκτεταμένης αστάθειας. Ο δείκτης Total Totals εμφανίζεται ήδη από τη βραδινή εικόνα του MODIS (εικόνα 4.54 α) αρκετά αυξημένος με τιμές 38 έως 51 σε όλη την ηπειρωτική και κυρίως στις δυτικές ακτές της ηπειρωτικής Ελλάδας με το νομό της Αιτωλοακαρνανίας να εμφανίζει τιμές από 46 έως 51.

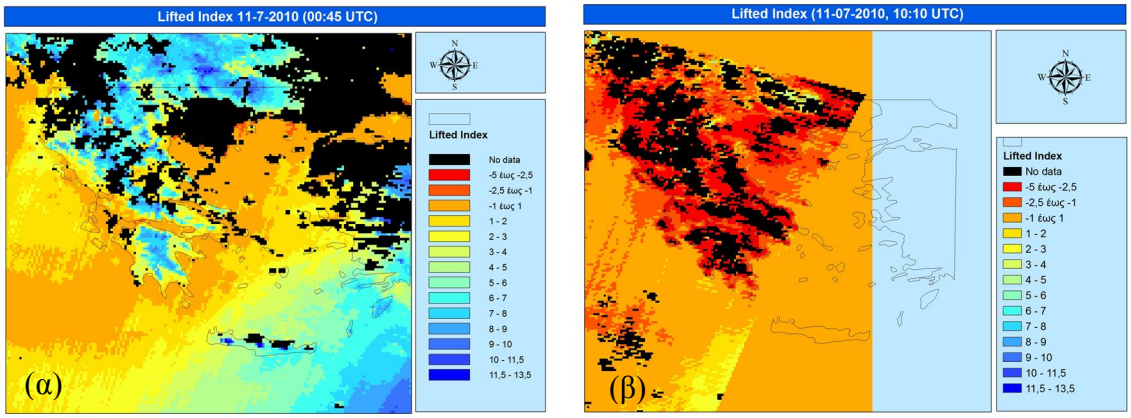
Στη μεσημεριανή καταγραφή (εικόνα 4.54β) έχει ήδη αναπτυχθεί έντονη αστάθεια που καλύπτει όλη την ηπειρωτική Ελλάδα με υψηλότατες τιμές. Ο δείκτης αστάθειας TT που αποτυπώνεται σε περιοχές χωρίς νέφη είναι πολύ υψηλός με τιμές από 46 έως 61.



Εικόνα 4.54 *Δείκτης αστάθειας Total Totals του MODIS στις 11-07-2010 για α) 00:45 UTC και β) 10:10 UTC*

Στη εξεταζόμενη περίπτωση, για άλλη μια φορά, ο δορυφόρος MODIS αποτυπώνει με επιτυχία την αστάθεια από τη βραδινή κιόλας μέτρηση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες του Lifted Index για τις αντίστοιχες ώρες (εικόνα 4.55).

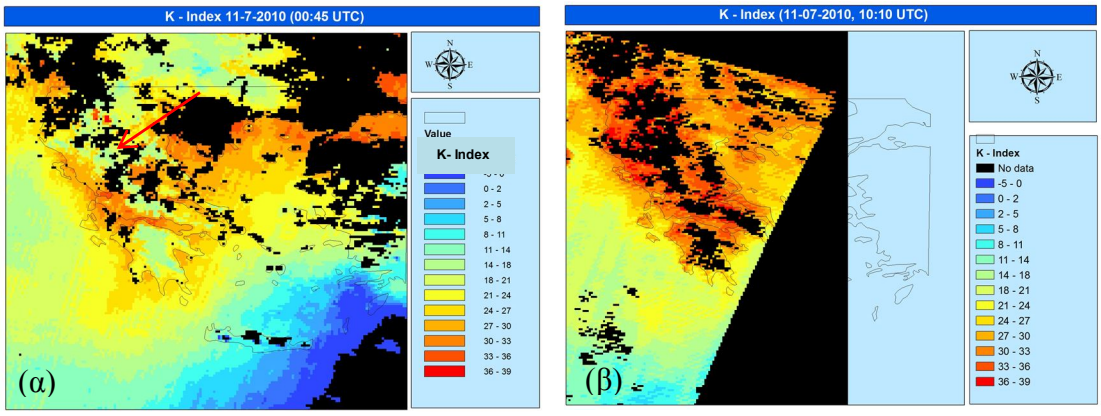
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 4.55 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του MODIS στις 11-07-2010 για α) 00:45 UTC και β) 10:10 UTC*

Τα αποτελέσματα του LI είναι ελαφρώς διαφοροποιημένα με αυτά του TT στη βραδινή καταγραφή όπου ο LI με τιμές από 10 έως 1 αποτυπώνει μικρή πιθανότητα αστάθειας με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη κεντρική Ελλάδα και κάποια κελιά αστάθειας στη βόρεια Ήπειρο. Στη πρωινή καταγραφή εμφανίζονται σε σημαντικό βαθμό αρνητικές τιμές του LI (-2,5 έως -5) σε όλη την ηπειρωτική και όχι μόνο Ελλάδα και αποτυπώνουν με επιτυχία την υψηλή αστάθεια που ήδη έχει πυροδοτήσει τη δημιουργία νεφών σε όλη την Ελλάδα.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο τελευταίος δείκτης, ο K-index (εικόνα 4.56) για τις αντίστοιχες ώρες.



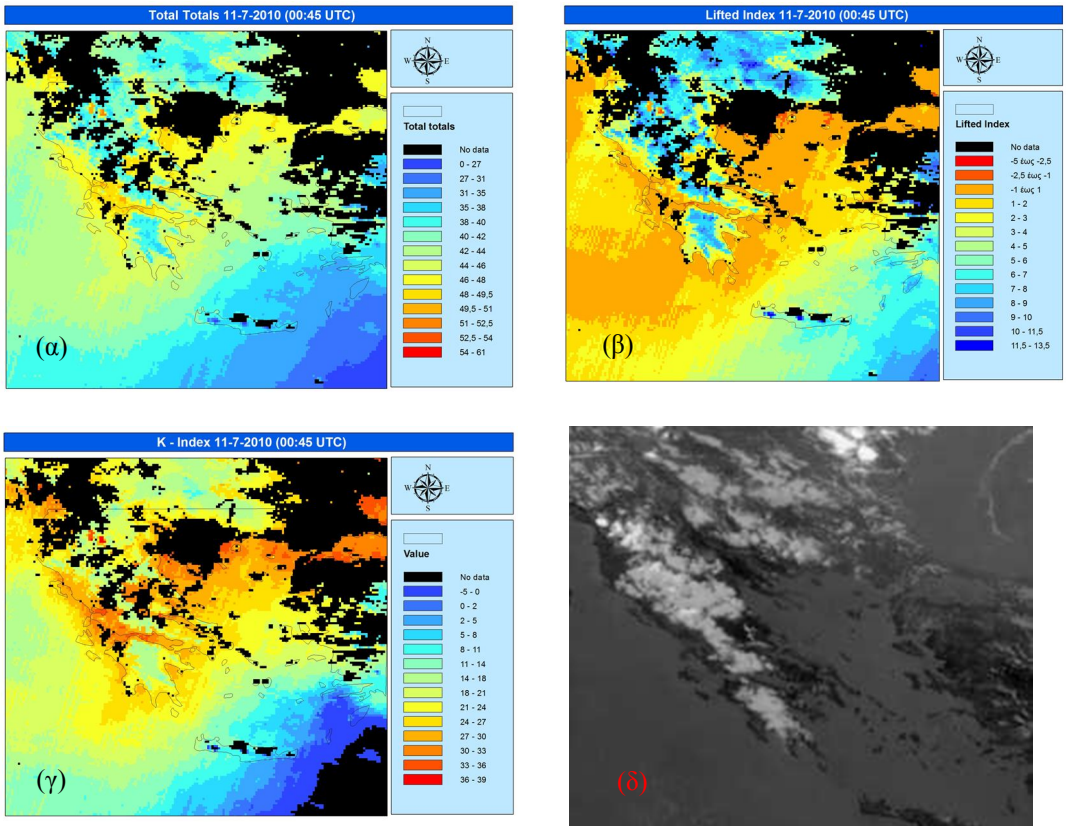
Εικόνα 4.56 *Δείκτης αστάθειας K-Index του MODIS στις 11-07-2010 για α) 00:45 UTC και β) 10:10 UTC*

Ο τελευταίος δείκτης, ο K-Index, εμφανίζει αντίστοιχη εικόνα με τον LI. Η βραδινή καταγραφή παρουσιάζει μικρές τιμές του KI (8-24) με τις μεγαλύτερες τιμές στη δυτική Ελλάδα και κεντρική Μακεδονία (21-33). Η πρωινή καταγραφή παρουσιάζει υψηλότατες τιμές του KI (48-61) κυρίως στην κεντρική και νότια ηπειρωτική Ελλάδα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο εμφανή κελιά αστάθειας στη βραδινή καταγραφή στη βόρεια ήπειρο στο σημείο που βρίσκονται λίμνες (εικόνα 4.56α). Ένα μειονέκτημα της καταγραφής είναι οι υψηλές τιμές του δείκτη στην περιοχή του βορείου Αιγαίου.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Η εικόνα και όλων των δεικτών αστάθειας είναι ποιοτικά αντίστοιχη τόσο στη βραδινή όσο και στη μεσημεριανή καταγραφή. Οι δείκτες εντοπίζουν την αστάθεια της ατμόσφαιρας από το βράδυ κυρίως στη δυτική Ελλάδα ενώ το μεσημέρι καταγράφονται υψηλότατες τιμές όλων των δεικτών στο σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας στην οποία έχουν ήδη αρχίσει να εμφανίζονται νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες τουTotal Totals, του Lifted Index και του K-Index του MODIS σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.57 *(α) Total Totals, (β) Lifted Index, (γ) K – Index στις 01:00 UTC και (δ) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 11-07-2010 και ώρα 14:00 UTC*

