

Χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων χαμηλής, μέσης-υψηλής και πολύ υψηλής ευκρίνειας

I. Z. Γήτας και K. N. Rishmawi

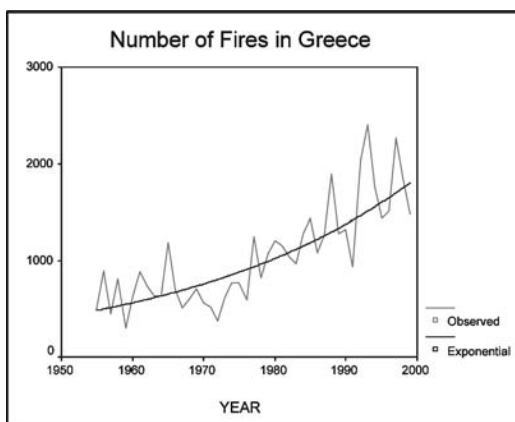
Μεσογειακό Αγρονομικό Ινστιτούτο Χανίων (M.A.I.X.)

T.Θ. 85, T.K. 73100, Χανιά, e-mail: igitas@for.auth.gr

Εισαγωγή

Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία οι φυσικές πυρκαγιές είναι αναπόσπαστο μέρος πολλών χερσαίων οικοσυστημάτων όπως τα εύκρατα δάση, οι σαβάννες και τα Μεσογειακά οικοσυστήματα μεταξύ άλλων. Όμως, από το 1960 μέχρι σήμερα, στις Ευρωπαϊκές Μεσογειακές χώρες, παρατηρείται μία εκθετική αύξηση τόσο στον αριθμό των πυρκαγιών (Σχήμα 1) όσο και στην συνολική καμένη έκταση (Moreno et al., 1988). Αυτή η αύξηση σχετίζεται με:

- Τις αλλαγές στις παραδοσιακές χρήσεις της γης που έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη συγκέντρωση καύσιμης ύλης, και
- Την παγκόσμια κλιματική αλλαγή (Gitas, 1999).



Σχήμα 1. Από το 1960 μέχρι σήμερα παρατηρείται μεγάλη αύξηση στον αριθμό των πυρκαγιών.

Όταν μία δασική έκταση καταστρέφεται από πυρκαγιά, λεπτομερείς και άμεσες πληροφορίες σχετικά με τη θέση και την έκταση της καμένης έκτασης καθώς και το βαθμό της καταστροφής είναι απαραίτητες για να εκτιμηθούν οι οικονομικές ζημιές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να καταγραφούν οι αλλαγές στην χρήση και κάλυψη της γης, να μοντελοποιηθούν οι ατμοσφαιρικές και κλιματικές επιπτώσεις από την καύση της βιομάζας (Caetano et al., 1994; Pereira et al., 1997). Επιπλέον, η ακριβής εκτίμηση βοηθά στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων που έχουν παρθεί για την ανάπλαση της καμένης περιοχής, και επιτρέπει τους δασολόγους-διαχειριστές να εντοπίσουν περιοχές που χρειάζονται έντονη ή ειδική ανάπλαση (Jakubauskas, 1988; Jakubauskas et al., 1990) με σκοπό την αποφυγή της υποβάθμισης της περιοχής.

Ακόμη και σήμερα, αρκετές από τις Δασικές Υπηρεσίες των Ευρωπαϊκών Μεσογειακών χωρών δεν χαρτογραφούν τις καμένες εκτάσεις (Chuvieco, 1997). Σε πολλές περιπτώσεις δημοσιεύεται ένας αριθμός που αντιστοιχεί στην έκταση που κάηκε αλλά η περίμετρος της πυρκαγιάς δεν χαρτογραφείται. Η έλλειψη της χαρτογραφικής απεικόνισης όμως δεν επιτρέπει την κατανόηση των χωρικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς.

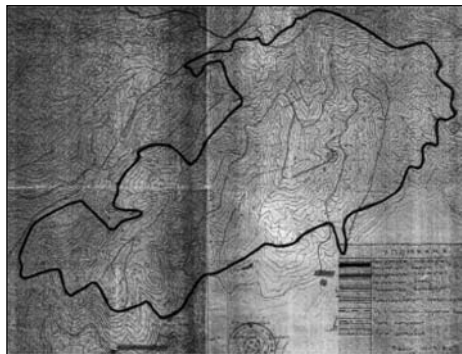
Οι μέθοδοι που ακολουθούνται από τη Δασική Υπηρεσία στην Ελλάδα για τη χαρτογράφηση των καμένων εκτάσεων και για την εκτίμηση του βαθμού καταστροφής της βλάστησης βασίζονται σε εκτενείς επισκέψεις στην καμένη περιοχή και σε οπτικές παρατηρήσεις των επιπτώσεων της πυρκαγιάς. Το σύνηθες αποτέλεσμα των επισκέψεων αυτών είναι η δημιουργία ενός πρόχειρου χάρτη της περιμέτρου της πυρκαγιάς επάνω στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής (Εικόνα 1), και η παραγωγή μίας Δήλωσης Αυτοψίας και μίας Αναφοράς της πυρκαγιάς (Gitas, 1999). Πρέπει να σημειωθεί ότι πρόσφατα άρχισε να γίνεται χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS) από την υπηρεσία στην καταγραφή των καμένων εκτάσεων.

Τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με τις υπάρχουσες μεθόδους στην Μεσογειακή Ευρώπη είναι τα ακόλουθα:

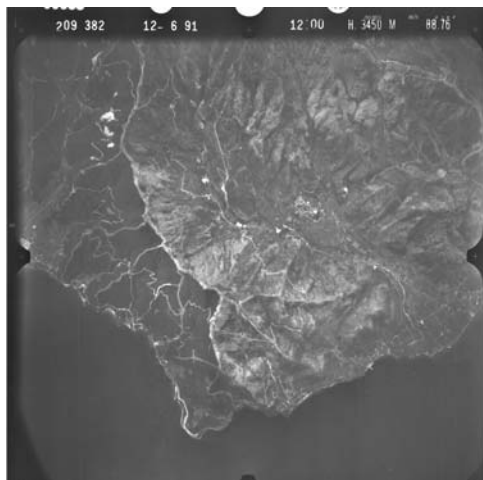
- Η παραγόμενη πληροφορία είναι συχνά μόνο ποιοτική και αφορά την περίμετρο της πυρκαγιάς ενώ πληροφορίες σχετικά με τα είδη που κάηκαν και τον βαθμό της καταστροφής δεν καταγράφονται,
- Η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη ακόμη και μήνες μετά την πυρκαγιά (Martin et al., 1994) με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει εκτίμηση της ανάκτησης της βλάστησης. Πιθανό αποτέλεσμα από την μη ανάκτηση της βλάστησης είναι η διάβρωση του εδάφους (Isaacson et al., 1982).

Οι μικρές πυρκαγιές μπορούν να χαρτογραφούνται με τις υπάρχουσες μεθόδους αλλά σε περιπτώσεις μεγάλων πυρκαγιών οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι δύσκολο να εφαρμοστούν (Gitas, 1994). Σύμφωνα με τον Chuvieco (1997) μία

εναλλακτική λύση στις υπάρχουσες μεθόδους καταγραφής των καμένων εκτάσεων αποτελεί η τηλεπισκόπηση (Εικόνα 2).



