



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Τοπογραφίας -Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Επίδραση της ραδιομετρίας υποβρυχίων εικόνων στην 2D και 3D ανακατασκευή



Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Ι. Δρακωνάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2016

"Ποτέ σου να μη λησμονάς τα πρώτα σκαλοπάτια

γιατί εκεία πρωτοπατείς και φτάνεις στα παλάτια..."

Στην Οικογενειά μου...

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον Δρ. Ανδρέα Γεωργόπουλο που δέχτηκε να επιβλέψει την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, και ήταν πάντα διαθέσιμος για συμβουλές και καθοδήγηση σαν πραγματικός δάσκαλος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων και τη Δ. Κουτσούμπα, καταδυόμενη αρχαιολόγο που μας βοήθησε με την χορήγηση της απαραίτητης άδειας για την εργασία στην ανασκαφική έρευνα και συνέδραμε στις εργασίες πεδίου.

Ευχαριστώ τον Δρ. Julien Beck, αρχαιολόγο και λέκτορα του Πανεπιστημίου της Γενεύης για την κάλυψη των εξόδων διαμονής και διατροφής του τοπογραφικού συνεργείου και την παροχή βιβλιογραφικού υλικού για την εκπόνηση της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στον Πάνο Αγραφιώτη, που με τις συμβουλές και τις πολλές ιδέες του συνέβαλλε τα μέγιστα στο θέμα της διπλωματικής εργασίας.

Πάνω από όλους ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη της, υλική και ψυχική, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επίδραση που έχει το υποβρύχιο περιβάλλον στην ραδιομετρία και την μετρητική αξιοπιστία εικόνων. Οι εικόνες χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος βυθισμένου πρωτοελλαδικού οικισμού στην παραλία "Λαμπαγιαννάς" Κοιλιάδας Αργολίδος με αυτόματη φωτογραμμετρική επεξεργασία. Επίσης αναλύει την διαδικασία μιας υποβρύχιας αρχαιολογικής έρευνας και το νομικό πλαίσιο που τη περιβάλλει. Διερευνά τρόπους βελτίωσης της ραδιομετρίας των υποβρύχιων εικόνων και ελέγχει τις διαφορές που παρουσιάζει η βαθμονόμηση του συστήματος μηχανή-υδατοστεγής θήκη σε υποβρύχιο περιβάλλον και σε εργαστηριακές συνθήκες. Περιλαμβάνει μια πρακτική εφαρμογή δημιουργίας ορθοφωτογραφίας από υποβρύχιες εικόνες σε μικρό βάθος. Συγκρίνει και αξιολογεί τα τρισδιάστατα μοντέλα και τις ορθοφωτογραφίες που δημιουργήθηκαν από εικόνες χωρίς επέμβαση και από εικόνες που διορθώθηκαν ραδιομετρικά. Τέλος ελέγχονται οι επιπτώσεις που έχουν στην κλίμακα του τρισδιάστατου μοντέλου οι υποβρύχιες βαθμονομήσεις με διαφορετικά λογισμικά

*School of Rural and Surveying Engineering
National Technical University of Athens, Greece*

The effect of underwater images on 2D and 3D reconstruction

Georgios I. Drakonakis

Diploma Thesis

March,2016

Abstract

This diploma thesis focuses on the effects of the underwater environment on the color and metric quality of images that are used for 3D reconstruction. A part of submerged Early Helladic II settlement at "Lambayiannas" beach Kiladha Argolis was documented using automatic photogrammetric processes. The procedure of an underwater survey is also analyzed, including the international and national legislation concerning underwater cultural heritage. Methods of underwater image enhancement are investigated and applied on data collected from the site. Different camera calibrations in underwater and lab environment are compared. The 3D model and orthophoto of the settlement are reconstructed using original and enhanced images and the results are compared and evaluated. Finally, the impact of different camera calibrations on the 3D model scale and shape is investigated and evaluated.

Key words- Underwater 3D Reconstruction, Underwater Image Enhancement, Underwater Photogrammetry, Underwater Camera Calibration

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1.....	1
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2.....	2
Υποβρύχια Αρχαιολογία.....	2
2.1. Υποβρύχια Αρχαιολογία.....	2
2.2 Νομικό Πλαίσιο.....	3
2.2.1 Διεθνής Νομοθεσία.....	4
2.2.2 Η προστασία της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς κατά το διεθνές δίκαιο .	4
2.2.3 Ελληνική Νομοθεσία.....	8
2.2.4 Προβλήματα προστασίας εναλίων αρχαίων.....	12
2.2.5 Μέτρα προστασίας.....	14
2.3 Σχεδιασμός υποβρύχιας Αρχαιολογικής έρευνας.....	15
2.4 Αρχαιολογική Καταγραφή.....	16
2.5 Μέθοδοι υποβρύχιας έρευνας.....	17
2.6 Καταστροφικές Τεχνικές Έρευνας.....	19
2.6 Συντήρηση Ευρημάτων.....	22
2.7 Προστασία αρχαιολογικού Χώρου.....	22
2.8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	22
Κεφάλαιο 3.....	23
Υποβρύχια Φωτογραμμετρία.....	23
3.1 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας.....	23
3.2 Υποβρύχια φωτογραφία.....	24
3.3 Υποβρύχια Φωτογραμμετρία και Αρχαιολογία.....	24
3.3.1 Τα πρώτα βήματα.....	25
3.3.2 Το ναυάγιο στην αρχαία ελληνική Φαναγόρεια.....	26
3.3.3 Τα ναυάγια Marzamemi και Granitola.....	28
3.4 State-of-the-art φωτογραμμετρικές εφαρμογές στην αρχαιολογία.....	30
3.4.1 Συνδυασμός φωτογραμμετρίας και ηχοβολιστικών συστημάτων.....	30
3.4.2 Χρήση Ρομποτικών οχημάτων για αρχαιολογικές εφαρμογές σε μεγάλα βάθη	33
3.4.3 Βαθυσκάφη - Μελέτη του φοινικικού ναυαγίου στο Klendi της Μάλτας.....	38
3.4.4 Όραση Υπολογιστών και Φωτογραμμετρία μέσα από μια GoPro.....	41
3.5 Άλλες μέθοδοι υποβρύχιας 3D ανακατασκευής.....	42

3.5.1 Sonar (sound navigation and ranging)	43
3.5.2 LiDAR (Light Detection and Ranging)	44
3.5.3 Σάρωση Γραμμικού Φωτός (Laser Line Scanning)	44
3.5.4 Σάρωση με Δομημένο Φως	44
3.6 Σύνοψη	45
Κεφάλαιο 4	46
Υποβρύχια Εικόνα	46
4.1 Επίδραση του νερού στο φως και στην εικόνα	46
4.1.1 Απώλεια Χρωμάτων	46
4.1.2 Απορρόφηση του Φωτός	46
4.1.3 Σκέδαση του φωτός	47
4.1.4 Άλλοι Παράγοντες Αλλοίωσης ποιότητας Εικόνας	48
4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων βελτίωσης και αποκατάστασης υποβρύχιας εικόνας	49
4.2.1 Ανασκόπηση μεθόδων αποκατάστασης εικόνας	49
4.2.2 Ανασκόπηση σε μεθόδους βελτίωσης της εικόνας	52
4.3 Διερεύνηση τρόπων ραδιομετρικής βελτίωσης υποβρύχιας εικόνας	56
4.3.1 Διόρθωση με το λογισμικό Adobe Photoshop	57
4.3.2 Διόρθωση Εικόνων με επεξεργασία Ιστογραμμάτων	61
4.3.3 Διόρθωση με τη μέθοδο "Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization"	62
4.4 Συγκρίσεις-Αξιολόγηση τρόπων Διόρθωσης	66
4.5 Διερεύνηση Επίδρασης υποβρύχιου περιβάλλοντος στη μετρητική αξιοπιστία της εικόνας	66
4.5.1 Γεωμετρία της μηχανής	66
4.5.2 Σημασία αποκατάστασης εσωτερικού προσανατολισμού	67
4.5.3 Η διάθλαση της φωτεινής ακτίνας στα δύο μέσα	68
4.5.4 Γεωμετρική συμπεριφορά μηχανής σε υποβρύχιο περιβάλλον	69
4.5.5 Βαθμονόμηση σε υποβρύχιο Περιβάλλον και σύγκριση με συνθήκες περιβάλλοντος	75
Κεφάλαιο 5	94
Πρακτική Εφαρμογή στην Ενάλια Αρχαιολογία	94
5.1 Αρχαιολογικά στοιχεία και γεωγραφικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης	94
5.2 Υποβρύχια Ανασκαφή στην παραλία "Λαμπαγιαννάς"	96
5.3 Στόχους των Εργασιών Τεκμηρίωσης	99
5.4 Συλλογή Δεδομένων	99

5.4.1 Αναγνώριση Περιοχής.....	99
5.4.2 Οριοθέτηση αντικειμένου στο βυθό.....	99
5.4.3 Διεξαγωγή μετρήσεων και επίλυση Δικτύου Οριζοντίου και Κατακόρυφου Ελέγχου	100
5.4.4 Τοποθέτηση, εντοπισμός και μέτρηση Φωτοσταθερών	101
5.5 Φωτογράφιση	101
5.5.1. Φωτογραφικός εξοπλισμός.....	101
5.5.1. Προγραμματισμός λήψεων.....	102
5.5.2 Προβλήματα φωτογράφισης	102
5.6 Επεξεργασία Δεδομένων.....	103
5.6.1 Βαθμονόμηση μηχανής και ραδιομετρική διόρθωση εικόνων	103
5.6.2 Αυτοματοποιημένη Φωτογραμμετρική Επεξεργασία	103
5.6.3 Επεξεργασία μεμονωμένων τμημάτων και τελική Ορθοφωτογραφία.....	110
5.7 Αξιολόγηση- Συμπερασματικά Σχόλια	115
Κεφάλαιο 6	116
Συγκρίσεις- Αξιολογήσεις.....	116
6.1 Ποιοτική αξιολόγηση ραδιομετρικών διορθώσεων υποβρύχιας εικόνας.....	116
6.2 Σύγκριση και αξιολόγηση νεφών σημείων	116
6.3 Σύγκριση και Αξιολόγηση Ορθοφωτογραφιών.....	122
6.4 Σύγκριση και αξιολόγηση 3D μοντέλων με διαφορετική βαθμονόμηση	129
6.5 Τελικά Συμπεράσματα.....	132
Βιβλιογραφία	133
Βιβλιογραφία.....	137

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Διάγραμμα Ροής εργασιών για την έρευνα ναυαγίου (ColinRenfrew&PaulBahn,2001).....	16
Εικόνα 2.2 Αντίγραφο από καταγραφή δύτη στην ανασκαφή του MaryRose,1982 (MaryRoseTrust) ..	17
Εικόνα 2.3 Διαγράμματα στρωματογραφίας Harris (BenFerrari).....	17
Εικόνα 2.4 Συρόμενη αναζήτηση (BenFerrari).....	18
Εικόνα 2.5 Σάρωση σε ευθεία διάταξη (Ben Ferrari)	18
Εικόνα 2.6 Σάρωση Jackstay (Graham Scott)	18
Εικόνα 2.7 Κυκλική αναζήτηση(Ben Ferrari)	19
Εικόνα 2.8 Τεχνικές ανασκαφής,δοκιμαστικές τρύπες,τομές (Graham Scott).....	20
Εικόνα 2.9 Συσσκευή αναρρόφησης (Graham Scott).....	20
Εικόνα 2.10 Δειγματοληψεία πυρήνων (Ben Ferrari).....	21
Εικόνα 2.11 Μέθοδος καθετηριασμού (Ben Ferrari)	22
Εικόνα 2.12 Εύρημα,Ακτινογραφία,λαβή ξίφους έπειτα από συντήρηση (ColinMartin).....	23
Εικόνα 3.1 Ορθή και Κεντρική προβολή (Μούζας,2010).....	24
Εικόνα 3.2 Η πρώτη υποβρύχια φωτογραφία.....	24
Εικόνα 3.3 Υποβρύχιες εργασίες συνεργείου στο ναυάγιο Planier, Marseille (Lioux,1973)	25
Εικόνα 3.4 Το αρχαίο ναυάγιο,αποβάθρα ρωμαϊκής περιόδου (Zuckovsky κ.ά,2013).....	25
Εικόνα 3.5 3D μοντέλο του Φαναγόριου ναυαγίου (Zuckovsky κ.ά ,2013).....	26
Εικόνα 3.6 Ναυάγια Marzememi και Granitola (Balletti,2015).....	26
Εικόνα 3.7 3D μοντέλο ναυαγίου Marzamemi με Photoscan	27
Εικόνα 3.8 3D μοντέλο ναυαγίου Granitola με Photoscan.....	28
Εικόνα 3.9 Ορθοφωτογραφία του ναυαγίου Marzamemi.....	29
Εικόνα 3.10 Παράθεση διαφορετικών τρόπων καταγραφής των αντικειμένων	30
Εικόνα 3.11 VilladeiPisoniΤρισδιάστατο μοντέλο (F.Brunoκ.ά. , 2015)	31
Εικόνα 3.12Συγχώνευση μοντέλου με βαθυμετρικό χάρτη (F. Bruno κ.ά.,2015).....	32
Εικόνα 3.13 Συλλογή από υποβρύχια ρομποτικά οχήματα.....	34
Εικόνα 3.14 Μηχανολογικό μοντέλο SeaBED	34
Εικόνα 3.15 Φωτομωσαϊκό του ναυαγίου της Χίου	36
Εικόνα 3.16 Βαθυμετρικός Χάρτης ναυαγίου	36
Εικόνα 3.17 Φωτομωσαϊκο με διόρθωση λόγω αναγλύφου	37
Εικόνα 3.18 Βαθυμετρικός χάρτης από δεδομένα σοναρ	37
Εικόνα 3.19 Βαθησκάφη Remora 2000 και Θέτις	38
Εικόνα 3.20 Τμήμα της υψηλής ανάλυσης ορθοφωτογραφιας	39
Εικόνα 3.21 Ανακατασκευή πυκνού νέφους σημείων με LSIS 3Dtool	40
Εικόνα 3.22 GoproHero3	41
Εικόνα 3.23 Παράγωγα της αρχαιολογικής εφαρμογής του VanDamme	42
Εικόνα 3.24 Τρόπος λειτουργίας δομημένου φωτός(M. Massot-Campos,2015).....	44
Εικόνα 4.1 Απορρόφηση του φωτός (http://lymanlures.com).....	46
Εικόνα 4.2 Σκέδαση του φωτός	47
Εικόνα 4.3Επίδραση σκέδασης στην Εικόνα (Jaffe,1990)	48
Εικόνα 4.4Μοντέλο υπολογισμού λαμβάνουσας ακτινοβολίαςJaffe 1990 (Sedlazeck 2011).....	50
Εικόνα 4.5 Σύγκριση με τη μεθοδο των Schechner και Karpel (Πηγή SchechnerandKarpel,2005).....	51
Εικόνα 4.6 Αποτελέσματα από τα πειράματα των Treibitz και Shcechner (Treibitz& Schechner,2009. 52	
Εικόνα 4.7 Ζευγάρια εικόνων πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά την εφαρμογή του αλγορίθμου των Bazeilleκ.ά. (Bazeille κ.ά. 2006).	53
Εικόνα 4.8 Αποτελέσματα αλγορίθμου ACE (Chambah,2004).....	54
Εικόνα 4.9 Αποτέλεσμα μεθόδου Iqbal αρχική εικόνα με το ιστόγραμμα της (δεξιά) και η διορθωμένη (αριστερά)(Iqbalκ.ά. 2012).....	54
Εικόνα 4.10 Αποτελέσματα μοντέλου Torrez-Mendez και Dudek (Torrez-Mendez και Dudek,2005)	55

Εικόνα 4.11 Στάδια επεξεργασίας μεθόδου των Ghanik.ά. (Ghanik.ά. 2014)	56
Εικόνα 4.12 Αρχικές εικόνες του αντικείμενου α) "φωτοσταθερό" β) "ψάρι" γ) "γωνία" δ) "κλίμακα" 57	57
Εικόνα 4.13 Ιστόγραμμα εικόνας 4.12β.....	57
Εικόνα 4.14 Ιστογράμματα Κόκκινου (α) Πράσινου (β) και μπλέ (γ).....	58
Εικόνα 4.15 Τελική εικόνα 12.γέπειτα από επεξεργασία στο AdobePhotoshop.....	59
Εικόνα 4.16 Ιστόγραμμα εικόνας 15.....	59
Εικόνα 4.17 Τελική εικόνα επειτα από επεξεργασία Photoshop 12.δ	59
Εικόνα 4.18 Εικόνα 12.βέπειτα από διόρθωση whitebalancing	60
Εικόνα 4.19 Δυό διαδοχικές λήψεις διορθωμένες με whitebalancing	61
Εικόνα 4.20 Τελικές εικόνες έπειτα από διόρθωση επέκτασης ιστογραμμάτων.....	62
Εικόνα 4.21 Ιστόγραμματα κόκκινου πράσινου και μπλέ καναλιού της Εικόνας 20.β.....	62
Εικόνα 4.22 Συνάρτησεις αθροιστικής πυκνότητας Rayleigh (Wikipedia)	63
Εικόνα 4.23 Τελικές εικόνες έπειτα από διόρθωση CLaHE.....	64
Εικόνα 4.24 Ιστογράμματα Εικόνας 23.β.....	64
Εικόνα 4.25 Η συνάρτηση κατανομής που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική ισοστάθμιση.	65
Εικόνα 4.26 Τελικές εικόνες με εφαρμογή Ισοστάθμισης και έπειτα CLaHE.....	65
Εικόνα 4.27 Ιστογράμματα Εικόνας 26.γ.....	65
Εικόνα 4.28 Η συνθήκη Συγγραμικότητας.....	66
Εικόνα 4.29 Η διάθλαση της οπτικής ακτίνας	69
Εικόνα 4.30 Ο δείκτης διάθλασης νερού	68
Εικόνα 4.31 Χρωματική Εκτροπή.....	69
Εικόνα 4.32 Ikelite Housing για Canon EOS 600D.....	70
Εικόνα 4.33 Μείωση οπτικού επιπέδου	71
Εικόνα 4.34 Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης	72
Εικόνα 4.35 Επίδραση επίπεδης θήκης στη διαστροφή του φακού	72
Εικόνα 4.36 Η επίδραση της θολωτής θύρας.....	73
Εικόνα 4.37 Η επίδραση της θολωτής θύρας.....	73
Εικόνα 4.38 Λήψη από το πεδίο ελέγχου	75
Εικόνα 4.39 Σύγκριση καμπύλων συστήματος μηχανή-θήκη και μηχανή.....	76
Εικόνα 4.40 Σύγκριση έκκεντρης διαστροφής συστήματος μηχανή-θήκη και μηχανή.....	77
Εικόνα 4.41 Χάρτες της διαστροφής για CCD.....	77
Εικόνα 4.42 Το πεδίο ελέγχου τοποθετείται στη περιοχή εργασίας.....	78
Εικόνα 4.43 Αρχική εικόνα και επεξεργασμένη για χρήση στο Photomodeler	79
Εικόνα 4.44 Θέσεις λήψης των φωτογραφιών 3D Viewer Photomodeler.....	79
Εικόνα 4.45 Αποτελέσματα υποβρύχιας βαθμονόμησης στο λογισμικό Photomodeler.....	80
Εικόνα 4.46 Θέσεις λήψης των φωτογραφιών 3D Viewer Photomodeler (Εργαστήριο.....	80
Εικόνα 4.47 Αποτελέσματα βαθμονόμησης στο εργαστήριο.....	81
Εικόνα 4.48 Οι καμπύλες της ακτινικής διαστροφής	83
Εικόνα 4.49 Χάρτες διαστροφής Photomodeler Scanner	83
Εικόνα 4.50 Εικόνα πριν και μετά από επεξεργασία για χρήση στο Faucal	84
Εικόνα 4.51 Παράθυρο ρυθμίσεων FAUCCAL	85
Εικόνα 4.52 Καμπύλες ακτινικής διαστροφής Faucal.....	87
Εικόνα 4.53 Σύγκριση καμπυλών Photomodeler και Faucal.....	87
Εικόνα 4.54 Χάρτες Διαστροφής FAUCCAL	88
Εικόνα 4.55 Λήψεις που χρησιμοποιήθηκαν στο LENS	88
Εικόνα 4.56 Σύγκριση ακτινικών διαστροφών LENS και Photoscan	90
Εικόνα 4.57 Χάρτες διαστροφής LENS	88
Εικόνα 4.58 Συγκεντρωτικός Πίνακας ακτινικής διαστροφής	88
Εικόνα 4.59 Χάρτης διαφοράς διαστροφής CCD και αυτοβαθμονόμησης Photoscan.....	92

Εικόνα 4.60 Χάρτης διαφοράς διαστροφής CCD και FAUCCAL	92
Εικόνα 4.57 Χάρτης διαφοράς διαστροφής CCD και Photomodeler	93
Εικόνα 5.1 Αργολικός κόλπος	94
Εικόνα 5.2 Εσωτερική άποψη σπηλαίου Φράγγχι.	95
Εικόνα 5.3 Σκελετός που ανακαλύφθηκε στο Σπήλαιο	96
Εικόνα 5.4 Τοποθεσία Ανασκαφής	97
Εικόνα 5.5 Τμήμα πλακόστρωτου από τον οικισμό	98
Εικόνα 5.6 3D απεικόνιση λίθινης θεμελίωσης	98
Εικόνα 5.7 Οριζόντιο Δικτύο	100
Εικόνα 5.8 Αυτοδύτης στυλεοφόρος επί το έργο 0.....	101
Εικόνα 5.9 Nikon D5200 και IkeliteHousing.....	101
Εικόνα 5.10 Προβλήματα Φωτογράφισης.....	102
Εικόνα 5.11 Σχετικός προσανατολισμός εικόνων.....	103
Εικόνα 5.12 Κατανομή Φωτοσταθερών	104
Εικόνα 5.13 Επιφάνεια-mesh αντικειμένου	108
Εικόνα 5.14 Ορθοφωτογραφία Ανασκαφικού Καννάβου	109
Εικόνα 5.15 Έλεγχος κλίμακας ορθοφωτογραφίας	110
Εικόνα 5.16 Έλεγχος κλίμακας για τμήματα Νο1 & Νο2	112
Εικόνα 5.17 Όρθοφωτογραφία τμήματος Νο3	112
Εικόνα 5.18 Όρθοφωτογραφία τμήματος Νο4	113
Εικόνα 5.19 Ορθοφωτογραφία Τμήματος Νο5	113
Εικόνα 5.20 Τελική ορθοφωτογραφία Καννάβου και τμημάτων Νο1 & Νο2	114
Εικόνα 6.1 3D Μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Lowest	117
Εικόνα 6.2 3D Μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Low	118
Εικόνα 6.3 3D Μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Medium	119
Εικόνα 6.4 3D Σύγκριση Αδιόρθωτου νέφους με διόρθωση Photoshop.....	120
Εικόνα 6.5 3D Σύγκριση Αδιόρθωτου νέφους με διόρθωση Αλγόριθμου	121
Εικόνα 6.6 Σύγκριση διορθωμένου με Photoshop νέφους και διορθωμένου με Αλγόριθμο	121
Εικόνα 6.7 Θέσεις λήψης κατά τη φωτογράφιση	122
Εικόνα 6.8 Ορθοφωτογραφία με διορθωμένες από τον Αλγόριθμο φωτογραφίες	123
Εικόνα 6.9 Αρχική Ορθοφωτογραφία διορθωμένη με τον Αλγόριθμο	124
Εικόνα 6.10 Ορθοφωτογραφία με διορθωμένες από Photoshop φωτογραφίες.....	125
Εικόνα 6.11 Ορθοφωτογραφία διορθωμένη με Photoshop.....	126
Εικόνα 6.12 Τμηματική διόρθωση ορθοφωτογραφίας με Photohsop	127
Εικόνα 6.12 Τμηματική διόρθωση ορθοφωτογραφίας με Photohsop	127
Εικόνα 6.13 Διαφορές μεταξύ 6.8 και 6.9	128
Εικόνα 6.14 Διαφορές μεταξύ 6.12. και 6.10	128
Εικόνα 6.15 Σύγκριση FAUCCAL με Αυτοβαθμονόμηση.....	130
Εικόνα 6.16 Σύγκριση Photomodeler και αυτοβαθμονόμησης	130
Εικόνα 6.17 Σύγκριση CCD και αυτοβαθμονόμησης.....	131

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Αναφορές σχετικά με ακρίβειες Sonar.....	45
Πίνακας 4.1 Μήκη κύματος και αντίστοιχα χρώματα	48
Πίνακας 4.2 Παράμετροι εσ. προσ/μου από CCD	80
Πίνακας 4.3 Παράμετροι Εσ. Προσ./μου από Photomodeler.....	86
Πίνακας 4.4 Παράμετροι Εσ. Προσ/μού από FAUCCAL.....	90
Πίνακας 4.5 Παράμετροι Εσ. Προσ/μού από LENS & Photoscan	94
Πίνακας 4.6 Συγκριτικά Αποτελέσματα για περιβάλλον αέρα.....	95
Πίνακας 5.1 Τελικές Συντεταγμένες	105
Πίνακας 5.2 Σφάλματα Φωτοσταθερών	110
Πίνακας 5.3 Διαφορές Αποστάσεων	110
Πίνακας 5.4 Σύγκριση πυκνού νέφους σημείων για διαφορετικά επίπεδα ποιότητας	111
Πίνακας 5.5 Έλεγχος κλίμακας	116
Πίνακας 5.6 Διαφορές συν/νων τμήματος No1.....	117
Πίνακας 5.7 Έλεγχος κλίμακας τμήματος No1.....	117
Πίνακας 6.1 Συγκριτικά αποτελέσματα Photoscan για ποιότητα εικόνων	123
Πίνακας 6.2 Αριθμός σημείων για κάθε μοντέλο και επίπεδο ποιότητας	123
Πίνακας 6.3 Ποσοστιαία μεταβολή αριθμού σημείων.....	127
Πίνακας 6.4 Έλεγχος κλίμακας τμήματος No1.....	127
Πίνακας 6.5 Διαφορές μεταξύ 3D μοντέλων στο Geomagic Qualify.....	129
Πίνακας 6.6 Επίδραση βαθμονόμησης στη συνόρθωση του μοντέλου.....	136
Πίνακας 6.7 Διαφορές μεταξύ μοντέλων με διαφορετική βαθ/ση και αυτοβαθ/ση.....	138

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τοποθετημένη στο σταυροδρόμι των τριών Ηπείρων και των Πέντε Θαλασσών η Ελλάδα ως γεωγραφικός χώρος έχει διαδραματίσει εξέχοντα ρόλο στην εξέλιξη του ανθρώπινου είδους. Στα εδάφη της υπάρχει ανεξερεύνητος αρχαιολογικός πλούτος από τα πρώιμα χρόνια του ανθρώπινου πολιτισμού. Με το επίπεδο της θάλασσας να αυξάνεται συνεχώς, και περίπου 17.000 χιλιόμετρα ακτογραμμής μέρος του πλούτου αυτού έχει βρεθεί κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ενάλια αρχαιολογία έχει αναλάβει το βάρος της έρευνας των βυθισμένων υπολειμμάτων της αρχαίας ανθρώπινης δραστηριότητας και έχει στη διάθεσή της ένα σύνολο από τις πλέον εξελιγμένες μεθόδους τρισδιάστατης ανακατασκευής, συμπεριλαμβανομένης της ψηφιακής Φωτογραμμετρία. Η εικόνα, πάνω στην οποία γίνονται οι μετρήσεις της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας όταν λαμβάνεται σε περιβάλλον δύο μέσων ή εξ ολοκλήρου σε υποβρύχιο περιβάλλον υπόκειται σε ραδιομετρικές και γεωμετρικές παραμορφώσεις. Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να ελεγχθεί εάν οι παραμορφώσεις αυτές έχουν επίδραση στην τρισδιάστατη και δισδιάστατη ανακατασκευή του πυθμένα σε ρηχά νερά.