Στις βραδινές καταγραφές του MODIS, τόσο ο TT όσο και ο LI παρουσιάζουν στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα παρόμοια κατανομή. Όμως ο TT εμφανίζει μεγάλες τιμές (35 έως 42) στις περισσότερες περιοχές ενώ ο LI παρουσιάζει χαμηλές τιμές (6 έως 9). Ο δείκτης LI εμφανίζει μεγάλες τιμές πάνω από θαλάσσιες περιοχές, γεγονός που τον καθιστά αναξιόπιστο στις περιοχές αυτές. Ο TT περιγράφει γεωγραφικά με καλύτερο τρόπο την ανάπτυξη νεφών τις επόμενες ώρες ενώ η τιμές του είναι αυξημένες και καταγράφουν ξεκάθαρη αστάθεια σε αντίθεση με τον LI που ενώ γεωγραφικά μοιάζει στη κατανομή του με τον TT εντούτοις εμφανίζει χαμηλές τιμές.

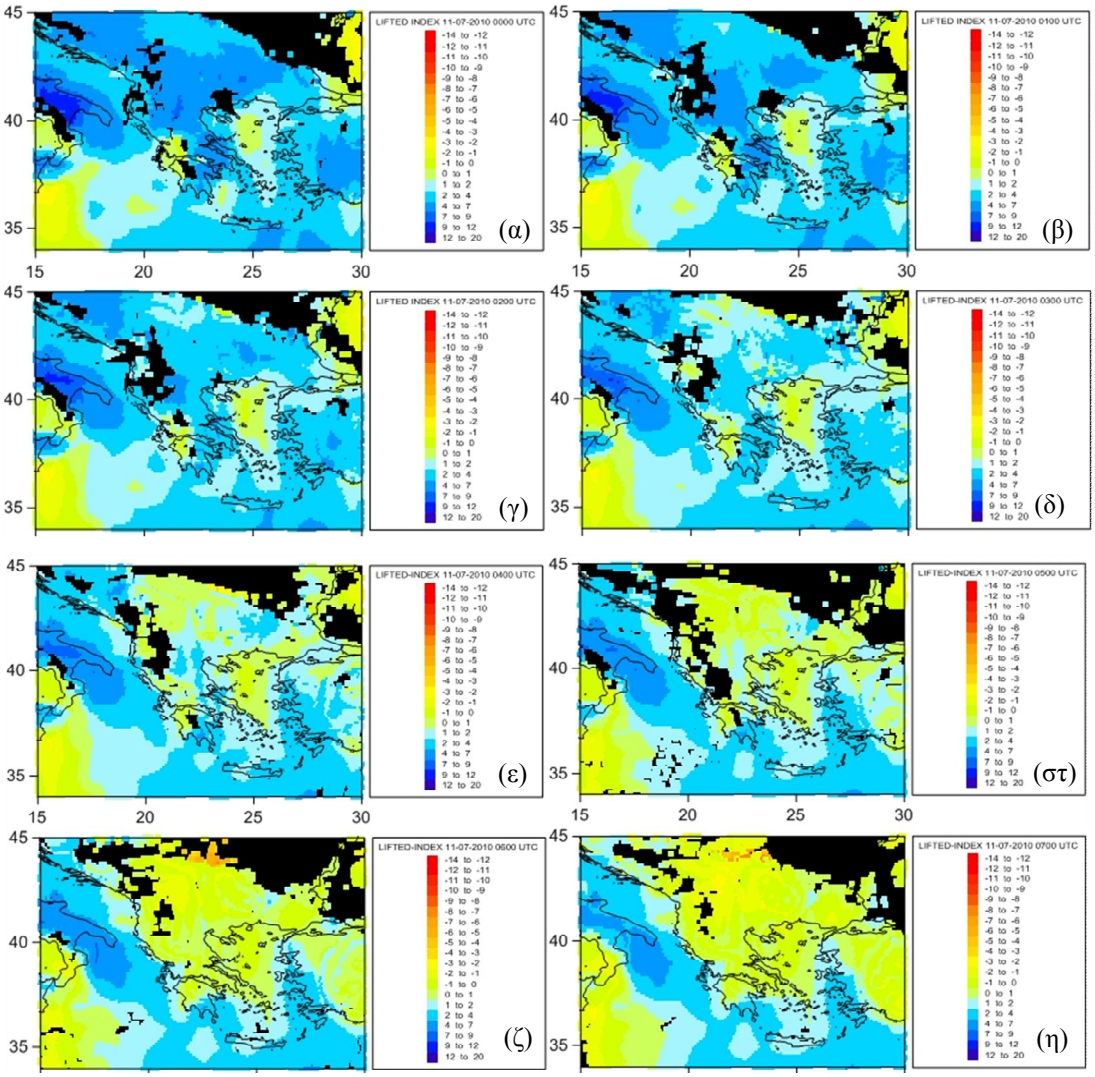
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Τέλος, ο δείκτης KI δίνει υψηλές τιμές κυρίως στη Στερεά και δυτική ήπειρο καταγράφοντας με επιτυχία την αστάθεια ενώ αποτυγχάνει από τη βραδινή καταγραφή να αποτυπώσει παρά μόνο σε μικρό βαθμό τις περιοχές που θα εμφανίσουν νέφη την επομένη.

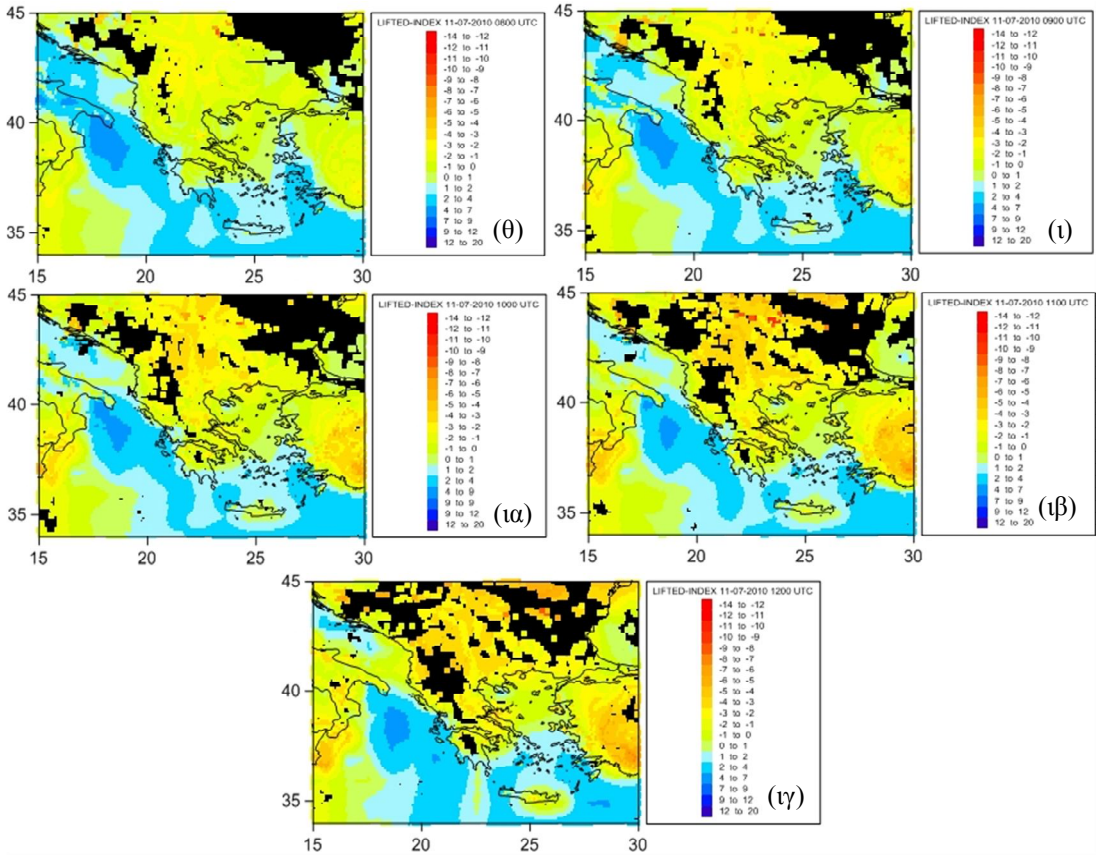
Συμπερασματικά, οι δείκτες αστάθειας και η γεωγραφική τους κατανομή που παρέχονται από το προϊόν MODIS δεν είναι σε θέση να αποτυπώσουν σε ικανοποιητικά επίπεδα την αστάθεια που πρόκειται να αναπτυχθεί την επόμενη ημέρα ενώ η γεωγραφική κατανομή των νεφών δεν επαληθεύεται παρά μόνο από τον TT. Στη προκειμένη περίπτωση, μόνο ο KI είναι σε θέση να δώσει ένα σήμα προειδοποιητικό της επερχόμενης ανάπτυξης νεφών και να χρησιμοποιηθεί επικουρικά σε επιχειρησιακή βάση.

iv. Μελέτη αστάθειας με το προϊόν GII

Όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, επιλέχτηκε η αποτύπωση της καταγραφής του GII να πραγματοποιηθεί ανά ώρα δηλαδή από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC ώστε να καταδειχτεί ξανά και χρονικά η εξέλιξη της αστάθειας. Για μια ακόμη φορά, δημιουργήθηκαν αρχικά οι χάρτες του GII για τον Lifted Index (Εικόνα 4.58).



