

Παράκτια Χαρτογράφηση με την χρήση μη Εναέριων Επανδρωμένων Μέσων

**Ποντίκας Ηλίας, Πέκαλης Δημήτριος, Γεωργούλα Όλγα,
Πατιάς Πέτρος, Καϊμάρης Δημήτριος**

*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή,
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών*

Περίληψη: Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν και συνδυάστηκαν δεδομένα, η συλλογή των οποίων πραγματοποιήθηκε τόσο από εναέρια όσο και από δορυφορική πλατφόρμα. Σκοπός ήταν η χαρτογράφηση παράκτιας ζώνης, ώστε να αποτελέσει κατάλληλο υπόβαθρο για την εκπόνηση μελετών τόσο από τοπογράφους μηχανικούς αλλά και από άλλους συγγενείς κλάδους. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του δορυφόρου WorldView-2 για την βυθομέτρηση και τον προσδιορισμό του αναγλύφου του πυθμένα, καθώς και αεροφωτογραφίες που αποκτήθηκαν από μη επανδρωμένο ελαφρύ σκάφος (UAV) για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου και ορθομωσαϊκού για την τρισδιάστατη απεικόνιση και χαρτογράφηση της παράκτιας ζώνης. Ο συνδυασμός της ορθοεικόνας του WorldView-2 και του ορθομωσαϊκού μέσω της διαδικασίας της σύνθεσης εικόνων, οδήγησε σε μια εικόνα μεγάλης χωρικής ανάλυσης με φασματική πληροφορία, κατάλληλης για περαιτέρω επεξεργασία και εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: Παράκτια Χαρτογράφηση, UAV, Πολυφασματική Βαθυμετρία.

Εισαγωγή

Η ανάγκη της συνεχούς παρακολούθησης των παράκτιων περιοχών και της χαρτογράφησης τους, είναι απαραίτητη για λόγους ασφάλειας, τόσο στην ναυσιπλοΐα, όσο και λόγω των μεταβολών των ακτών από διαβρώσεις, κατολισθήσεις, την επίδραση των κυμάτων, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας κ.ά. Η χρήση των νέων τεχνολογιών όπως αυτή των UAVs, της διάθεσης εικόνων νέων δορυφόρων, της ανάπτυξης νέων αλγορίθμων καθώς και της ραγδαίας αύξησης της επεξεργαστικής ισχύς των υπολογιστών, παρέχουν την δυνατότητα της εύκολης, γρήγορης και με χαμηλό κόστος χαρτογράφησης ή ενημέρωσης των ήδη υπαρχόντων υποβάθρων.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα του WorldView-2, καθώς και φωτογραμμετρικά παράγωγα από αεροφωτογραφίες που αποκτήθηκαν από σύστημα UAV. Τα δεδομένα αυτά συνδυάστηκαν μέσω της διαδικασίας σύνθεσης εικόνων, για την δημιουργία μιας νέας ορθοεικόνας υψηλής χωρικής ανάλυσης με φασματική πληροφορία. Η πολυφασματική δορυφορική εικόνα χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα.

Περιοχή μελέτης

Η περιοχή η οποία επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία εντοπίζεται στην Ν. Ποτίδαια Χαλκιδικής, στην διώρυγα Β.Δ. του οικισμού. Συνολικά χαρτογραφήθηκε μια περιοχή έκτασης 1.5 km² (Εικ. 1).