Η εργασία δομείται σε 5 κεφάλαια.

Το Κεφάλαιο 2 περιγράφει την επιστήμη της υποβρύχιας αρχαιολογίας, τις μεθόδους που χρησιμοποιεί και το νομικό πλαίσιο που τη διέπει σε διεθνές επίπεδο αλλά και εθνικό όσον αφορά στην Ελλάδα.

Το κεφάλαιο 3 περιγράφει εφαρμογές υποβρύχιας φωτογραμμετρίας από τα πρώτα χρόνια εμφάνισής της μέχρι και σήμερα, και τον τρόπο που αυτή εφαρμόζεται από τα σύγχρονα μέσα συλλογής υποβρύχιων δεδομένων όπως τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα και αναφέρονται περιληπτικά μερικές ακόμη μέθοδοι υποβρύχιας 3D ανακατασκευής.

Το κεφάλαιο 4 περιγράφει την υποβρύχια εικόνα, τα προβλήματα που το νερό δημιουργεί στην ραδιομετρία και την μετρητική της αξιοπιστία. Γίνεται επίσης μια διερεύνηση στους τρόπους αποκατάστασης και βελτίωσης της ραδιομετρίας της εικόνας αλλά και σε μεθόδους υποβρύχιας βαθμονόμησης. Επιχειρούνται επίσης διάφοροι τρόποι ραδιομετρικής βελτίωσης των εικόνων που ελήφθησαν για την δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου σε μικρό βάθος. Επίσης πραγματοποιούνται βαθμονομήσεις σε υποβρύχιο και εργαστηριακό περιβάλλον και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Το κεφάλαιο 5 περιγράφει τη πρακτική εφαρμογή της δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου και ορθοφωτογραφίας σε ανασκαφή βυθισμένου οικισμού Πρωτοελλαδικής Περιόδου στην περιοχή Λαμπαγιαννάς Κοιλιάδας Αργολίδος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 συγκρίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανακατασκευής και των ορθοφωτογραφιών με χρήση των διορθωμένων εικόνων από το κεφάλαιο 4 και ελέγχεται η επίδραση που έχουν οι διαφορετικές υποβρύχιας και εργαστηριακές βαθμονομήσεις στη κλίμακα και τη γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου.

Κεφάλαιο 2

Υποβρύχια Αρχαιολογία

Το Κεφάλαιο 2 έχει ως βιβλιογραφική πηγή το βιβλίο "Underwater Archaeology" της "Nautical Archaeology Society".

2.1. Υποβρύχια Αρχαιολογία

Τι είναι υποβρύχια Αρχαιολογία

Αρχαιολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με την αναγνώριση και ερμηνεία των φυσικών και τεχνητών καταλοίπων που αφήνουν οι προηγούμενες γενεές. Η αρχαιολογία όπως υπάρχει σήμερα έχει τις ρίζες της στην περιέργεια για παλιά πράγματα, ιστορίες και θρύλους που έχουν περάσει από γενιά σε γενιά (A. Bowens, 2009). Όλα τα κατάλοιπα, όσο ασήμαντα και αδιάφορα και αν φαίνονται στην αρχή μπορεί να κρύβουν σημαντικά στοιχεία για την κατανόηση του τι συνέβη πριν τα φέρει στο φως ο αρχαιολόγος. Εκτός από τον αρχαιολογικό πλούτο που υπάρχει στη στεριά και στο υποβρύχιο περιβάλλον υπάρχει μια πλούσια πηγή αρχαιολογικής πληροφορίας. Οι μαρτυρίες αυτές επιβιώνουν και στη στεριά και στη θάλασσα, αν και ο καθορισμός τους ως επίγειες ή ενάλιες είναι λίγο περίπλοκος καθώς περιοχές που βρίσκονταν κοντά στο νερό πριν από μερικές χιλιάδες χρόνια σήμερα μπορεί να έχουν σκεπαστεί από αυτό. Οι περισσότεροι αρχαιολόγοι εξειδικεύονται σε ένα ή περισσότερους τομείς όπως είναι η μελέτη πολιτισμών με γεωγραφικά κριτήρια ή σε συγκεκριμένες χρονολογικές περιόδους. Λίγοι όμως αναπτύσσουν δεξιότητες για εργασία σε συγκεκριμένο περιβάλλον όπως είναι το υποβρύχιο και όσοι το κάνουν έχουν ήδη εξειδικευτεί σε κάποιο τομέα. Συνήθως ο τομέας αυτός είναι η μελέτη πλοίων και ναυαγίων. Ωστόσο υπάρχουν και κάποιοι που ενδιαφέρονται για καταβυθισμένους οικισμούς, όπως και αυτός που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Οι υποβρύχιοι αρχαιολογικοί χώροι είναι σημαντικοί για δυο βασικούς λόγους. Πρώτον είναι συχνά μοναδικής φύσης και δεν υπάρχουν παρόμοιοι πουθενά αλλού (π.χ. ναυάγια) και δεύτερον η παρουσία του νερού συντηρεί με διαφορετικό τρόπο τα ευρήματα, τα προστατεύει συνήθως από κάθε είδους επέμβαση και δημιουργεί το φαινόμενο της "χρονοκάψουλας". Οι επίγειοι αρχαιολογικοί χώροι, κατά το παρελθόν κατοικούνταν για μακρές περιόδους με αποτέλεσμα να μην εξάγονται συμπεράσματα για συγκεκριμένη χρονική περίοδο αλλά αντικατόπτριζαν τις αλλαγές με το πέρασμα του χρόνου. Σε αντίθεση με αυτούς, η παρουσία του νερού διατηρεί τα ευρήματα "παγωμένα" σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο κάτι εξαιρετικά σημαντικό.

Τι δεν είναι υποβρύχια Αρχαιολογία

Στόχος της υποβρύχιας αρχαιολογίας είναι η καταγραφή ευρημάτων και η ερμηνεία τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο ζωής, τις δραστηριότητες και την επικοινωνία των λαών κατά το παρελθόν. Σε καμία περίπτωση δεν περιλαμβάνει την ανέλκυση αντικειμένων για οικονομική

εκμετάλλευση και αγοραπωλησίες. Από το 18ο αιώνα επαγγελματίες δύτες μισθώνονταν για την ανέλκυση εμπορευμάτων και αντικειμένων με σκοπό την επαναφορά τους στις εμπορικές δραστηριότητες. Στο περιθώριο των δραστηριοτήτων αυτών, έβρισκαν συχνά βυθισμένα αρχαιολογικά ευρήματα. Ενώ το οικονομικό όφελος ήταντο απόλυτο κίνητρο, συχνά γοητευμένοι από τη δόξα άρχισαν συστηματικά την ανεύρεση και ανέλκυση ναυαγίων καταστρέφοντάς τα φυσικά. Με την πάροδο των χρόνων αρκετοί αρχαιολογικοί θρόνους είτε απροκάλυπτα είτε υποδυόμενοι τους αρχαιολόγους έγιναν κυνηγοί θησαυρών εις βάρος της επιστήμης της αρχαιολογίας. Τα φαινόμενα αυτά οδήγησαν τα περισσότερα κράτη στη θέσπιση εθνικών θεσμικών πλαισίων για την προστασία της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

2.2 Νομικό Πλαίσιο

Υπολογίζεται ότι υπάρχουν περίπου τρία εκατομμύρια μη αναληφθέντα ναυάγια στους ωκεανούς του κόσμου. Κατά μια εκτίμηση, χάνονταν περίπου 300.000 πλοία κάθε αιώνα. Στην αρχή επιδιωκόταν η ανακάλυψη χαμένων φορτίων από γνωστά ναυάγια, μόνο προς τον σκοπό της επανεισαγωγής των φορτίων αυτών στο εμπόριο, ιδιαίτερα στη βόρεια Ευρώπη. Αντίθετα, στη Μεσόγειο όταν άρχισε μαζί με την ανύψωση φορτίων η ανάκτηση σημαντικών αρχαιολογικών ευρημάτων τα κράτη άρχισαν να θεσπίζουν και να εφαρμόζουν κανόνες για την "ανάκτηση" ενάλιων πολιτιστικών αγαθών, ανάλογων εκείνων που εφαρμόζονταν στα ανευρισκόμενα στη γη πολιτιστικά αγαθά.

Η μέριμνα των αρχαιολόγων, αναφορικά με τα ανευρισκόμενα και ενδεχομένως ανελκυσόμενα ιστορικά και αρχαιολογικά αντικείμενα, είναι τριπλή: Θεωρούν ότι τα αντικείμενα αυτά θα πρέπει να εξετάζονται *in situ*, αντιτάσσονται σθεναρά στο εμπόριο των αντικειμένων αυτών, και υποστηρίζουν ότι τίθενται ειδικά ηθικά ζητήματα όσον αφορά στη μεταχείριση ανθρώπινων λειψάνων (A. Bowens, 2009).

Τα διάφορα εθνικά δίκαια περιλαμβάνουν διάφορες και διαφορετικές ρυθμίσεις. Σε διεθνές επίπεδο οι συζητήσεις σχετικά με τα ζητήματα των ενάλιων ιστορικών και αρχαιολογικών αγαθών άρχισαν κυρίως τη δεκαετία του 1970 και μετέπειτα. Σημαντικό εμπόδιο στην προστασία των αγαθών αυτών, ήταν οι αναφερθείσες κερδοσκοπικού χαρακτήρα δραστηριότητες που έχουν την προέλευσή τους σε νόμους συγκεκριμένους, όπως ειδικότερα στις ρυθμίσεις του δικαίου της θάλασσας του τέλους του 19ου αιώνα σύμφωνα με το οποίο κάθε θαλάσσιο σκάφος ανήκε σε αυτόν που το εύρισκε.

Η υποβρύχια αρχαιολογία διαφέρει από την επίγεια σε διάφορα σημεία. Υπάρχουν εγγενείς δυσκολίες στη διαδικασία ανασκαφής που καθιστούν σχεδόν αδύνατη τη σωστή εξέταση των ενάλιων ιστορικών-αρχαιολογικών τόπων *in situ*. Το κόστος της υποβρύχιας αρχαιολογικής πρακτικής είναι πολύ μεγάλο και σε αυτό προστίθενται και τα αναπόφευκτα νομικά έξοδα που συνεπάγεται η εκδίκαση συγκρουόμενων αξιώσεων μεταξύ εμπορικών διασωστών, κυβερνήσεων, κυρίων των ναυαγίων, κληρονόμων κλπ.

Οι διαφορές αυτές, συχνά οδηγούν σε διαφορές στη νομική μεταχείριση των ενάλιων πολιτιστικών αγαθών. Στην Ελλάδα, ήδη από το 1834, στον πρώτο αρχαιολογικό νόμο, γίνεται αναφορά σε ενάλια αρχαία (άρθρο 62), τα οποία αποτελούν ιδιοκτησία του κράτους. Ο νόμος 3028/2002 "Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς" για πρώτη φορά περιλαμβάνει ρητές διατάξεις που καλύπτουν όλα τα ζητήματα προστασίας και διαχείρισης των ενάλιων αρχαιοτήτων.

2.2.1 Διεθνής Νομοθεσία

Για να προσδιοριστεί το νομικό καθεστώς που διέπει μια υποβρύχια αρχαιολογική έρευνα πρέπει να προσδιοριστεί και η θέση της, κάτι όχι και πολύ εύκολο στην θάλασσα. Τα νομικά θέματα που σχετίζονται με την ανακάλυψη, χαρτογράφηση και ανασκαφή υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς έχουν περιγραφεί σαν "νομικός λαβύρινθος" (Altes, 1976). Για τετρακόσια χρόνια το νομικό καθεστώς της θάλασσας δεν ήταν τίποτα άλλο από ένα άθροισμα εθιμικών κανόνων διαμορφωμένο από τις μεγάλες αποικιοκρατικές δυνάμεις και τα μεγάλα ναυτικά κράτη. Η έλλειψη κωδικοποίησης του δικαίου της θάλασσας αποτελούσε πάντα ένα σημαντικό πρόβλημα. Το 1609 ο Ολλανδός νομικός Hugo Grotius εξέδωσε την πραγματεία "MARE LIBERUM", που αποτελούσε μια διαπραγμάτευση της ελευθερίας των θαλασσών. Μέχρι τα μέσα του 20ου αιώνα έγιναν διάφορες προσπάθειες για να δημιουργηθεί ένα νομικό πλαίσιο για τη θάλασσα, χωρίς όμως κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα. Μετά τη λήξη του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, ο τότε πρόεδρος των ΗΠΑ Τρούμαν εξέδωσε δύο Διακηρύξεις που αναφέρονταν στα δικαιώματα αλιείας, έρευνας, ελέγχου και εκμετάλλευσης του βυθού των θαλασσών. Οι Διακηρύξεις αυτές αποτέλεσαν και τη βάση για την μετέπειτα εξέλιξη του Δικαίου της Θάλασσας.

2.2.2 Η προστασία της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς κατά το διεθνές δίκαιο

Η Σύμβαση των Ηνωμένων εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας

Υιοθετήθηκε το 1982 από την Συνθήκη των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας "United Nations Convention of the Law of the Sea" ή UNCLOS III. Η UNCLOS III ταξινομεί τα ύδατα σε πέντε κατηγορίες:

- Χωρική Θάλασσα
- Συνορεύουσα Ζώνη
- Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ)
- Υφαλοκρηπίδα
- Ανοιχτή Θάλασσα

Όταν υπογράφηκε η συνθήκη η ενάλια πολιτιστική κληρονομιά δεν ήταν υψηλής προτεραιότητας και για αυτό δεν μεριμνήθηκε η δημιουργία ενός ισχυρού προστατευτικού καθεστώτος. Παρ' όλα αυτά είναι σημαντική διότι διευκρινίζει τι μπορεί να ρυθμίζει κάθε κράτος στην εκάστοτε ζώνη. Σύμφωνα με τη συνθήκη η παραπάνω ζώνες μετρώνται από την Γραμμή Βάσης. Γραμμή βάσης είναι η γραμμή κατώτατης ρηχίας (φυσική) κατά μήκος της ακτής, όπως αυτή σημειώνεται στους ναυτικούς χάρτες μεγάλης κλίμακας που είναι επίσημα αναγνωρισμένοι από το παράκτιο κράτος. Εκτός από τις φυσικές Γραμμές Βάσης υπάρχουν και οι Ευθείες γραμμές Βάσης που συνδέουν κατάλληλα σημεία της ακτογραμμής όπου παρουσιάζονται βαθιές κοιλώσεις ή άμεση γεινίαση με συστάδα νησιών.

Χωρικά Ύδατα

Η Χωρική Θάλασσα ή Χωρικά Ύδατα ή Αιγιαλίτιδα Ζώνη (Territorial Sea) είναι η θαλάσσια ζώνη που εκτείνεται έως 12 ναυτικά μίλια πέραν του εδάφους και των εσωτερικών υδάτων. Στη ζώνη αυτή το παράκτιο κράτος ασκεί πλήρη κυριαρχία και έχει το αποκλειστικό δικαίωμα να ρυθμίζει όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την υποβρύχια αρχαιολογία.

Συνορεύουσα Ζώνη

Είναι η θαλάσσια ζώνη που συνορεύει με την χωρική θάλασσα και στην οποία το παράκτιο κράτος μπορεί να ασκεί ορισμένα δικαιώματα ελέγχου. Το παράκτιο κράτος μπορεί να ασκεί έλεγχο ώστε να εμποδίζονται και να τιμωρούνται οι παραβιάσεις,

στο έδαφος ή στη χωρική του θάλασσα της τελωνιακής, μεταναστευτικής, δημοσιονομικής ή υγειονομικής νομοθεσίας. Εκτείνεται έως 24 ναυτικά μίλια από τις γραμμές βάσηςσυμπεριλαμβάνονταστο εύρος της χωρικής θάλασσας. Το άρθρο 303 της Συνθήκης επιτρέπει στο παράκτιο κράτος να θεωρεί τις εργασίες σχετιζόμενες με την ενάλια πολιτιστική κληρονομιά ως διεξαγόμενη στα Χωρικά της Ύδατα δίνοντας τουπλήρη κυριαρχικά δικαιώματα.Τα κράτη που λαμβάνουν υπόψη στη νομοθεσία τους την υποβρύχια αρχαιολογία στη ζώνη αυτή ολοένα και αυξάνονται με τις ΗΠΑ να είναι το πιο πρόσφατο παράδειγμα το 1999.

Ανοιχτή Θάλασσα

Είναι τα τμήματα της θάλασσας που είναι πέρα από τα όρια δικαιοδοσίας των παρακτίων κρατών.Στη περιοχή αυτή κανένα κράτος δεν μπορεί να αξιώσει μονομερώς αρμοδιότητες και ισχύει η αρχή της ελευθερίας της ανοιχτής θάλασσας,όπως αυτήεκφράστηκεαπό τον Grotius. Η ελευθερία αυτή εκδηλώνεται με τις εξής έξι επιτρεπόμενες ενέργειες: ναυσιπλοΐα, υπερπήδηση, τοποθέτηση υποβρυχίων καλωδίων και σωληναγωγών, κατασκευή τεχνητών νησιών, αλιεία και επιστημονική έρευνα. HUNCLOSSIIδιακηρύσσει τον βυθόκαι τους πόρους του ως "*κτήμα της ανθρωπότητας*" (άρθρο 136). Κατά συνέπεια τα κράτη μπορούν να εκμεταλλεύονται τους πόρους του Διεθνούς Βυθού μόνο μέσω ενός συστήματος που έχει συμφωνηθεί διεθνώς, το οποίο διασφαλίζει τη δίκαιη κατανομή για τα οικονομικά οφέλη και τη τεχνολογία.Για την ενάλια πολιτιστική κληρονομιά αποφασίστηκε κατά την συνδιάσκεψη ότι αυτή δεν περιλαμβάνεται στον όρο "*πόροι*"επομένως η αρχή της ελευθερίας της ανοιχτής θάλασσας ισχύει για έρευνα, χαρτογράφηση και ανασκαφή υποβρυχίων αρχαιολογικών ευρημάτων. Η Συνθήκη όμως διακηρύσσειστο άρθρο 149 ότι "*όλα τα αντικείμενα αρχαιολογικής και ιστορικής φύσης που ευρίσκονται στην περιοχή(Ανοιχτής Θάλασσας) πρέπει να διατηρηθούν στο σύνολό τους προς όφελος του ανθρώπου και να διατεθούνστη χώρα προέλευσης ή στο τόπο πολιτισμικής προέλευσης ή στο τόπο ιστορικής και αρχαιολογικής προέλευσης*".Συνεπώς στην ανοιχτή θάλασσα και στο πυθμένα της όλα τα κράτη έχουν το δικαίωμα έρευνας, χαρτογράφησης και ανασκαφής της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς και μπορούν να εξουσιοδοτήσουν τα πλοίαπου φέρουν την σημαία τους να το κάνουν.

Υφαλοκρηπίδα

Η υφαλοκρηπίδααποτελείται από το θαλάσσιο βυθό και το υπέδαφος που εκτείνεται από την φυσική προέκταση του χερσαίου εδάφους του παράκτιου κράτους έως το Διεθνή Βυθό. Το ακριβές μήκος της υφαλοκρηπίδας διαφέρει κατά περίπτωση. Το παράκτιο κράτος μπορεί να αξιώσει έως 350 ναυτικά μίλια από τις γραμμές βάσης ή 100 ναυτικά μίλια από την ισοβαθή των 2500 μέτρων. Ο καθορισμός της υφαλοκρηπίδας είναιπερίπλοκη διαδικασία καθώς πολλές φορές γειτονικά κράτη έρχονται σε σύγκρουση για τα όρια των υφαλοκρηπίδων τους.Κάθε παράκτιο κράτος έχει το δικαίωμα αποκλειστικής έρευνας και εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων της υφαλοκρηπίδας. Η ενάλια πολιτιστική κληρονομιά δεν περιελήφθη στον όρο "*φυσικοί πόροι*" επομένως το κράτος δεν έχει το αποκλειστικό δικαίωμα να ρυθμίζει αρχαιολογική έρευνα, χαρτογράφηση και ανασκαφή στην υφαλοκρηπίδα. Σύμφωνα με το άρθρο 303 της Συνθήκης τα κράτη οφείλουν "*να προστατεύουν αντικείμενα αρχαιολογικής και ιστορικής φύσης και σημασίας και πρέπει να συνεργάζονται για τον σκοπό αυτό*". Ορισμένα κράτη (Αυστραλία, Ιρλανδία, Σεϋχέλλες, Κύπρος, Ισπανία, Πορτογαλία,Νορβηγία και Κίνα) έχουν συμπεριλάβει στη νομοθεσία τους διατάξεις που να εφαρμόζουν το άρθρο 303 της συνθήκης και να ρυθμίζουν την ενάλια αρχαιολογία στην υφαλοκρηπίδα τους. Παρ' όλο που οι αξιώσεις τους μπορεί να είναι αμφισβητήσιμεςκανένα άλλο κράτος δεν ενίσταται σε αυτές. Συμπερασματικά, αυτό που προκύπτει είναι ότι εάν ένα ανασκαφικό έργο πρόκειται να λάβει χώρα εντός 350 ναυτικών μιλίων από την ακτή, τα παράκτια κράτη έχουν το δικαίωμα να υπαγορεύσουν ρυθμιστικό καθεστώς γιααυτό.

Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ)

Θεωρείται η θαλάσσια έκταση, εντός της οποίας ένα κράτος έχει δικαίωμα έρευνας ή άλλης εκμετάλλευσης των θαλασσίων πόρων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας από το νερό και τον άνεμο. Εκτείνεται πέραν των χωρικών υδάτων μιας χώρας στα 200 ναυτικά μίλια από την ακτογραμμή. Εξαιρέση σ' αυτόν τον κανόνα αποτελούν οι περιπτώσεις όπου οι ΑΟΖ δύο ή περισσότερων χωρών εφάπτονται, όταν δηλαδή οι ακτογραμμές των εν λόγω χωρών απέχουν λιγότερο από 400 ναυτικά μίλια. Στην περίπτωση που οι ΑΟΖ εφάπτονται, έγκειται στις χώρες που τις διεκδικούν να ορίσουν από κοινού θαλάσσια σύνορα. Γενικά, κάθε σημείο εντός αλληλοεφαπτόμενης περιοχής περιέρχεται στη δικαιοδοσία της εγγύτερης χώρας. Η ΑΟΖ δεν συμπεριλαμβάνει τα χωρικά ύδατα, ούτε και την Υφαλοκρηπίδα πέραν των 200 ναυτικών μιλίων. Η διαφορά χωρικών υδάτων και ΑΟΖ είναι πως τα χωρικά ύδατα αφορούν σε πλήρη κυριαρχία, ενώ η ΑΟΖ αποτελεί απλό κυριαρχικό δικαίωμα, το οποίο αναφέρεται στη δικαιοδοσία του παράκτιου κράτους μέχρι και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η επιφάνεια είναι διεθνή ύδατα. Η ακριβής έκταση της ΑΟΖ είναι συχνά θέμα διαμάχης μεταξύ δύο ή περισσότερων χωρών. Η ενάλια αρχαιολογία δεν θεωρείται θαλάσσια επιστημονική έρευνα και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να διεξαχθεί ελεύθερα σύμφωνα με την ελευθερία της ανοιχτής θάλασσας. Το δικαίωμα θεσμικής ρύθμισης αρχαιολογικών δραστηριοτήτων στην ζώνη αυτή είναι ασαφές και αποτελεί αιτίαγια συνεχείς έριδες μεταξύ κρατών. Το Μαρόκο και η Τζαμάικα παραδείγματος χάριν αξιώνουν δικαιοδοσία να ρυθμίζουν αρχαιολογικές ανασκαφές στην ΑΟΖ τους σε αντίθεση με τα περισσότερα κράτη.

Τα άρθρα 149 και 303 της UNCLOS αναφέρονται ρητά στην ανάγκη προστασίας υπέρ του συνόλου της ανθρωπότητας των αρχαιολογικών και ιστορικών αντικειμένων που βρίσκονται στη θάλασσα.

Η Ευρωπαϊκή Σύμβαση για την Προστασία της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς της Βαλέττας, 1992

Η Σύμβαση αυτή αποτελεί αναθεώρηση της Σύμβασης του Λονδίνου του 1969. Το άρθρο 2ii αναφέρεται ρητά στην αναγνώριση της αρχαιολογικής κληρονομιάς και την ανάγκη λήψης μέτρων προστασίας της: "τη δημιουργία εφεδρικών αρχαιολογικών ζωνών, ακόμη κι όταν δεν υπάρχουν ορατά λείψανα στην επιφάνεια του εδάφους ή μέσα στο νερό, για τη διατήρηση της υλικής μαρτυρίας, η οποία θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τις μεταγενέστερες γενεές". Έτσι συμπληρώνεται το άρθρο 2 της Ευρωπαϊκής Σύμβασης για την Προστασία της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς του Λονδίνου (1969) που κυρώθηκε από την Ελλάδα με το Ν. 1127/1981, ΦΕΚ Α' /32. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εισήγαγε την υποβρύχια αρχαιολογία στα πεδία εφαρμογής των πολιτιστικών δράσεων της ύστερα από πρωτοβουλία της Ελληνικής Προεδρίας το 1994.

Η Σύμβαση της UNESCO για την Προστασία της Ενάλιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Παρίσι, 2001

Η Σύμβαση της UNESCO για την προστασία της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί το διεθνές θεσμικό πλαίσιο με σκοπό να εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την προστασία της κληρονομιάς αυτής.