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

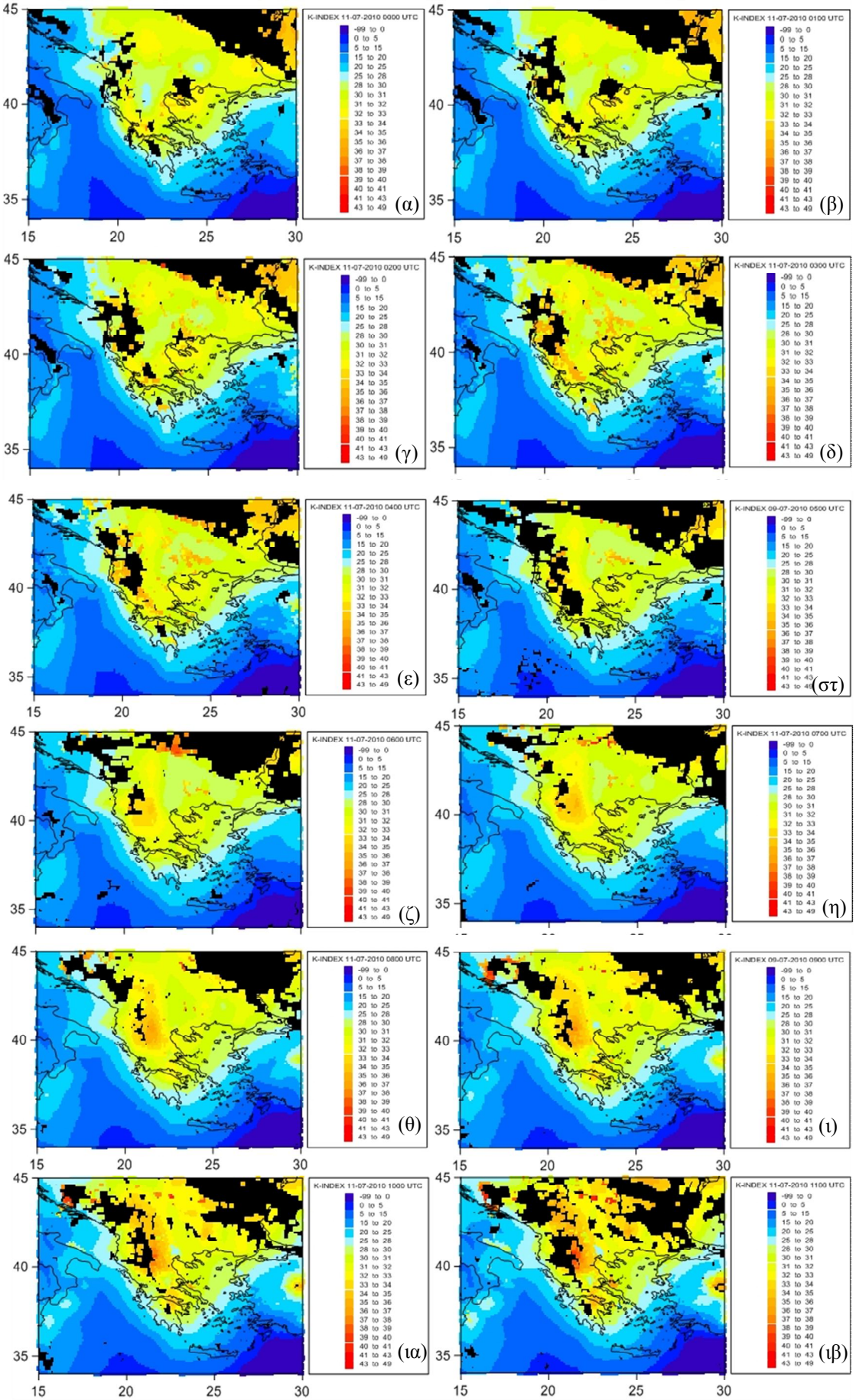


Εικόνα 4.58 *Δείκτης αστάθειας Lifted Index του GII στις 11-07-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

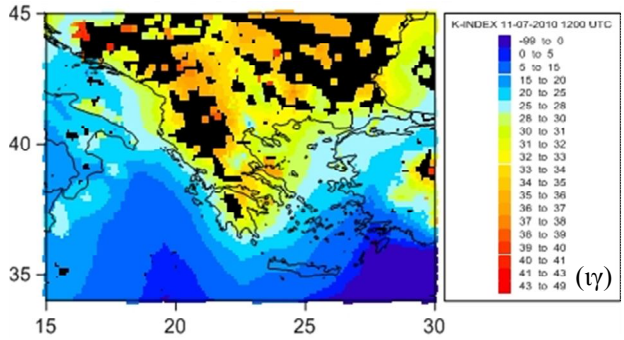
Η χρονική εξέλιξη του δείκτη από τις 00:00 UTC έως και τις 12:00 UTC δείχνει για μια ακόμα φορά την σταδιακή μείωση της τιμής του LI. Μεγάλες τιμές του LI (2 έως 9), επομένως μικρή αστάθεια εντοπίζεται αρχικά στην ηπειρωτική Ελλάδα (εικόνα 4.58 α, β, γ, δ) με εξαίρεση τη δυτική Στερεά και το βόρειο Αιγαίο (τιμές LI από -1 έως -3). Τις πρώτες πρωινές ώρες έως το μεσημέρι, καταγράφονται αρνητικές τιμές του δείκτη LI (-1 έως -3) στο σύνολο της ηπειρωτικής χώρας και το Αιγαίο (εικόνα 4.58 ζ, η, θ, ι). Τις μεσημεριανές ώρες, η έντονη αστάθεια αποτυπώνεται από τον LI με τιμές από -2 έως και -5. Επομένως, ο δείκτης LI, από τις πρωινές και όχι τις βραδινές ώρες, επιτυγχάνει να αποτυπώσει σε ικανοποιητικό βαθμό την αστάθεια.

Αντιστοίχως, η ίδια καταγραφή για τις ίδιες ώρες μελέτης ακολουθεί και για τον δείκτη του K-Index του GII (εικόνα 4.59). Από τις 00:00 UTC καταγράφονται υψηλές τιμές του KI (31-34) στην ηπειρωτική Ελλάδα και το βόρειο Αιγαίο. Με τη πάροδο του χρόνου, οι τιμές του KI αυξάνονται ενώ στην ανατολική Μακεδονία και τη δυτική Ελλάδα εμφανίζονται πυρήνες αστάθειας με τιμές του KI από 33 έως 37 (εικόνα 4.59ε, στ, ζ, η, θ ,ι). Τέλος, στις μεσημεριανές καταγραφές, ο δείκτης KI παρουσιάζει υψηλότατες τιμές, από 32 έως 49, σε όλη την Ελλάδα και κυρίως στην Ήπειρο και δυτική Μακεδονία (εικόνα 4.59ια, ιβ, ιγ).

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

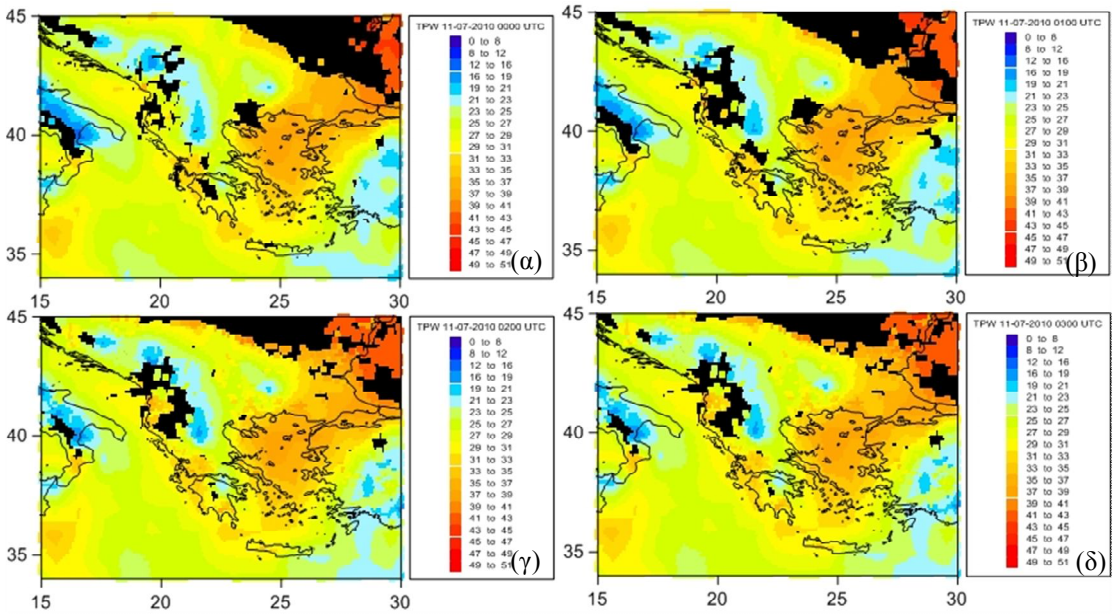


Εικόνα 4.59 *Δείκτης αστάθειας K-Index του GII στις 11-07-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC, ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