Εικόνα 1. Περιοχή Μελέτης

Φωτογραμμετρική Παραγωγή

Πραγματοποιήθηκε αεροφωτογράφιση με ένα ελαφρύ πτητικό μέσο, το eBee της εταιρείας Sensefly, καλύπτοντας την στεριά με 337 αεροφωτογραφίες χωρικής ανάλυσης 0.31m. Η ανάλυση αυτή ενδείκνυται για την ικανοποίηση απαιτήσεων χαρτογραφικής κλίμακας 1:200, καθώς η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια αυτής της κλίμακας είναι 0.05m και 0.10m αντίστοιχα. Η πτήση πραγματοποιήθηκε σε ύψος 104m, με επικάλυψη 60% κατά πλάτος και 75% κατά μήκος, κάνοντας λήψη αεροφωτογραφιών σε δυο κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις στην ίδια πτήση. Για την επίλυση της δέσμης μετρήθηκαν 50 φωτοσταθερά σημεία, από τα οποία τα 14 χρησιμοποιήθηκαν σαν φωτοσταθερά σημεία (control points), τα 8 σαν σημεία ελέγχου (check points) ενώ τα υπόλοιπα δεν συμμετείχαν στην φωτογραμμετρική επεξεργασία με σκοπό την ανεξάρτητη αξιολόγηση των φωτογραμμετρικών προϊόντων (Εικ. 2). Τα φωτοσταθερά μετρήθηκαν με ακρίβεια 0.01 - 0.02m με την μέθοδο RTK μέσω UHF και μόνιμο σταθμό αναφοράς εγκατεστημένο στην παραλία, ο οποίος κατέγραφε ταυτόχρονα στατικές παρατηρήσεις για την επίλυση και συνόρθωση του μέσω του μόνιμου δικτύου αναφοράς HEPOS και του σταθμού AUT1. Από το έντυπο αναφοράς του λογισμικού Pix4d, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν 0.01m. Από την αξιολόγηση των φωτογραμμετρικών προϊόντων με ανεξάρτητα σημεία ελέγχου και σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της Κτηματολόγιο Α.Ε., το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δεν ξεπέρασε το 0.02 m

οριζοντιογραφικά και το 0.05m υψομετρικά, ενώ σύμφωνα με FGDC National Standard for Spatial Data Accuracy για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% η οριζοντιογραφική ακρίβεια ήταν 0.04m και 0.10m αντίστοιχα.



Εικόνα 2. Παραχθέν Ορθομωσαϊκό με μέγεθος pixel 0.031m



Εικόνα 3. Ορθοανοιγμένη δορυφορική εικόνα WorldView-2.

Γεωμετρική διόρθωση δορυφορικής εικόνας

Για την γεωμετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων του WorldView-2 μετρήθηκαν με την μέθοδο RTK μέσω του μόνιμου σταθμού αναφοράς Herpos 115 σημεία με ακρίβεια 0.01 – 0.02m, καταναμημένα ομοιόμορφα σε όλη την έκτασή της. Η γεωμετρική διόρθωση της πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας ανάλυσης 2.0m, πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Erdas Imagine, κάνοντας χρήση 11 σταθερών σημείων και 6 σημείων ελέγχου. Από το έντυπο αναφοράς το RMS ήταν 0.2pixel (0.4m). Η ορθοαναγωγή της δορυφορικής εικόνας (Εικ. 3) πραγματοποιήθηκε με DTM κανάβου 5.0m, ανάλυση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κλίμακας του τελικού προϊόντος (Πατιάς, 2010).