Οι γενικές αρχές που εκφράζει η Σύμβαση αυτή είναι:

Ως ενάλια πολιτιστική κληρονομιά ορίζεται κάθε ίχνος ανθρώπινης παρουσίας πολιτιστικού, ιστορικού ή αρχαιολογικού χαρακτήρα που έχει βυθιστεί μερικώς ή ολικώς περιοδικά ή δια παντός εδώ και τουλάχιστον 100 χρόνια. Πρωταρχική προτεραιότητα είναι η *κατά χώραν* διατήρηση της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς, προτού επιτραπεί ή αναληφθεί οιαδήποτε επέμβαση σε αυτή.

Οι επεμβάσεις στην ενάλια πολιτιστική κληρονομιά πρέπει να γίνονται κατά προτίμηση με μη καταστρεπτικές τεχνικές και έρευνες για την ανέλκυση των αντικειμένων. Η ενάλια πολιτιστική κληρονομιά δεν πρέπει να αποτελεί αντικείμενο εμπορικής εκμετάλλευσης.

Καμία δραστηριότητα που αφορά στην ενάλια πολιτιστική κληρονομιά δεν υπόκειται στο δίκαιο της ναυαγιοειρείας ή ανέλκυσης θησαυρών εκτός εάν: γίνεται κατ' εντολή των αρμοδίων υπηρεσιών και σύμφωνα με την παρούσα Σύμβαση και εξασφαλίζει τη μέγιστη προστασία της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς κατά τις επιχειρήσεις ανέλκυσης. Οι επεμβάσεις δεν πρέπει να διαταράσσουν χωρίς λόγο ιερούς τόπους και ανθρώπινα λείψανα.

Η υπεύθυνη και αβλαβής προσέγγιση του κοινού στην *κατά χώρα* ενάλια πολιτιστική κληρονομιά ενθαρρύνεται με σκοπό την παρατήρηση και τεκμηρίωση καθώς και τη διεθνή συνεργασία. Κάθε ανακάλυψη ή επέμβαση στην ενάλια πολιτιστική κληρονομιά που εντοπίζεται εντός της ΑΟΖ, της υφαλοκρηπίδας του παρακτίου κράτους ή στα διεθνή ύδατα υπόκειται σε σαφές σύστημα δήλωσης γνωστοποίησης και αδειοδότησης. Ειδική μεταχείριση επιφυλάσσεται στα πολεμικά πλοία και άλλα κρατικά πλοία ή στρατιωτικά αεροσκάφη που απολαμβάνουν ασυλίας. Πριν από κάθε επέμβαση προηγείται περιγραφικός σχεδιασμός που πρέπει να εγκριθεί από τις αρμόδιες αρχές.

Είναι απαραίτητο να προωθηθεί η επιμόρφωση, η μεταφορά τεχνογνωσίας, καθώς και η διάδοση της ενημέρωσης και να ευαισθητοποιηθεί και να επιμορφωθεί το κοινό για την αξία και το ενδιαφέρον της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

Τα Κράτη-Μέλη που θα επικυρώσουν τη Σύμβαση δεσμεύονται να υιοθετήσουν τα αναγκαία μέτρα για να διασώσουν την υποβρύχια πολιτιστική κληρονομιά προς όφελος της ανθρωπότητας, εφαρμόζοντας για αυτό το σκοπό τα πλέον πρόσφορα μέσα που διαθέτουν ανάλογα με τις δυνατότητές τους.

Ειδικότερα στο πλαίσιο της Σύμβασης:

– Τα Κράτη-Μέλη συνεργάζονται και επικουρούνται αμοιβαία, προκειμένου να εξασφαλίσουν την προστασία και τη διαχείριση της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

– Μοιράζονται κατά το δυνατό τις πληροφορίες που διαθέτουν για την ενάλια πολιτιστική κληρονομιά.

– Λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα, ώστε να ευαισθητοποιήσουν το κοινό για την αξία της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

– Συνεργάζονται για τη διάδοση της επιμόρφωσης στην υποβρύχια αρχαιολογία καθώς και για τις τεχνικές διατήρησης της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς.

– Συμμετέχουν στις δραστηριότητες της UNESCO σχετικά με την εφαρμογή της Σύμβασης, όπως π.χ. οι διασκέψεις των κρατών ή οι συναντήσεις σε συμβουλευτικό ή τεχνικό επίπεδο.

– Επωφελούνται της τεχνικής βοήθειας της UNESCO, στο πλαίσιο του προϋπολογισμού της, ώστε να επεξεργασθούν σχετική εθνική νομοθεσία για την εφαρμογή της Σύμβασης.

Η έλλειψη νομικού πλαισίου προστασίας για την αρχαιολογική-πολιτιστική κληρονομιά και δὴ για την υποβρύχια πολιτιστική κληρονομιά που κείται στα διεθνή ύδατα ώθησε πολλές χώρες να θεωρούν την Σύμβαση ως το καταφύγιο που θα τους διασφάλιζε αυτή την προστασία, σε αντίθεση με την Ελλάδα που διέθετε πάντοτε ισχυρό θεσμικό πλαίσιο προστασίας για τις αρχαιότητες.

Η αποχή που σημείωσε η Ελλάδα από την ψηφοφορία του τελικού κειμένου της Συμβάσης, που υιοθέτησε η Γενική Συνέλευση της UNESCO το Νοέμβριο του 2001, προκάλεσε εντύπωση ίσως και έκπληξη σε όσους γνώριζαν ότι η Ελλάδα, ως κατ' εξοχήν χώρα με πλούσιο αρχαιολογικό απόθεμα και αυστηρές νομοθετικές διατάξεις καθολικής προστασίας, υπήρξε από τους πλέον ένθερμους υποστηρικτές για την καθιέρωση ενός νέου οργάνου προστασίας για την ενάλια πολιτιστική κληρονομιά. Εν τούτοις, η ελληνική αντιπροσωπεία διατήρησε σοβαρές επιφυλάξεις κατά την διαμόρφωση του τελικού κειμένου, διότι οι διατάξεις της Σύμβασης είναι αμφίβολο κατά πόσο θα λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως εργαλείο για την προστασία της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς, ενώ θίγουν σοβαρά ζητήματα που άπτονται των δικαιωμάτων άσκησης της εθνικής δικαιοδοσίας της χώρας ακόμη και εντός των χωρικών υδάτων της.

2.2.3 Ελληνική Νομοθεσία

Νομικό πλαίσιο προστασίας της αρχαιολογικής κληρονομιάς από της συστάσεως του Ελληνικού Κράτους μέχρι το 2002

Η μέριμνα για την προστασία των αρχαιοτήτων εκδηλώθηκε ήδη κατά τη διάρκεια του Αγώνα της Ανεξαρτησίας πριν από τη σύσταση του νεωτέρου ελληνικού κράτους. Το πρώτο συστηματικό και συγκροτημένο νομικό κείμενο για την προστασία των αρχαιοτήτων επιχειρήθηκε στο Ανεξάρτητο Ελληνικό Κράτος, επί της Αντιβασιλείας του πρώτου βασιλέα Όθωνα, το 1834. Πρόκειται για τον πρώτο αρχαιολογικό νόμο 10/22-5-1834, έργο του Μάουερ, που για την εποχή του υπήρξε πρωτοποριακός και βασίζεται μάλλον στο ιταλικό δίκαιο. Στο άρθρο 62 του νόμου του 1834 της Αντιβασιλείας γίνεται μνεία για τα υποβρύχια αρχαία: *"όλα τα επί εθνικής γής, ή υπ' αυτήν, ή εις τον πυθμένα της θαλάσσης, εις ποταμούς και δημοσίους ρύακας, εις λίμνας ή βάλτους ευρισκόμενα ερείπια, ή άλλα αρχαιότητος αντικείμενα, οποιοδήποτε ονόματος, είναι ιδιοκτησία του Κράτους"*.

Ο νόμος αυτός κήρυττε τις αρχαιότητες στην Ελλάδα *"εθνικόν κτήμα όλων των Ελλήνων εν γένει"* και προέβλεπε την οργάνωση της αρμόδιας κρατικής υπηρεσίας, καθώς και την ίδρυση δικτύου μουσείων. Επίσης, αποτέλεσε βάση για τα μεταγενέστερα αυστηρότερα νομοθετήματα, όπως ο νόμος ΒΧΜΣΤ' (2646) του 1899 «Περί Αρχαιοτήτων», που καθιέρωσε το αποκλειστικό δικαίωμα κυριότητας του κράτους σε όλα τα αρχαία που βρίσκονται στην Ελλάδα, καθώς και για όσα ακολούθησαν μέχρι τον κωδικοποιημένο νόμο ΚΝ 5351 του 1932 «Περί Αρχαιοτήτων», που μέχρι τον Ιούλιο 2002 αποτελούσε το βασικό κείμενο της ελληνικής αρχαιολογικής νομοθεσίας.

Στο άρθρο 1 του ΚΝ 5351 του 1932 "Περί Αρχαιοτήτων", ο Νομοθέτης είχε ήδη προβλέψει την προστασία των ενάλιων αρχαιοτήτων. *"Πάντα τα εν Ελλάδι και οιοσδήποτε Εθνικοί κτήμασιν, εν ποταμοίς, λίμναις και εν τω πυθμένι της θαλάσσης, ευρισκόμενα αρχαία, κινητά τε και ακίνητα, είναι ιδιοκτησία του Κράτους"*.

Πρόθεση του Νομοθέτη ήταν να υπαγάγει στην ιδιοκτησία του κράτους όλα τα αρχαία εν γένει, κινητά και ακίνητα, αδιακρίτως του χώρου στον οποίο βρίσκονται, στην ξηρά ή στη θάλασσα, στους ποταμούς και τις λίμνες της ελληνικής επικράτειας. Εξ ορισμού, από τη γενική διάταξη του άρθρου 1 του ΚΝ 5351, τα ανασυρόμενα από τη θάλασσα ενάλια αρχαία ανήκουν στην απόλυτη και αποκλειστική κυριότητα του Κράτους και ισχύουν για αυτά οι ίδιες διατάξεις του αρχαιολογικού νόμου

Συνταγματική Προστασία

Πριν από το Σύνταγμα του 1975 δεν υπήρχε ειδική συνταγματική πρόβλεψη για τις αρχαιότητες. Πρώτο το Σύνταγμα του 1975 με τα άρθρα 18 και 24 καθιέρωσε αυξημένη συνταγματική προστασία για τα αρχαία και το πολιτισμικό περιβάλλον τους. Κατά το άρθρο 24, όπως αυτό αναθεωρήθηκε το 2001: α) η προστασία του πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του Κράτους (παρ. 1) και β) τα μνημεία προστατεύονται από το Κράτος (παρ. 6).

Ειδικότερα στην παράγραφο 1 του άρθρου 24 ορίζεται ότι: *"η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του Κράτους και δικαίωμα του καθενός. Για τη διαφύλαξή του το Κράτος έχει υποχρέωση να παίρνει ιδιαίτερα προληπτικά ή κατασταλτικά μέτρα στο πλαίσιο της αρχής της αειφορίας..."*. Αυτόσημαίνει ότι το Κράτος έχει την υποχρέωση να λαμβάνει κάθε προληπτικό ή κατασταλτικό μέτρο για τη διαφύλαξη των μνημείων, στα οποία περιλαμβάνονται και οι ενάλιες αρχαιότητες, την αρμοδιότητα των οποίων έχει η Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων του ΥΠΠΟ. Όσον αφορά στο πολιτιστικό περιβάλλον αυτό συγκροτείται από τα μνημεία και τα λοιπά στοιχεία που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα και συνθέτουν την ιστορική, καλλιτεχνική, τεχνολογική και εν γένει πολιτιστική κληρονομιά της χώρας.

Ο Νόμος 3028/02 "Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς"

Ο ν. 3028/2002 "Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς" αντικατέστησε τον ΚΝ 5351/32 "Περί Αρχαιοτήτων" και αποτελεί πλέον το βασικό νόμο για την προστασία των αρχαιοτήτων και της εν γένει πολιτιστικής κληρονομιάς. Με το νέο νόμο επιχειρείται η διεύρυνση, η ενίσχυση και εν πολλοίς ο εκσυγχρονισμός της προστασίας των αρχαιοτήτων. Ο ν. 3028/2002 περιέχει δέκα κεφάλαια που αναφέρονται σε βασικές διατάξεις, στα ακίνητα μνημεία και χώρους, στα κινητά μνημεία, στην αρχαιολογική έρευνα και στις εργασίες προστασίας μνημείων, στα Μουσεία, στην πρόσβαση και στη χρήση των μνημείων και των χώρων, στα οικονομικά κίνητρα, στα συλλογικά όργανα, στις ποινικές διατάξεις και τέλος σε ειδικές μεταβατικές και τελικές διατάξεις.

Ο νέος αρχαιολογικός νόμος περιλαμβάνει για πρώτη φορά ρητές διατάξεις, που καλύπτουν όλο το φάσμα των εναλίων αρχαιοτήτων σε ότι αφορά στην προστασία και στην εν γένει διαχείρισή τους (Άρθρο 15). Επί της ουσίας, οι ενάλιες αρχαιότητες καλύπτονται από το ίδιο πνεύμα προστασίας με τις χερσαίες. Η διάκρισή τους σε ξεχωριστό άρθρο υπό τον τίτλο *"Ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι"* οφείλεται στην ιδιαιτερότητα που αυτές οι αρχαιότητες έχουν από τη φύση τους αλλά και στην αναγκαιότητα που προκλήθηκε από την ίδια τη νομολογία για την κάλυψη του νομικού κενού του ΚΝ 5351/32.

Ορισμός της ενάλιας αρχαιολογικής και εν γένει υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς

Η υποβρύχια αρχαιολογική κληρονομιά της Ελλάδας περιλαμβάνει όλες τις αρχαιότητες κατά την έννοια των άρθρων 1 και 2 του ν. 3028/2002 "Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και της εν γένει πολιτιστικής κληρονομιάς", οι οποίες εντοπίζονται στο "βυθό της θαλάσσης, ή στον πυθμένα λιμνών ή ποταμών" της Ελληνικής επικράτειας. Αυτές μπορεί να είναι αρχαίες λιμενικές εγκαταστάσεις, καταποντισμένοι οικισμοί, μέρος των οποίων πολλές φορές προεκτείνεται στον αιγιαλό και την παραλία, ναυάγια πλοίων ή ακόμη και μεμονωμένες ενάλιες αρχαιότητες.

Το άρθρο 15: "Ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι"

Το άρθρο 15 υπό τον τίτλο "Ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι" έχει ως αποκλειστικό αντικείμενο τους ενάλιους αρχαιολογικούς χώρους, οι οποίοι ως προς τις γενικές ρυθμίσεις δεν διαφοροποιούνται από τους χερσαίους αρχαιολογικούς χώρους, π.χ. οριοθετήσεις ζωνών, προϋπόθεση αρχαιολογικού ελέγχου για τη χορήγηση άδειας εκτελέσεως έργων, καταβολή αμοιβής για υπόδειξη αρχαίου εντός αρχαιολογικού χώρου κ.λπ.

Πεδίο εφαρμογής του άρθρου 15 του ν. 3028/2002

Στα άρθρα 1 και 2 του ν. 3028/2002 αναφέρεται ότι "τα πολιτιστικά αγαθά που βρίσκονται εντός των ορίων της ελληνικής επικράτειας, συμπεριλαμβανομένων των χωρικών υδάτων, καθώς και εντός άλλων θαλάσσιων ζωνών στις οποίες η Ελλάδα ασκεί σχετική δικαιοδοσία σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο" αποτελούν αντικείμενο νομοθετικής προστασίας κατά τις διατάξεις του νόμου. Τούτο σημαίνει ειδικότερα ότι η εφαρμογή των διατάξεων επεκτείνεται πέραν των χωρικών υδάτων και της αιγιαλίτιδος ζώνης στη συνορεύουσα ζώνη, την υφαλοκρηπίδα και στην Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ). Επί πλέον η πρόοδος που σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια στις υποβρύχια αρχαιολογικές ανακαλύψεις βαθέων υδάτων χάρη στις νέες μεθόδους, που εφαρμόζονται στην υποβρύχια αρχαιολογική έρευνα με τη χρήση της νέας τεχνολογίας έφερε κυριολεκτικά στην επιφάνεια αρχαιολογικά ευρήματα και ναυάγια ελληνικού ενδιαφέροντος, που εντοπίζονται σε θαλάσσιες ζώνες, πέραν των χωρικών υδάτων, επί των οποίων η Ελλάδα δύναται να ασκήσει κυριαρχικά δικαιώματα σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο και που μέχρι πρότινος το βάθος τους ήταν απρόσιτο. Ορθά λοιπόν ο νομοθέτης προβλέπει την προστασία αυτών των πολιτιστικών αγαθών στην εθνική νομοθεσία (Κ.Π. Δελλαπόρτα). Στο σημείο αυτό, ο νέος νόμος εναρμονίζεται επίσης με το πνεύμα των Συστάσεων του Συμβουλίου της Ευρώπης για την προστασία της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς και με τις ρυθμίσεις που προβλέπονται στην Σύμβαση της UNESCO του 2001, μολονότι η Ελλάδα δεν αποτελεί συμβαλλόμενο μέλος της Σύμβασης.

Ειδικότερα προβλέπονται ρυθμίσεις που αφορούν:

1. Στους ενάλιους αρχαιολογικούς χώρους απαγορεύεται η αλιεία, η αγκυροβολία και η υποβρύχια δραστηριότητα με αναπνευστικές συσκευές, εκτός αν έχει χορηγηθεί άδεια του Υπουργού Πολιτισμού, η οποία εκδίδεται ύστερα από γνώμη του Συμβουλίου. (Άρθρο 15, παρ 1).

Με τη διάταξη αυτή εξετάζονται κατά περίπτωση ατομικές περιπτώσεις, όπου παρίσταται ανάγκη, για κάθε θαλάσσια περιοχή εντός της οποίας εντοπίζονται ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι. Η διάταξη προϋποθέτει οριοθέτηση ζωνών των κηρυγμένων ενάλιων αρχαιολογικών χώρων, εντός των οποίων με Απόφαση του Υπουργού Πολιτισμού μπορεί να ασκούνται υπό όρους, βάσει της παραγράφου 15,2, οι δραστηριότητες που αναγράφονται στην παράγραφο 15,1, δηλαδή η αγκυροβολία, η αλιεία, η υποβρύχια δραστηριότητα κ.λπ.

2. Με απόφαση του Υπουργού Πολιτισμού και του τυχόν συναρμοδίου Υπουργού, ύστερα από γνώμη του Συμβουλίου καθορίζονται οι όροι άσκησης των δραστηριοτήτων αυτών στους ενάλιους αρχαιολογικούς χώρους (άρθρο 15,2).

Η διάταξη αυτή έχει γενικό κανονιστικό περιεχόμενο. Σε εφαρμογή της εκδίδεται Κοινή Υπουργική Απόφαση των συναρμοδίων Υπουργών Πολιτισμού, Γεωργίας και Εμπορικής Ναυτιλίας, με την οποία τίθενται οι προϋποθέσεις και οι όροι που ρυθμίζουν την άσκηση των δραστηριοτήτων, οι οποίες αναγράφονται στην παράγραφο 15,1 χωριστά για κάθε περίπτωση.

3. Με όμοια απόφαση ορίζονται οι όροι άσκησης της υποβρύχιας δραστηριότητας με αναπνευστικές συσκευές, βαθυσκάφη ή άλλα μέσα επισκόπησης του βυθού σε θαλάσσιες περιοχές, λίμνες και ποταμούς για λόγους προστασίας της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς. (άρθρο 15,3).

Η διάταξη αυτή, σε αντιδιαστολή με την παράγραφο 1 του άρθρου 15, που αναφέρει τη ρητή απαγόρευση άσκησης των υποβρύχιων δραστηριοτήτων κατά το άρθρο, εντός των εναλίων αρχαιολογικών χώρων, επιτρέπει την υπό όρους άσκηση της υποβρύχιας δραστηριότητας με αναπνευστικές συσκευές, βαθυσκάφη και άλλα μέσα επισκόπησης του βυθού στις λοιπές θαλάσσιες περιοχές, λίμνες και ποταμούς της ελληνικής επικράτειας, για λόγους προστασίας της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι όροι άσκησης καθορίζονται με Κοινή Απόφαση των Υπουργών Πολιτισμού και Εμπορικής Ναυτιλίας.

Η παράγραφος αυτή αναφέρεται στις λοιπές θαλάσσιες περιοχές, που δεν είναι μεν χαρακτηρισμένες ως ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι, αλλά με σοβαρότατες ενδείξεις υπάρξεως εναλίων αρχαίων, που λόγω της πραγματικής δυσχέρειας εντοπισμού τους δεν έχουν ακόμη οριοθετηθεί, και ως εκ τούτου συντρέχουν λόγοι προστασίας τους. Έτσι, για λόγους προστασίας της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς κρίνεται σκόπιμο, πριν από κάθε υποβρύχια δραστηριότητα, δυνάμενη να βλάψει άμεσα ή έμμεσα τα ενάλια αρχαία, να ζητείται προηγουμένως σχετική άδεια από την Αρχαιολογική Υπηρεσία, η οποία καθορίζει κατά περίπτωση όρους και προϋποθέσεις.

Είναι σαφές ότι η γενική διάταξη της παρ. 3 του άρθρου 15 είναι προληπτικού χαρακτήρα, διότι η άσκηση των ως άνω δραστηριοτήτων δεν απαγορεύεται, όπως εσφαλμένα έχει ερμηνευθεί, αλλά αντίθετως προβλέπεται ο καθορισμός όρων άσκησης της υποβρύχιας δραστηριότητας με αναπνευστικές συσκευές, όσο και των βαθυσκαφών και άλλων μέσων επισκόπησης του βυθού, καθώς και η διαδικασία χορήγησης αδειάς για τις περιοχές εκείνες, που δεν είναι μεν χαρακτηρισμένες ως ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι, αλλά που συγκεντρώνουν σοβαρότερες ενδείξεις ύπαρξης εναλίων αρχαίων που δεν έχουν ακόμη εντοπισθεί.

Η πρόοδος της τεχνολογίας και η ανάπτυξη νέων τρόπων υποβρύχιας έρευνας έχουν ανοίξει νέες δυνατότητες προσέγγισης της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς ακόμη και σε μεγάλα βάθη. Η μεγάλη πυκνότητα των εναλίων αρχαίων ανά τις ελληνικές θάλασσες προκύπτει από τις ιστορικές πηγές και τη βιβλιογραφία, κυρίως όμως από το μέγεθος των τυχαίων παραδόσεων, υποδείξεων αλλά και κατασχέσεων εναλίων αρχαίων που καταλήγουν στην Υπηρεσία, καθώς και από το πρόγραμμα χαρτογράφησης των ελληνικών βυθών που έχει καθιερώσει η ΕΕΑ σε συνεργασία με το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών του Υπουργείου Ανάπτυξης από το 2000.

Για τη διευκόλυνση των ενασχολουμένων με τις υποβρύχιες δραστηριότητες καθορίζονται οι θαλάσσιες περιοχές, στις οποίες οι δραστηριότητες αυτές μπορεί να

ασκούνται χωρίς την απαιτούμενη άδεια του ΥΠΠΟ, ενώ στις λοιπές, επειδή συντρέχουν λόγοι προστασίας της ενάλιας πολιτιστικής κληρονομιάς, κρίνεται σκόπιμο πριν από κάθε δραστηριότητα δυνάμενη να βλάψει άμεσα ή έμμεσα τα ενάλια αρχαία να ζητείται προηγουμένως σχετική άδεια από την Υπηρεσία που καθορίζει κατά περίπτωση όρους και προϋποθέσεις.

4. Γύρω από ενάλια μνημεία και γύρω από αρχαιολογικούς χώρους είναι δυνατόν να ορίζεται περιοχή στην οποία δεν επιτρέπονται οι παραπάνω δραστηριότητες χωρίς προηγούμενη άδεια (Ζώνη Προστασίας), που χορηγείται με απόφαση του Υπουργού Πολιτισμού, ύστερα από γνώμη του Συμβουλίου (άρθρο 15,4).

Η ειδική διάταξη είναι κατ' εφαρμογήν των Άρθρων 12, 13 και 17, που αφορούν αντίστοιχα στην οριοθέτηση αρχαιολογικών χώρων και ζωνών προστασίας γύρω από ενάλια μνημεία και ενάλιους αρχαιολογικούς χώρους. Η διάταξη έχει επίσης γενικό κανονιστικό περιεχόμενο και σε εφαρμογή της δίνεται στον Υπουργό Πολιτισμού η δυνατότητα εκδόσεως Αποφάσεως, ύστερα από γνώμη του αρμοδίου Αρχαιολογικού Συμβουλίου, με την οποία να απαγορεύεται η άσκηση των δραστηριοτήτων που αναγράφονται στην παράγραφο 15,3 χωριστά για κάθε περίπτωση, π.χ. υποβρύχια επισκόπηση και κατάδυση, εντός των ζωνών προστασίας των εναλίων αρχαιολογικών χώρων].

5. Απαγορεύεται η εκτέλεση κάθε μορφής λιμενικού έργου χωρίς προηγούμενη άδεια, που χορηγείται με απόφαση του Υπουργού Πολιτισμού ύστερα από γνώμη του Συμβουλίου. Η άδεια αυτή προηγείται από όλες τις άδειες που αφορούν στην εκτέλεση του έργου και τα στοιχεία της αναγράφονται με ποινή ακυρότητας στις υπόλοιπες άδειες που απαιτούνται (Άρθρο 15,5).

Για την χορήγηση αδειάς εκτελέσεως πάσης φύσεως λιμενικών εγκαταστάσεων αρμόδιος είναι ο Υπουργός Πολιτισμού, αρμοδιότητα που μεταβιβάστηκε στον Προϊστάμενο της Εφορείας Εναλίων Αρχαιοτήτων.

2.2.4 Προβλήματα προστασίας εναλίων αρχαίων

Η φύση και μόνο του περιβάλλοντος χώρου στον οποίο βρίσκονται και εντοπίζονται οι ενάλιες αρχαιότητες είναι καθοριστική όχι μόνον για τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην υποβρύχια αρχαιολογική έρευνα και ανασκαφή αλλά και για τον τρόπο διαχείρισης της υποβρύχιας αρχαιολογικής κληρονομιάς. Τα προβλήματα προστασίας της διαφοροποιούνται και είναι μεγαλύτερα από εκείνα των αρχαιοτήτων που βρίσκονται στην ξηρά.

Οι δυσκολίες διαχείρισης και προστασίας των εναλίων αρχαιολογικών χώρων οφείλονται, εν πολλοίς, στους ακόλουθους παράγοντες:

1. Το φυσικό περιβάλλον:

i) Σε αντίθεση με τις περισσότερες χερσαίες αρχαιότητες, που εντοπίζονται ευκολότερα με προσιτό τρόπο, οι ενάλιες αρχαιότητες δεν είναι ακόμη όλες γνωστές, ώστε να οριοθετηθούν επακριβώς οι θαλάσσιες περιοχές με ζώνες προστασίας και να αστυνομευθούν.

ii) Οι ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι και δη τα ναυάγια, όπως είναι φυσικό, δεν περιφράσσονται. Ως εκ τούτου, αντιμετωπίζουν εγγενή προβλήματα και δυσκολίες στη φύλαξη και την αστυνόμευσή τους.