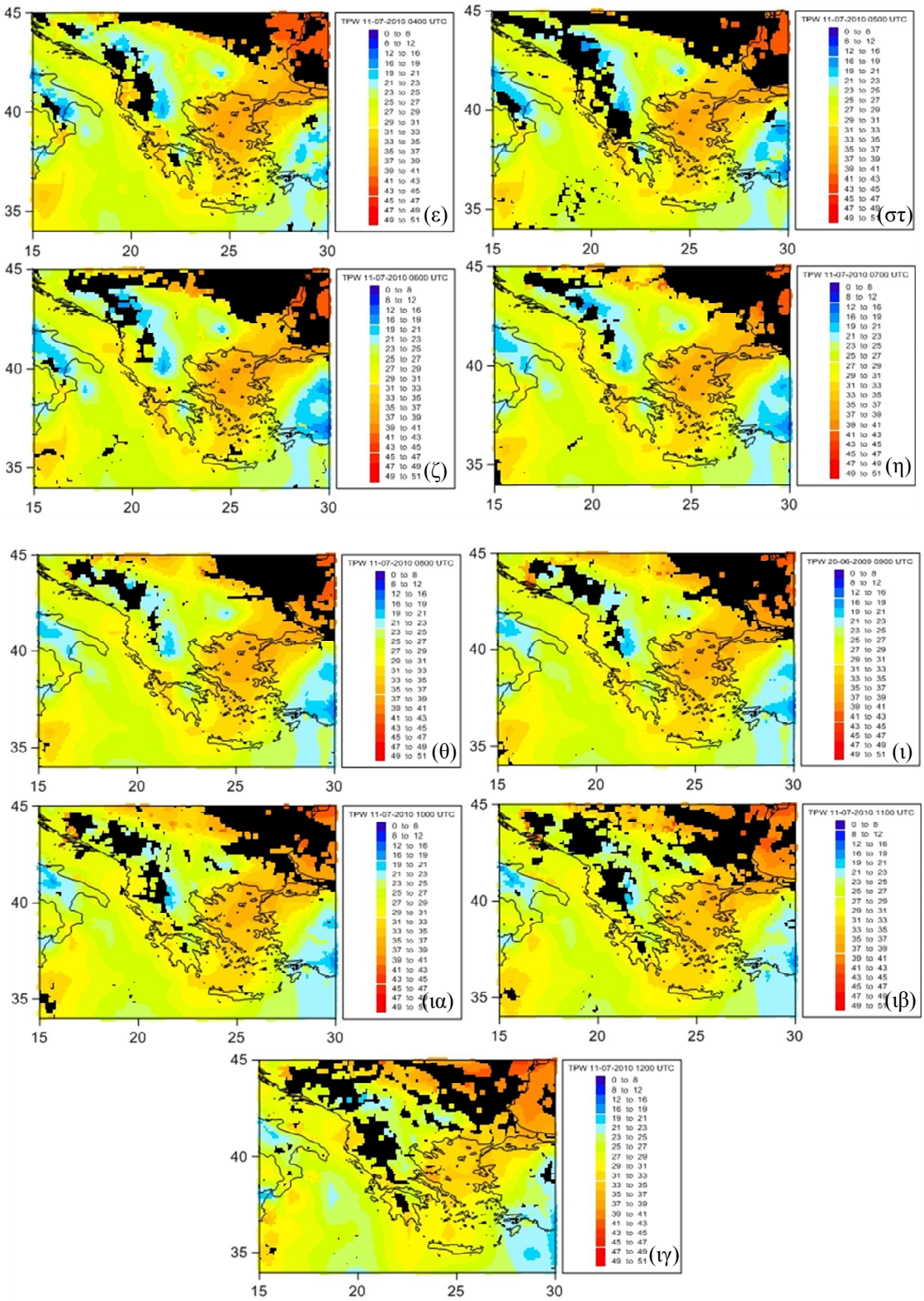
Αμφότεροι οι δείκτες αστάθειας του GII, ο Lifted-Index και ο K-Index καταγράφουν σε ικανοποιητικό βαθμό την αστάθεια στον Ελλαδικό από τις βραδινές ακόμα ώρες της προηγούμενης ημέρας.

Τέλος, παρουσιάζεται και σε αυτή τη περίπτωση η εκτίμηση του GII όσο αφορά στη στήλη υετίσιμου νερού (TPW) κατά τις αντίστοιχες ώρες με αυτές των δεικτών αστάθειας (εικόνα 4.60). Τις πρώτες βραδινές ώρες εμφανίζονται τιμές του υετίσιμου ύδατος της τάξης των 23-31 kg/m^2 εκτός από μία περιοχή στην δυτική Μακεδονία όπου παρατηρείται ξηρή λίμνη με τιμές 16-23 kg/m^2.

Τις επόμενες ώρες δεν υπάρχουν αξιόλογες μεταβολές έως τις μεσημεριανές ώρες. Διατηρείται, ωστόσο, η ξηρή λίμνη στην δυτική Μακεδονία η οποία τις μεσημεριανές ώρες μεταφέρεται ελαφρώς στα νότια. Τέλος, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, στη περιοχή του κεντρικού και βόρειου Αιγαίου παρουσιάζονται υψηλές τιμές υετίσιμου ύδατος από 31 ως 39 kg/m^2.



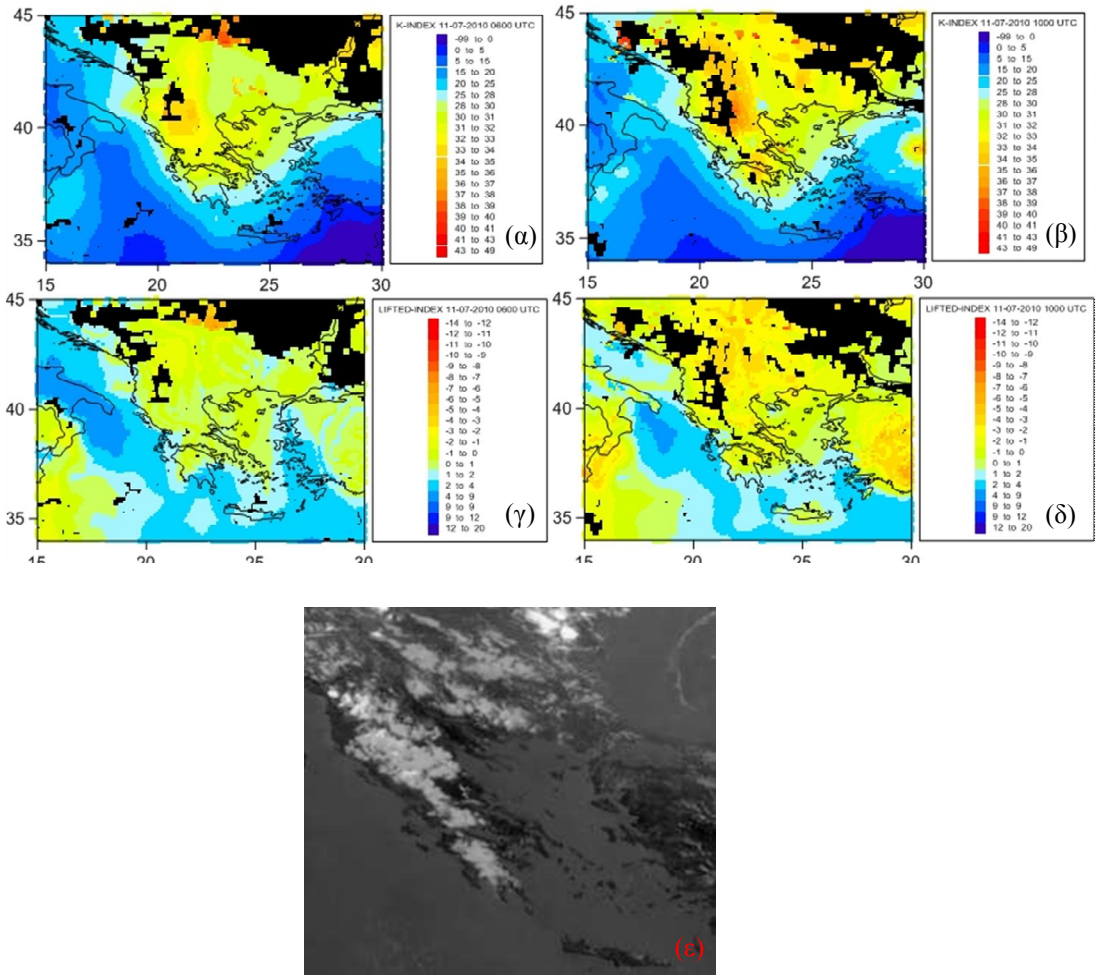
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.