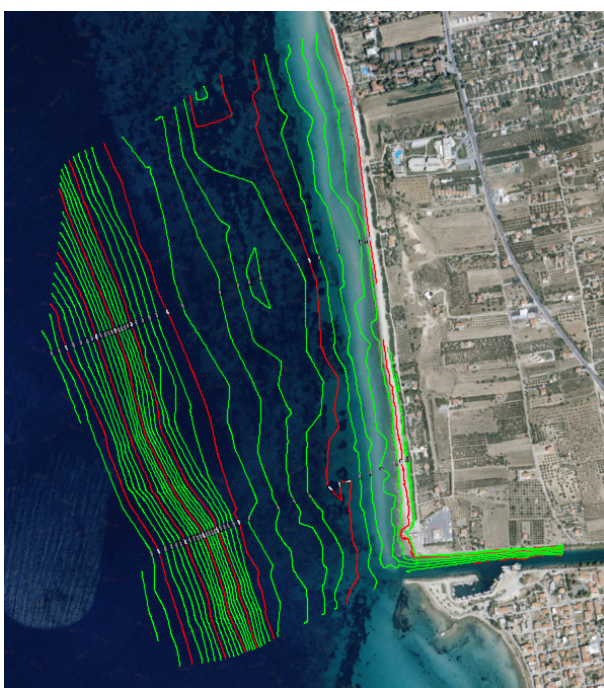
Σύνθεση εικόνων

Μέσω του λογισμικού Erdas Imagine πραγματοποιήθηκε η σύνθεση του ορθομωσαϊκού και της πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας με σκοπό την παραγωγή τελικής ορθοεικόνας (Εικ. 4) χωρικής ανάλυσης 0.25 m, ραδιομετρικής ανάλυσης 8 bit με 6 διαύλους (RGB, Red Edge, NIR 1 και NIR2). Η σύνθεση πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο Hyperspherical Color Space Resolution Merge (HCS), δια-

τηρώντας την χωρική ανάλυση του ορθομοσαϊκού και την φασματική πληροφορία της πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας. Από τον έλεγχο διατήρησης της αρχικής φασματικής πληροφορίας προέκυψε τιμή συσχέτισης 95%.



Εικόνα 4. Σύνθετη εικόνα.



Εικόνα 5. Ισοβαθείς με ισοδιάσταση 1.0m

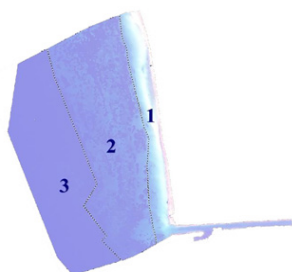
Βαθυμετρία με εξοπλισμό Sonar

Ο προσδιορισμός της μορφολογίας του πυθμένα (Εικ. 5) πραγματοποιήθηκε με το ηχοβολιστικό μονής δέσμης SonarMite v4 BTX, το οποίο συνδέθηκε με GNSS δέκτη, προσαρμοσμένο σε στυλεό με σταθερή απόσταση της κεραίας από το sonar. Για την βυθομέτρηση πραγματοποιήθηκε η μέθοδος RTK, όπου σε πραγματικό χρόνο ο Rover δέκτης, λάμβανε διόρθωση μέσω UHF από μόνιμο σταθμό αναφοράς που εγκαταστάθηκε στην παραλία.

Πολυφασματική Βαθυμετρία

Για την πολυφασματική βαθυμετρία εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι, το πολυφασματικό βυθομετρικό μοντέλο Lyzenga, ο αλγόριθμος Stumpf -Holderied - Sinclair και η μέθοδος της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Οι βαθμονομήσεις των μοντέλων έγιναν με τη χρήση σημείων εκπαίδευσης σύμφωνα με την ηχοβόλιση και η αξιολόγηση τους έγινε με πρόβλεψη βαθών σε σημεία με γνωστό βάθος, τα οποία ήταν διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση του κάθε μοντέλου. Για την εφαρμογή των μοντέλων η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις υπό-περιοχές (Πιν. 1) με ομοιογενή σύσταση βυθού.

Πίνακας 1. Πίνακας σημείων εκπαίδευσης και αξιολόγησης



	Σημεία	
	Εκπαίδευσης	Αξιολόγησης
Περιοχή 1	96	87
Περιοχή 2	101	108
Περιοχή 3	72	67

Πολυφασματικό βυθομετρικό μοντέλο Lyzenga

Το γραμμικό μοντέλο της σχέσης (1) δεν εφαρμόστηκε στη συνολική έκταση μελέτης παρά μόνο στις τρεις υπό περιοχές (Πιν. 2), μιας και οι εφαρμογές που έχουν γίνει στο παρελθόν όπως της Doxani et al (2012) και Μαυρίδου (2013) έχουν αποδείξει ότι το μοντέλο δίνει αποτέλεσμα μόνο σε περιοχές με ομοιογενή βυθό. Οι διάυλοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 1, 2, 3, 4 και 5. Οι διάυλοι 6, NIR1 και NIR2 αποκλείστηκαν διότι η φασματική πληροφορία τους θεωρείται γενικά πως είναι ασήμαντη για εφαρμογές βαθυμετρίας (Doxani, 2012).

$$z = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i X_i \quad (1)$$

Όπου:

N το πλήθος των διαθέσιμων διαύλων,

i ο κάθε διάυλος,

$X_i = \ln(L_{f(i)} - L_{w(i)})$,

$L_{f(i)}$ η παρατηρούμενη ακτινοβολία σε κάθε διάυλο i ,

$L_{w(i)}$ η ακτινοβολία πάνω από βαθιά νερά σε κάθε διάυλο i ,

α_0 σταθερός συντελεστής που είναι συνάρτηση των συντελεστών εξασθένησης για κάθε διάυλο (Ζήδρου, και συν., 2000),

α_i συντελεστής που είναι συνάρτηση τόσο των συντελεστών εξασθένησης όσο και της ακτινοβολίας του βυθού (Ζήδρου, και συν., 2000).

Πίνακας 2. Συνοπτικός πίνακας των παλινδρομήσεων για την μέθοδο Lyzenga

A/A	Σημεία	R	R ²	D-w	Διάυλοι
Περιοχή 1					
1	96	0.924	0.854	0.795	1-4-5
2	93	0.950	0.902	1.035	1-3-4-5
3	89	0.959	0.919	1.061	1-3-4
4	84	0.965	0.931	1.363	1-3-4
5	82	0.967	0.936	1.402	1-3-4
6	80	0.969	0.940	1.483	1-3-4
7	78	0.971	0.943	1.522	1-3-4
Περιοχή 2					
1	109	0.731	0.534	1.077	2-3-5
2	101	0.782	0.611	1.264	1-2-3-4-5
3	91	0.857	0.734	1.331	1-2-3-4-5
4	88	0.870	0.757	1.393	1-2-3-4-5
Περιοχή 3					
1	72	0.817	0.668	1.177	1-2-3
2	68	0.848	0.719	1.389	1-2-3
3	65	0.865	0.749	1.543	1-2-3
4	63	0.874	0.763	1.555	1-2-3
5	62	0.879	0.773	1.630	1-2-3

Αλγόριθμος Stumpf -Holderied – Sinclair

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ENVI 4.7. Ο αλγόριθμος έχει δοκιμαστεί σε διάφορα πολυφασματικά δορυφορικά συστήματα (Landsat-7 ETM, Ikonos-2, QuickBird-2 κλπ.). Η ομοιότητα των τεσσάρων διαύλων του Ikonos-2 όπου βασίστηκε η ανάπτυξη του αλγορίθμου, με τους τέσσερεις από τους οκτώ διαύλους του WorldView-2 επιτρέπει την εφαρμογή του για την εκτίμηση βαθών (Kaimaris, 2012).

Η αρχή αυτή βασίζεται στη σχέση (2):

$$Z = g^{-1}[\ln(A_b - R_\infty) - \ln(R_w - R_\infty)] \quad (2)$$

Όπου:

Z = βάθος,

g = συνάρτηση των συντελεστών εξασθένησης της διάχυσης τόσο για την κατερχόμενη όσο και για την ανερχόμενη,

A_b η ανακλώμενη ακτινοβολία του πυθμένα,

R_∞ η ανάκλαση του νερού, εάν το νερό ήταν οπτικά βαθύ,

R_w = η παρατηρούμενη ανάκλαση.

Δοκιμάστηκαν οι συνδυασμοί των διαύλων Blue – Green – Red με τους δύο διαύλους στο υπέρυθρο φάσμα (Near-IR1, Near-IR2) για να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, με τη χρήση των κύριων συνιστωσών. Επιπλέον δοκιμάστηκε και η αντικατάσταση του μπλε διαύλου με το παράκτιο μπλε για να μελετηθούν τυχόν καλύτερα αποτελέσματα. Οι συνδυασμοί που εφαρμόστηκαν ήταν οι εξής:

(α) 2 (Blue) – 3Green) – 5 (Red) – 7 (Near-IR1)

(β) 2 (Blue) – 3 (Green) – 5 (Red) – 8 (Near-IR2)

(γ) 1 (Coastal) – 3 (Green) – 5 (Red) – 7 (Near-IR1)

(δ) 1 (Coastal) – 3 (Green) – 5 (Red) – 8 (Near-IR2)

Ο αλγόριθμος υπολογίζει σχετικά βάθη και με τη χρήση σημείων με γνωστά βάθη, και στη συνέχεια πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός τους σε απόλυτα.

Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τέσσερις πρώτοι διαύλοι της πολυφασματικής δορυφορικής εικόνας (Coastal, Blue, Green, Yellow), διότι στους υπόλοιπους τέσσερις (Red, Red Edge, Near-IR1, Near-IR2) παρατηρήθηκε μεγάλη απορρόφηση από το νερό που οδηγούσε σε μεγάλα σφάλματα ταξινόμησης. Αφού έγινε η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση στο λογισμικό Erdas Imagine, η ταξινομημένη εικόνα μαζί με τα σημεία του μοντέλου επεξεργάστηκαν στο λογισμικό ArcMap και έγινε αντιστοίχιση της τάξης σε κάθε σημείο του μοντέλου με τη βοήθεια ενός διαγράμματος box-and-whisker στο λογισμικό Matlab.

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η σύνθετη εικόνα που προέκυψε ενδείκνυται για την εφαρμογή αλγεβρικών πράξεων, δεικτών ή ταξινομήσεων για τον εντοπισμό βλάστησης, νερού, κ.ά. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εφαρμόστηκε ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI για τον εντοπισμό της, ο κανονικοποιημένος δείκτης νερού NDWI για τον εντοπισμό υδάτων και η επιβλεπόμενη ταξινόμηση με την επιλογή κατάλληλων δειγμάτων σε όλη την εικόνα. Τα παραπάνω αποτελέσματα μαζί με άλλα δεδομένα που συλλέχθηκαν από υπηρεσίες, οργανώθηκαν σε μια ενιαία γεωγραφική

βάση δεδομένων, με σκοπό τον καθορισμό σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Κτηματολόγιο Α.Ε. και την ισχύουσα νομοθεσία των οριογραμμών αιγιαλού, παραλίας, παλαιού αιγιαλού και της ακτογραμμής.

Από την πολυφασματική βαθυμετρία παρατηρώντας τον πίνακα 3, διαπιστώνεται πως για την περιοχή 1, η μέθοδος με τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν ο αλγόριθμος Stumpf- Holderied- Sinclair με χρήση των διαύλων 1 (Coastal) – 3 (Green) – 5 (Red) – 8 (Near-IR2). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό πως η μέθοδος Lyzenga και η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση έδωσαν ίδιας ακρίβειας αποτελέσματα, όπως και οι απόλυτες διαφορές και τα στατιστικά στοιχεία κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα.

Η περιοχή 2 αποτελείται από φύκια και μόνο η μέθοδος Lyzenga κατάφερε να δώσει καλά αποτελέσματα, καθώς στον αλγόριθμο Stumpf-Holderied- Sinclair η συσχέτιση ήταν μηδενική (0.003) και στην μέθοδο της μη επιβλεπόμενη ταξινόμησης οι τάξεις που δημιουργήθηκαν παρουσίαζαν μεγάλη διασπορά.

Στην αμμώδη περιοχή 3 αποτελούμενη από άμμο, καμία μέθοδος δεν μπόρεσε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς στην μέθοδο Lyzenga το 68.7% των σημείων αξιολόγησης είχαν απόλυτη διαφορά του προβλεπόμενου με το μετρημένο βάθος μεγαλύτερη των 2m. Αντίστοιχα, όπως στην περιοχή 2 στον αλγόριθμο Stumpf-Holderied- Sinclair η συσχέτιση ήταν μηδενική (0.003) και στην μέθοδο της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης οι τάξεις που δημιουργήθηκαν παρουσίαζαν μεγάλη διασπορά.