2. Η γεωμορφολογία της Ελλάδος:

i) Η Ελλάδα μετά τη Νορβηγία είναι η χώρα με το μεγαλύτερο ανάπτυγμα ακτογραμμής, που ανέρχεται σε 17.000 περίπου χιλιόμετρα, και αντιστοιχεί στο 25% της συνολικής ακτογραμμής της Μεσογείου.

ii) Οι ελληνικές θάλασσες είναι αρχιπελαγικές, εφόσον περικλείουν νησιωτικά συμπλέγματα που αριθμούν περί τα 3500 νησιά. Οι παράγοντες αυτοί δεν επιτρέπουν την επί μονίμου ή διαρκούς βάσεως αστυνόμευση και φύλαξη των εναλίων αρχαιολογικών χώρων από τις Λιμενικές Αρχές, ούτε την τοποθέτηση αρχαιοφυλάκων.

3. Η ιδιαιτερότητα της φύσεως των εναλίων αρχαίων:

Οι ενάλιες αρχαιότητες τόσο των αβαθών όσο και των βαθέων υδάτων κινδυνεύουν εξ ίσου από κάθε είδους παράνομη ή ανεξέλεγκτη δραστηριότητα, εφόσον αυτά κείνται στην επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας.

I. Ενάλιο αρχαιολογικοί χώροι σε μικρά βάθη

αρχαία λιμάνια

καταποντισμένοι οικισμοί

i) Κίνδυνοι από φυσικά φαινόμενα, γεωφυσικές μεταβολές, κλπ.

ii) Κίνδυνοι από επεμβάσεις του ανθρώπινου παράγοντα:

- δημόσια ή ιδιωτικά έργα, λιμενικά έργα μεγάλης ή μικράς εμβελείας
- διάφορες αλιευτικές δραστηριότητες σε αβαθή νερά, με τη χρήση μηχανικών αλιευτικών μεθόδων, όπως π.χ. η οστρακαλιεία με αργαλειό, σε αντίθεση με την περισυλλογή οστράκων με τα χέρια και με τη χρήση συμβατικών μεθόδων,
- λαθρανασκαφές.

II. Ενάλιες αρχαιότητες σε μεγαλύτερα βάθη

μεμονωμένες αρχαιότητες, αρχαία ναυάγια

i) Κίνδυνος καταστροφής του φορτίου (κυρίως αμφορείς) που είναι εκτεθειμένο στην επιφάνεια του πυθμένα από υποβρύχια δραστηριότητες όπως:

- Συστηματική αλιεία με μηχανικούς τρόπους, π.χ. μηχανότρατα
- Ποντίσεις καλωδίων, αγωγών
- Γεωτρήσεις

Οι παραβιάσεις της νομοθεσίας με επιβλαβείς επιπτώσεις επί των εναλίων αρχαίων συνοψίζονται επιγραμματικά ως εξής:

- Αυθαίρετες κατασκευές λιμενικών έργων
- Καταπατήσεις αιγιαλών
- Παραβιάσεις όρων και αυθαίρετες τροποποιήσεις εγκεκριμένων μελετών στην εκτέλεση έργων.
- Αυθαίρετες εγκαταστάσεις μονάδων υδατοκαλλιεργειών-ιχθυοκαλλιεργειών κ.λπ.

- Επεκτάσεις μονάδων χωρίς άδεια του ΥΠΠΟ
- Μηχανικοί τρόποι αλιείας
- Χρήση δυναμίτιδας
- Ανεξέλεγκτη αυτόνομη κατάδυση χωρίς άδεια του ΥΠΠΟ
- Χρήση ηλεκτρονικών μέσων επισκόπησης και τουριστικών υποβρυχίων χωρίς άδεια από το ΥΠΠΟ.

2.2.5 Μέτρα προστασίας

Το γεγονός ότι το αρχαιολογικό και γενικότερα το πολιτιστικό απόθεμα που κείται στο βυθό των θαλασσών ελαττώνεται δραματικά ανάγκασε την Ελληνική Πολιτεία να θεσπίσει νομοθετικές ρυθμίσεις για την ενίσχυση της προστασίας της υποβρύχιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Έτσι, σε εφαρμογή των διατάξεων που προβλέπονται από το νομικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε παραπάνω προχώρησε στη λήψη περαιτέρω μέτρων για την προστασία της υποβρύχιας αρχαιολογικής κληρονομιάς που συνοψίζονται ως εξής:

- Η αστυνόμευση των ελληνικών θαλασσών και του αιγιαλού για την καταστολή φαινομένων παράνομης υποβρύχιας δραστηριότητας. Τούτο αποτελεί αποκλειστική ευθύνη και αρμοδιότητα των κατά τόπους Λιμενικών Αρχών .
- Η κήρυξη εναλίων αρχαιολογικών χώρων ως χρηζόντων ειδική νομική προστασία.
- Η κήρυξη ως ναυαγίων, πλοίων και αεροσκαφών βυθισμένων άνω των 50 ετών.
- Ο έλεγχος χρήσης ανιχνευτών μετάλλων και μηχανημάτων επισκόπησης του βυθού.
- Η χορήγηση αμοιβών για τις υποδείξεις ναυαγίων και τις παραδόσεις αρχαιοτήτων που προέρχονται από τη θάλασσα.
- Η συστηματική υποβρύχια ερευνητική επισκόπηση για την ψηφιακή χαρτογράφηση των ελληνικών βυθών και η σύσταση αρχείου ναυαγίων και εναλίων αρχαιολογικών χώρων στην Εφορεία Εναλίων που εντοπίζονται στις ακτογραμμές της ελληνικής επικράτειας.
- Η κωδικοποίηση θαλασσίων περιοχών, που έχουν ελεγχθεί αρχαιολογικά, ανά την επικράτεια για την άσκηση οστρακαλιείας και για την άσκηση υποβρύχιας δραστηριότητας με αναπνευστικές συσκευές για αναψυχή σε θαλάσσιες περιοχές της ελληνικής επικράτειας, όπου δεν εντοπίζονται αρχαία ναυάγια.

Τα μέτρα και τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν δεν επαρκούν συχνά για να προστατεύσουν τις ενάλιες αρχαιότητες. Εν τούτοις, παρά τις δυσχέρειες που αντιμετωπίζουν στην εφαρμογή και κατά συνέπεια στην αποτελεσματικότητα των μέτρων που παρουσιάστηκαν ανωτέρω η «καθολική προστασία» [blanketprotection] που προβλέπεται στην αρχαιολογική νομοθεσία για την αρχαιολογική εν γένει κληρονομιά έχει διασώσει σε μεγάλο βαθμό την ενάλια αρχαιολογική κληρονομιά σε σχέση με τις άλλες χώρες της μεσογειακής λεκάνης.

Σύμφωνα με τις καταγγελίες που περιέρχονται στην Εφορεία Εναλίων μέσω των Λιμενικών Αρχών αλλά και της Δ/νσης Αρχαιοκαπηλείας της Ελληνικής Αστυνομίας προκύπτει ότι το μέτρο ελέγχου της υποβρύχιας δραστηριότητας με αναπνευστικές

συσκευές παραβιάζεται συστηματικά. Έτσι ορισμένοι, που η κατάδυση αποτελεί γι' αυτούς μέρος της επαγγελματικής τους ενασχόλησης, παραβιάζουν ποικιλοτρόπως τις διατάξεις της αρχαιολογικής νομοθεσίας, αφαιρώντας αντικείμενα από τα αρχαία ναυάγια με αποτέλεσμα την ολοσχερή, τις περισσότερες φορές, καταστροφή ενός αρχαιολογικού χώρου που αποτελεί «κλειστό σύνολο».

Από την άλλη, η παράνομη άσκηση υποβρύχιας δραστηριότητας με αυτόνομη αναπνευστική συσκευή για λόγους αναψυχής, τις περισσότερες φορές συνεπάγεται και ενέργειες που αποβαίνουν επιβλαβείς για την ενάλια αρχαιολογική κληρονομιά.

Οι ενέργειες αυτές αποσκοπούν είτε:

α) Στην απόκτηση ενός αρχαίου αντικειμένου ως αναμνηστικού από κάποιο συγκεκριμένο ναυάγιο για προσωπική κατοχή. Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι πλέον συνήθεις. Οι ιδιώτες εν τούτοις συχνά δηλώνουν τα αντικείμενα αυτά στην Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων, προκειμένου να νομιμοποιήσουν την απόκτησή τους, έστω και εκ των υστέρων, με τις προβλεπόμενες από τη νομοθεσία διαδικασίες χορήγησης άδειας κατοχής.

β) Στην παράνομη εμπορία αρχαιοτήτων. Τα αρχαία αντικείμενα από ναυάγια, που εντοπίζονται σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές, και τις περισσότερες φορές είναι «σημειωμένα» στην ακτογραμμή, ανελκύονται παράνομα και προωθούνται στο εξωτερικό από τη θάλασσα με σκοπό την εμπορία τους από οργανωμένα δίκτυα παράνομης διακίνησης αρχαιοτήτων που τροφοδοτούν την διεθνή αγορά έργων τέχνης.

Σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα που περιήλθαν στην Εφορεία Εναλίων προέρχονται από παρόμοιες αρχαιοκαπηλικές ενέργειες στην θάλασσα, ενώ οι εμπορικοί αμφορείς είναι εκείνοι που αποτελούν το κατ' εξοχήν και πλέον σύννηθες αντικείμενο αρχαιοκαπηλείας από τα αρχαία ναυάγια.

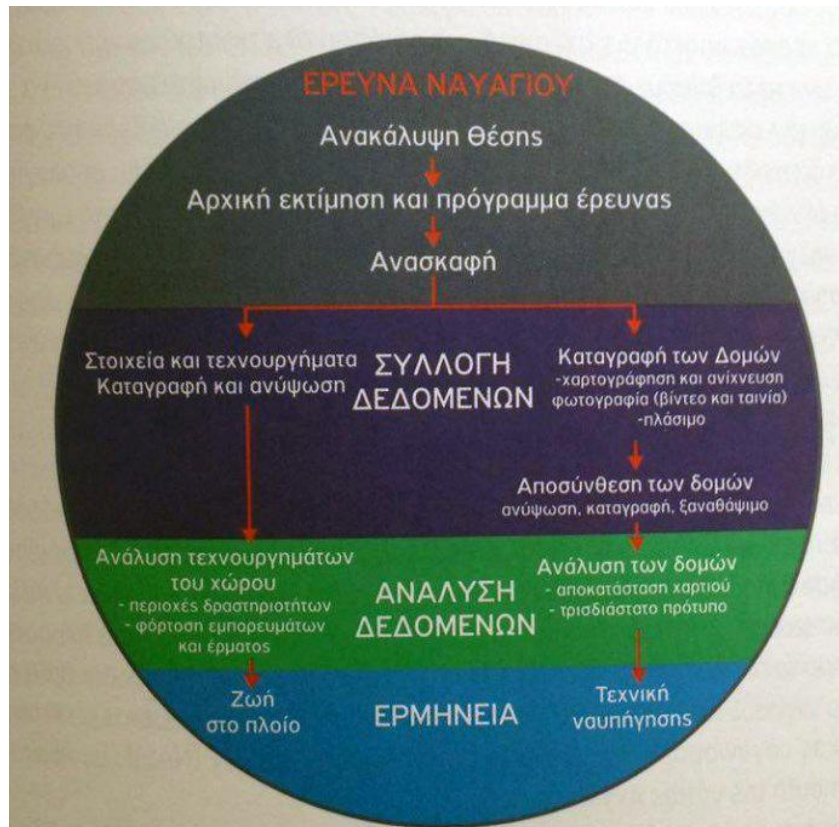
Το άρθρο 15 καθιστά σαφές το θεσμικό πλαίσιο προστασίας και διαχείρισης των εναλίων αρχαίων, τα παραπτώματα και τις κυρώσεις. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται περισσότερο από εκείνους που καλούνται να εφαρμόσουν και να σεβασθούν το νόμο παρά από την ίδια την νομοθεσία.

Ο ν. 3028/2002 συνιστά μια υποσχόμενη νομοθεσία αλλά ο χρόνος θα δείξει κατά πόσο διασφαλίζει όντως την προστασία και τη διαχείριση της ενάλιας πολιτισμικής κληρονομιάς.

2.3 Σχεδιασμός υποβρύχιας Αρχαιολογικής έρευνας

Ο σχεδιασμός μιας υποβρύχιας αρχαιολογικής έρευνας πρέπει να ξεκινάει από το γραφείο. Ο αρχαιολόγος αφού καθορίσει την περιοχή μελέτης πάνω σε χάρτη με συντεταγμένες ανατρέχει σε πιθανόν προηγούμενες εργασίες που έχουν γίνει στο ίδιο μέρος καταλαμβάνει τα αποτελέσματα των ερευνών υπόψη στο δικό του έργο. Ελέγχει την ισχύουσα νομοθεσία και ρυθμίζει τα νομικά ζητήματα (άδειες από ΕΕΑ, λιμεναρχείο). Δημοσιεύει αναφορά που να αιτιολογεί γιατί το έργο λαμβάνει χώρα για την ενημέρωση του κοινού. Έπειτα καθορίζει τις μεθόδους εργασίας. Ποιό συγκεκριμένα: καθορίζει ποιά μέρη του χώρου θα ερευνηθούν και ποιά όχι, τις μεθόδους συλλογής δεδομένων, τη στρατηγικές καταγραφής και ανάκτησης αντικειμένων π.χ. κεραμική, την αναγκαιότητα για ανάπτυξη μεθοδολογίας εργασίας (εάν δεν υπάρχει προκαθορισμένη), εκτιμά την δουλειά γραφείου μετά το πεδίο. Ακόμη πρέπει να προγραμματίσει την διαθεσιμότητα πόρων με βάση τον προϋπολογισμό και να εξασφαλίσει τον απαραίτητο εξοπλισμό. Τέλος πρέπει να

καταρτίσει το χρονοδιάγραμμα εργασιών και να φροντίσει για την ύπαρξη κανόνων ασφαλείας.



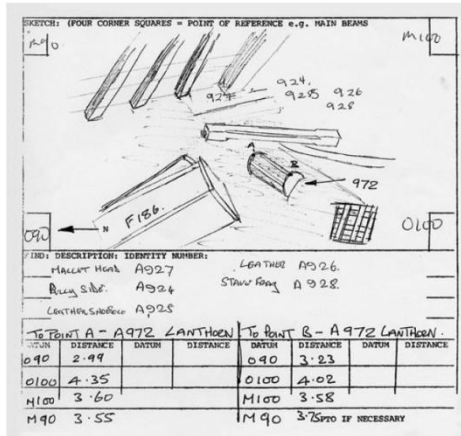
Εικόνα 2.1 Διάγραμμα Ροής εργασιών για την έρευνα ναυαγίου (ColinRenfrew&PaulBahn,2001)

2.4 Αρχαιολογική Καταγραφή

Το πλήθος και η έκταση της πληροφορίας που μπορεί να καταγραφεί σε μια αρχαιολογική έρευνα είναι μεγάλα. Για να καταστεί δυνατή η περαιτέρω μελέτη της πρέπει να πάρει μια οργανωμένη και προσιτή μορφή. Ιδανικά οι αρχαιολόγοι πρέπει να μπορούν να "ανακατασκευάσουν το αντικείμενο από το αρχείο των δεδομένων που κατέγραψαν. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς η ανασκαφή καταστρέφει το χώρο και κάνει αδύνατη την μελλοντική έρευνα. Στόχος είναι να καταγραφεί ό,τι υπάρχει ολοκληρωμένα και με τη μέγιστη ακρίβεια. Γενικά για τα αντικείμενα πρέπει να καταγράφεται η θέση τους με συντεταγμένες, η κωδικοποίησή τους, περιγραφικά χαρακτηριστικά, σχέσεις με το περιβάλλον τους κ.ά.

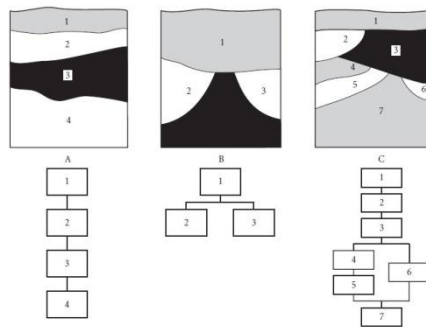
Ο παρακάτω κατάλογος είναι μια ένδειξη του τι και πώς πρέπει να καταγραφεί:

- τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας
- γεωγραφικές και περιβαλλοντικές πληροφορίες
- δεδομένα τοπογράφησης
- σχέση μεταξύ αντικειμένων και χώρου (π.χ. στρωματογραφία Harris)
- αυτοσχέδια
- φωτογραφική τεκμηρίωση
- ευρήματα



Εικόνα 2.2 Αντίγραφο από καταγραφή δύτε στην ανασκαφή του MaryRose,1982 (MaryRoseTrust)

Ένας πολύ χρήσιμος τρόπος για τον συσχετισμό των αντικειμένων μεταξύ τους και με το περιβάλλον είναι η διαγραμματική αναπαράσταση της πορείας της ανασκαφής με τη μέθοδο της στρωματογραφίας. Τα σχέδια που δημιουργούνται παρατίθενται επιθεματικά. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως πρίντακας Harris.



Εικόνα 3

Εικόνα 2.3 Διαγράμματα στρωματογραφίας Harris (BenFerrari)

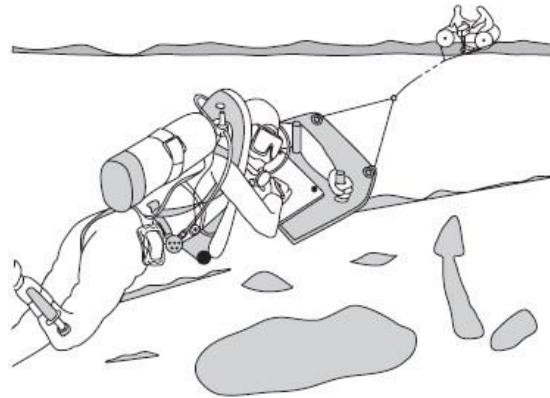
2.5 Μέθοδοι υποβρύχιας έρευνας

Για τον εντοπισμό και την έρευνα περιοχών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, χρησιμοποιούνται μέθοδοι αρχαιολογικών διασκοπήσεων όπως είναι οι μαγνητικές διασκοπήσεις, ακουστικά συστήματα, δορυφορικές εικόνες υψηλής ευκρίνειας και αεροφωτογραφίες ρηχών νερών. Εκτός από την επιστράτευση της σύγχρονης τεχνολογίας οι παραδοσιακοί τρόποι έρευνας με δύτες-αρχαιολόγους, όταν φυσικά το βάθος το επιτρέπει είναι εξίσου αποτελεσματικές. Ο υποβρύχιος χρόνος είναι πολύ διαφορετικός από τον επίγειο. Σύμφωνα με μελέτες σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα υπολογίζεται ότι ο χρόνος εργασίας αυξάνεται κατά 30% για βάθος 3 μέτρα σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο επιφανείας. Αυτό συμβαίνει γιατί απαιτούνται περισσότερα καταδυτικά συνεργεία για να βγεί συγκεκριμένος όγκος δουλειάς σε συγκεκριμένο χρόνο, δεδομένου ότι το προσωπικό χρειάζεται ανάπαυση. Συνυπολογίζοντας τον καιρό, τα ρεύματα, την ορατότητα και τα όποια άλλα προβλήματα έχει ένα τόσο ξένο περιβάλλον τότε ο απαιτούμενος χρόνος εργασίας γιγαντώνεται.

Για να είναι λοιπόν αποτελεσματική η έρευνα ακολουθούνται διάφορες τεχνικές:

Συρόμενη αναζήτηση

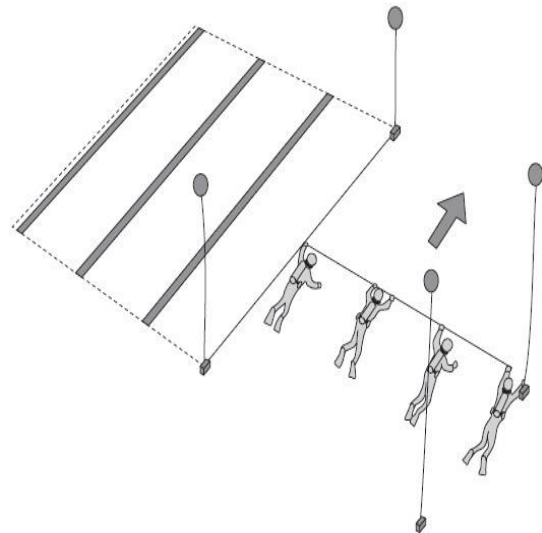
Πρόκειται για μια κοινή μέθοδο αρχαιολογικής αναζήτησης. Ο δύτες κινείται είτε συρόμενος από πλοίο επιφανείας είτε με υποβρύχιο προωθητικό όχημα πάνω από τον βυθό. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από την ορατότητα, την εμπειρία του δύτε και την ταχύτητα κίνησης. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το κόστος, και η δυσκολία εντοπισμού της θέσης.



Εικόνα 2.4 Συρόμενη αναζήτηση (BenFerrari)

Σάρωση καννάβου σε ευθεία διάταξη

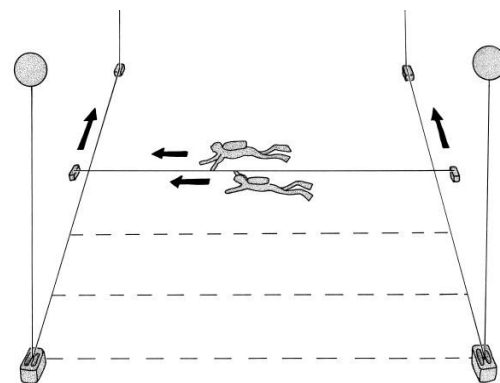
Το σύστημα αυτό βασίζεται στην σάρωση ενός καννάβου τοποθετημένου πάνω από το αντικείμενο από 2 έως 6 δύτες οι οποίοι κινούνται επί μιας ευθείας γραμμής. Μνεία γίνεται στη σωστή διατήρηση αποστάσεων μεταξύ των δυτών για να μεγιστοποιείται η κάλυψη της σάρωσης. Η τεχνική αυτή απαιτεί καλό συγχρονισμό μεταξύ των δυτών, αποτελεσματική επικοινωνία και συντονισμό. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η επί τόπου καταγραφή της θέσης ενός ευρήματος με τη μέθοδο των ορθογωνικών συντεταγμένων. Εναλλακτικά τοποθετούνται σημάδια και η καταγραφή γίνεται σε δεύτερο χρόνο. Η μέθοδος είναι εξαιρετικά αποτελεσματική σε ρηχά νερά.



Εικόνα 2.5 Σάρωση σε ευθεία διάταξη (BenFerrari)

Σάρωση Jackstay - Σάρωση διαδρόμου

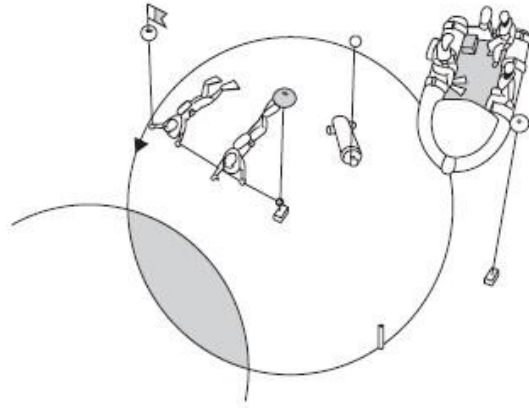
Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δυο μακριές μεταλλικές γραμμές που τοποθετούνται παράλληλα οριζοντάς την περιοχή αναζήτησης σε αποστάσεις που κυμαίνονται από 10 έως 50 μέτρα, αναλόγως την περίπτωση. Μια τρίτη μεταλλική γραμμή, ελαφρότερη, τοποθετείται κάθετα μεταξύ των δύο. Οι δύτες ξεκινούν από τις δύο άκρες της γραμμής αυτής και κρατώντας την με το ίδιο χέρι κολυμπούν προς την απέναντι μεριά. Αφού ολοκληρώσουν την αναζήτηση στη γραμμή, την μεταφέρουν σε προσυμφωνημένη απόσταση. Πρόκειται για μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ανιχνευτές.



Εικόνα 2.6 Σάρωση Jackstay (Graham Scott)

Κυκλική Σάρωση

Πρόκειται για ένα απλό σύστημα αναζήτησης, που είναι χρήσιμο σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας. Απαιτεί εξοπλισμό που μπορεί εύκολα να μεταφερθεί από τους δύτες. Χρησιμοποιείται συνήθως όταν αναζητείται θέση ενός αντικειμένου που είναι γνωστό ότι υπάρχει στη περιοχή. Ένα σημείο τοποθετείται στο πυθμένα και δρα ως κέντρο του κύκλου αναζήτησης. Οι δύτες κολυμπούν κυκλικά γύρω από αυτό χρησιμοποιώντας μια μετροταινία για να υλοποιούν τις ακτίνες αναζήτησης και μια πυξίδα για να γνωρίζουν πότε έχουν κλείσει έναν κύκλο. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σαρώσεων εξαρτώνται από την ορατότητα και τη φύση του αντικειμένου που αναζητείται. Μόλις αυτό εντοπιστεί η θέση του καταγράφεται με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων και με την ανάλογη ακρίβεια (μαγνητική πυξίδα και μετροταινία).