Εικόνα 4.60 *Total Precipitable Water (TWP) του GII στις 11-07-2010 για α) 00:00 UTC, β) 01:00 UTC, γ) 02:00 UTC, δ) 03:00 UTC,ε) 04:00 UTC, στ) 05:00 UTC, ζ) 06:00 UTC, η) 07:00 UTC, θ) 08:00 UTC, ι) 09:00 UTC, ια) 10:00 UTC, ιβ) 11:00 UTC, ιγ) 12:00 UTC*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνονται συνοπτικά οι χάρτες του Lifted Index και του K-Index του GII σε αντιπαραβολή με την εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV).



Εικόνα 4.61 *(α) K-Index του GII στις 06:00 UTC, (β)K-Index του GII στις 10:00 UTC, (γ) Lifted-Index του GII στις 06:00 UTC, (δ) Lifted-Index του GII στις 10:00 UTC, (ε) Εικόνα ορατού HRV του MSG στις 11-07-2010 και ώρα 14:00 UTC*

Ο δείκτης KI εμφανίζει υψηλές τιμές στις 06:00 UTC σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα και το βόρειο Αιγαίο και κυρίως στην περιοχή της δυτικής Μακεδονίας και την Ήπειρο (33 έως 37) ενώ στις 10:00 UTC αποτυπώνει ακόμα ισχυρότερη αστάθεια στις παραπάνω περιοχές (35 έως 39, εικόνα 4.61 α, β). Αντίστοιχα, ο δείκτης LI υποδεικνύει υψηλότατη αστάθεια σχεδόν σε όλη την Ελλάδα (0 έως -3, εικόνα 4.61 γ) ενώ στις 10:00 UTC οι τιμές του είναι ακόμα πιο υψηλές με τις υψηλότερες να εμφανίζονται σε περιοχές τη Θεσσαλίας και του Έβρου (-3 έως -5).

Ο GII φαίνεται ότι προσεγγίζει τις περιοχές όπου μερικές ώρες μετά εμφανίζονται νέφη, κυρίως στις καταγραφές του KI όπου οι υψηλές τιμές στην Ήπειρο συμπίπτουν με τις νεφώσεις στο κανάλι του ορατού (εικόνα 4.61ε). Ο δείκτης LI δίνει υψηλές τιμές στις καταγραφές του στα σημεία όπου

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

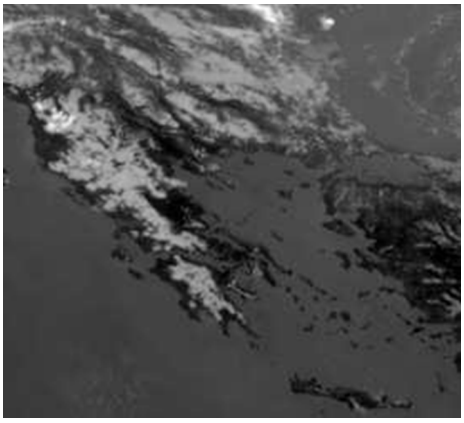
αναπτύχθηκαν νέφη, όμως δίνει υψηλές τιμές και στη Θεσσαλία η οποία παρουσιάζεται ανέφελη στο κανάλι του ορατού.

Συμπερασματικά, από τη βραδινή καταγραφή, ο GII επιτυγχάνει σε ικανοποιητικό βαθμό τον γεωγραφικό εντοπισμό των περιοχών όπου τις επόμενες ώρες αναπτύσσονται νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης, δηλαδή τη περιοχή της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας

v. Χρονική εξέλιξη των δεικτών GII

Όπως σε όλες τις περιπτώσεις έτσι και στη συγκεκριμένη, επιλέχτηκαν κάποια σημεία στον Ελλαδικό χώρο, μερικά από αυτά εντός των περιοχών εμφάνισης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και μερικά εκτός των περιοχών εμφάνισης νεφών. Η μεταβολή των δεικτών αστάθειας με το χρόνο δίνει το μέτρο μεταβολής της αστάθειας σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή και κατά την ημέρα της 11^{ης} Ιουλίου 2010.

Στην εικόνα 4.62 εμφανίζεται ο χάρτης με τα επιλεγμένα σημεία σε περιοχές εντός ή εκτός νεφώσεων καθώς και η εικόνα του ορατού υψηλής ανάλυσης του MSG όπου διακρίνονται οι περιοχές αυτές.



(α)

(β)

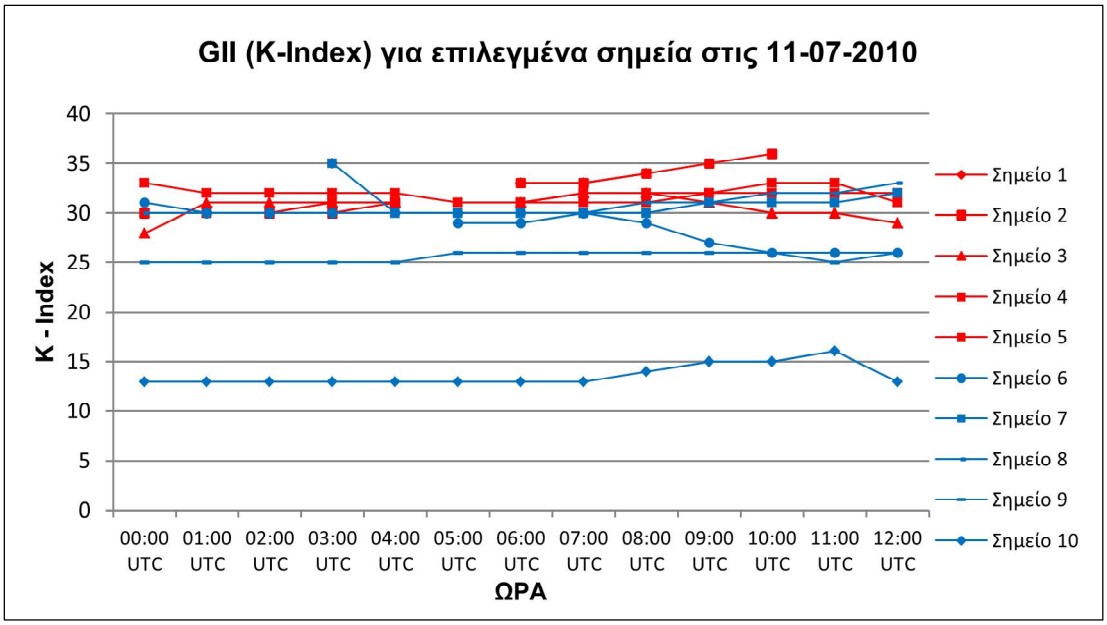
Εικόνα 4.62 *(α) Εικόνα ορατού υψηλής ανάλυσης για τις 11-07-2010 και (β) χάρτης Ελλάδας με τα επιλεγμένα σημεία για χρονική μελέτη.*

Τα σημεία 1, 2, 3, 4 και 5 βρίσκονται εντός περιοχών εμφάνισης νεφών ενώ στα σημεία 6, 7, 8, 9 και 10 δεν αναπτύσσονται νέφη (εικόνα 4.62). Στην εικόνα 4.63 και 4.64 αποτυπώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα της τιμής δεικτών του LI και του KI των επιλεγμένων σημείων συναρτήσει του χρόνου.

Από τη σύγκριση των τιμών στο διάγραμμα της εικόνας 4.63 προκύπτει αυξητική τάση του δείκτη K-Index σε όλα τα σημεία εκτός των σημείων 3, 6 και 10, κυρίως τις μεσημεριανές ώρες. Τα σημεία που εμφανίζονται νέφη (1,2,3,4 και 5) αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα και ο δείκτης KI παρουσιάζει σχεδόν σε όλες τις ώρες αυξημένες τιμές (μεγαλύτερες του 30). Τα σημεία

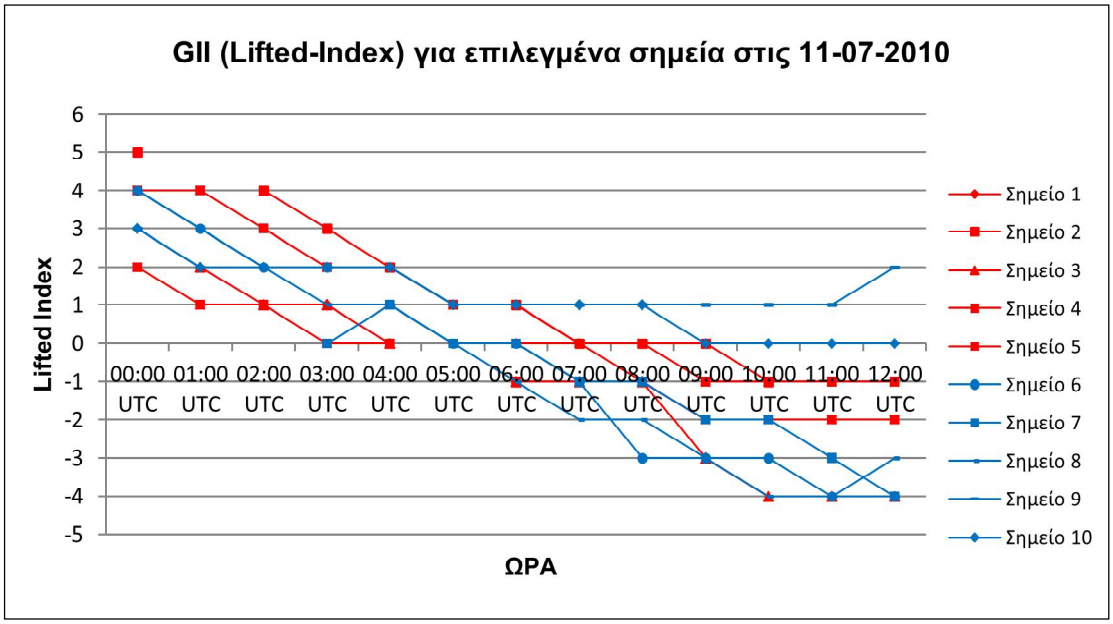
02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

εκτός νεφοκάλυψης (σημεία 6,7,8,9 και 10) αποτυπώνονται με μπλε χρώμα και ο δείκτης KI εμφανίζεται κοντά στη τιμή 30 και μόνο στο σημείο 6 (Θεσσαλονίκη) η τιμή του είναι 26 τις τελευταίες ώρες ενώ τα σημείο 9 (Πελοπόννησος) εμφανίζει τιμές κάτω του 30 και το σημείο 10 (Κρήτη) είναι κάτω από 15. Ο δείκτης δε παρουσιάζει ξεκάθαρη εικόνα σχετικά με την ανάπτυξη ή μη νεφών αλλά τα σημεία που παρουσίασαν νέφη έχουν κατά κανόνα τιμή KI πάνω από 30 τις περισσότερες ώρες.