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Μέθοδος	Διάυλοι	Απόλυτες Διαφορές (m)					Mean (m)	Median (m)	Std. Dev. (m)
		0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2<			
Περιοχή 1									
Lyzenga	1-3-4	65.1%	30.2%	2.4%	0%	2.3%	0.44	0.37	0.36
Stumpf-Holderied-Sinclair	2-3-5-7	76.7%	12.8%	5.8%	2.4%	2.3%	0.44	0.26	0.50
	2-3-5-8	59.3%	19.8%	12.8%	8.1%	0%	0.59	0.42	0.50
	1-3-5-7	77.9%	14%	3.4%	4.7%	0%	0.39	0.22	0.45
	1-3-5-8	76.7%	17.5%	4.6%	1.2%	0%	0.38	0.28	0.34
Unsupervised classification	1-2-3-4	62.4%	34.1%	2.3%	0%	1.2%	0.44	0.37	0.35
Περιοχή 2									
Lyzenga	1-2-3-4-5	37%	31.5%	13.9%	7.4%	10.2%	0.91	0.73	0.8
Stumpf-Holderied-Sinclair	2-3-5-7	21.3%	16.7%	16.6%	10.2%	35.2%	1.64	1.31	1.32
Περιοχή 3									
Lyzenga	1-2-3	3%	8.9%	7.5%	11.9%	68.7%	4.08	3.44	2.83

Τα υψηλής ανάλυσης φωτογραμμετρικά και χαρτογραφικά προϊόντα που προκύπτουν από την παραπάνω μέθοδο, δύναται να αντικαταστήσουν την ανάγκη για επίγειες μετρήσεις ή αυτοψίες. Ο συνδυασμός τους με τον προσδιορισμό της μορφολογίας του βυθού μπορεί να εξυπηρετήσει και άλλες εφαρμογές όπως είναι η χαρτογράφηση και παρακολούθηση παράκτιων περιοχών με έντονο πρόβλημα διαβρώσεων και κατολισθήσεων. Μέσω της επαναλαμβανόμενης χρήση τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μπορούν να εκτιμηθούν η κίνηση γαιών, ο ρυθμός διάβρωσης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατολισθήσεις και ο ρυθμός μεταβολής της ακτογραμμής, έτσι ώστε να προβλεφθούν ζώνες υψηλής και μέτριας επικινδυνότητας με σκοπό την έγκαιρη προστασία των πολιτών.

Βιβλιογραφία

1. Πανεπιστημιακές σημειώσεις - Δημοσιεύσεις

- Ζήδρου Ε., Καρκάνη Ζ., Ματζίρη Μ., Παπαδοπούλου Μ., Τζιαβός Η., Τσακίρη – Στρατή Μ., Χατζηγάκη Σ, 2000, Πολυφασματική Βαθυμετρία με συνδυασμό δεδομένων από ηχοβόλιση και εντοπισμό με το σύστημα GPS, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 2.
- Μαυρίδου Ρ., 2013, Δημιουργία ψηφιακών βυθομετρικών χαρτών με πολυφασματική βαθυμετρία
- Πατιάς Π., 2010. Σχεδιασμός Διερεύνηση και Έλεγχος Φωτογραμμετρικής Παραγωγής. Πανεπιστημιακές σημειώσεις ΤΑΤΜ-Α.Π.Θ.
- Doxani G, M Papadopoulou, P Lafazani, C Pikridas, M Tsakiri-Strati, 2012, Shallow-water bathymetry over variable bottom types using multispectral worldview-2 image.
- Kaimaris Dimitrios, Patias Petros, Stylianidis Efstratios, 2012, Evaluation of Methodologies for the Determination of Bathymetry Using Worldview-2, Imagery: A Case Study at Lake Pramoritza, Greece, Appl Rem Sens J (2).

2. Σχετική νομοθεσία - Τεχνικές Προδιαγραφές:

- Κτηματολόγιο Α.Ε., 2006, Τεχνικές Προδιαγραφές για την παραγωγή ψηφιακών Ορθοφωτοχαρτών και DTM για τη χάραξη Αιγιαλού, Αθήνα,
- N. 2971/2001 ΦΕΚ 285Α/2001
- N. 4281/2014 ΦΕΚ 160Α/2014
- N.4321/2015 ΦΕΚ 32Α/2015
- ΦΕΚ595Α/2005