Εικόνα 1. Θεματικός χάρτης περιμέτρου πυρκαγιάς (Πηγή: Δασαρχείο Θάσου).



Εικόνα 2. Εναλλακτικές μορφές καταγραφής καμένων εκτάσεων.

Η παραπάνω άποψη βασίζεται σε αρκετές μελέτες που έχουν διεξαχθεί για να διερευνηθεί η ικανότητα των δορυφορικών εικόνων χαμηλής και μέσης-υψηλής χωρικής ανάλυσης στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων (Πίνακας 1). Επιπλέον, υπάρχει και μία σειρά από ερευνητικές εργασίες στις οποίες μελετάται η χρήση δορυφορικών εικόνων χαμηλής και μέσης-υψηλής χωρικής ανάλυσης στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων (Martin et al., 1994; Fraser et al., 2001; Sa et al., 2001).

Πίνακας 1.
Σύγκριση μεθόδων χαρτογράφησης καμένων εκτάσεων
(Πηγή: E. Chuvieco)

	GPS	Αεροφωτογραφία	Δορυφορική Τηλεπισκόπηση	
			Χαμηλή Ευκρίνεια	Μέση Ευκρίνεια
Κόστος	Υψηλό	Μέσο-Υψηλό	Χαμηλό	Μέσο
Χρόνος Διεκπεραίωσης	Μικρός	Μεγάλος	Μικρός	Μέτριος
Κάλυψη	Τοπική	Τοπική	Παγκόσμια	Περιφερειακή
Ακρίβεια	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή- Μέση	Υψηλή
Σχόλια	1. Καταγράφεται μόνον η περίμετρος της πυρκαγιάς.	1. Χρησιμοποιούνται υποκειμενικά ποιοτικά κριτήρια. 2. Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό.	1. Περιοδική συλλογή εικόνων καθώς και εύκολη και συνεχής πρόσβαση στα δεδομένα. 2. Τα δεδομένα συλλέγονται στο ορατό και το υπέρυθρο. 3. Γρήγορη και αντικειμενική ανάλυση εικόνων.	

Μέχρι σήμερα οι συγκριτικές αυτές μελέτες έχουν δείξει ότι οι εικόνες χαμηλής χωρικής ανάλυσης όπως αυτές που παράγονται από τους δορυφορικούς απεικονιστές NOAA/AVHRR και SPOT VEGETATION υπερεκτιμούν την καμένη έκταση (Eva and Lambin, 1998; Fraser et al., 2000; Fraser et al., 2001), ενώ μέσης-υψηλής ανάλυσης χωρικά δεδομένα όπως αυτά του δορυφορικού απεικονιστή LANDSAT TM παράγουν ακριβέστερες εκτιμήσεις της καμένης έκτασης. Η υπερεκτίμηση της καμένης έκτασης που σχετίζεται με την χρήση δορυφορικών εικόνων χαμηλής ανάλυσης μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι μικρές περιοχές (μικρότερες από την χωρική ανάλυση του απεικονιστή που χρησιμοποιείται) υγιούς βλάστησης μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς χαρτογραφούνται ως καμένες (Eva and Lambin, 1998).

Αν και από τις εικόνες του LANDSAT TM παράγονται ακριβέστερες αποτυπώσεις της καμένης έκτασης, εντούτοις αναφέρονται πολλά προβλήματα που σχετίζονται τόσο με την χρήση του συγκεκριμένου απεικονιστή στην χαρτογράφηση των καμένων εκτάσεων όσο και με την εκτίμηση του βαθμού σοβαρότητας του καψίματος της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα:

- Σύγχυση στη διάκριση της καμένης περιοχής από σκιαζόμενες περιοχές υγιούς βλάστησης (Tanaka et al., 1983; Milne, 1986; Chuvieco and Congalton,

1988; Parnot, 1988; Pereira, 1992; Caetano et al., 1994; Lombrana, 1995; Pereira et al., 1997; Gitas, 1999).

- Σύγκριση ανάμεσα στις ελαφρώς καμένες και τις περιοχές αραιής υγιούς βλάστησης (Chuvieco and Congalton, 1988; Gitas, 1999).
- Δυσκολίες στο διαχωρισμό της καμένης βλάστησης από άλλες κατηγορίες και ειδικότερα τις υδάτινες επιφάνειες (Tanaka et al., 1983; Ponzoni et al., 1986; Chuvieco and Congalton, 1988; Parnot, 1988; Pereira and Setzer, 1993; Lombrana, 1995; Siljeström and Moreno, 1995; Silva, 1996), αστικές περιοχές (Tanaka et al., 1983; Chuvieco and Congalton, 1988; Lombrana, 1995; Caetano et al., 1996; Silva 1996) και το γυμνό έδαφος (Parnot, 1988; Pereira and Setzer, 1993; Siljeström and Moreno, 1995).

Σύμφωνα με τους Justice et al. (1993) παρότι αρκετή έρευνα έχει γίνει σχετικά με την χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με τη χρήση δεδομένων AVHRR και LANDSAT, η ανάπτυξη καινούργιων μεθόδων που θα έχουν ως αποτέλεσμα την ακριβέστερη αποτύπωση της καμένης έκτασης από δορυφορικά δεδομένα σε τοπική αλλά και παγκόσμια κλίμακα αποτελεί μία ερευνητική προτεραιότητα.

Στις 24 Σεπτεμβρίου 1999 εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος IKONOS που είναι ο πρώτος εμπορικός δορυφόρος υψηλής ευκρίνειας. Η κατακόρυφη χωρική ανάλυση των 82 εκ. του IKONOS κάνει το προϊόν συγκρίσιμο με μία αεροφωτογραφία. Σύμφωνα με τους Tanaka and Sugimura (2001) η χρήση εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης θα αποτελέσει ένα καινούργιο κεφάλαιο για την τηλεπισκόπηση. Μία κύρια εφαρμογή των εικόνων IKONOS αναμένεται να είναι και αυτή της χρήσης τους στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων (Rishmawi and Gitas, 2001).

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διερευνήσει την δυνατότητα χρήσης εικόνων χαμηλής (AVHRR), μέσης-υψηλής (LANDSAT TM) και πολύ υψηλής (IKONOS) ευκρίνειας στην ακριβή χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων στη Θάσο.

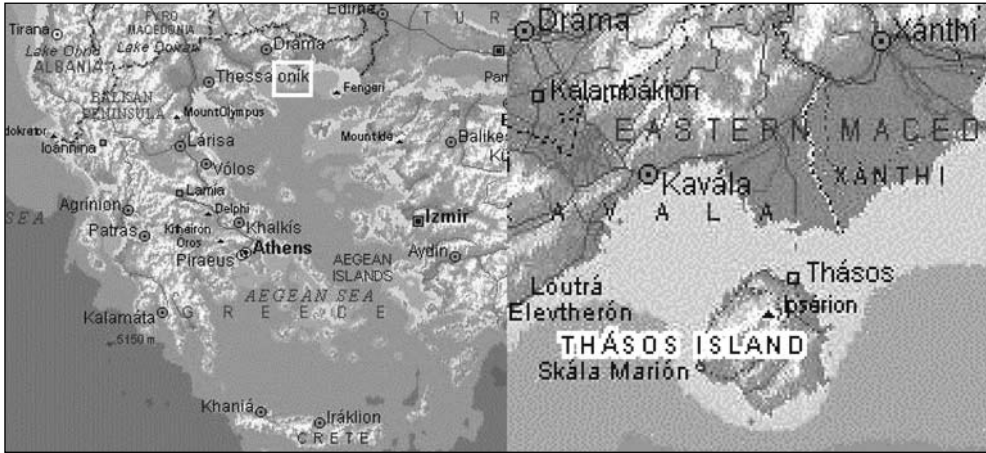
Οι επιμέρους σκοποί είναι:

- Η βελτίωση μεθόδων που ήδη χρησιμοποιούνται στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με την χρήση εικόνων AVHRR και LANDSAT TM,
- Η ανάπτυξη μεθόδου για την χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με την χρήση των εικόνων IKONOS,
- Η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της χρήσης εικόνων από τους τρεις απεικονιστές στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων.