Εικόνα 4.63 *Διάγραμμα του K-Index (GII) στις 11-07-2010 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6,7, 8, 9 και 10 συναρτήσει της ώρας*

Το ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και για τον δείκτη Lifted Index του GII στην εικόνα 4.64 για τα ίδια επιλεγμένα σημεία (κόκκινο για νεφοκάλυψη, μπλε για μη νεφοκάλυψη).

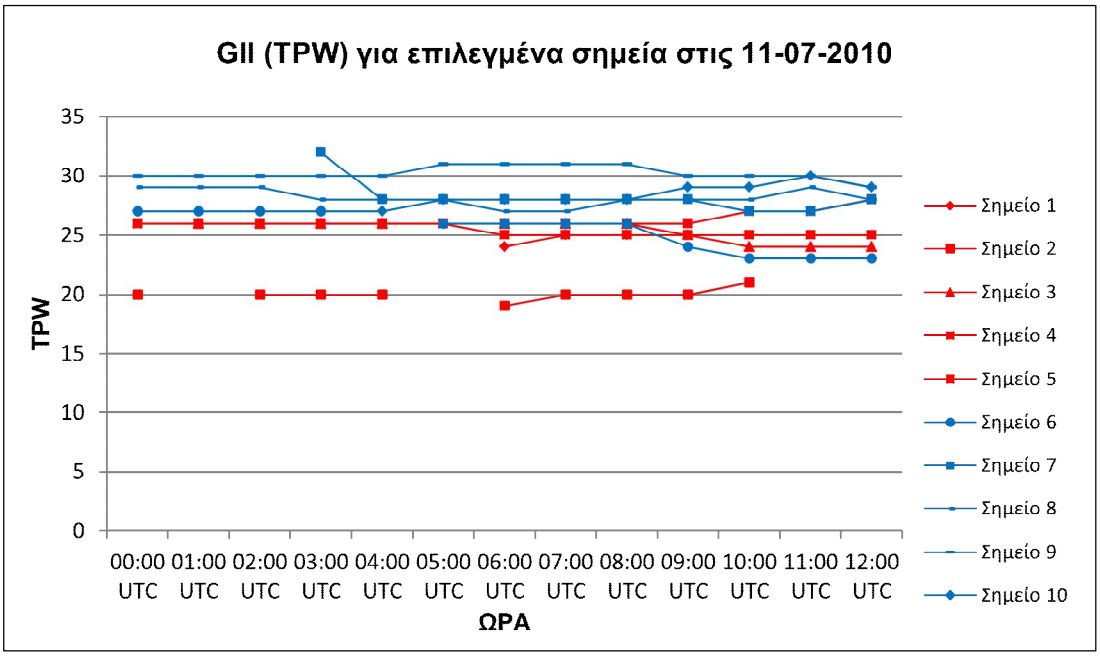


Εικόνα 4.64 *Διάγραμμα του Lifted-Index (GII) στις 11-07-2010 των σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 και 10 συναρτήσει του χρόνου*

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αντιστοίχως και ο δείκτης Lifted Index παρουσιάζει πτωτική τάση για όλα τα σημεία, δηλαδή σηματοδοτεί έντονη αστάθεια στα σημεία με αρνητικές τιμές και με ελάχιστες τιμές καθώς πλησιάζουν οι μεσημεριανές ώρες. Τα σημεία στα οποία αναπτύχθηκαν νέφη παρουσιάζουν αντίστοιχη τιμή με εκείνα στα οποία δεν εμφανίστηκαν αλλά κατά τις τελευταίες ώρες τα σημεία στα οποία δεν καλύπτονταν με νέφη παρουσίασαν μικρότερη τιμή του LI. Συνεπώς, η εικόνα του LI δε δικαιολογεί την εμφάνιση ή μη των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης.

Τέλος, στα ίδια σημεία αποτυπώνεται και το TPW (υετίσιμο ύδωρ) και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.65 συναρτήσει του χρόνου, με κόκκινο τα σημεία με νέφη και μπλε τα σημεία χωρίς νέφη.



Εικόνα 4.65 *Διάγραμμα του GII για το TPW (υετίσιμο ύδωρ) στις 11-07-2010 σημείων 1, 2, 3, 4, 5, 6,7, 8, 9 και 10 συναρτήσει του χρόνου*

Τα σημεία εμφάνισης νεφώσεων παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές μικρότερες τιμές στήλης ύδατος από τα μη νεφοκαλυπτώμενα σημεία. Επομένως, για άλλη μια φορά, από το παραπάνω διάγραμμα δε προκύπτει σαφής ένδειξη για τις τιμές ή τις μεταβολές του TPW που να οδηγεί σε ασφαλές συμπέρασμα αναφορικά με τη δημιουργία ή μη νεφών. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι οι τιμές του σημείου 8 είναι ιδιαίτερα υψηλές καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο ολοκληρωμένα δορυφορικά ατμοσφαιρικά προϊόντα, ο MODIS και ο GII με τα οποία αποτυπώνεται η ατμοσφαιρική αστάθεια μέσω γνωστών δεικτών αστάθειας και διερευνήθηκε η πιθανότητα χρησιμοποίησής τους σε επιχειρησιακή βάση. Μολονότι οι μηχανισμοί δημιουργίας νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης που δύναται να οδηγήσουν σε καταιγίδες θεωρούνται γνωστοί και είναι αποτέλεσμα της υψηλής ατμοσφαιρικής αστάθειας, εντούτοις η πρόγνωση τέτοιων φαινομένων είναι αρκετά επισφαλής. Τα δορυφορικά προϊόντα τα οποία εξάγονται μέσω αλγορίθμων από δορυφορικές μετρήσεις είναι μία εναλλακτική πηγή εκτίμησης της ατμοσφαιρικής αστάθειας αλλά και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων, ιδίως σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη επίγειων μετρήσεων. Η μεγάλη εξέλιξη της τεχνολογίας των δορυφόρων οι οποίοι υποστηρίζονται από όργανα υψηλής χωρικής ανάλυσης επιτρέπουν τη πραγματοποίηση μετρήσεων σε όλα τα σημεία του πλανήτη και ιδίως εκεί που δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν επίγειες μετρήσεις. Η συγκεκριμένη μελέτη προσπαθεί να αξιολογήσει τα προϊόντα αυτά έχοντας ως βάση τέσσερις ημέρες εμφάνισης μεγάλης αστάθειας στην Ελλάδα και να απαντήσει στο ερώτημα της πιθανής χρησιμοποίησής τους στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση εμφάνισης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων.

Εξετάστηκαν δύο διαφορετικά δορυφορικά προϊόντα που προέρχονται το ένα από δορυφορικό πρόγραμμα της NASA, τον MODIS και το άλλο από τη Eumetsat, το δείκτη παγκόσμιας αστάθειας GII (Global Instability Index). Το όργανο MODIS φέρεται από δύο δορυφόρους πολικής τροχιάς (TERRA και AQUA) με υψηλή χωρική ανάλυση μετρήσεων ενώ ο GII αποτελεί προϊόν του MSG-8, γεωστατικού δορυφόρου με μεγάλη χρονική διαθεσιμότητα μετρήσεων. Αμφότερα τα δορυφορικά προϊόντα εξετάζουν την ύπαρξη ατμοσφαιρικής αστάθειας με τον υπολογισμό γνωστών δεικτών αστάθειας. Ο MODIS παρέχει δεδομένα για τρεις δείκτες, τον Total Totals (TT), τον Lifted Index (LI) και το K-Index (KI). Ο GII παρέχει δεδομένα, εκτός άλλων δεικτών αστάθειας που δεν μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, για τους δείκτες Lifted Index και τον K-Index καθώς και την εκτίμηση για το υετίσιμο ύδωρ TPW (Total Precipitable Water).