Εικόνα 2.4 Κυκλική αναζήτηση (BenFerrari)

2.6 Καταστροφικές Τεχνικές Έρευνας

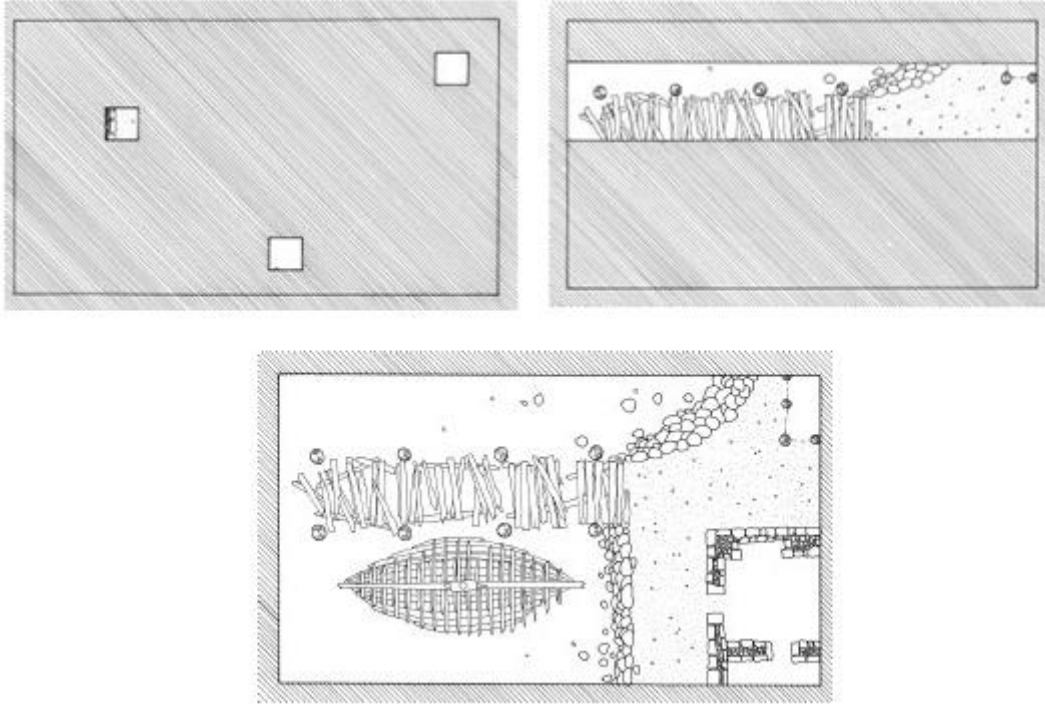
Διάφορες τεχνικές έχουν υιοθετηθεί και αξιολογηθεί με άξονα την ισορροπία μεταξύ της λαμβανόμενης πληροφορίας και του αντίκτυπου της επέμβασης στο αντικείμενο. Οι μέθοδοι έρευνας είναι διάφορες όπως ο καθετηριασμός, η δειγματοληψία με χρήση δοκιμαστικών τομών και η ανασκαφή. Αξιοσημείωτη είναι και η αύξηση του κόστους σε σχέση με τις αντίστοιχες επίγειες διαδικασίες.

Η ανασκαφή θεωρείται από τους αρχαιολόγους ως η τελευταία λύση στην οποία πρέπει να καταφύγουν κατά την έρευνα ενός υποβρύχιου αρχαιολογικού χώρου. Καθώς η διεθνής αρχαιολογική κοινότητα έχει υιοθετήσει την θεωρία της διατήρησης *insitu*, μια ανασκαφή δικαιολογείται για δύο λόγους: Όταν τα ερωτήματα που έχουν τεθεί δεν μπορούν να απαντηθούν με τις προαναφερθείσες τεχνικές καταγραφής και αναζήτησης και όταν το χώρο υπόκειται σε κάποιο είδος απειλής (Adams, 2002). Ο λόγος που η ανασκαφή θεωρείται ως έσχατο μέσο έρευνας είναι γιατί η διαδικασία αυτή είναι μη αναστρέψιμη και καταστροφική, γεγονός που ισχύει και στις μη ενάλιες περιπτώσεις. Μόνο με προσεκτικό σχεδιασμό και συνεχή καταγραφή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μεγιστοποιείται η λήψη και ερμηνεία της πληροφορίας. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό έχει λάβει η ανάπτυξη φωτογραμμετρικών τεχνικών στο υποβρύχιο περιβάλλον (βλ. Κεφάλαιο 3).

Ανασκαφή

Ορίζεται ως η ελεγχόμενη αφαίρεση των ευρημάτων με σκοπό την κατανόηση των χρονικών, χωρικών και περιβαλλοντικών τους συσχετίσεων. Απαιτεί εμπειρία για να είναι αποτελεσματική. Ειδικά για το υποβρύχιο περιβάλλον η εμπειρία αποκτάται δύσκολα λόγω της πολύ περιορισμένης χρονικής διάρκειας της εργασίας. Οι βασικές αρχές της ανασκαφής είναι ίδιες με την επίγεια. Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός, σχολαστικότητα και ελεγχόμενες κινήσεις. Το πιο αποτελεσματικό εργαλείο του

αρχαιολόγου είναι το χέρι του, ευαίσθητο και ακριβές. Υπάρχει ποικιλία εργαλείων και συστημάτων που μπορεί να χρησιμοποιήσει όπως ειδικά μυστριά και βούρτσες. Ο τρόπος εκσκαφής περιλαμβάνουν ανοίγματα δοκιμαστικών οπών, κάθετες τομές ιδανικές για στρωματογραφία και ορύγματα συγκεκριμένων διαστάσεων αναλόγως των ενδείξεων που υπάρχουν για πιθανή παρουσία αντικειμένων. Είναι εμφανές ότι κάθε τεχνική παρέχει διαφορετική πληροφορία για τον αρχαιολογικό χώρο (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8 Τεχνικές Ανασκαφή, δοκιμαστικές τρύπες, τομές (GrahamScott)

Τα βασικά βήματα της ανασκαφής είναι δύο. Αρχικά γίνεται το "σκάψιμο" για να αποκαλυφθεί το αντικείμενο και να καταγραφεί, και έπειτα η απομάκρυνση του υλικού. Για να απομακρυνθούν τα υλικά χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές αναρρόφησης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην ένταση της αναρρόφησης για να αποφευχθεί πιθανή καταστροφή των ευρημάτων. Η συσκευή δεν έχει σκοπό την εκσκαφή αλλά την απομάκρυνση του υλικού που ο δύτες ανασκάπτει.



Εικόνα 2.9 Συσκευή αναρρόφησης (GrahamScott)

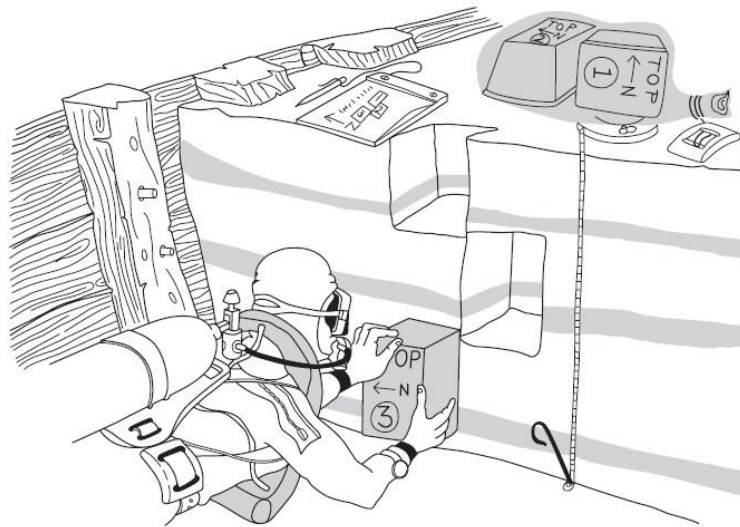
Δειγματοληψία

Δείγματα συλλέγονται από τον αρχαιολογικό χώρο για διάφορους λόγους όπως είναι η αναγνώριση οργανικών καταλοίπων, η χρονολόγηση κ.λπ. Για να καταφύγει στη μέθοδο της δειγματοληψίας ο αρχαιολόγος πρέπει να ικανοποιούνται κάποια κριτήρια:

- Πρέπει να υπάρχουν ενδείξεις ότι το δείγμα θα περιέχει ίχνη που θα μπορούν να δώσουν πληροφορία που αφορά στο παρελθόν.

- Πρέπει να υπάρχει λόγος, δηλαδή πρέπει η ανάλυσή του να απαντά σε συγκεκριμένα ερωτήματα που έχουν τεθεί πριν τη συλλογή του δείγματος.
- Ο τρόπος μελέτης του δείγματος πρέπει να έχει προκαθοριστεί. Οι διαβουλεύσεις με τους ειδικούς(π.χ. εργαστήρια ραδιοχρονολόγησης) πρέπει να έχουν γίνει στο πρώιμο στάδιο της αρχαιολογικής έρευνας.

Όπως γράφεται και παραπάνω η μελέτη της στρωματογραφίας είναι σημαντικό στάδιο. Για την δημιουργία των χαρακτηριστικών του εκάστοτε στρώματος είναι απαραίτητο να λαμβάνονται δείγματα και να αναλύονται εργαστηριακά για την δημιουργία ενός αξιόπιστου προφίλ. Οι αναλύσεις αυτές μπορεί να είναι ραδιοχρονολόγηση άνθρακα, δένδροχρονολόγηση για ξύλινα τμήματα κ.ά. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος δειγματοληψίας είναι η λήψη πυρήνων και στηλών. Τα δείγματα λαμβάνονται εισάγοντας ένα καλούπι από μέταλλο ή πλαστικό με τρόπο τέτοιο ώστε να διατηρείται σωστή χρονολογική σειρά.

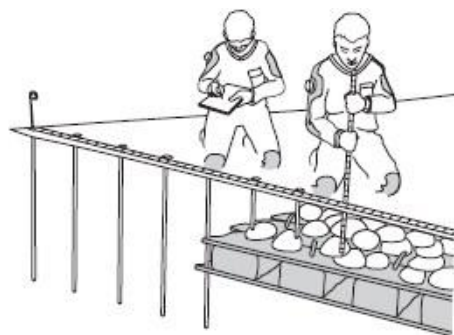


Εικόνα 2.10 Δειγματοληψία πυρήνων (BenFerrari)

Καθετηριασμός (Probing)

Είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αντικειμένων και κατασκευών κάτω από τα στρώματα των ιζημάτων του βυθού. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από το επίπεδο διατήρησης των ευρημάτων και το βάθος στο οποίο είναι θαμμένα, και πρόκειται για υποκειμενική μέθοδο καθώς εξαρτάται από την αίσθηση της αφής και μερικές φορές η μέτρηση και η ερμηνεία δυσκολεύει. Όπως και με τη δειγματοληψία πυρήνων μπορεί να

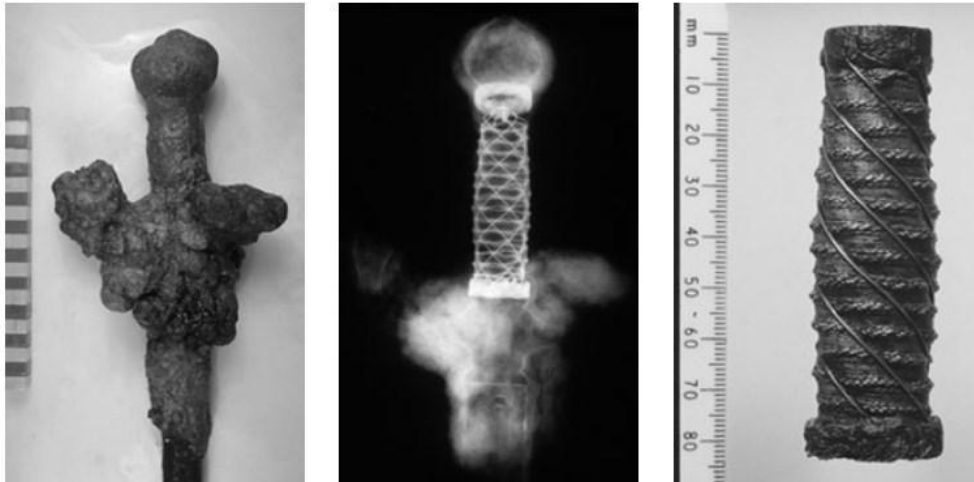
καταστεί επικίνδυνη για την ακεραιότητα των αρχαιολογικών ευρημάτων και πρέπει να χρησιμοποιείται με γνώση των συνεπειών του. Ο εξοπλισμός μπορεί να είναι πολύ απλός όπως μια μεταλλική ράβδος ή ένας σωλήνας.



Εικόνα 2.11 Μέθοδος Καθετηριασμού (BenFerrari)

2.6 Συντήρηση Ευρημάτων

Τα ευρήματα που αφαιρούνται από την τοποθεσία της ανασκαφής έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον, κάτι που επιταχύνει δραματικά τις διαδικασίες διάβρωσης και αποσύνθεσης που το νερό είχε "παγώσει". Για το λόγο αυτό απαιτείται η άμεση εκκίνηση της διαδικασίας συντήρησης. Η διαδικασία αυτή αφορά στον τομέα της επιστήμης των υλικών. Πρέπει να προσδιοριστεί ο τύπος του ευρήματος για να καθοριστεί και η σωστή διαδικασία συντήρησης. Ένας τρόπος είναι η ακτινογράφιση του ευρήματος (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 Ευρήμα, Ακτινογραφία, λαβή ξίφους έπειτα από συντήρηση (Colin Martin)

2.7 Προστασία αρχαιολογικού Χώρου

Συνήθως μετά το πέρας της ανασκαφικής διαδικασίας και γενικότερα της αρχαιολογικής έρευνας, ο χώρος χρήζει προστασίας από τα φυσικά φαινόμενα και την ανθρώπινη επέμβαση. Ο συνηθέστερος τρόπος είναι η ταφή. Επίσης η χρήση σακίων άμμου είναι κοινή πρακτική αν και ανεβάζει αισθητά το κόστος. Επίσης η χρήση τεχνητών πλακών από ειδική μεμβράνη ή ακόμα και πλαστικό γρασιδί από καταστήματα κηπουρικής μπορεί παρέχει επαρκή προστασία. Ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται πάντα από τα διαθέσιμα χρήματα και τον χρόνο. Εάν η προστασία *in situ* των ευρημάτων δεν είναι δυνατή για οποιοδήποτε λόγο, τότε η ανάκτηση των πιο ευαίσθητων ευρημάτων είναι η μόνη μέθοδος που θα εγγυηθεί την προστασία τους.

2.8 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο κλασικός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων της έρευνας από τους αρχαιολόγους είναι ο χάρτης, όπου αναπαριστάται η χωρική πληροφορία που συλλέχθηκε από τα άπειρα δελτία καταγραφής. Πλέον, η σύγχρονη εποχή έχει δώσει τη δυνατότητα της αποτελεσματικής διαχείρισης της πληροφορίας αυτής με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Τοπογραφικά, ιστορικά, γεωλογικά στοιχεία συνδυάζονται με τα ευρήματα και δίνουν ολοκληρωμένη εικόνα της χωρικής πληροφορίας. Στοιχεία που συλλέχθηκαν πριν αρκετά χρόνια μπορούν να συνδυαστούν πλέον με δεδομένα SONAR, μαγνητικά και GPS. Η χρησιμότητα των ΣΓΠ είναι καθοριστική στην ολοκληρωμένη διαχείριση των αρχαιολογικών μνημείων σε στεριά αλλά και θάλασσα με άμεσο όφελος την αρτιότερη διασφάλισή τους και την περαιτέρω εκτίμηση νέων θέσεων έρευνας. Φυσικά όπου γίνεται χρήση ενός ΣΓΠ, η συμβολή του σύγχρονου Αγρονόμου & Τοπογράφου Μηχανικού είναι τουλάχιστον καθοριστική αν όχι αδήριτη ανάγκη.

Κεφάλαιο 3

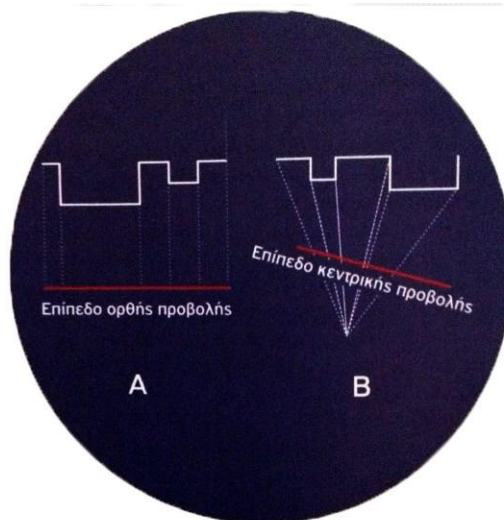
Υποβρύχια Φωτογραμμετρία

3.1 Στοιχεία Φωτογραμμετρίας

Η επιστήμη με τη βοήθεια της οποίας αποκτάται μετρητικά αξιόπιστη πληροφορία για την μορφή ενός αντικειμένου, το μέγεθος και τη θέση του στο χώρο μέσα από διαδικασίες καταγραφής, επεξεργασίας και μέτρησης φωτογραφικών εικόνων ονομάζεται **φωτογραμμετρία**(φώς+γραμμή+μετρώ).

Η φωτογραφία/εικόνα αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο ταχύτατης και αντικειμενικής συλλογής θεματικής και μετρητικής πληροφορίας υψηλής πυκνότητας που συντελεί στη δραστική μείωση του χρόνου εργασίας άρα και παραμονής στο πεδίο(μείζονος σημασίας στις υποβρύχιες εργασίες). Η μετρητική αξιοπιστία της φωτογραφίας μπορεί να φτάσει υψηλά επίπεδα πλέον με την ραγδαία ανάπτυξη των ψηφιακών δεκτών καταγραφής εικόνας αλλά και της όρασης υπολογιστών(computervision).

Ο χάρτης αποτελεί μια υπό κλίμακα ορθή προβολή του εδάφους, σε αντίθεση με τη φωτογραφία που αποτελεί μια κεντρική προβολή (Εικόνα 3.1). Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σημεία στο χώρο προβάλλονται μέσω του προβολικού κέντρου, που υλοποιείται από το σύστημα φακών της μηχανής.

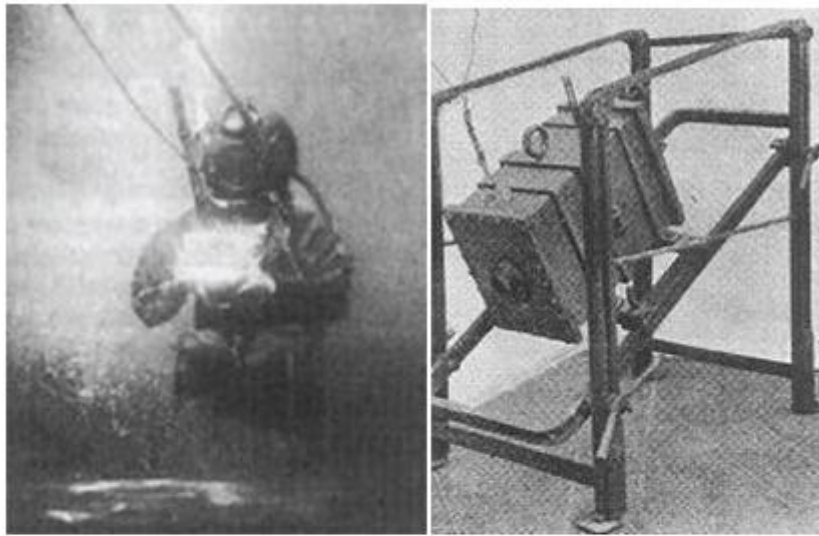


Εικόνα 3.1 Ορθή και κεντρική προβολή (Μουζάς,2010)

Για να προβληθούν τα σημεία από τη φωτογραφία, μέσω της κεντρικής προβολής στο επιθυμητό επίπεδο αναφοράς είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι παράμετροι των προσανατολισμών των εικόνων(και του μοντέλου). Οι παράμετροι υπολογίζονται με μέτρηση σημείων ελέγχου (φωτοσταθερά) με τοπογραφικές μεθόδους και ακρίβεια μέτρησης τουλάχιστον 2 φορές μεγαλύτερη από την ζητούμενη ακρίβεια του χάρτη. Ο χάρτης αυτός ονομάζεται ορθοφωτοχάρτης καθώς είναι προϊόν ορθής προβολής διορθωμένο από σφάλματα αναγλύφου.

3.2 Υποβρύχια φωτογραφία

Το Φεβρουάριο του 1856 ο Άγγλος δικηγόρος William Thompson τράβηξε την πρώτη υποβρύχια φωτογραφία, ενώ η πρώτη υποβρύχια φωτογραφική μηχανή κατασκευάστηκε από τον Γάλλο φυσιοδίφη Louis Boutan και το μηχανικό Joseph David το 1893. Για το λόγο αυτό ο Louis Boutan θεωρείται ο πατέρας της υποβρύχιας φωτογραφίας. Στις αρχές του 20ού αιώνα ο αμερικάνος δημοσιογράφος Jack Williamson εφηύρε μια συσκευή για υποβρύχια κινηματογράφηση. Το 1927 το περιοδικό National Geographic δημοσίευσε την πρώτη έγχρωμη υποβρύχια φωτογραφία των Charles Martin και Dr. William H. Longley. Το έτος 1957 όμως ήταν ορόσημο γιατί παρουσιάστηκε η αμφίβια φωτογραφική μηχανή Calypso (μετέπειτα Nikonos) από τους Jean DeWouters και Jacques-Yves Cousteau.



Εικόνα 3.2 Η πρώτη υποβρύχια φωτογραφία, η πρώτη υποβρύχια μηχανή και η μηχανή Calypso

3.3 Υποβρύχια Φωτογραμμετρία και Αρχαιολογία

Η φωτογραμμετρία είναι αποδεδειγμένα μια αποτελεσματική μέθοδος για την τεκμηρίωση αρχαιολογικών ευρημάτων μέσα στο νερό. Τα πλεονεκτήματα είναι εμφανή. Υψηλή ακρίβεια στη καταγραφή, τη μέτρηση και ερμηνεία των εικόνων με ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής στο πεδίο, κάτι που είναι μείζονος σημασίας σε ένα ξένο περιβάλλον όπως είναι το νερό. Στη πορεία των χρόνων η αναγκαιότητα παραγωγής ακριβών και λεπτομερών δισδιάστατων (και τρισδιάστατων τη σύγχρονη

εποχή) χαρτών με μικρό κόστος αποτέλεσε πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών.

3.3.1 Τα πρώτα βήματα

Η εφεύρεση του ρυθμιστή πίεσης(μπουκάλια οξυγόνου) τη δεκαετία του '50 από τους Jack-YvesCousteau και EmileGagnan (AquaLung) επέτρεψε στους αρχαιολόγους να φτάνουν σε αρχαιολογικούς χώρουςκάτω από το νερό και έδωσε τη δυνατότητα να μελετώνται ναυάγια. Έπειτα από πειραματισμούς κατάλαβαν ότι έπρεπε να καταδυθούν οι ίδιοι για να διασφαλίσουν ότι οι επίγειες επιστημονικές μέθοδοι εφαρμόζονταν σωστά και υποβρυχίως. Επίγειες μέθοδοι ανασκαφής βασισμένες σε αρχές γεωλογίας προσαρμόστηκαν στο υποβρύχιο περιβάλλον. Βυθοκόροι αναρρόφησης τροφοδοτούμενοι με αέρα ή νερό για να αφαιρούν εναποθέσεις χωρίς να μετακινούνται τα ευρήματα κατασκευάστηκαν ειδικά για τέτοιους σκοπούς. Από την άλλη όμως, τεχνικές όπως οι τομές εδάφους δεν μπορούσαν να προσαρμοστούν εύκολα καθώς απαιτούσαν τη χρήση οπτικών εργαλείων (θεοδόλιχα,χωροβάτες). Οι παραδοσιακές μέθοδοι ήταν ασύμφωτες καθώς απαιτούσαν πολύ χρόνο παραμονής στο πεδίο, πράγμα αδύνατον.

Τα πρώτα πειράματα υποβρύχιας φωτογραμμετρίας για αρχαιολογικούς σκοπούς ξεκίνησαν τη δεκαετία του '60 (Bass,1970 "ArchaeologyUnderWater"). Την ίδια δεκαετία το Ναυτικό Ωκεανογραφικό Γραφείο στην Ουάσιγκτον πραγματοποίησε το πρώτο πείραμα σε ένα υποβρύχιο, υπό την καθοδήγηση του JosephPollio (Pollio,1968). Έπειτα διεξήχθησαν κι άλλα πειράματα που συμπεριλάμβαναν τις βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται σήμερα (Ciani κ.ά., 1971; Faig, 1979; Hoehle, 1971; Pollio, 1971). Από τότε το ενδιαφέρον της αρχαιολογίας για φωτογραμμετρικές εφαρμογές συνέχισε να μεγαλώνει (Bass&Rosencrantz, 1973; Tchernia κ.ά, 1978).

Το 1964 το υποβρύχιο Asherah, με χρηματοδότηση τηςNGS (NationalGeographicSociety) εκτέλεσε την πρώτη του αποστολή στην Τουρκία και πήρε τις πρώτες στερεοσκοπικές εικόνες στη Νήσο Πλάτη (YassiAda) από ένα βυζαντινό ναυάγιο σε βάθος 35 μέτρων(Bass 1970; Bass&Rosencrantz, 1973). Για την λήψη των εικόνων χρειάστηκε ένας μεγάλος και πολύπλοκος μηχανισμός. Φωτογραμμετρική αποτύπωση επίσης έγινε σε ναυάγιο στη Μασσαλία από τον γάλλο αρχαιολόγο BernardLioux (Lioux,1973). Ενώ στο υποβρύχιο Asherah είχαν τοποθετηθεί δύο συγχρονισμένες κάμερες,οLioux χρησιμοποίησε μεταλλικό πλαίσιο για να καθοδηγεί την κάμερα και να λαμβάνει στερεοσκοπικές λήψεις. Με τον τρόπο αυτόέπρεπε να εφαρμόσει ισχυρούς γεωμετρικούς περιορισμούς. Οι λήψεις έπρεπε να γίνουν σύμφωνα με την ανθρώπινη φυσιολογία της στερεοσκοπικής όρασης, δηλαδή να είναι παράλληλοι οι οπτικοί άξονεςκαι χωρίς κλίσεις. Αυτό βοήθησε και την μετέπειτα επεξεργασία στα περορισμένων δυνατοτήτων αναλογικά όργανα φωτογραμμετρικής απόδοσης.