Περιοχή μελέτης και δεδομένα

Η περιοχή μελέτης είναι η Θάσος (συντεταγμένες 24°30' με 24°48' Ανατολικά και 40°33' με 40°49' Βόρεια) (Εικόνα 3). Η συνολική έκταση του νησιού εί-

ναί περίπου 39.000 εκτάρια ενώ η περίμετρος του νησιού είναι λίγο μεγαλύτερη από 100 χιλιόμετρα. Το υψόμετρο φθάνει τα 1200 μέτρα ενώ οι κλίσεις του εδάφους φθάνουν τους 76 βαθμούς. Το κλίμα της Θάσου είναι Μεσογειακό και χαρακτηρίζεται από θερμά, ξηρά και ηλιόλουστα καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες. Οι βροχοπτώσεις λαμβάνουν χώρα κυρίως την άνοιξη και το φθινόπωρο.



Εικόνα 3. Η περιοχή μελέτης.

Η τραχεία πεύκη είναι το κυρίαρχο δασικό είδος στη Θάσο ενώ η μαύρη πεύκη αποτελεί το δεύτερο κύριο δασικό είδος. Τρεις πυρκαγιές, την δεκαετία του 80, είχαν ως αποτέλεσμα να καούν περισσότερα από 20.000 εκτάρια δάσους, δηλαδή μία έκταση μεγαλύτερη από το μισό της συνολικής έκτασης του νησιού (Εικόνα 4). Ειδικότερα όσον αφορά τα κύρια δασικά είδη κήκαν:

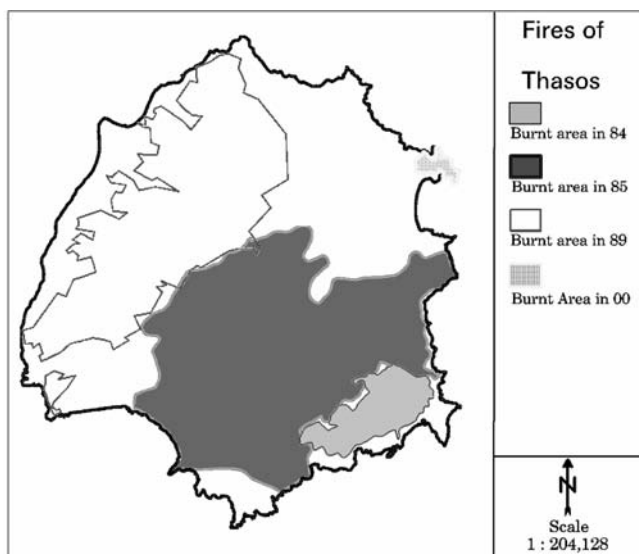
- πάνω από το 70% των συστάδων της τραχείας πεύκης,
- 60% των συστάδων της μαύρης πεύκης,
- περίπου το 80% των μεικτών συστάδων μαύρης και τραχείας πεύκης.

Επιπλέον, τον Ιούλιο του 2000, μία μεικτή δασική πυρκαγιά έκαψε 165 εκτάρια τραχείας πεύκης. Σήμερα το δάσος της τραχείας πεύκης καλύπτει μία έκταση 2000 εκταρίων κυρίως στη βόρεια και ανατολική πλευρά του νησιού.

Πολλοί είναι οι λόγοι που η Θάσος αποτελεί ιδανική περιοχή μελέτης:

- Η περιοχή καλύπτεται από χαρακτηριστική Μεσογειακή βλάστηση δηλαδή από τον τύπο βλάστησης που πλήττεται κυρίως από τις πυρκαγιές στην Ελλάδα.
- Υπήρχαν χαρτογραφικές αποτυπώσεις των πυρκαγιών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση της ακρίβειας των χαρτογραφήσεων από δορυφορικές εικόνες.

- Το έντονο ανάγλυφο που έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σκιαζόμενων περιοχών, οι οποίες συνήθως συγχέονται με τις καμένες εκτάσεις επάνω σε δορυφορικές εικόνες.



Εικόνα 4. Οι περιόμετροι τεσσάρων πυρκαγιών στη Θάσο.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν:

- Δύο εικόνες NOAA/AVHRR. Πιο συγκεκριμένα μία εικόνα πριν (11 Αυγούστου 1989) και μία εικόνα μετά (20 Αυγούστου 1989) την πυρκαγιά.
- Μία εικόνα LANDSAT TM μετά την πυρκαγιά (19 Σεπτεμβρίου 1989).
- Μία εικόνα IKONOS μετά την πυρκαγιά (17 Ιουλίου 2000).
- Οι περιόμετροι των πυρκαγιών όπως αποτυπώθηκαν από τη Δασική Υπηρεσία.
- Ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ανάλυσης 10 μέτρων) που δημιουργήθηκε από τοπογραφικούς χάρτες 1:5000.
- Στοιχεία που συλλέχθηκαν μέσα στην έκταση που κάηκε το 2000 με τη χρήση θεσιολάβου (δέκτη GPS), και
- Τοπογραφικοί και θεματικοί χάρτες.

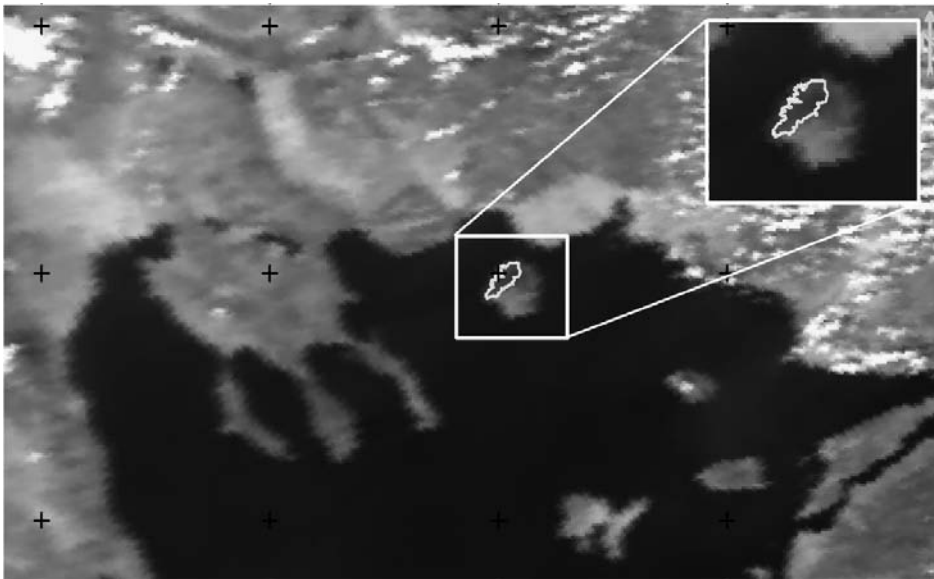
Χαρτογράφηση με δορυφορικά δεδομένα AVHRR

Ο απεικονιστής AVHRR που βρίσκεται στο μετεωρολογικό δορυφόρο NOAA έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Καθημερινή κάλυψη.