Καταρχήν, κρίθηκε σκόπιμο να αξιολογηθούν οι τιμές των δεικτών του MODIS και του GII με τη βοήθεια των διαθέσιμων ραδιοβολήσεων στα αεροδρόμια Θεσσαλονίκης, Αθήνας και Ηρακλείου. Από τους δείκτες του MODIS, ο KI παρουσιάζει στο σύνολο των μετρήσεων το μεγαλύτερο

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

συντελεστή συσχέτισης (0.7) ενώ έπεται ο TT (0.56) και τελευταίος ο LI (0.31). Αντίστοιχα, για τους δείκτες του GII, ο KI παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (0.81) και έπεται ο LI (0.67). Τα δεδομένα του MODIS και του GII προσεγγίζουν τον KI ικανοποιητικά για τη χρονική περίοδο που αξιολογήθηκαν (Ιούνιος 2009) ενώ ο LI εμφανίζεται με χαμηλή συσχέτιση για τον MODIS αλλά με υψηλή συσχέτιση για τον GII. Τέλος ο TT που διατίθεται από τον MODIS παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των δεικτών σε σύγκριση με τους αντίστοιχους δείκτες των ραδιοβολίσεων κρίνονται ικανοποιητικά για τον TT του MODIS, για τον KI και για τα δυο δορυφορικά προϊόντα (MODIS και GII), και για τον LI του GII, ενώ για τον LI του MODIS τα αποτελέσματα της αξιολόγησης κρίνονται μέτρια. Συνεπώς, η συμβολή τους θα μπορούσε να είναι θετική κυρίως στις περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες ραδιοβολίσεις. Σε κάθε περίπτωση, περαιτέρω αξιολόγησή τους σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για τον ελλαδικό χώρο κρίνεται αναγκαία.

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης, εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις έντονης αστάθειας στον Ελλαδικό χώρο και αναλύθηκαν ποιοτικά οι χάρτες των δεικτών αστάθειας του MODIS και του GII. Οι δείκτες του MODIS είναι διαθέσιμοι δύο φορές τη μέρα, περίπου δύο ώρες μετά τα μεσάνυχτα και κατά τις 12:00 μμ, τοπική ώρα Ελλάδας. Το βραδινό πέρασμα του δορυφόρου δεν είναι σε θέση να δώσει ένα ξεκάθαρο προειδοποιητικό σήμα για την πιθανή εκδήλωση αστάθειας αφού προηγείται χρονικά αυτής αρκετές ώρες. Εντούτοις, από την ανάλυση προέκυψε ότι σε ένα βαθμό καταγράφει τη νυχτερινή αστάθεια λόγω δυναμικών αιτίων τα οποία σε συνδυασμό με τα θερμικά αίτια της επομένης είναι σε θέση να πυροδοτήσουν την ανάπτυξη κατακόρυφων νεφών την επομένη μέρα. Αντίθετα, το μεσημεριανό πέρασμα του MODIS εντοπίζει με μεγάλη ακρίβεια την ανάπτυξη νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης αφού είναι σε θέση να καταγράψει και τα θερμικά αίτια.

Ο GII εντοπίζει και αποτυπώνει την υφιστάμενη αστάθεια σε μεγάλο βαθμό και καταγράφει λεπτομερώς και την εξέλιξή της λόγω της μεγάλης χρονικής συχνότητας λήψης μετρήσεων. Αυτό επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών που ξεκινά η ανάπτυξη νεφών λίγες ώρες πριν την εμφάνισή τους και μπορεί να λειτουργήσει επικουρικά ως βοηθητικό προγνωστικό εργαλείο βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης. Η υψηλή χρονική συχνότητα μετρήσεων σε συνδυασμό με την ικανοποιητική χωρική του ανάλυση επιτρέπουν τη μελέτη της αστάθειας σε περιοχές που δεν εκτελούνται επίγειες μετρήσεις.

Σε γενικές γραμμές, οι δείκτες αστάθειας των δορυφόρων επιτυγχάνουν να αποτυπώσουν σε μεγάλο βαθμό την αστάθεια και χωρικά και χρονικά. Στη

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

περίπτωση όμως της βραδινής καταγραφής, ο MODIS αδυνατεί να καταγράψει τη θερμική αστάθεια της επόμενης ημέρας αφού απέχει αρκετές ώρες πριν την εμφάνισή της. Αντιθέτως, η μεσημεριανή καταγραφή του αποτυπώνει και την υφιστάμενη θερμική αστάθεια. Ο GII καταγράφει την αστάθεια με υψηλή χρονική συχνότητα οπότε είναι σε θέση να την αποτυπώσει έγκαιρα. Αυτό προκύπτει και από τη σύγκριση των χαρτών των δορυφορικών δεικτών με τις εικόνες του καναλιού του ορατού υψηλής ανάλυσης (HRV) και του καναλιού του θερμικού υπέρυθρου (IR 10.8 μm). Σε γενικές γραμμές, τα νέφη που εμφανίζονται στα δύο κανάλια του δορυφόρου αναπτύσσονται σε περιοχές με μεγάλες τιμές των δεικτών αστάθειας των δορυφόρων.

Οι βραδινές καταγραφές του MODIS για τον Total Totals και τον K-Index αποτυπώνουν καλύτερα την ύπαρξη αστάθειας σε αντίθεση με τον Lifted Index ο οποίος καταγράφει ύπαρξη χαμηλής αστάθειας και επιπλέον παρουσιάζει μικρή συσχέτιση με τον LI των ραδιοβολίσεων. Σε κάθε περίπτωση όμως, όπως αναφέρθηκε, δε μπορούν οι βραδινές καταγραφές να αποτελέσουν επικουρικό εργαλείο βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης. Στις πρωινές καταγραφές του MODIS έχει ήδη αναπτυχθεί έντονη αστάθεια και εμφανίζονται ήδη αρκετά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης. Μολονότι σε αυτή τη περίπτωση ο MODIS επιτυγχάνει να καταγράψει την υψηλή αστάθεια, αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο όσον αφορά στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση μόνο στις περιπτώσεις προχωρημένων απογευματινών καταιγίδων. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι οι ώρες των δύο περασμάτων του MODIS από τη χώρα μας δε βοηθούν ιδιαίτερα ως προς τη πρόγνωση των επικείμενων μετεωρολογικών φαινομένων.

Όσον αφορά στον GII, ο K-Index και ο Lifted Index αποτυπώνουν αρκετά εύστοχα τη χρονική εξέλιξη της αστάθειας παρέχοντας εικόνα κάθε 15 λεπτά της ώρας, δίνοντας ισχυρό σήμα για πιθανή εμφάνιση νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και καταιγίδων τις επόμενες ώρες. Συνεπώς, οι μετεωρολόγοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν επικουρικά την εξέλιξη της αστάθειας που παρέχει ο GII και να εντοπίσουν τις περιοχές εκείνες που είναι ύποπτες για έντονα καιρικά φαινόμενα. Συνοψίζοντας, οι δείκτες αστάθειας κυρίως του GII και λιγότερο του MODIS είναι σε θέση να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης καταιγίδων.

Μία μελλοντική μελέτη των συνθηκών αστάθειας για μεγάλο αριθμό περιπτώσεων αστάθειας με τη βοήθεια των συγκεκριμένων δορυφορικών προϊόντων μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου εντοπισμού των περιοχών οι οποίες είναι ευεπίφορες να εμφανίσουν καταιγιδοφόρο δραστηριότητα με μεγάλη ακρίβεια. Αυτός ο αλγόριθμος θα παρέχει στους

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

προγνώστες μετεωρολόγους μία επιπρόσθετη βοήθεια η οποία σε ελάχιστο χρόνο θα καταδεικνύει με μεγάλη ακρίβεια τις περιοχές που θα εμφανίσουν έντονα και ακραία φαινόμενα τις προσεχείς ώρες.

Ένα βασικό μειονέκτημα των εξεταζόμενων δορυφορικών προϊόντων της εργασίας αυτής είναι η προϋπόθεση της έλλειψης νεφών προκειμένου να είναι σε θέση να υλοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις. Ειδικά για τον MODIS που πραγματοποιεί μετρήσεις δύο φορές την ημέρα, πιθανή νεφοκάλυψη την ώρα διέλευσης πάνω από την Ελλάδα οδηγεί σε πλήρη έλλειψη δεδομένων. Το γεγονός αυτό δε είναι τόσο σημαντικό για τον GII, αφού πιθανή ύπαρξη νεφών για μερικά λεπτά ή λίγες ώρες οδηγεί μεν στο ίδιο πρόβλημα, όμως με τη διάλυση των νεφών σε κάποια χρονική στιγμή είναι σε θέση να δώσει δεδομένα κατά τη διάρκεια της ίδιας μέρας. Μόνο σε μέρες με απόλυτη νεφοκάλυψη καθόλη τη διάρκεια της νύχτας και της ημέρας αδυνατεί να παρέχει δεδομένα.

Τέλος, για τις τέσσερις περιπτώσεις καταιγίδων στον Ελλαδικό χώρο, εξετάστηκαν χρονικά οι δείκτες αστάθειας του GII τόσο σε περιοχές εμφάνισης όσο και σε περιοχές μη εμφάνισης καταιγιδοφόρων νεφών. Σε όλες τις ημέρες αστάθειας που εξετάστηκαν, οι δείκτες αστάθειας παρουσίασαν την ίδια τάση, δηλαδή αύξηση της τιμής τους συναρτήσει της ώρας για τον TT και τον KI, μείωση της αριθμητικής τιμής του LI διότι μικρές τιμές του δείκτη αυτού αντιστοιχούν σε αύξηση της αστάθειας. Όλοι οι δείκτες σηματοδότησαν αύξηση της αστάθειας με την πάροδο του χρόνου είτε επρόκειτο για περιοχές με εμφάνιση νεφών είτε όχι. Αντιθέτως, το υετίσιμο ύδωρ (TPW) παρουσίασε σχετικά σταθερές τιμές συναρτήσει του χρόνου με μία μικρή αυξητική τάση κατά τη πάροδο της ημέρας.