Οι Elfickκαι Fryer(1983) χρησιμοποίησαν μια πλατφόρμα από plexiglastπου προσάρμοσαν στην επιφάνεια της θάλασσας για να τραβήξουν φωτογραφίες σε συνθήκες δυο μέσων και να δημιουργήσουν χάρτη μεγάλης κλίμακας (1:180). Ο Π.Αγραφιώτης(2012) χρησιμοποίησε την ίδια μέθοδο, και αναπτύσσοντας ειδική μέθοδο αντιμετώπισης της διάθλασης αποτύπωσε αρχαιολογικό χώρο στη περιοχή της Επιδάουρου. Την ίδια μέθοδο χρησιμοποίησε και η Ι.Χουβαρδά (2014) για γεωμετρική τεκμηρίωση βυθισμένου μνημείου.Η Ε. Διαμαντή(2011) αποτύπωσε φωτογραμμετρικά αρχαίο ναυάγιο που εντοπίστηκε στο νότιο Ευβοϊκό σε βάθος 40 μέτρων αναδεικνύοντας την συμβολή της υποβρύχιας φωτογραμμετρίας στην αρχαιολογική έρευνας

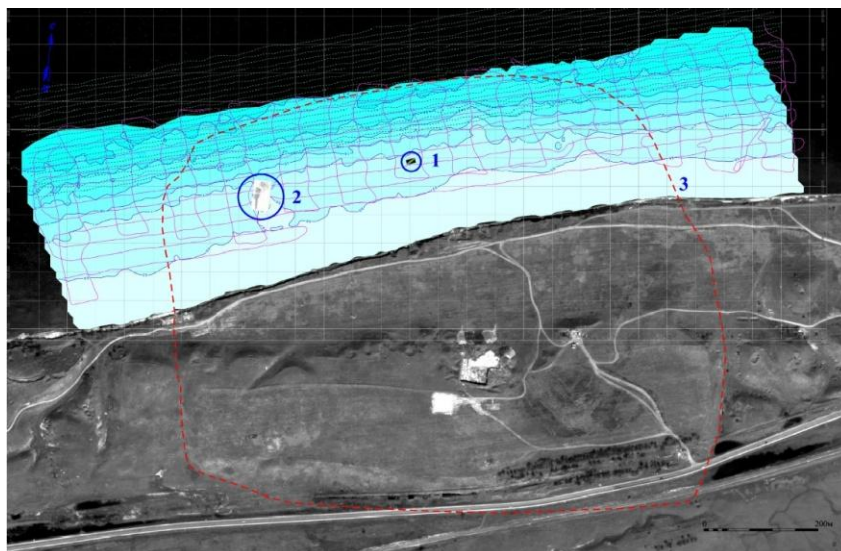


Εικόνα 3.3Υποβρύχιες εργασίες συνεργείου στο ναυάγιο Planier, Marseille(Lioux,1973)

3.3.2 Το ναυάγιο στην αρχαία ελληνική Φαναγόρεια

Η Φαναγόρεια ιδρύθηκε στα μέσα του 6ου αιώνα π.Χ. από κάτοικους των Αβδήρων και αποτέλεσε τη μεγαλύτερη σε έκταση ελληνική αποικία στην περιοχή της χερσονήσου Ταμάν στην Ρωσία. Κατά την κλασσική περίοδο αποτέλεσε την πρωτεύουσα τουΚιμμέριου Βοσπόρου και ήκμασε έως τα τέλη του 1ου αιώνα π.Χ. Με την στάθμη του νερού της Μαύρης θάλασσας να ανεβαίνει από την αρχαιότητα, περίπου το ένα τρίτο του οικισμού βρίσκεται σήμερα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, από συνδυασμό πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων, υδρογραφικές αποτυπώσεις και χαρτογράφηση αρχαιολογικών ευρημάτων η αρχαία ακτογραμμή κείται περίπου 250 μέτρα από την σύγχρονη ακτογραμμή προς το πέλαγος.

Το 2012 στο πλαίσιο της υποβρύχιας αναζήτησης της ακτογραμμής ανακαλύφθηκε από τους Zhukovsky και Kuznetsovένα ξύλινο πλοίο θαμμένο κάτω από 1.5 μέτρο ιζήματος. Η ανακάλυψη έγινε 135 μέτρα από τις ακτές του κόλπου Ταμάν σε βάθος 1 μέτρου, μέσα στο πλημμυρισμένο κομμάτι του αρχαίου οικισμού.Το σημείο αυτό κάνει το εύρημα ιδιαίτερα σημαντικό για την ανακατασκευή της αρχαίας ακτογραμμής καθώς η θέση του υποδεικνύειότι θάφτηκε πάνω ή πολύ κοντά στην ακτή.

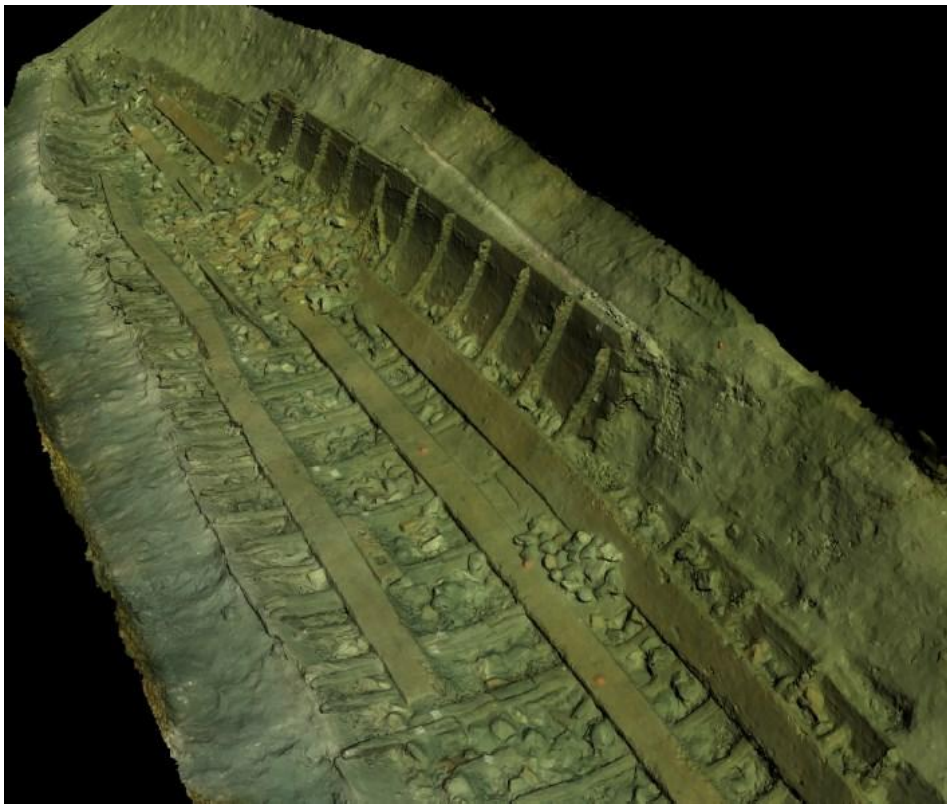


Εικόνα 3.4 1. Το αρχαίο ναυάγιο, 2. Αποβάθρα ρωμαϊκής περιόδου(Zuckovsky κ.ά. ,2013)

Η πλήρης ανασκαφή του ναυαγίου ελλοχεύει τον κίνδυνο έκθεσης των ξύλινων στοιχείων του πλοίου στο περιβάλλον με καταστροφικές συνέπειες. Επίσης τα ρηγά νερά (κυματισμοί) σε συνδυασμό με δυσμενή καιρικά φαινόμενα είναι ένας ακόμα επιβαρυντικός παράγοντας για την ανασκαφή. Ο περιορισμένος χρόνος εργασιών καταγραφής και τεκμηρίωσης του ναυαγίου απαίτησε τη χρήση της φωτογραμμετρικής μεθόδου για την αποτύπωση.

Οι διαστάσεις της ανασκαφής ήταν 120 m² και το μέγιστο βάθος 3 μέτρα. Το ναυάγιο έχει μήκος 15,1 m και μέγιστο πλάτος 2,4 m. Οι συνθήκες ορατότητας ήταν αρκετά κακές λόγω της διατάραξης του νερού από κυματισμούς. Πριν την φωτογράφιση τοποθετήθηκαν σημεία έλεγχου (300 περίπου) με χρωματιστές πινέζες κατά μήκος του σκελετού του πλοίου, τα οποία μετρήθηκαν από την ακτή με γεωδαιτικό σταθμό. Η απαραίτητη επικάλυψη στις φωτογραφίες επιτεύχθηκε με τοποθέτηση της κάμερας σε ειδική κατασκευή μεταλλικής πλατφόρμας ισοδιάστασης 8 μέτρων κατά μήκος και 2 μέτρων κατά πλάτος η οποία πακτώθηκε στον πυθμένα. Η κάμερα κινείτο χειροκίνητα λαμβάνοντας φωτογραφίες σε ίσες αποστάσεις. Έπειτα από πειραματικές λήψεις βρέθηκε η βέλτιστη κατανομή (33 γραμμές με 12 εικόνες ανά γραμμή). Η χρήση του λογισμικού Photoscan της Agisoft το οποίο διαθέτει αλγόριθμο αυτομάτης εξαγωγής νέφους σημείων για τμήματα της χερσαίας ανασκαφής στον οικισμό ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική και οι ερευνητές αποφάσισαν να το χρησιμοποιήσουν και για το ναυάγιο. Μετά το πέρας των εργασιών ο σκελετός του πλοίου σκεπάστηκε με άμμο για να μην καταστραφεί από τις συνθήκες περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή φωτογραμμετρικής μεθόδου επέτρεψε στην ανασκαφική ομάδα να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο και ακριβές αντίγραφο τριών διαστάσεων του ευρήματος σε χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας εργασιών πεδίου.



Εικόνα 3.5 3D μοντέλο του Φαναγόρειου ναυαγίου (Zuckovsky κ.ά. ,2013)

3.3.3 Τα ναυάγια Marzamemi και Granitola

Το 2014 το τμήμα Ανθρωπιστικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Ca'Foscari με επικεφαλής τον καταδυόμενο αρχαιολόγο Carlo Beltrame σε συνεργασία με το εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Πανεπιστημίου Αρχιτεκτονικής της Βενετίας (IUAV) με επικεφαλής τον Francesco Guerra ερεύνησαν δυο ναυάγια της Ρωμαϊκής περιόδου με φορτίο μαρμάρινων κίονες.

Το πρώτο ναυάγιο βρίσκεται κοντά στη πόλη Marzamemi (περιοχή Συρακουσών) στην νοτιοανατολική Σικελία, ανακαλύφθηκε το 1958 και φωτογραφήθηκε από τους Karitaen και Gargallo οι οποίοι το χρονολόγησαν στον 3ο αιώνα π.Χ. σύμφωνα με δύο αμφορείς που βρέθηκαν εκεί. Αποτελείται από 14 τμήματα λευκού μαρμάρου σκορπισμένα στον βυθό (Εικόνα 3.6). Το δεύτερο ναυάγιο βρίσκεται κοντά στην Granitola της νοτιοδυτικής Σικελίας και ανακαλύφθηκε το 1976 από τον G. Purpura. Χρονολογείται και αυτό στον 3ο αιώνα π.Χ. και κείται σε βάθος 3 μέτρων σε απόσταση 200 μέτρων από την ακτή. Αποτελείται από φορτίο 63 τετραγωνισμένων μαρμάρινων τμημάτων και 2 βάθρων όλα στοιβαγμένα παράλληλα (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.6 Ναυάγιο Marzamemi και Granitola (Balletti, 2015)

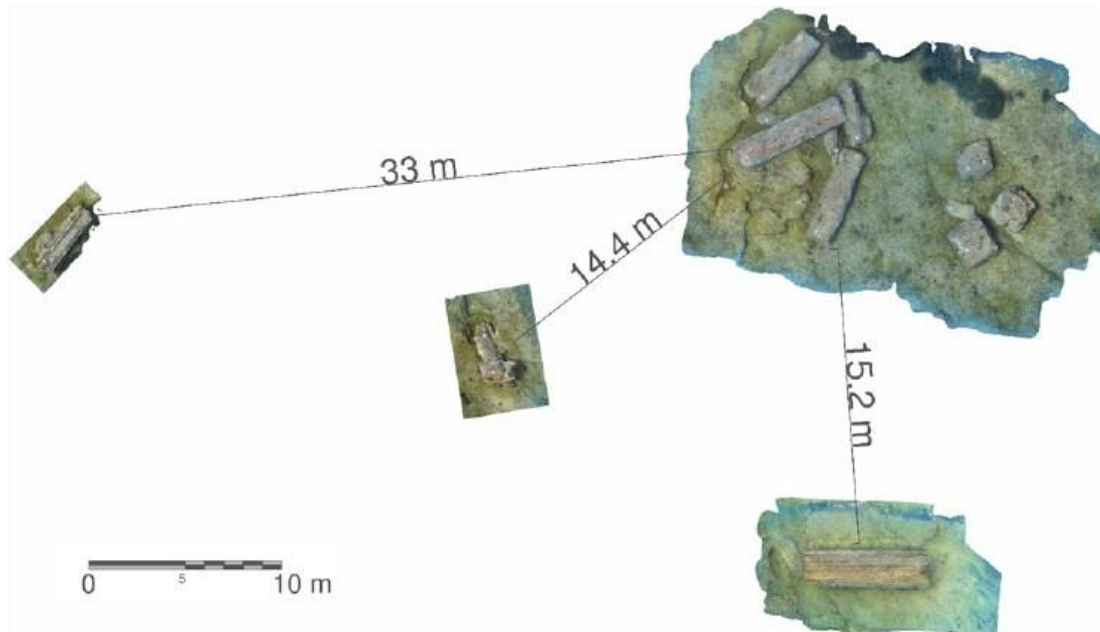
Το καθαρό νερό, οι καλές συνθήκες φωτισμού και η ισορροπία λευκού επέτρεψαν ποιοτικά καλές λήψεις από άποψη χρώματος. Λόγω της διασποράς των αντικειμένων στο πρώτο ναυάγιο οι εργασίες επιμερίστηκαν σε 4 διαφορετικά τμήματα τα οποία αργότερα συνενώθηκαν στο ίδιο σύστημα αναφοράς με τη μέθοδο του τριπλευρισμού. Μετρήσεις φωτοσταθερών έγιναν με μετροταινία και τριπλευρισμό και το σύστημα συνορθώθηκε με ελάχιστα τετράγωνα σε τοπικό αυθαίρετο σύστημα. Στο δεύτερο ναυάγιο το μικρό βάθος επέτρεψε τη χρήση GPS και τα φωτοσταθερά μετρήθηκαν με τη μέθοδο RTK, με επίγειο σταθμό αναφοράς κοντά στην ακτή. Η δημιουργία του μοντέλου έγινε με το λογισμικό Agisoft Photoscan.



Εικόνα 3.8 3D μοντέλο ναυαγίου Marzamemi με Photoscan

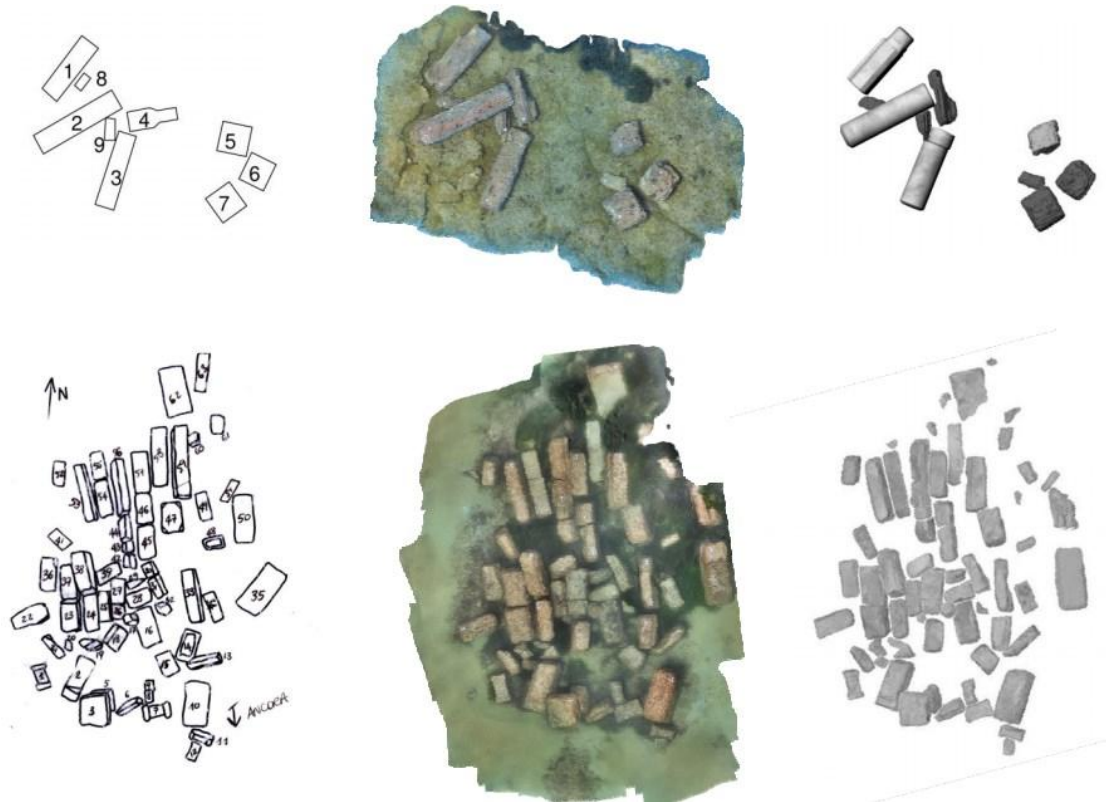


Εικόνα 3.9 3D μοντέλο ναυαγίου Granitola με Photoscan



Εικόνα 3.10 Ορθοφωτογραφία του ναυαγίου Marzamemi

Η μοντελοποίηση στον τρισδιάστατο χώρο τέτοιων ευρημάτων δίνει την δυνατότητα στους αρχαιολόγους να αντλήσουν και να ερμηνεύσουν πληροφορίες σε συνδυασμό με την υπάρχουσα γνώση και να την εμπλουτίσουν. Οι υψηλές ακρίβειες που παρέχει η μέθοδος αυτή επιτρέπει την διεξαγωγή υποθέσεων για τον τρόπο διεξαγωγής τέτοιου είδους μεταφορών εκείνη τη περίοδο μέσω ογκομετρήσεων των ευρημάτων και εισαγωγή σε 3D λογισμικά CAD.



Εικόνα 3.11 Παράθεση των διαφορετικών τρόπων καταγραφής των αντικειμένων

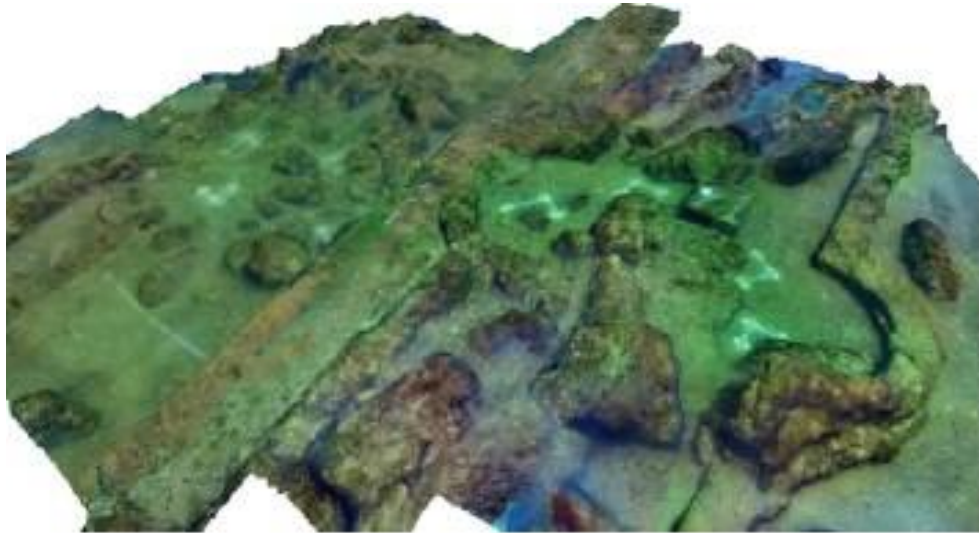
3.4 State-of-the-artφωτογραμμετρικές εφαρμογές στην αρχαιολογία

3.4.1Συνδυασμός φωτογραμμετρίας και ηχοβολιστικών συστημάτων

Τα ηχοβολιστικά ή ακουστικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογέςυδρογραφικών αποτυπώσεων διαφόρων κλιμάκων. Μπορούν να δώσουν καλά αποτελέσματα χωρίς να περιορίζονται από κακέςσυνθήκες περιβάλλοντος όπως χαμηλή ορατότητα και δεν απαιτούν επαφή με το αντικείμενο κάτι που επιτρέπει μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ σκηνης και δέκτησε σχέση με την υποβρύχιαφωτογραμμετρία. Από την άλλη όμως οι ακρίβειες που δύνανται να πετύχουν δεν είναι τόσο μεγάλες και η χρωματική πληροφορία είναι αδύνατον να αποκτηθεί.Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων μελετάται για να διαπιστωθείεάν είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση του υποβρύχιου αντικειμένουχρησιμοποιώντας βαθυμετρικούς χάρτες για την γεωαναφορά. Πρόκειται για ένα περίπλοκο έργο καθώς τα 3D δεδομένα που παράγονται είναι πολύ διαφορετικά σε ανάλυση και ακρίβεια.

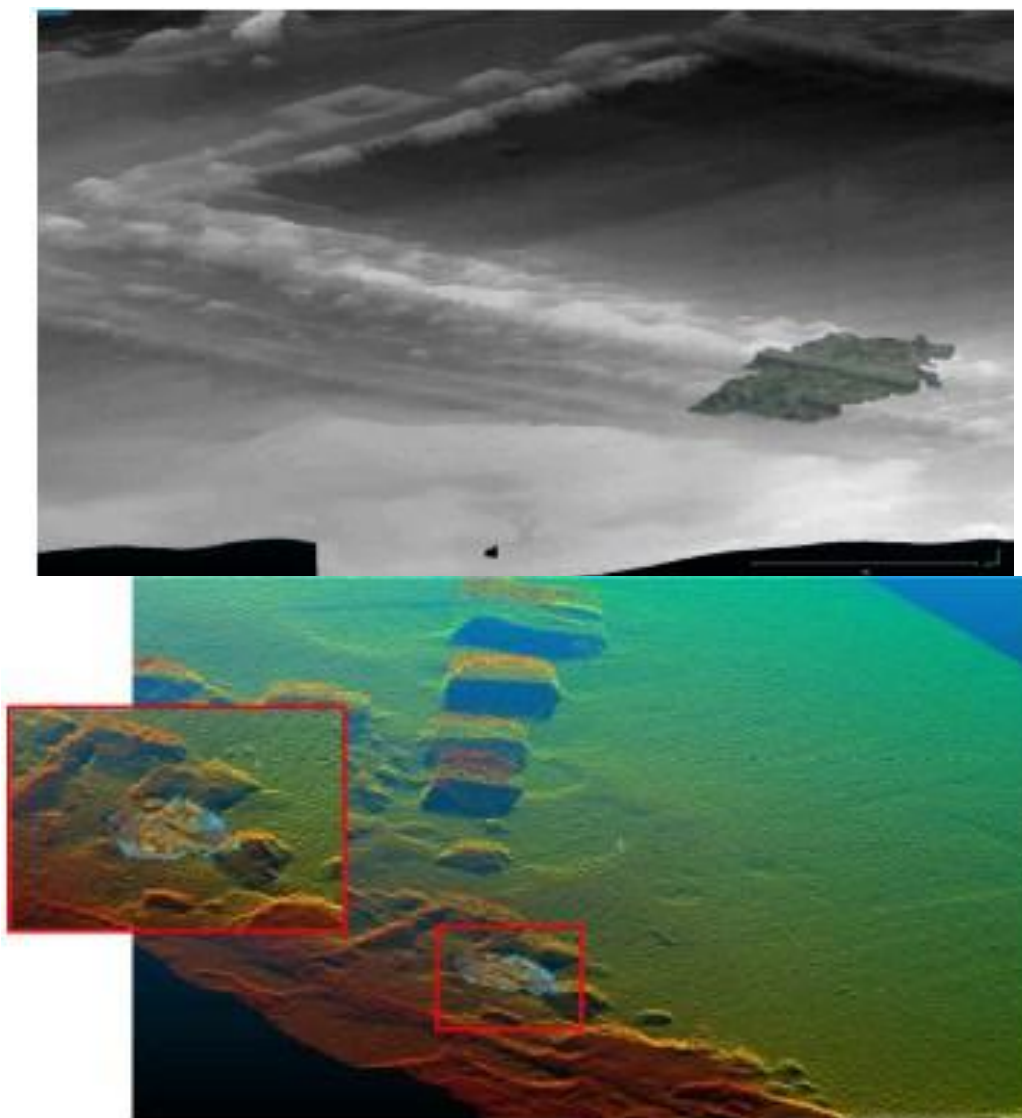
Οι F. Bruno κ.ά. διερεύνησαν την δυνατότητα συγχώνευσης μοντέλων που δημιουργήθηκαν από ακουστικά και οπτικά δεδομένα σε μια εφαρμογή στο βυθισμένο αρχαιολογικό πάρκο στην Baia της Ιταλίας. Η τοποθεσία βρίσκεταιλίγα χιλιόμετρα βόρεια της Νάπολι και ανήκει στο ηφαιστειακό σύμπλεγμα του CampiFlegrei.Εκτείνεται σε όλη την ακτή από την Cuma έως τη Νάπολι και φτάνει έως 15 μέτρα βάθος.Περιλαμβάνει αρχιτεκτονικά κατάλοιπα όπως δρόμους,κήπους, λουτρά καθώς καικεραμική.Υπάρχει υψηλή συγκέντρωση θαλάσσιας χλωρίδας, διαταράξεις του νερού από ρεύματα και κακές συνθήκες φωτισμού λόγω της θολότητας κάτι που δυσκολεύει αρκετά την φωτογράφιση. Η διαδικασία ανακατασκευής είναι παρόμοια με τις προηγούμενες που αναφέρθηκαν με τη

διαφορά ότι δεν έγιναν μετρήσεις για τη γεωαναφορά του μοντέλου. Το αντικείμενο έχει διαστάσεις 160x120 μέτρα. Για να δώσουν κλίμακα μέτρησαν πολλαπλές αποστάσεις και πέτυχαν μέσο σφάλμα 3 χιλιοστών. Για να αξιολογήσουν την ακρίβεια της ανακατασκευής έλεγξαν την απόκλιση που έχουν γραμμές θεωρητικά ευθείες.



Εικόνα 3.12 VilladeiPisoni Τρισδιάστατο μοντέλο (F.Brunok.ά. , 2015)

Για την δημιουργία του μοντέλου από ακουστικά δεδομένα χρησιμοποίησαν ηχοβολιστικό σύστημα (sonar) πολλαπλών δεσμών. Πρόκειται για σύστημα που εκπέμπει ηχητικά κύματα σε συγκεκριμένη συχνότητα και υπολογίζει το βάθος καταγράφοντας το χρόνο επιστροφής τους. Είναι κατάλληλο για παραγωγή χαρτών υψηλής ανάλυσης σε ρηχά νερά (έως 80 μέτρα) και είναι αξιόπιστο για καταγραφή δεδομένων σε περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Διαθέτει αδρανειακά συστήματα και συστήματα εντοπισμού θέσης που εξασφαλίζουν ακρίβεια μικρότερη του μέτρου. Η επεξεργασία έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Διεθνούς Οργανισμού Υδρογραφίσεων (IHO) και το τρισδιάστατο μοντέλο που παράχθηκε ταυτίστηκε με το φωτογραμμετρικό επιλέγοντας ομόλογα σημεία. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται δύο εφαρμογές σε διαφορετικά σημεία της περιοχής μελέτης. Στη πρώτη περίπτωση η ταύτιση είναι καλή στη δεύτερη περίπτωση το αποτέλεσμα δεν ήταν ικανοποιητικό λόγω των μεγάλων διαφορών στην ανάλυση. Οι ερευνητές εκτίμησαν ότι για να υπάρξει σωστή ταύτιση των δύο μοντέλων πρέπει να υπάρχουν κοινά σημεία των οποίων η ανάλυση στο τρισδιάστατο μοντέλο να είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την ανάλυση του βαθυμετρικού χάρτη. (περίπου 0,1 μέτρα).