- Χωρική ανάλυση 1,1 χιλιόμετρα, και
- Δύο ειδών λήψεις: κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Δύο εικόνες, η πρώτη μία εβδομάδα πριν και η άλλη μία εβδομάδα μετά την πυρκαγιά του 1989 (Εικόνα 5) χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα AVHRR διανέμονται ελεύθερα στο διαδίκτυο. Πριν από την ανάλυση έγινε η προεπεξεργασία τους. Η προεπεξεργασία των εικόνων που περιελάμβανε την ατμοσφαιρική και ραδιομετρική τους διόρθωση είχε ως αποτέλεσμα την κανονικοποίηση των δύο εικόνων ώστε να γίνουν συγκρίσιμες μεταξύ τους. Δηλαδή με την προεπεξεργασία αυτή η παραλλακτικότητα των τιμών λαμπρότητας που οφείλονταν σε εξωτερικούς παράγοντες ελαχιστοποιήθηκε, ώστε το ίδιο αντικείμενο να έχει την ίδια εμφάνιση στις δύο εικόνες (που είχαν ληφθεί σε διαφορετικές ημερομηνίες και στην περίπτωση που δεν είχε καεί ή είχε υποστεί κάποια άλλη αλλαγή). Στην εργασία αυτή έγινε η σχετική διόρθωση των εικόνων AVHRR με εικόνα αναφοράς την εικόνα μετά την πυρκαγιά και με τη βοήθεια της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης.



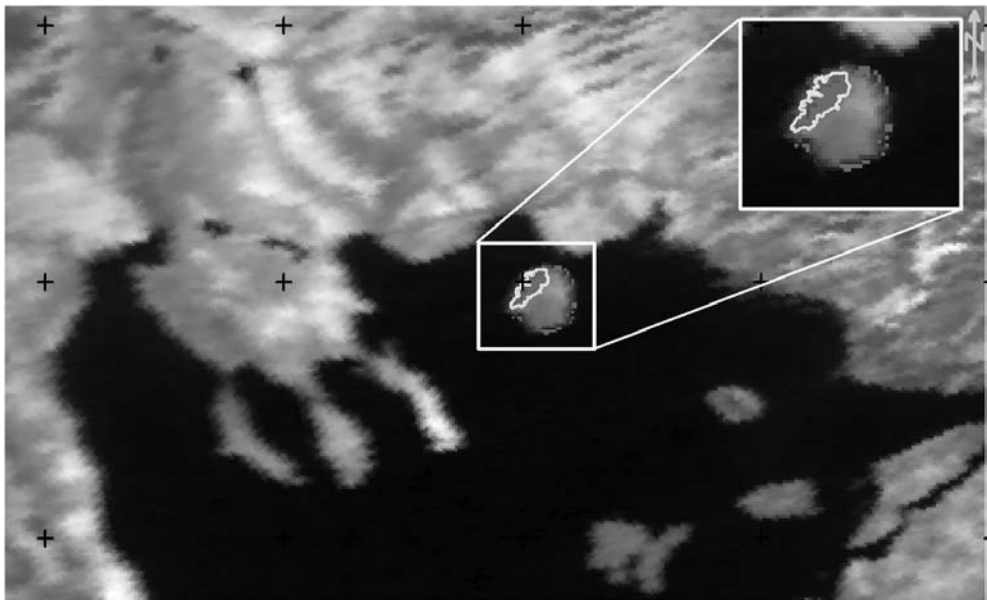
Εικόνα 5. Δεδομένα AVHRR. Η εικόνα μετά την πυρκαγιά.

Επιπλέον, η προεπεξεργασία των εικόνων περιελάμβανε τη γεωμετρική τους διόρθωση. Με τη γεωμετρική διόρθωση οι δορυφορικές εικόνες αποκτούν γεωμετρία χάρτη με αποτέλεσμα τα αντικείμενα να απεικονίζονται με το πραγμα-

τικό γεωμετρικό τους σχήμα. Επίσης, μετά τη γεωμετρική διόρθωση, οι εικόνες και οι ψηφιακοί χάρτες μπορούν να χρησιμοποιούνται μαζί στη γεωγραφική ανάλυση εφόσον βρίσκονται στο ίδιο σύστημα αναφοράς.

Μετά την προεπεξεργασία των εικόνων AVHRR υπολογίστηκε ο NDVI (Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης) για κάθε μία από τις δύο εικόνες. Στη συνέχεια ο NDVI της εικόνας μετά από την πυρκαγιά αφαιρέθηκε από τον NDVI της εικόνας πριν από την πυρκαγιά. Η εικόνα που προέκυψε από την αφαίρεση χρησιμοποιήθηκε για τη χαρτογράφηση της πυρκαγιάς διότι οι αλλαγές στις τιμές του NDVI σχετίζονται με την καταστροφή της βλάστησης.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας έγινε σύγκριση με την περίμετρο της πυρκαγιάς όπως αυτή αποτυπώθηκε από την Δασική Υπηρεσία (Εικόνα 6). Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 88%. Η κυριότερη σύγχυση που παρατηρήθηκε ήταν αυτή της καμένης έκτασης με τα αβαθή ύδατα κοντά στην ακτογραμμή. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη χαμηλή ευκρίνεια του απεικονιστή, η οποία και επηρέασε την ακρίβεια της σχετικής γεωμετρικής διόρθωσης των δύο εικόνων. Επίσης περιοχές μη-καμένης (υγιούς) βλάστησης μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς χαρτογραφήθηκαν ως καμένες.