Επιπλέον, η χρονική ανάλυση των δεικτών αστάθειας για τις περιοχές εμφάνισης νεφών ή μη, κατέδειξε μικρή διαφορά τόσο στις απόλυτες τιμές τους όσο και στη μεταβολή τους. Οι περιοχές με νέφη εμφανίζουν στις περισσότερες περιπτώσεις ελαφρώς μεγαλύτερη αστάθεια, υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η αστάθεια είναι ισχυρότερη σε σημεία όπου δεν αναπτύχθηκαν νέφη. Η ραγδαία αύξηση των δεικτών αστάθειας συναρτήσει του χρόνου και οι μεγάλες τελικές τιμές τους δικαιολογούν την δημιουργία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και επιβεβαιώνουν τη θεωρία. Εντούτοις, δεν αποσαφηνίστηκαν πλήρως οι συνθήκες της εμφάνισης ή μη νεφών σε μία περιοχή αφού οι μικρές διαφορές στις τιμές των δεικτών αστάθειας δεν δίνουν ξεκάθαρη εικόνα. Ακόμα και η μελέτη του TPW που διατίθεται από τον GII δεν είναι σε θέση να δώσει απάντηση για την εμφάνιση ή μη νεφών σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές των δεικτών αστάθειας. Στις

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

περισσότερες περιπτώσεις, το TPW παρουσιάζει παρόμοιες τιμές σε νεφοσκεπείς ή μη περιοχές. Μελλοντική έρευνα του GII που θα εστιάζει περισσότερο σε αυτό το ζήτημα είναι πιθανό να καταδείξει τις ακριβείς συνθήκες ανάπτυξης νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής. Είναι βέβαιο ότι η δημιουργία νεφών ή και καταιγίδων δεν επηρεάζεται μόνο από την αστάθεια που αποτελεί την αναγκαία συνθήκη ή το υετίσιμο ύδωρ αλλά και από άλλους παράγοντες όπως τοπολογία, σύγκλιση και θέρμανση στη κατώτερη τροπόσφαιρα κ.λ.π.

Η εξέλιξη των μετρητικών οργάνων των δορυφόρων, η αύξηση της χωρικής ανάλυσης των μετρήσεων, η βελτίωση των αλγορίθμων υπολογισμού των δεικτών αστάθειας θα οδηγήσουν στο μέλλον σε μεγαλύτερη αξιοπιστία των βραχυπρόθεσμων προγνώσεων ακραίων καιρικών φαινομένων όπως αυτά των καταιγίδων μικρής αλλά και μέσης κλίμακας. Η συμβολή στην έγκαιρη πρόγνωση των συχνά βίαιων και ακραίων αυτών φαινομένων θα βοηθήσει όχι μόνο στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των σημαντικών τους επιπτώσεων σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας αλλά θα συμβάλει και στην ασφάλεια των πολιτών.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Χαράλαμπου Φείδα – Κωνσταντίνου Καρτάλη, 2003: Σημειώσεις του μαθήματος Δορυφορική Μετεωρολογία – Κλιματολογία, σελ. 96.

Μακρογιάννης Τ. Ι., Χ. Σ. Σαχσαμάνογλου, 1994: Στοιχεία Γενικής Μετεωρολογίας, σελ. 295.

Καρακώστας Θ., Μ. Β. Σιούτας, 1992: Σχέση υετίσιμου Ύδατος και Ύψους Βροχόπτωσης Θερινών Καταιγίδων στην Περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. 1° Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας – Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 503, 507.

Μακρογιάννης Τ. Ι., 2007: Σημειώσεις του μαθήματος Θερμοδυναμική και Στατική της Ατμόσφαιρας, σελ.136

Αγγουριδάκης Ε., 1976: Το υετίσιμο ύδωρ εις την περιοχήν των Αθηνών, Διατριβή επί Υφηγεσία, Θεσσαλονίκη, σελ.126.

EUMETSAT, 2007: The Global Instability Indices product algorithm theoretical basis document, EUMETSAT, Doc No: EUM/MET/REP/07/0164.

Μαίρη Βλάχου, Μαρία Χριστοδούλου, 2010**:** Μνημόνιο πρόγνωσης καιρού, Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων, Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών.

Borbas Eva E., Suzanne W. Seemann, Aniko Kern, Leslie Moy, Jun Li, Liam Gumley and Paul Menzel, April 6 2011: Modis Atmospheric profile retrieval Algorithm Theoretical Basis Document, Version 7.

Chrysoulalis N., M. Spiliotopoulos, C. Domenikiotis and N. Dalezios, 2003: Towards Monitoring of Regional Atmospheric Instability through MODIS/AQUA images, Proceedings of the International Symposium held at Volos, Greece, 7-9 November.

Chrysoylakis N., M. Spiliotopoulos, H. Feidas, C. Domenikiotis, N.R. Dalezios, 2004: Estimation of atmospheric static stability with the use of satellite remote sensing.

Koenig Marianne , January 2002: Atmospheric Instability Parameters Derived from MSG SEVIRI Observations, Technical Memorandum No. 9, Eumetsat.

Retha Matthee, Liesl Dyson, Matianne Konig, 2009: Verification of Global and regional instability indices across South Africa against radiosonde data

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Koenig Marianne, Monika Pajek, Piotr Struzik, 2006: Use of MSG global instability Indices (GII) for storm prediction in Poland – Validation study, Paper presented at the 2006 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, 12-16 June 2006, Finland

Marianne Koenig, Estelle de Coning, 2009: The MSG Global Instability Indices Product and its Use as a Nowcasting Tool, DOI: 10.1175/2008WAF2222141.1, American Meteorological Society, pp272-285.

Murphy, A.H., 1988: Skill scores based on the mean square error and their relationship to the correlation coefficient, Monthly Weather Review, 116, pp2417 – 242.

Jolliffe, I.T. & Stephenson, D.B., 2003: Forecast Verification – A practitioner's Guide in Atmospheric Science, Wiley, England.

Kachigan, S.K., 1991: Multivariate Statistical Analysis – A Conceptual Introduction, Second Edition, Radius Press, New York.

Φλόκα, Ε.Α. και Θ.Σ. Καρακώστας, 1988: Συμβολή στην Πρόγνωση Καταιγίδων στο Βορειοελλαδικό χώρο, Meteorologika, No. 73, 229-238.

Karacostas, T.S., O.K. Kakaliagoy and H.A. Flocas, 1991: An objective evaluation of two instability indices associated with forecasting convective storms over north-central Greece, Geofizika, 8, 51-60.

Karacostas, T.S., 1990: The development of an index as an aid in forecasting mesoscale convective storms over North-Central Greece. 21st Int. Conf. For Alpine Meteorology. Engelberg, Switzerland, 227-230.

Marianne Konig, Monika Pajek, Piotr Struzik, 2007: MSG global instability indices for storm nowcasting – Validation studies on product quality and analysis of sensibility to input model data, In: Joint 2007 Eumetsat and 15th AMS Conference, P.50

Marinaki A., M. Spiliotopoulos and H. Michalopoulou, 2006: Evaluation of Atmospheric indices in Greece, Advances in Geosciences, 7, 131-135.

Miller, R.C., 1967: Notes on Analysis and Severe Storm Forecastong Procedures of the Military Weather Warning Center. AWS Tech. Rep. 200, USAF, 170 pp. (Available from Headquarters, AWS, Scott AFB, IL 62225).

Peppler Randy A., 1988: A review of static stability indices and related thermodynamic parameters, pp 87.

02/19/2015 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Boyden, C. J., 1963: A simple instability index for use as a synoptic parameter. Meteorol. Mag., 92, 198-210.

George J. J., 1960: Weather Forecasting for Aeronautics. New York, Academic Press, 407-415.

Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. Bull. Amer. Meteor. Soc. 34. 250-252.

NASA, 2003: The MODIS-atmosphere web site, (URL: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov).

University of Wyoming, 2011: Atmospheric soundings web site, University of Wyoming, Department of Atmospheric Science, Laramie, USA, (URL:http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

Στολάκη Σταυρούλα Ν., 2004: Μελέτη των χαρακτηριστικών των χαλαζοπτώσεων στην περιοχή Ημαθίας – Πέλλας και εκτίμηση αυτών κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 99.

Ακριτίδης Δημήτρης, 2008: Συνοπτικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της δομής της ανώτερης τροπόσφαιρας κατά τη μεταφορά στρατοσφαιρικού όζοντος, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 81.

Καρακώστας Θόδωρος, 2005: Σημειώσεις μαθήματος Συνοπτική και Δυναμική Μετεωρολογία, σελ. 54

Μπαλάμη Μαρία Α., 2001: Φυσική μελέτη θερινής καταιγίδας Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 163.

Ρούπα Παρασκευή, 2009: Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών εκκενώσεων στον Ελλαδικό χώρο και σχέση αυτών με τον υετό, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 118.

Λυσίτσα Χ. Ευαγγελία, 2010: Συνοπτικά, δυναμικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της «Μετεωρολογικής βόμβας» της περιόδου 21-23 Ιανουαρίου 2004, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 147