Εικόνα 3.13 Συγκώνευση μοντέλου με βαθυμετρικό χάρτη (F. Bruno κ.ά.,2015)

3.4.2 Χρήση Ρομποτικών οχημάτων για αρχαιολογικές εφαρμογές σε μεγάλα βάθη

Τα ρομποτικά οχήματα χρησιμοποιούνται για τοπογράφηση πυθμένα από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 για αρχαιολογικούς σκοπούς. Η κατάδυση πέρα από το όριο των 50 μέτρων με χρήση συμπιεσμένου αέρα απαγορεύεται σύμφωνα με τη νομοθεσία. Απαιτείται περαιτέρω εκπαίδευση για το δύτε, χρήση εμπλουτισμένου αέρα (NITROX) και εξειδικευμένο εξοπλισμό στην επιφάνεια. Η εργασία των δυτών σε πολύ μεγάλα βάθη, τόσο από πλευράς ασφάλειας αλλά και κόστους είναι απαγορευτική. Ναυάγια σε μεγάλα βάθη δεν έχουν ερευνηθεί λόγω της δυσκολίας προσβασιμότητας. Σήμερα υπάρχει πληθώρα τρόπων εξερεύνησης του πυθμένα όπως HOV, ROV, AUV και ρυμουλκούμενα συστήματα. Κάθε σύστημα έχει τις δικές του δυνατότητες :

- Τα HOV (Human Occupied Vehicles) είναι σε χρήση από το 1960. Λόγω του περιορισμένου χρόνου βυθού, χαμηλής ταχύτητας και ανθρώπινου πιλοταρίσματος είναι περισσότερο κατάλληλα για απευθείας παρατήρηση, χαρτογράφηση μικρής κλίμακας και δειγματοληψίες παρά για λεπτομερείς, μεγάλης κλίμακας και υψηλής ανάλυσης χάρτες.
- Τα ρυμουλκούμενα συστήματα απαιτούν πλοία υποστήριξης και επιχειρούν με περιορισμένη ακρίβεια και χρόνο. Η υδροδυναμική και ο περιορισμένος έλεγχος τα καθιστά ασταθή στη διατήρηση συγκεκριμένου βάρους και χρειάζεται να διατηρούν μεγάλες αποστάσεις από τον πυθμένα. Ένα τέτοιο σύστημα ανακάλυψε το ναυάγιο του "RMS Titanic" την 1η Σεπτεμβρίου του 1985 σε βάθος 3.810 μέτρων, 400 ναυτικά μίλια νοτιοανατολικά του Newfoundland
- ROV (Remotely Operated Vehicles) Πρόκειται για υποβρύχιους μηχανισμούς υψηλής αυτοματοποίησης που εκτελούν διάφορες εργασίες κατ'εντολή του χειριστή τους που βρίσκεται στην επιφάνεια. Η τεχνολογία ανάπτυξης των ROV ωρίμασε στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εργασίες στην ωκεανογραφία, την αρχαιολογία, έρευνα και διάσωση κ.τ.λ. Το μέγιστο επιχειρησιακό τους βάθος φτάνει τα 3 χιλιόμετρα. Ένα ROV αποτελείται από το κυρίως όχημα, τον σταθμό ελέγχου, το σύστημα εναπόθεσης και καταβίβασης και τις παροχές ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης φέρει φωτογραφικές μηχανές εργαλεία μηχανικά χέρια κ.λπ. και διαθέτει σύστημα προσδιορισμού θέσης.
- Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV) άρχισαν να αναπτύσσονται στις αρχές της δεκαετίας του '60, αλλά η πραγματική ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα αυτό ουσιαστικά μετράει τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της τεχνητής νοημοσύνης. Χρησιμοποιούν μπαταρία για την παροχή ενέργειας, δεν έχουν καλώδια για τη σύνδεση με την επιφάνεια αλλά προηγμένη ασύρματη τεχνολογία και λειτουργούν αυτόνομα. Η εφαρμογή τους, προς το παρόν, είναι κυρίως για ωκεανογραφικούς σκοπούς και για εφαρμογές άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ένα τυπικό όχημα AUV ταξιδεύει με ταχύτητα 80 χλμ./ω και παρέχει δυνατότητα ταχύτητας 4D αποτύπωσης βυθού, δηλαδή επαναλαμβανόμενης προγραμματισμένης αποτύπωσης.

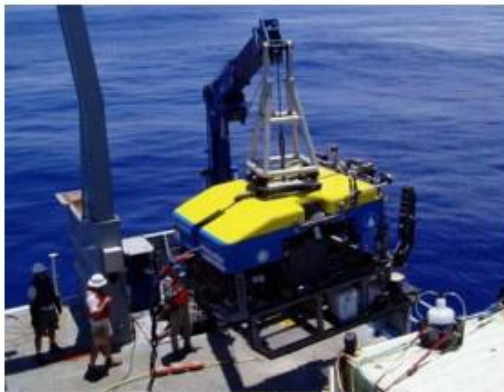
Όλα τα οχήματα διαθέτουν αισθητήρες πλοήγησης όπως σόναρ, αναμεταδότες, DVL, βυθόμετρο και αισθητήρες συλλογής δεδομένων όπως μηχανές βιντεοσκοπησης, φωτογράφισης, στερεοσκοπικές κάμερες αλλά και αισθητήρες κατάλληλους για συλλογή χημικών/περιβαλλοντικών δεδομένων για ωκεανογραφικές και βιολογικές μελέτες.



ALVIN submersible, 4500m (WHOI)



THETIS submersible, 610m (HCMR)



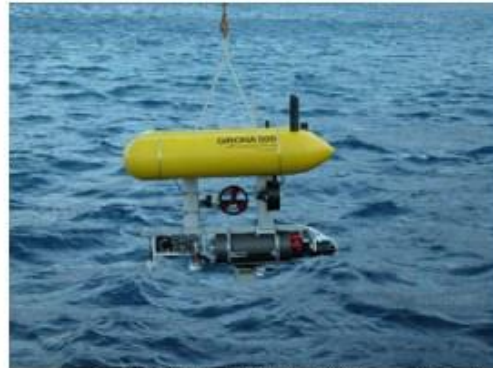
Jason II ROV (WHOI)



Super Achilles ROV, 600m (HCMR)



REMUS 100 AUV (WHOI)

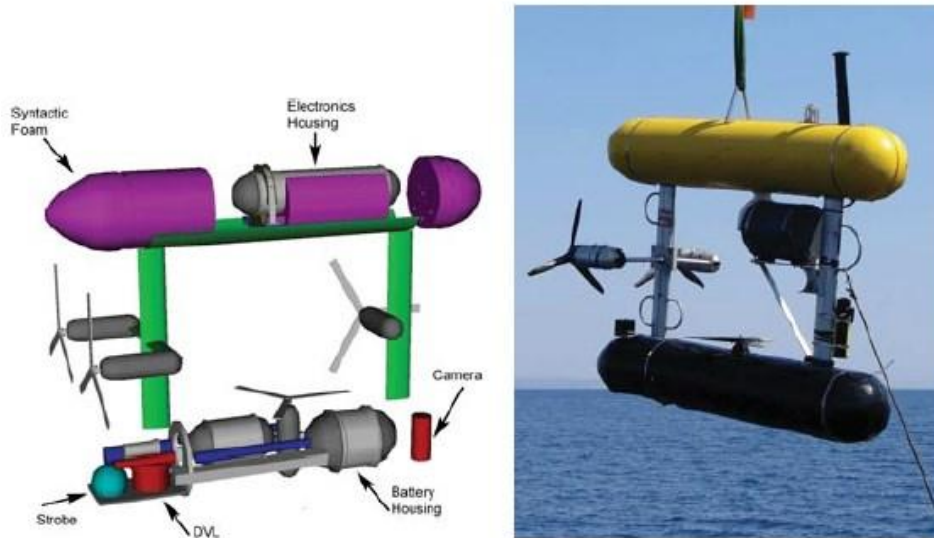


GIRONA 500 AUV (Girona Univ.)

Εικόνα 3.13 Συλλογή από υποβρύχια ρομποτικά οχήματα

Ναυάγια στα βαθιά νερά δείχνουν ότι ο άνθρωπος ήταν ικανός να πλοηγείται στις ανοιχτές θάλασσες από την αρχαιότητα και τα ευρήματα παρέχουν εξέχουσας σημασίας πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο το κατάφερε αυτό. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι σε μεγάλο βάθος διατηρούνται καλύτερα από τα παρόχθια σύγχρονά τους (Σακελλαρίου, κ.ά., 2007). Η πρώτη αρχαιολογική εφαρμογή με χρήση υποβρύχιου οχήματος διεξήχθη το 1989 όταν το Jason ROV ερεύνησε ένα αρχαίο ναυάγιο στην Μεσόγειο, μεταξύ της Καρχηδόνας (σημερινής Λιβύης) και της Ρώμης.

Το 2005 στα πλαίσια έρευνας σε ναυάγιο της Χίουσι Β. Bingham κ.ά.χρησιμοποίησαν το SeaBEDAUV, ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημασε σχήμα τορπίληςσχεδιασμένο για να δουλεύει κοντά στο πυθμένα για να συλλέξει φωτογραφικά, ακουστικά και χημικά δεδομένα. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη δημιουργία φωτομωσαϊκού για αρχαιολογική ερμηνεία.

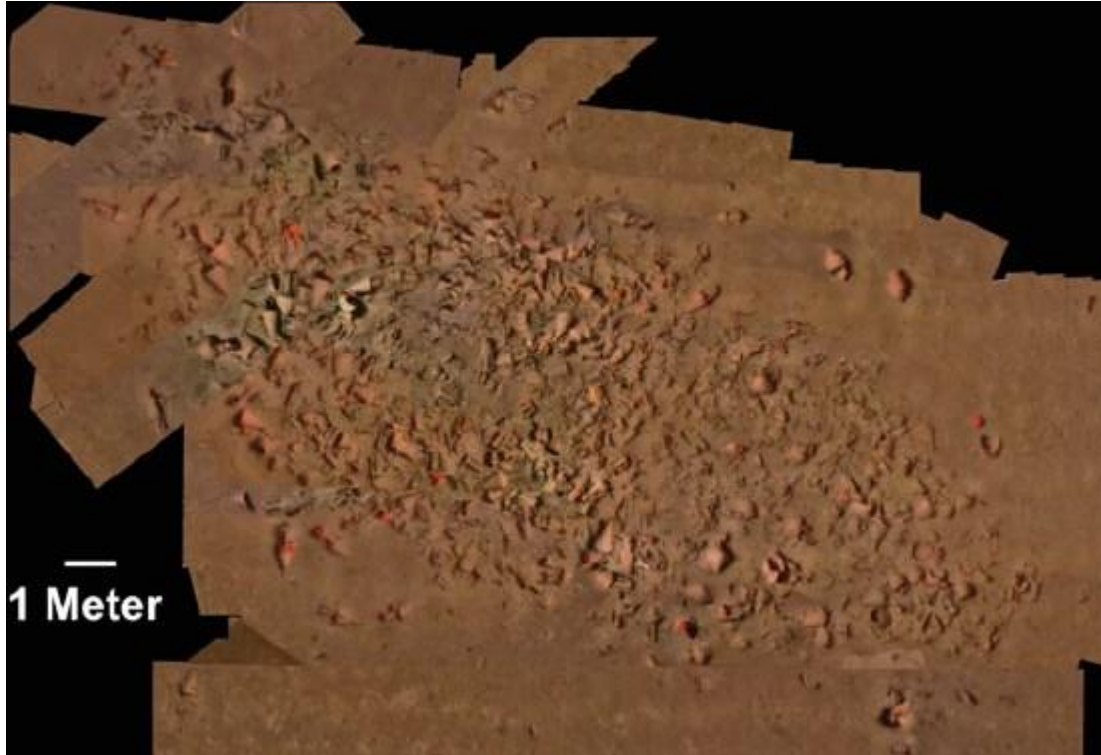


Εικόνα 3.14Μηχανολογικό μοντέλο του SeaBED και φωτογραφία από την πόντιση του στο Αιγαίο(B. Bingham,2010)

Το ναυάγιο ανακαλύφτηκε το 2004 από την Εφορία Εναλίων Αρχαιοτήτων και το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών(Σακελλαρίου κ.ά, 2007). Αρχικά εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια γεωφυσικών ερευνών με χρήση σαρωτή πλευρικής σάρωσης και ταυτοποιήθηκε από εικόνες που τράβηξε το ROV SuperAchilles του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Μετέφερε πάνω από 350 αμφορείς οι οποίοι παρέχουν σημαντικά στοιχεία για τον καθορισμό της προέλευσης, χρονολογίας και φορτίου του πλοίου.Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αποστολές. Η πρώτη περιλάμβανε τη συλλογή φωτογραφικών και βαθυμετρικών δεδομένων σε περιοχή έκτασης 500 m²για αναγνωριστικούς σκοπούς. Οι δυο τελευταίες μεγαλύτερης ανάλυσης δεδομένα καθώςτο όχημα "πέταξε" 2.5 μέτρα πάνω από το βυθό και κάλυψε έκταση 30x45 μέτραμε κέντρο το ναυάγιο. Η πυκνότητα μεταξύ το γραμμών πτήσης (1.25 μέτρα) και το υψόμετρο είχε ως αποτέλεσμα επικαλύψεις 60% κατά μήκος και 20% κατά πλάτος.

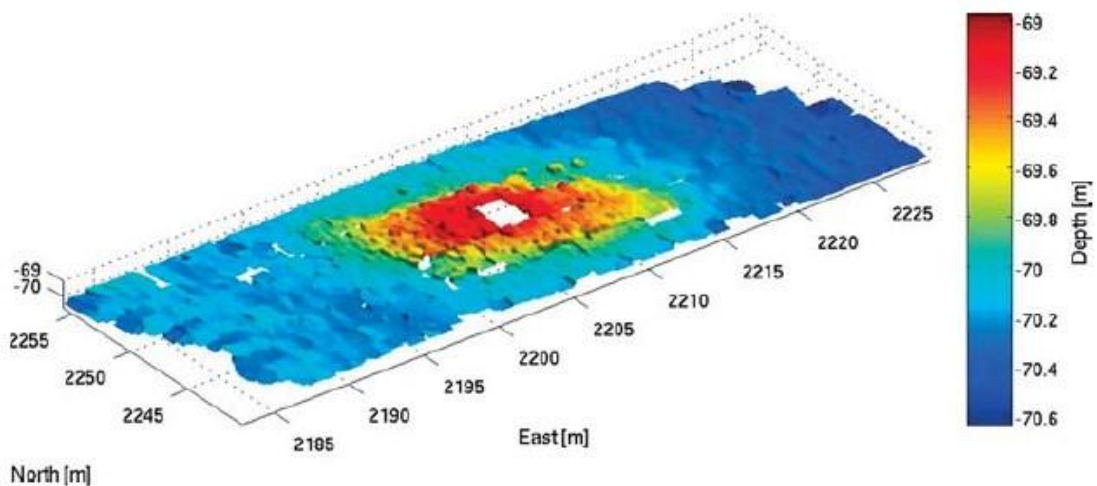
Για τον απόλυτο εντοπισμό της θέσης του οχήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ακουστικού εντοπισμού μεγάλης βάσης(LongBaseline ή LBL). Η μέθοδος LBL προσφέρει την καλύτερη ακρίβεια από όλα τα ακουστικά συστήματα εντοπισμού για το υποθαλάσσιο όχημα(Δουκάκης,1999).Το όχημα αλληλεπιδρά με ποντισμένους πομποδέκτες. Οι πομποδέκτες είναι παθητικά συστήματα που εκπέμπουν ακουστικά κύματα μόλις λάβουν σήμα σε συγκεκριμένη συχνότητα. Με τρεις πομποδέκτες το όχημα λαμβάνει τρεις διαφορετικές επιστροφές ηχητικών κυμάτων σε διαφορετικούς χρόνους και έτσι καθορίζεται η θέση του σε σχέση με τους πομποδέκτες.Η ερευνητική ομάδα πόντισε τρεις των οποίων οι συντεταγμένες υπολογίστηκαν με πλοίο επιφανείας με LBL καιτο ακουστικό αυτό δίκτυο πλέον γεωαναφέρθηκε με GPS στο WGS '84. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του απόλυτου προσανατολισμού του δικτύου κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 2.1 μέτρων. Συμπληρώνοντας τον απόλυτο εντοπισμό η αδρανειακήπλοήγηση (deadreckoning) έδωσε αβεβαιότητα μεταξύ των γραμμών πτήσης 0.18 μέτρα και εξασφάλισε τις απαιτούμενες επικαλύψεις για τη δεδομένη απόσταση μεταξύ των γραμμών.

Έπειτα από χρωματική διόρθωση των εικόνων, συνέθεσαν το φωτομωσαϊκό με χρήση πάνω από 7000 εικόνων. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μωσαϊκού βασίστηκε στο πρόβλημα ταυτόχρονης τοποθέτησης στο χώρο και χαρτογράφησης (SLAM) σε συνδυασμό με φωτογραμμετρία και όραση υπολογιστών.

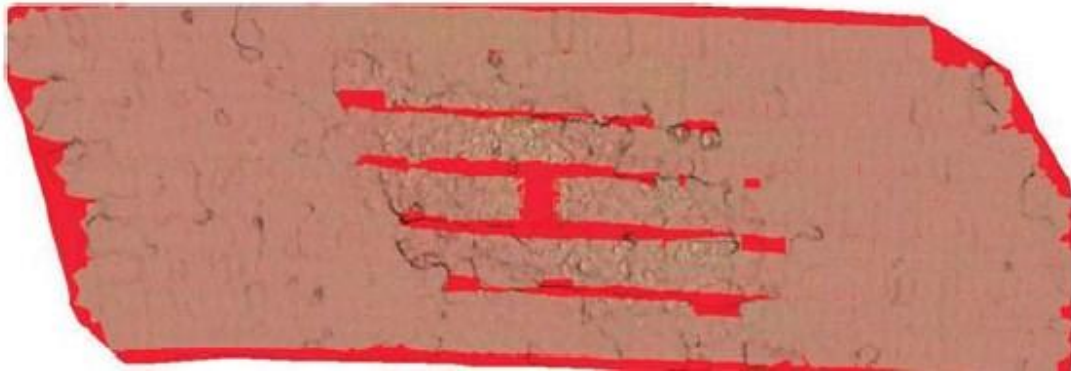


Εικόνα 3.15 Φωτομωσαϊκό του ναυαγίου της Χίου (B. Bingham, 2010)

Παράλληλα με τη δημιουργία του φωτομωσαϊκού η ομάδα δημιούργησε τρισδιάστατο βαθυμετρικό χάρτη χρησιμοποιώντας πληροφορία από διαδοχικές εικόνες και εκτελώντας τριγωνισμό με ισοδιάσταση 5 εκατοστών. Λόγω ανεπαρκούς επικάλυψης σε μερικά σημεία παρατηρείται απουσία δεδομένων. Τα δύο σετ συνδυάστηκαν για να δημιουργηθεί ένα γεωμετρικά ακριβές φωτομωσαϊκό το οποίο όμως παρουσιάζει προβλήματα σε μερικά σημεία λόγω απουσίας πληροφορίας (Εικόνα 3.16).

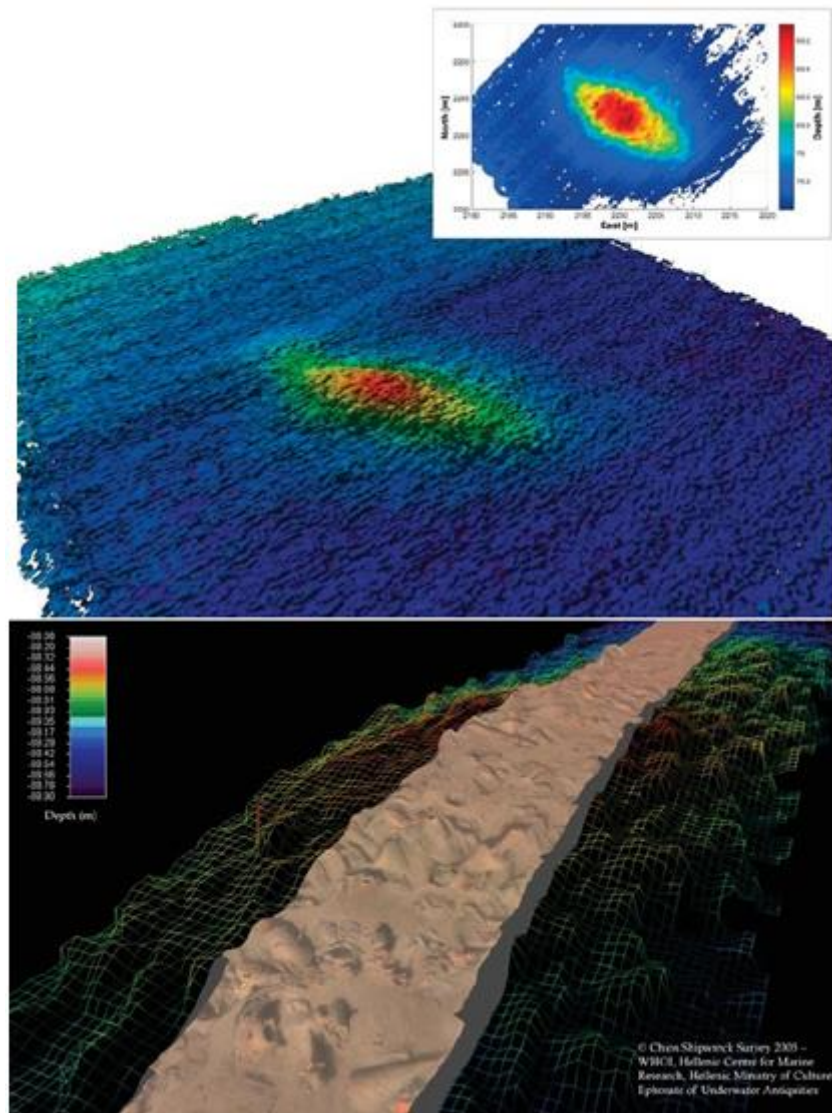


Εικόνα 3.16 Βαθυμετρικός χάρτης ναυαγίου (B. Bingham, 2010)



Εικόνα 3.17 φωτομωσαϊκό με διόρθωση λόγω αναγλύφου(B.Bingham,2010)

Υψομετρική πληροφορία συλλέχθηκε και με χρήση ηχοβολιστικού πολλαπλής δέσμης και παράχθηκε δεύτερος βαθυμετρικός χάρτης με ισοδιάσταση 5 εκατοστών ο οποίος και συνδυάστηκε με το φωτομωσαϊκό για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας.



Εικόνα 3.18 Πάνω: Βαθυμετρικός χάρτης απο δεδομένα σόναρ, Κάτω : Φωτομωσαϊκό πάνω στο βαθυμετρικό χάρτη (B. Bingham, 2010)

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το AUV, οι αισθητήρες και οι τεχνικές επεξεργασίας παρέχουν επαρκή ακρίβεια για τους αρχαιολόγους και επιτρέπουν την ερμηνεία του τύπου φορτίου, χωρητικότητας και άλλες πολύτιμες πληροφορίες για τον τρόπο διεξαγωγής του θαλάσσιου εμπορίου στην αρχαιότητα.(B. Bingham κ. ά.,2010)

3.4.3 Βαθυσκάφη - Μελέτη του φοινικικού ναυαγίου στο Xlendi της Μάλτας

Τα βαθυσκάφη είναι ειδικής κατασκευής σκάφη, που μπορούν να καταδυθούν αυτόνομα σε εξαιρετικά μεγάλα βάθη, εξ ου και η ονομασία τους, με σκοπό την παρατήρηση και εξερεύνηση του θαλάσσιου βυθού. Τα επανδρωμένα βαθυσκάφη έχουν υψηλές τεχνολογικές απαιτήσεις, αφού πρέπει να είναι κατάλληλα για να φιλοξενήσουν ανθρώπους σε πολύ υψηλή πίεση. Έτσι, πρέπει να διαθέτουν τον απαιτούμενο χώρο, συστήματα υποστήριξης της ζωής και ιδιαίτερα στιβαρή κατασκευή. Με τη χρήση βαθυσκαφών μπορούν πια οι ίδιοι οι επιστήμονες να επισκέπτονται περιοχές της θάλασσας που είναι αδύνατο να τις προσεγγίσουν με άλλο τρόπο.



Εικόνα 3.19 Τα βαθυσκάφη Remora 2000 της Comex και Θέτις του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε

Το βαθυσκάφος της παραπάνω εικόνας χρησιμοποίησαν οP. Drap και η ομάδα του για την πραγματοποίηση έρευνας που παρουσίασαν το 2015(P.Drap κ.ά 2015). Η έρευνά τους αποτελείται από δυο στάδια. Το πρώτο αφορά σε τοπογράφιση σε μεγάλο βάθος με χρήση φωτογραμμετρίας από το βαθυσκάφος. Στόχος τους ήταν να αποκτήσουν σετ δεδομένων που να καλύπτει εξολοκλήρου την περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση ενός 3D μοντέλου χαμηλής ανάλυσης που παράγεται σε πραγματικό χρόνο insitu και ακολουθείται από ένα δεύτερο μοντέλο πολύ υψηλής ανάλυσης που παράγεται στο εργαστήριο. Το δεύτερο στάδιο της έρευνας αφορά την εξαγωγή γνωστών αντικειμένων από την τοποθεσία, με χρήση συστηματικού συλλογισμού βασισμένου στην αρτιογιανταπαράσταση της γνώσης. Η φωτογραμμετρική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφιση και παράλληλα σε συνδυασμό με το σύστημα CIDOC-CRM (International Committee for Documentation-Conceptual Reference Model), ένα

σύστημα ευρέως χρησιμοποιημένο στο τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς για την αυτόματη αναγνώριση αρχαιολογικών ευρημάτων. Τόπος εφαρμογής της συγκεκριμένης έρευνας ήταν το φοινικικό ναυάγιο κοντά στη πόλη Xlendi της Μάλτας, το οποίο είναι το αρχαιότερο γνωστό ναυάγιο στη δυτική Μεσόγειο. Ανακαλύφθηκε από τον οργανισμό AuroraTrust το 2008 κατά τη διάρκεια υδρογραφικής αποτύπωσης των ακτών της Μάλτας και του Gozo με ηχοβολιστικό πλευρικής σάρωσης. Κείται σε βάθος 110 μέτρων σε αμμώδη βυθό με απουσία υδρόβιας βλάστησης. Οι διαστάσεις του είναι περίπου 14 μέτρα μήκος και 5 μέτρα πλάτος. Το φορτίο του αποτελείται από αμφορείς, τεφροδόχους και μυλόπετρες, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά στρώματα. Έρευνα του πρώτου στρώματος αποκαλύπτει ότι τα αντικείμενα προέρχονται από τη Δυτική Φοινίκη και τη περιοχή της Τυρρηνίας, και χρονολογούνται μεταξύ 8ου και 7ου αιώνα π.Χ. Το μεγάλο βάθος του ναυαγίου διατήρησε το φορτίο σε άριστη κατάσταση όσον αφορά διάβρωση, αρχαιοκαπηλία κ.λπ, κάτι που το καθιστά υψηλής αρχαιολογικής και πολιτισμικής σημασίας. Αυτό, σε συνδυασμό με το μεγάλο βάθος, απέκλεισε τον παραδοσιακό τρόπο ανασκαφής, ο οποίος είναι και καταστροφικός και έδωσε την ευκαιρία να γίνει πειραματισμός στην ανάπτυξη μεθόδων οντολογικής ανάλυσης σχημάτων μέσα από τη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών, και να ανοίξει ένα νέο κεφάλαιο στην αρχαιολογική έρευνα, την διαχείριση και τη προστασία της ενάλιας πολιτισμικής κληρονομιάς.