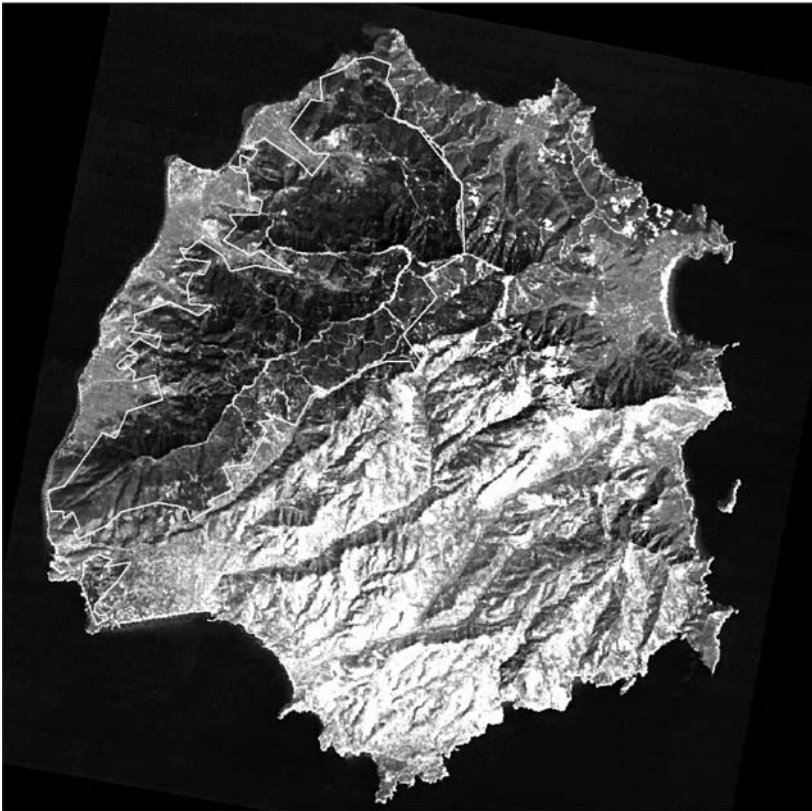


Εικόνα 6. Δεδομένα AVHRR. Προσοχή στην σύγχυση με τα αβαθή ύδατα. Με κίτρινο χρώμα η περίμετρος της πυρκαγιάς όπως αποτυπώθηκε από την Δασική Υπηρεσία.

Χαρτογράφηση με δορυφορικά δεδομένα LANDSAT TM

Ο απεικονιστής TM (Εικόνα 7) που βρίσκεται στον δορυφόρο LANDSAT έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

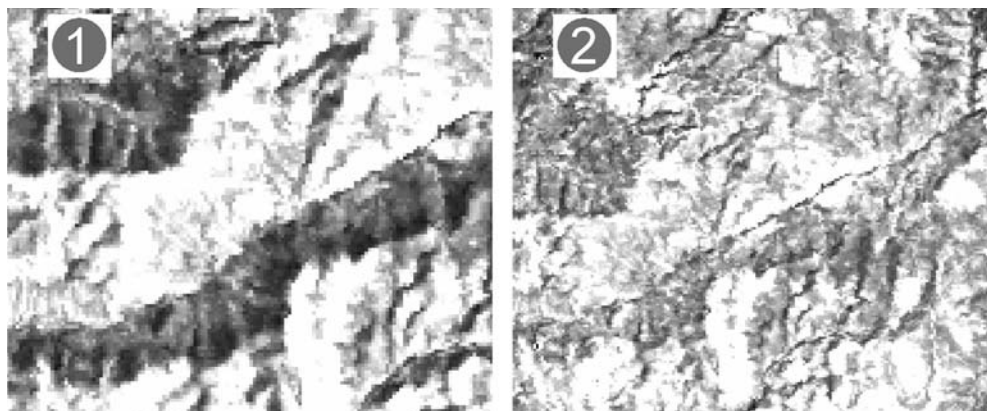
- κάλυψη κάθε 18 μέρες,
- χωρική ανάλυση 30 μέτρα.



Εικόνα 7. Δεδομένα LANDSAT TM. Η ανάλυση βασίστηκε σε μία εικόνα που αποκτήθηκε μετά την πυρκαγιά. Με κίτρινο χρώμα η περίμετρος της πυρκαγιάς όπως αποτυπώθηκε από τη Δασική Υπηρεσία.

Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, η ακρίβεια της χαρτογράφησης καμένων εκτάσεων με την χρήση δορυφορικών εικόνων LANDSAT TM επηρεάζεται αρνητικά από την σύγχυση ανάμεσα σε περιοχές που σκιάζονται εξαιτίας του ανάγλυφου και τις καμένες εκτάσεις. Έτσι

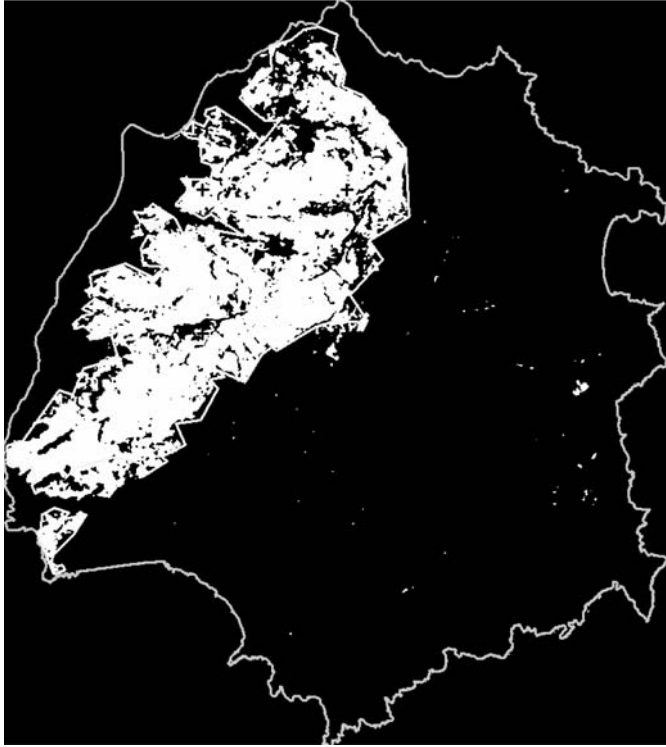
η προεπεξεργασία περιελάμβανε όχι μόνον την ατμοσφαιρική και γεωμετρική αλλά και την τοπογραφική διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων LANDSAT TM με την χρήση του μοντέλου του Minnaert (1941, 1961). Με την τοπογραφική διόρθωση (Εικόνα 8) αφαιρούνται από την εικόνα οι σκιές λόγω του ανάγλυφου με αποτέλεσμα ένα αντικείμενο να έχει την ίδια εμφάνιση ανεξάρτητα από το αν βρίσκεται στην ανατολική ή δυτική πλαγιά ενός βουνού.



Εικόνα 8. Με την τοπογραφική διόρθωση αφαιρούνται από την εικόνα οι σκιές λόγω του ανάγλυφου. Η εικόνα TM πριν (1) και μετά (2) την τοπογραφική διόρθωση.

Η ανάλυση βασίστηκε σε μία εικόνα που αποκτήθηκε αμέσως μετά την πυρκαγιά στην οποία εφαρμόστηκε η τεχνική του δυαδικού εφοδιαστικού μοντέλου παλινδρόμησης (Koutsias and Karteris, 1998). Το δυαδικό εφοδιαστικό μοντέλο παλινδρόμησης συσχετίζει μία δυαδική εξαρτημένη μεταβλητή (σε αυτή την περίπτωση καμένο – μη καμένο) με μία ομάδα ανεξάρτητων μεταβλητών (σε αυτή την περίπτωση την τοπογραφικά διορθωμένη εικόνα LANDSAT TM με τους επτά διαύλους της).

Το μοντέλο παράγει δυαδικό αποτέλεσμα δηλαδή καμένη έκταση και μη καμένη έκταση (Εικόνα 9). Πιο συγκεκριμένα όλα τα εικονοστοιχεία (pixels) με τιμή μικρότερη από 0.5 χαρακτηρίστηκαν ως καμένα και τα εικονοστοιχεία με τιμή μεγαλύτερη από 0.5 χαρακτηρίστηκαν ως μη-καμένα. Στην κατηγορία μη-καμένα συμπεριλαμβάνονται το νερό, οι αστικές περιοχές, η βλάστηση, οι γυμνές επιφάνειες και οι σκιαζόμενες εκτάσεις. Όπως και στην περίπτωση των εικόνων AVHRR η εκτίμηση της ακρίβειας βασίστηκε στην σύγκριση με την περίμετρο της πυρκαγιάς όπως αυτή χαρτογραφήθηκε από την Δασική Υπηρεσία.



Εικόνα 9. Χαρτογράφηση της καμένης έκτασης με την χρήση του δυαδικού εφοδιαστικού μοντέλου παλινδρόμησης. Με κίτρινο χρώμα η περίμετρος της πυρκαγιάς όπως αποτυπώθηκε από την Δασική Υπηρεσία.

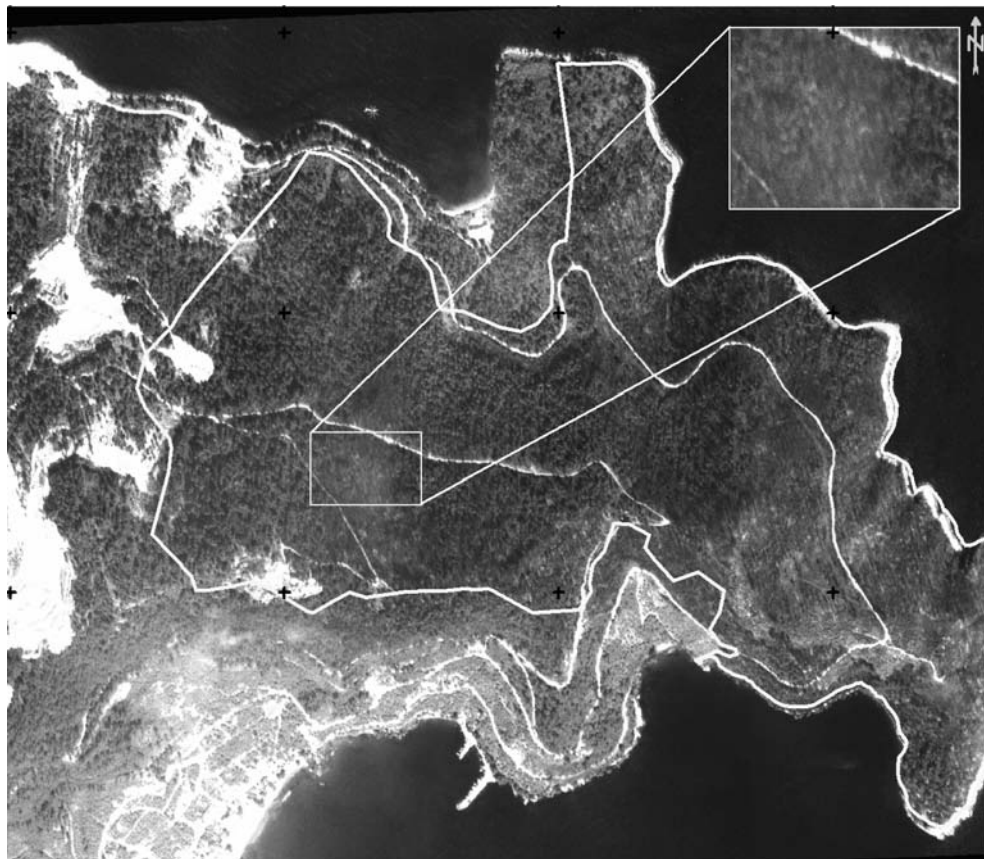
Το αποτέλεσμα της μεθόδου αποδείχθηκε πολύ ακριβές όταν συγκρίθηκε με την περίμετρο της πυρκαγιάς σύμφωνα με την Δασική Υπηρεσία. Πιο συγκεκριμένα η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 97.4%. Ελάχιστη σύγχυση δημιουργήθηκε ανάμεσα στην καμένη έκταση και σε περιοχές χαμηλής πυκνότητας βλάστησης καθώς και ανάμεσα στην καμένη έκταση και στις αστικές περιοχές. Η τοπογραφική διόρθωση είχε ως αποτέλεσμα τον ακριβή διαχωρισμό των καμένων εκτάσεων από τις σκιαζόμενες εκτάσεις.

Χαρτογράφηση με δορυφορικά δεδομένα IKONOS

Ο απεικονιστής IKONOS έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- δυνατότητα κάλυψης κάθε 3 μέρες,

- χωρική ανάλυση 1 μέτρο (Εικόνα 10), δύο εικόνες καλύπτουν το 80% της Θάσου.



Εικόνα 10. Δεδομένα IKONOS. Η καμένη έκταση όπως φαίνεται σε μία εικόνα υψηλής ευκρίνειας. Με κίτρινο χρώμα η περίμετρος της πυρκαγιάς όπως αποτυπώθηκε από τη Δασική Υπηρεσία.

Η προεπεξεργασία περιελάμβανε την ατμοσφαιρική και γεωμετρική διόρθωση της δορυφορικής εικόνας. Για την ατμοσφαιρική διόρθωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Richter (1977) που χρησιμοποιεί το μοντέλο MORTAN.

Η καμένη έκταση, το νερό και οι σκιαζόμενες περιοχές είναι τρεις κατηγορίες με παρόμοιο φασματικό προφίλ στην εικόνα IKONOS λόγω του περιορισμένου αριθμού διαύλων (3 στο ορατό και ένας στο εγγύς υπέρυθρο) καθώς και της έλλειψης διαύλου στο μέσο-υπέρυθρο που έχει ο απεικονιστής. Επιπλέον,

εξαιτίας της υψηλής ευκρίνειας των εικόνων IKONOS, παρατηρήθηκε δυσκολία στο διαχωρισμό της πυρκαγιάς επιφανείας από τις σκιαζόμενες εκτάσεις που καλύπτονται από βλάστηση υπορόφου.

Για το διαχωρισμό των καμένων εκτάσεων από τις άλλες κατηγορίες κάλυψης γης αναπτύχθηκε μια πολύπλοκη μεθοδολογία πολλών βημάτων που περιελάμβανε:

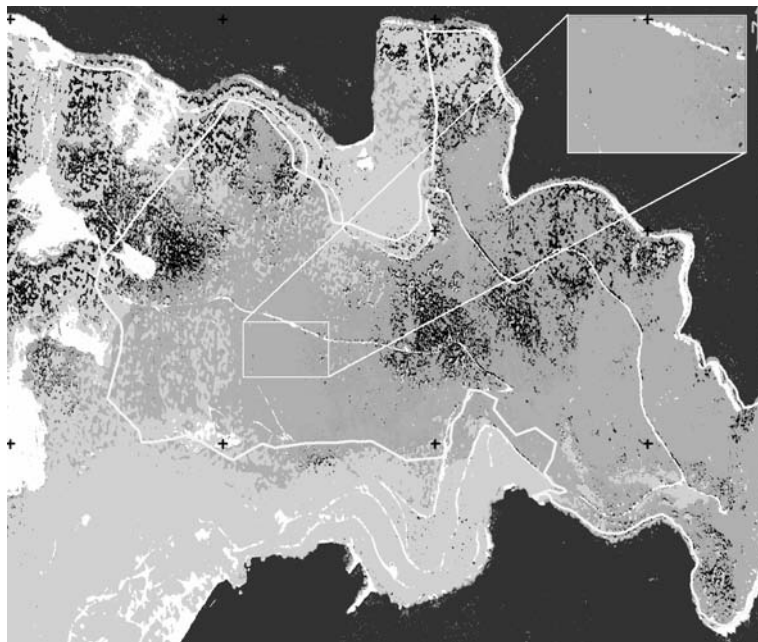
- τη σύγκριση των φασματικών υπογραφών της καμένης έκτασης (πυρκαγιά κομουτέγης και πυρκαγιά επιφανείας) με τις άλλες κατηγορίες κάλυψης γης,
- την παραγωγή χρωματικών μοντέλων έντασης, απόχρωσης, κορεσμού (IHS),
- την παραγωγή του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI) για τον διαχωρισμό της καμένης έκτασης από το νερό,
- την επιλογή των διαύλων και παραγώνων που φαίνεται να διαχωρίζουν καλύτερα την καμένη έκταση από τις άλλες κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν ο διάυλος στο ερυθρό, ο διάυλος στο υπέρυθρο, καθώς και η απόχρωση και ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης,
- την επιλογή δειγματοληπτικών περιοχών αντιπροσωπευτικών για την κάθε κατηγορία και την αντιστοίχιση κάθε κατηγορίας σε έναν ακέραιο αριθμό,
- τη χρήση της κανονικής ανάλυσης διάκρισης (Canonical Discriminant Analysis) που περιελάμβανε την παραγωγή γραμμικών εξισώσεων διάκρισης που με τη σειρά τους χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή σκληρής διάκρισης. Η CDA μεγιστοποιεί την απόκλιση ανάμεσα στις κατηγορίες και ελαχιστοποιεί την απόκλιση στην ίδια την κατηγορία,
- την χρήση επιβλεπόμενης ταξινόμησης (με την χρήση της μεθόδου της ελάχιστης απόστασης) με την χρήση των σκληρής διάκρισης.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας έγινε σύγκριση με την περίμετρο της πυρκαγιάς όπως αυτή χαρτογραφήθηκε από την Δασική Υπηρεσία. Επιπλέον, το 2000 πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στην περιοχή μελέτης κατά την οποία με την βοήθεια του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS) εντοπίστηκαν και φωτογραφήθηκαν σημεία με διαφορετικό βαθμό προσβολής από την πυρκαγιά. Τα σημεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί η ικανότητα του απεικονιστή στον διαχωρισμό διαφορετικών επιπέδων προσβολής.

Από την διαδικασία εκτίμησης ακρίβειας με την χρήση του πίνακα σφαλμάτων (Congalton, 1991) φαίνεται ότι η μέθοδος είχε ως αποτέλεσμα τον ακριβή διαχωρισμό των καμένων εκτάσεων από τις άλλες κατηγορίες κάλυψης γης. Πιο συγκεκριμένα η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 92,5% και οφείλεται κυρίως στην χρήση της μεθόδου CDA.

Επιπλέον, η μέθοδος είχε ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό δύο τύπων πυρκαγιάς, της επικόρουφης και της επιφανειακής (Εικόνα 11). Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση που παρατηρήθηκε ανάμεσα στην πυρκαγιά επιφανείας

και τις σκιαζόμενες εκτάσεις που καλύπτονται από βλάστηση υπορόφου δεν εξαλείφθηκε πλήρως λόγω του ότι μερικές από τις εκτάσεις της κατηγορίας πυρκαγιά επιφανείας είναι και αυτές σκιαζόμενες.



Εικόνα 11. Δεδομένα IKONOS. Χαρτογράφηση της καμένης έκτασης με τη χρήση της κανονικής ανάλυσης διάκρισης.

Συμπεράσματα

Η ακριβής και λεπτομερής χαρτογράφηση της καμένης έκτασης, του βαθμού καταστροφής της βλάστησης, καθώς και η χαρτογράφηση της υγιούς βλάστησης μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς αποτελούν σημαντικές πληροφορίες που βοηθούν στην καλύτερη διαχείριση της περιοχής που κάηκε. Οι παραπάνω πληροφορίες χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων για να εκτιμηθούν οι οικονομικές ζημιές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να καταγραφούν οι αλλαγές στην χρήση και κάλυψη της γης, και να μοντελοποιηθούν οι ατμοσφαιρικές και κλιματικές επιπτώσεις από την καύση της βιομάζας.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες χαμηλής (AVHRR), μέσης-υψηλής (LANDSAT TM) και πολύ υψηλής (IKONOS) ευκρίνειας στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων στη Θάσο.

Στα πλαίσια της εργασίας βελτιώθηκαν υπάρχουσες τεχνικές ανάλυσης εικόνων AVHRR και TM με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των καμένων εκτάσεων από τις άλλες κατηγορίες κάλυψης γης με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν καινούργιες τεχνικές ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων IKONOS που είχαν επίσης σαν αποτέλεσμα τον ακριβή διαχωρισμό των καμένων εκτάσεων από τις άλλες κατηγορίες κάλυψης γης.

Η χρήση του κάθε τύπου εικόνας έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα:

- αν και ο απεικονιστής AVHRR δεν δίνει την δυνατότητα εντοπισμού των περιοχών υγιούς βλάστησης μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς είναι ο μοναδικός απεικονιστής με καθημερινή κάλυψη,
- δεδομένα του απεικονιστή AVHRR διανέμονται ελεύθερα στο διαδίκτυο,
- η χρήση των εικόνων LANDSAT TM έχει ως αποτέλεσμα τον ακριβή εντοπισμό αλλά και την παροχή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με την καμένη έκταση,
- πολύ μεγάλος χρόνος κάλυψης ολόκληρου του πλανήτη,
- η χρήση των εικόνων IKONOS έχει επίσης ως αποτέλεσμα τον ακριβή εντοπισμό αλλά και την παροχή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με την καμένη έκταση,
- ένα επιπλέον πλεονέκτημα των εικόνων πολύ υψηλής ευκρίνειας (IKONOS) είναι και η ικανότητα διαχωρισμού μεταξύ επικόρουφης και πυρκαγιάς επιφανείας,
- με την χρήση εικόνων πολύ υψηλής ευκρίνειας εισάγονται καινούργιοι τύποι θορύβου στην εικόνα. Για παράδειγμα, οι σκιές των μεμονωμένων υψηλών δέντρων εισάγουν θόρυβο στις εικόνες IKONOS που μπορεί να αποτελέσει πηγή σύγχυσης με την καμένη έκταση.

Βιβλιογραφία

- Caetano O., Mertes L. and Pereira J. (1994): «Using spectral mixture analysis for fire severity mapping». In: D.X. Viegas (ed). *Proceedings of the 2nd International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. 667-677.
- Chuvieco E. (1997): Foreword, in: E. Chuvieco (ed). *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 3-5.
- Chuvieco E. (1989): «Multitemporal analysis of Thematic Mapper images. Applications to forest fire mapping and inventory in a Mediterranean environment». In: *Proceedings of the Earthnet pilot Project on LANDSAT Thematic Mapper Applications*, Frascati, pp. 279-285.

- Chuvicco E. and Congalton R. (1998): «Mapping and inventory of forest fire from digital processing of TM data», *Geocarto International*, 4:41-53.
- Chuvicco E. (1999): «*Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean Basin*», Springer-Verlag, New York.
- Congalton R. (1991): «A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data», *Remote sensing of Environment*, 52:229-241.
- Eva H. and Lambin E. (1998): «Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach», *Remote sensing of Environment*, 16:975-982.
- Fraser R., Li Z. and Cihlar J. (2000): «Hotspot and NDVI differencing Synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forests», *Remote sensing of Environment*, 74:362-376.
- Fraser R., Hall R. and Landry R. (2001): «Burned area mapping across Canada's boreal forest zone using SPOT VEGETATION calibrated with LANDSAT TM imagery». In: E. Chuvicco and P. Martin (eds). *Proceedings of the 3rd International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management*, New Methods and Sensors, Paris, pp. 133-137.
- Gitas I.Z. (1994): «*Geographical Information Systems and Remote Sensing in forest management*», Department of Geography, University of Cambridge, M. Phil. Thesis, p. 96.
- Gitas I.Z. (1999): «*Geographical Information Systems and Remote Sensing in mapping and monitoring fire-altered forest landscapes*», Department of Geography, University of Cambridge, Ph.D. Dissertation, p. 23.
- Isaacson D., Smith H. and Alexander C. (1982): «Erosion hazard reduction in a wildfire damaged area», In: C. Johannsen and J. Sanders (eds). *Remote Sensing for Resource Management Soil Conservation Society of America*, Ankeny, pp. 179-190.
- Jakubauskas M. (1988): «Postfire vegetation change detection using LANDSAT MSS and TM data», In: *School of Graduate Studies*, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, pp. 99.
- Jakubauskas M., Lulla K. and Mausel P. (1990): «Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56:371-377.
- Justice C., Malingreau J.-P. and Setzer A. (1993): «Satellite remote sensing of fires: potential and limitation», In: P. Crutzen and J.G. Goldammer. *Fire in the environment: The ecological atmospheric and climatic importance of vegetation fires*, John Wiley and Sons, New York, pp. 77-88.
- Koutsias N., Karteris M. and Chuvicco E. (1998): «The use of intensity-hue-saturation transformation of LANDSAT-5 Thematic Mapper data for burned land mapping», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 19:3499-3514.
- Koutsias N. and Karteris M. (1996): «*Logistic regression modelling of Thematic Mapper data for burned area mapping*», In: Unpublished Manuscript, Aristotelian University of Thessaloniki, Dept. of Forestry and Natural Environment, Lab. of Forest Management and remote Sensing.
- Koutsias N. and Karteris M. (1998): «Logistic regression modelling of multitemporal The-

- matic Mapper data for burned area mapping», *International Journal of Remote Sensing*, 19:3499-3514.
- Koutsias N. and Karteris M. (2000): «Burned area mapping using logistic regression modelling of a single post-fire LANDSAT 5 Thematic Mapper image», *International Journal of Remote Sensing*, 21:673-687.
- Lombrana M. (1995): «Monitoring of burned forest areas with remote sensing data. A study in North-East Spain using LANDSAT TM and SPOT XS data. Technical note I.95.80», In: Institute for Remote Sensing Applications, Joint research Center, Ispra.
- Lopez G. and Casselles V. (1991): «Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data», *Geocarto International*, 6:31-37.
- Martin M., Viedma O. and Chuvieco E. (1994): «High versus low resolution satellite images to estimate burned areas in large forest fires». In: D.X. Viegas (ed). *Proceedings of the 2nd International Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. 653-663.
- Milne A. (1986): «The use of remote sensing in mapping and monitoring vegetational change associated with bushfire events in eastern Australia», *Geocarto International*, 1:25-35.
- Minnaert M. (1941): «The reciprocity principle in Lunar photometry», *Astrophysical Journal*, 93:403-410.
- Minnaert M. (1961): In: G.P. Kuiper and B.M. Middlehurst (eds). *Planets and Satellites* (Solar System Series. University of Chicago, Chicago.
- Moreno J.M. and Oechel W.C. (1994): «The Role of fire in Mediterranean-type ecosystems». In: *Ecological studies*; v. 107, Springer-Verlag, New York, pp. xiii, 201.
- Moreno J.M. and Oechel W.C. (1995): «Global change and Mediterranean-type ecosystems». In: *Ecological studies*; v. 117, Springer-Verlag, New York, pp. vii, 527.
- Moreno J.M. (1998): «*Large Fires*», Backhuys Publishers, Leiden.
- Navarro R., Salas F., Navarro C., Fernandez P. and Gonzalez M. (1997): «Evaluacion de danos producidos por incendio y regeneracion posterior de la vegetacion. Aplicacion de imagenes LANDSAT TM a su caracterizacion y seguimiento», *Internal Report*, Consejeria de Medio Ambiente, Junta de Andalucia, Sevilla.
- Parnot J. (1988): «Inventaire des feux de brouse au Burkina Faso saison seche 1986-1987». In: *Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, ERIM, Ann Arbor, Michigan, Abidjan, Cote d' Ivoire.
- Pereira J.M. (1992): «Burned area mapping with conventional and selective principal component analysis», *Finisterra*, 27:61-76.
- Pereira J. and Setzer A. (1993a): «Spectral Characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images», *International Journal of Remote Sensing*, 14:583-597.
- Pereira J., Chuvieco E., Beaudion A. and Desbois N. (1997): «Remote sensing of burned areas», In: E. Chuvieco (ed). *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 127-183.
- Ponzoni F., Lee D. and Filho P. (1986): «Assessment of area burned and vegetation recovery at Brazilia National Park, using LANDSAT TM data». In: *Proceedings of the IV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Sao Jose Dos Campos, pp. 615-621.

- Richter R. (1997): «ATCOR2 for ERDAS IMAGINE- Atmospheric correction and haze removal». In: *Users Manual*, Version 1.6, Geosystems GmbH, Germany.
- Rishmawi K.N. and Gitas I.Z. (2001): «Burned area mapping on the Mediterranean island of Thasos using low, medium-high and very high spatial resolution satellite data». The Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPS2001 conference): *Geomatics Earth Observation and the Information Society*, London, UK, 12-14 September 2001.
- Sa A., Silva J., Pereira J. and Vasconcelos M. (2001): «Burned area detection in the Miombo of Northern Mozambique using MODIS and LANDSAT Data». In: E. Chuvieco and P. Martin (eds). *Proceedings of the 3rd International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management, New Methods and Sensors*, Paris, pp. 156-159.
- Siljeström P. and Moreno A. (1995): «Monitoring Burned area by principal component analysis of multitemporal TM data», *International Journal of Remote Sensing*, 16:1577-1587.
- Silva J. (1996): «Comparing the vegetation indices NDVI and VI7 for burned area mapping with LANDSAT 5 TM imagery». *Instituto Superior de Agronomia, Universidad Tecnica de Lisboa*, Lisbon.
- Tanaka S., Kimura H. and Suga Y. (1983): «Preparation of 1:25000 LANDSAT map for assessment of burned areas in Etajima Island», *International Journal of Remote Sensing*, 4:17-31.
- Tanaka S. and Sugimura T. (2001): «A new frontier of remote sensing from IKONOS images», *International Journal of Remote Sensing*, 22:1-5.
- Viedma O., Melia J., Segarra D. and Carcia-Haro J. (1997): «Modelling the rate of ecosystem recovery after fires by using LANDSAT TM data», *Remote sensing of Environment*, 61: 383-398.