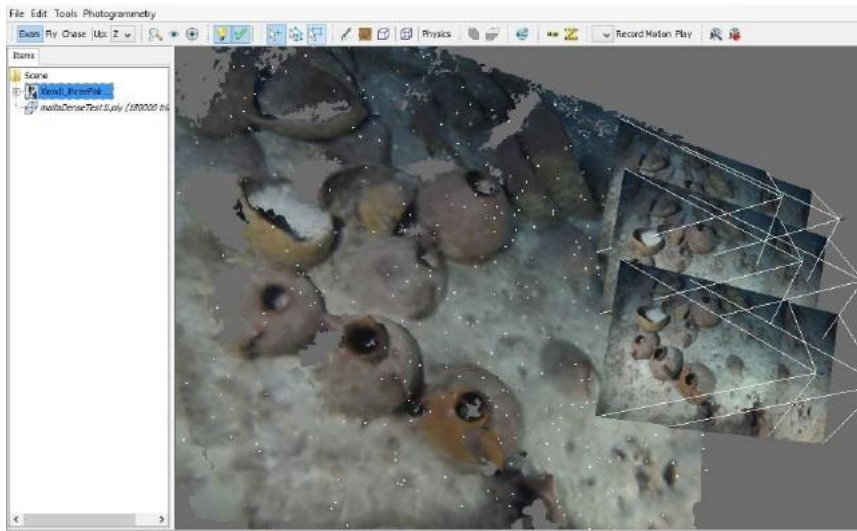
Το βαθυσκάφος Remora 2000 έχει χωρητικότητα δύο ατόμων, φτάνει σε μέγιστο βάθος 610 μέτρων και μέγιστο χρόνο κατάδυσης 5 ώρες, υπεραρκετός χρόνος για την συλλογή των φωτογραφικών δεδομένων. Πάνω στο βαθυσκάφος προσαρμόστηκαν 3 κάμερες υψηλής ανάλυσης συγχρονισμένες και ελεγχόμενες από τον υπολογιστή του πιλοτηρίου. Συνεχής φωτισμός εξασφάλισε προβολέας HMI τροφοδοτούμενος από το βαθυσκάφος. Η υψηλή συχνότητα λήψεων των μηχανών επίσης εξασφάλισε πλήρη κάλυψη και η μεγάλη κλίμακα των εικόνων είχε αποτέλεσμα τρισδιάστατο μοντέλο υψηλής ακρίβειας (έως 0,005 mm/pixel για την ορθοφωτογραφία). Η επεξεργασία εν πλω επιτρέπει τη δημιουργία 3D της περιοχής που καλύπτει το βαθυσκάφος σε πραγματικό χρόνο και δίνει τη δυνατότητα στο πιλότο να καλύψει ολόκληρη τη περιοχή.



Εικόνα 3.20 Τμήματος υψηλής ανάλυσης ορθοφωτογραφίας, στο περιθώριο ολόκληρη η ορθοφωτογραφία (<http://www.groplan.eu>)

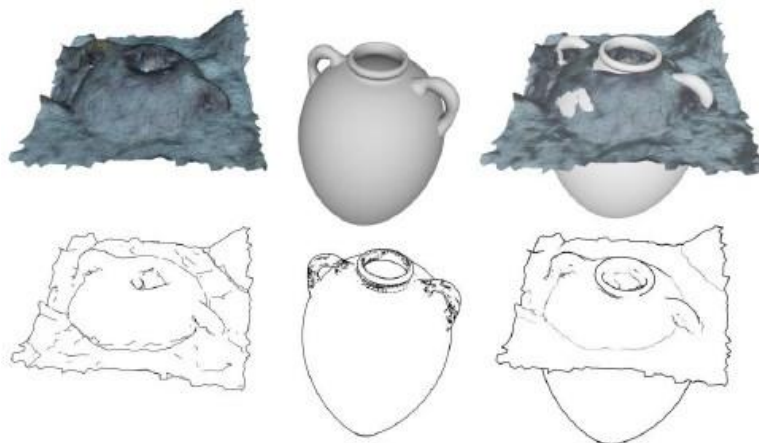
Το τρισδιάστατο σύστημα των μηχανών, με την κάθε μια τοποθετημένη σε ξεχωριστή υδατοστεγή θήκη βαθμονομήθηκε σε δύο φάσεις. Στη πρώτη εκτελέστηκε

βαθμονόμηση σε κάθε σύστημα μηχανή-θήκη ξεχωριστά για τον καθορισμό του εσωτερικού προσανατολισμού αυτών και στη δεύτερη φάση για να καθοριστεί η σχετική θέση των μηχανών οι οποίες είναι σταθεροποιημένες στην πλατφόρμα. Η βαθμονόμηση είναι και αυτή που θα καθορίσει την τελική κλίμακα του μοντέλου. Για τον καθορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η κίνηση του βαθυσκάφους και η επίλυσή του με τη μέθοδο της συνόρθωσης κατά δέσμες έγινε on-the-fly. Δεσμευτικός παράγοντας στη συνόρθωση χρησιμοποιήθηκε και η βάση λήψης μεταξύ των μηχανών και τα υπόλοιπα σε κάθε στερεοζεύγος έφτασαν μέχρι χιλιοστό. Η κατασκευή του πυκνού νέφους σημείων έγινε χρησιμοποιώντας μεθόδους MVS (MultiViewStereo) και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η Patched-Based MultiViewStereo (Furukawa, 2010).



Εικόνα 3.21 Ανακατασκευή πυκνού νέφους σημείων με LSIS 3Dtool (P.Drap,2015)

Έπειτα από τη παραγωγή του 3D μοντέλου η ερευνητική ομάδα πειραματίστηκε στην αυτόματη ταύτιση των αμφορέων με μοντελοποιημένους που ήδη υπάρχουν σε βάσεις δεδομένων, με στόχο να επιτύχουν τη ακρίβεια της αντίστοιχης χειροκίνητης διαδικασίας με την έρευνα να είναι ακόμα σε εξέλιξη μέχρι τη στιγμή που γράφονται αυτές οι γραμμές. Τα πρώτα αποτελέσματα φαίνονται στη εικόνα 3.22. Έχουν δημιουργήσει μη-φωτορεαλιστική αναπαράσταση (Non-photorealistic Rendering) του αντικειμένου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρχικά για την αναγνώριση της περιοχής που πιθανώς να κρύβεται π.χ. ένας αμφορέας.



Εικόνα 3.22 Πάνω σειρά: αναγνώριση αντικειμένου στην ανακατασκευασμένη επιφάνεια μοντέλου με χρήση 3D μοντέλου. Κάτω σειρά: Αναγνώριση αντικειμένου με χρήση της αναπαράστασης NPR (Drap,2015)

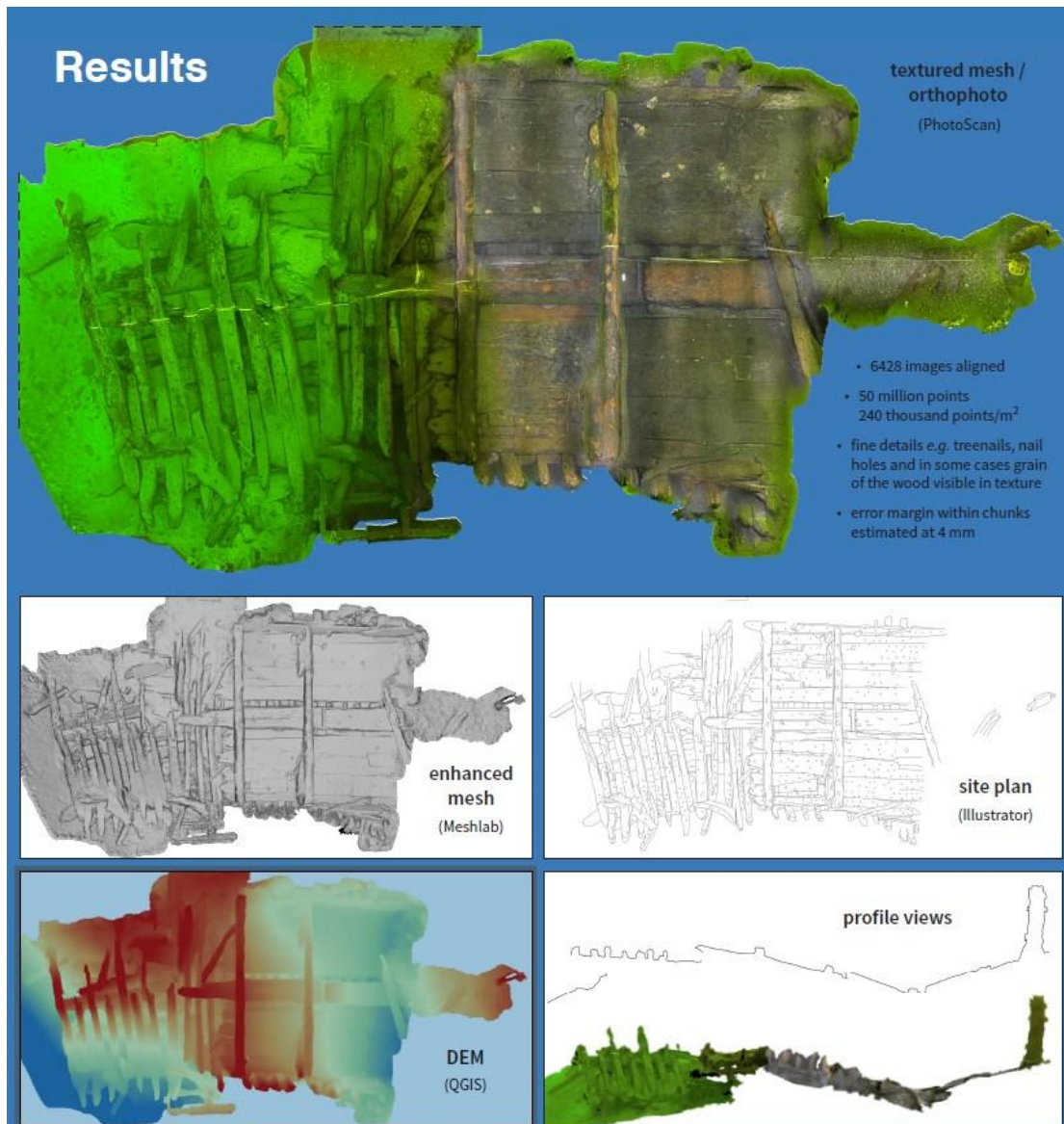
3.4.4 Όραση Υπολογιστών και Φωτογραμμετρία μέσα από μια GoPro

Οι GoPro μηχανές έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση το 2005 όταν ο Woodman πούλησε την πρώτη μηχανή GoProHero με 35 mm φίλμ ως "παντός καιρού" sports κάμερα. Σήμερα (2016) η εταιρία είναι κυρίαρχη στην αγορά των actioncameras. Πλήθος μοντέλων έχει κυκλοφορήσει με κάποια μοντέλα να μπορούν να φτάσουν έως και σε 40 μέτρα βάθος. Η τεχνολογία των αισθητήρων έχει προχωρήσει αρκετά και πλέον παρέχουν υψηλή ανάλυση, μεγάλο εύρος πεδίου, φορητότητα και αντοχή με μικρό κόστος. Εκτός από υποβρύχια λήψεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα συστήματα αεροφωτογράφισης (UAV) και φυσικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν και παραπάνω από μία μηχανές για στερεοσκοπικές λήψεις. Πρόκειται αναμφισβήτητα για τρόπο φωτογράφισης που έχει να προσφέρει πολλά σε εφαρμογές υποβρύχιας αρχαιολογίας και γενικότερα στη πολιτιστική κληρονομιά.



Εικόνα 3.23 GoProHero3 (www.gopro.com)

Το 2014 ο Thomas van Damme χρησιμοποίησε μια μηχανή GoPro, για να καταγράψει την ανασκαφή του ναυαγίου *Straatvarder* κοντά στη πόλη Ρόντερνταμ της Ολλανδίας. Πρόκειται για ναυάγιο ολλανδικού εμπορικού πλοίου χρονολογίας 17ου αιώνα, διαστάσεων 15x8 μέτρων σε βάθος 16-20 μέτρων με χαρακτηριστικό την πολύ χαμηλή ορατότητα η οποία σε μερικά σημεία δε ξεπερνά τα 50 εκατοστά. Το πρόβλημα της ορατότητας είχε ως αποτέλεσμα την καταγραφή από απόσταση έως και 20 εκατοστά και την παραγωγή μεγάλης διάρκειας βιντεοσκοπήσης για την απόκτηση καρέ ικανοποιητικής ευκρίνειας. Η συνολική διάρκεια καταγραφής έφτασε τις 2:40 ώρες από τις οποίες προέκυψαν 7048 καρέ για να υπάρξει επαρκής επικάλυψη μεταξύ των διαδοχικών λήψεων. Η επεξεργασία έγινε στο λογισμικό *Photoscan* της *Agisoft*. Οι φωτογραφίες μοιράστηκαν σε 11 τμήματα τα οποία προσανατολίστηκαν σχετικά μεταξύ τους και συγχωνεύθηκαν με το σφάλμα μεταξύ τους να είναι 4 χιλιοστά. Κλίμακα δόθηκε χρησιμοποιώντας μετρημένες αποστάσεις στο πεδίο. Επιπλέον δημιουργήθηκαν 3D πλέγμα, DEM και τομές σε άλλα λογισμικά (Εικόνα 3.24).



Εικόνα 3.24 Παράγωγα της αρχαιολογικής εφαρμογής του VanDamme (VanDamme, 2014)

3.5 Άλλες μέθοδοι υποβρύχιας 3D ανακατασκευής

Εκτός από την υποβρύχια φωτογραμμετρία που αναπτύχθηκε εκτενώς παραπάνω υπάρχουν και άλλες μέθοδοι υποβρύχιας 3D ανακατασκευής. Η συλλογή τρισδιάστατων δεδομένων επιτρέπει στους επιστήμονες να ανακατασκευάσουν το υποβρύχιο περιβάλλον, να εκτελέσουν μετρήσεις, να μοντελοποιήσουν και να ερμηνεύσουν αξιόπιστα εκτός από αρχαιολογικούς σκοπούς και για ένα εύρος ερευνητικών δραστηριοτήτων. Η πρόοδος της τεχνολογίας δίνει τη δυνατότητα κατασκευής 3D μοντέλων πυθμένα και γενικότερα βυθισμένων αντικειμένων. Υπάρχουν διάφορα συστήματα τα οποία συλλέγουν καταγράφουν και αναλύουν δεδομένα για την παραγωγή των μοντέλων αυτών. Τα συστήματα αυτά μπορούν να

κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση την μέθοδο μέτρησης. Οι τρεις κατηγορίες αυτές είναι :

- Μέτρηση απόστασης ή τριγωνισμός (triangulation)
- Μέτρηση χρόνου (Time of Flight)
- Μέτρηση φάσης και διαφοράς φάσης (Modulation)

Τριγωνισμός

Τα συστήματα βασισμένα στη μέθοδο αυτή μετρούν την απόσταση μεταξύ δυο πηγών ή δέκτων με γνωστές παραμέτρους και ενός κοινού σημείου και προσδιορίζουν τη θέση του στο χώρο.

Μέτρηση Χρόνου

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου που κάνει τα ταξιδέψει το σήμα από την εκπεμπόμενη πηγή μέχρι το στόχο και να επιστρέψει. Γνωρίζοντας τον την ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η απόσταση.

Μέτρηση διαφοράς φάσης

Όπως τα προηγούμενα συστήματα εκμεταλλεύονται το χρόνο διάδοσης του σήματος, με τον ίδιο τρόπο εκμεταλλεύονται τη διαφορά στη συχνότητα του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος.

Άλλος ένας τρόπος κατηγοριοποίησης είναι τα παθητικά και ενεργητικά συστήματα αναλόγως τον τρόπο αλληλεπίδρασης με το μέσο.

3.5.1 Sonar (sound navigation and ranging)

Τα ηχοβολιστικά συστήματα αναλύονται και στο εδάφιο 3.4.1. Ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία (μέτρηση χρόνου) και υπάρχουν ενεργητικά και παθητικά. Τα παθητικά ηχοβολιστικά δεν χρησιμοποιούνται για 3D ανακατασκευές. Τα ενεργητικά χωρίζονται σε τρεις τύπους: πολλαπλής δέσμης ή MBS, μονής δέσμης ή SBS, και πλευρικής σαρώσεως ή SSS. Πλεονέκτημα τους είναι το πολύ μεγάλο βεληνεκές που κάνει δυνατή τη συλλογή βαθυμετρικής πληροφορίας σε βάθος μερικών χιλιάδων μέτρων από πλοίο επιφανείας. Ενδεικτικά παρατίθενται μερικές αναφορές από εφαρμογές sonar και οι ακρίβειες που μπορούν να επιτύχουν.

Πίνακας 3.1 Αναφορές σχετικά με Ακρίβειες Sonar (M. Massot-Campos & G. Oliver-Codina, 2015)

References	Sonar Type	Scope	Accuracy	Resolution
Pathak	MBS	Rough map for path planning	≈1 m	2.5 cm
Rosenblum	MBS	Small object reconstruction	-	≈8 cm
Hurtos	MBS + Camera	Projects images on 3D surfaces	2.34 cm	-
Guo	SBS	Small target 3D reconstruction	2.62 cm	-
Coiras	SSS	Seabed elevation with UW pipe	19 cm	5.8 cm
Brahim	IS	Sparse scene geometry	0.5 m	-
Aykin	IS	Smooth surfaces 3D reconstruction	≈15 cm	1 cm
Negahdaripour	IS + Camera	Alternative to stereo systems	≈5 cm	-

3.5.2 LiDAR (Light Detection and Ranging)

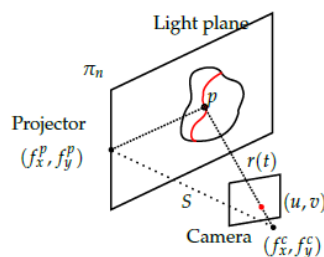
Πρόκειται για τεχνολογία που εφαρμόζεται ευρέως στην επίγεια χαρτογράφηση και θαλάσσια χαρτογράφηση μικρού βάθους. Ανάλογα με το εκπεμπόμενο μήκος κύματος το LiDAR μπορεί να εισχωρήσει σε βάθος έως 30 μέτρα. Έχει χρησιμοποιηθεί για υποβρύχια αναγνώριση αντικειμένων (συνήθως ναρκών) καθώς και για εργασίες βαθυμετρίας. Το σύνηθες ύψος πτήσης είναι στα 300 μέτρα και μπορεί να επιτύχει ακρίβειες μερικών δεκάδων εκατοστών. Το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα αυξάνοντας το βάθος και να αντιμετωπίζει την υποβρύχια σκέδαση. Η τεχνολογία LiDAR έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές υποβρύχια εφαρμογές (Mullen 1995, Cadalli 2001, Reinman 2009, Pellen 2012)

3.5.3 Σάρωση Γραμμικού Φωτός (Laser Line Scanning)

Για να αυξηθεί η τελική ακρίβεια των παραπάνω συστημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία laser σε συνδυασμό με εικονογραφικούς αισθητήρες όπως φωτοπολλαπλασιαστικούς σωλήνες PMT, ανιχνευτές φωτονίων, ή ακόμα και κάμερες. Τα συστήματα αυτά εκπέμπουν γραμμικούς παλμούς οι οποίοι συλλέγονται από δέκτες. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, Σαρωτές συνεχούς κύματος (CW-LLS), PulseGated (PG-LLS) και διαμορφωμένους σαρωτές (mod-LLS). Μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλές ακρίβειες, από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά, αλλά περιορίζονται σε μικρή εμβέλεια, έως μερικά μέτρα. Ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές που έχει χρησιμοποιηθεί η Σάρωση Γραμμικού Φωτός (Moore 2000, , Cochenour 2011, McLeod 2013)

3.5.4 Σάρωση με Δομημένο Φως

Τα συστήματα δομημένου φωτός αποτελούνται από μια κάμερα και ένα προβολέα φωτός.



Εικόνα 3.24 Τρόπος λειτουργίας δομημένου φωτός (M. Massot-Campos, 2015)

Προβάλλοντας μια λωρίδα φωτός γνωστού μοτίβου στην επιφάνεια του αντικειμένου μια γραμμή φωτός εμφανίζεται παραμορφωμένη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βάθους και γενικότερα του σχήματος του αντικειμένου με τη μέθοδο του τριγωνισμού. Τα συστήματα αυτά έχουν εφαρμοστεί και σε υποβρύχια συνθήκες πάνω σε AUV (Kondok.ά, 2004, Pratsk.ά, 2012).

3.6 Σύνοψη

Ο τρόπος και το σύστημα που θα επιλεγεί για να γίνει η υποβρύχια 3D ανακατασκευή εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια του τελικού προϊόντος, το διαθέσιμο προϋπολογισμό, τον διαθέσιμο χρόνο. Η υποβρύχια συλλογή 3D δεδομένων, ιστορικά διεξαγόταν με ηχοβολιστικά συστήματα. Η πληροφορία που συλλέγονταν σαν υψομετρικός χάρτης και με την μετέπειτα λήψη υποβρυχίων εικόνων η φωτογραφική υφή προσθέτονταν με τη μορφή φωτομωσαϊκού. ((M. Massot-Campos,2015). Πλέον οι παραπάνω μέθοδοι είτε μεμονομένες είτε σε συνδυασμό είναι η λύση για το πρόβλημα της υποβρύχιας 3D ανακατασκευής. Επίσης η βιβλιογραφική ανασκόπηση των παραπάνω εφαρμογών δείχνει ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η πρόοδος που έχει σημειωθεί στην σύγχρονη φωτογραμμετρία και όραση υπολογιστών έχει δώσει νέα διάσταση στον τρόπο που διεξάγονται οι υποβρύχια έρευνες και ανασκαφές. Η παραγωγή γεωμετρικά ακριβών μοντέλων για αντικείμενα αρχαιολογικού ενδιαφέροντος σε συνδυασμό με την υπάρχουσα γνώση από τους παραδοσιακούς τρόπους αποτύπωσης και καταγραφής, ανοίγει νέα μονοπάτια για την τεκμηρίωση και την ερμηνεία του παρελθόντος από τους ειδικούς.

Κεφάλαιο 4

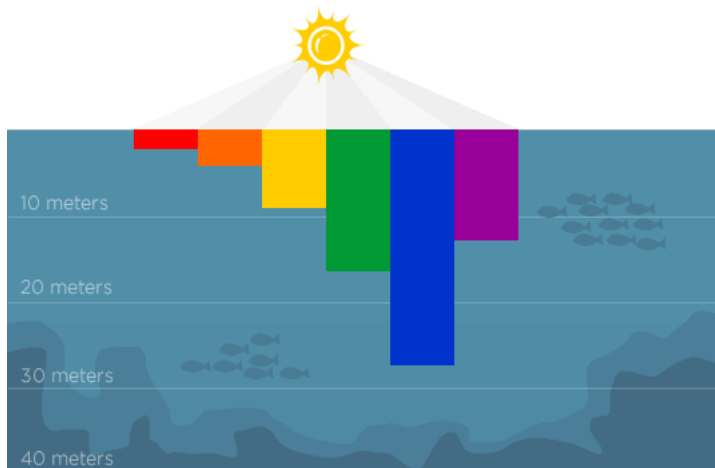
Υποβρύχια Εικόνα

4.1 Επίδραση του νερού στο φως και στην εικόνα.

Η ποιότητα της εικόνας που σχηματίζεται από ένα υποβρύχιο σύστημα φωτογράφισης επηρεάζεται έντονα από τις οπτικές ιδιότητες του μέσου, δηλαδή του νερού ανάμεσα στο αντικείμενο και την μηχανή. Σύμφωνα με τους νόμους της Φυσικής, το φως όταν διέρχεται από το νερό (με πυκνότητα περίπου 800 φορές μεγαλύτερη του αέρα) υπόκειται σε φαινόμενα όπως η απώλεια χρωμάτων, η απορρόφηση και η σκέδαση. Το φως αφού ανακλαστεί στο αντικείμενο που φωτογραφίζεται, ταξιδεύει προς τη μηχανή και καταγράφεται στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια του αισθητήρα καταγράφοντας το αντικείμενο αλλά και τις αλλοιώσεις που εισάγουν τα φαινόμενα αυτά.

4.1.1 Απώλεια Χρωμάτων

Κάθε περιοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στον άνθρωπο –και στην φωτογραφική μηχανή- μια συγκεκριμένη αντίληψη χρώματος. Η διαφοροποίηση των χρωμάτων ανάλογα με το μήκος κύματος (Πίνακας 1) έχει αποτέλεσμα τα χρώματα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας να μην απορροφώνται ομοιόμορφα από το νερό αλλά να γίνεται μια κλιμακωτή απορρόφηση. Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται επιλεκτική απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή απώλεια των χρωμάτων ανάλογα με το βάθος (Εικόνα 4.1).



Πίνακας 4.1

Μήκος κύματος (nm)	Χρώμα
400-440	Ιώδες
440-480	Κυανό
480-560	Πράσινο
560-590	Κίτρινο
590-630	Πορτοκαλί
630-700	Ερυθρό

Εικόνα 4.1 Απορρόφηση του φωτός (<http://lymanlures.com>)

Πρώτα απορροφάται το κόκκινο (3 μέτρα), ακολουθούν το πορτοκαλί (5 μέτρα) και το κίτρινο (10 μέτρα), στη συνέχεια απορροφάται το πράσινο (20 μέτρα) και τέλος μετά τα 30 μέτρα παραμένει το μπλε-γκρί. Σε πολύ μεγαλύτερα βάθη, αρχίζει και κυριαρχεί το μαύρο. Έτσι το νερό έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί ως φίλτρο συγκρατώντας ορισμένα χρώματα από άλλα.

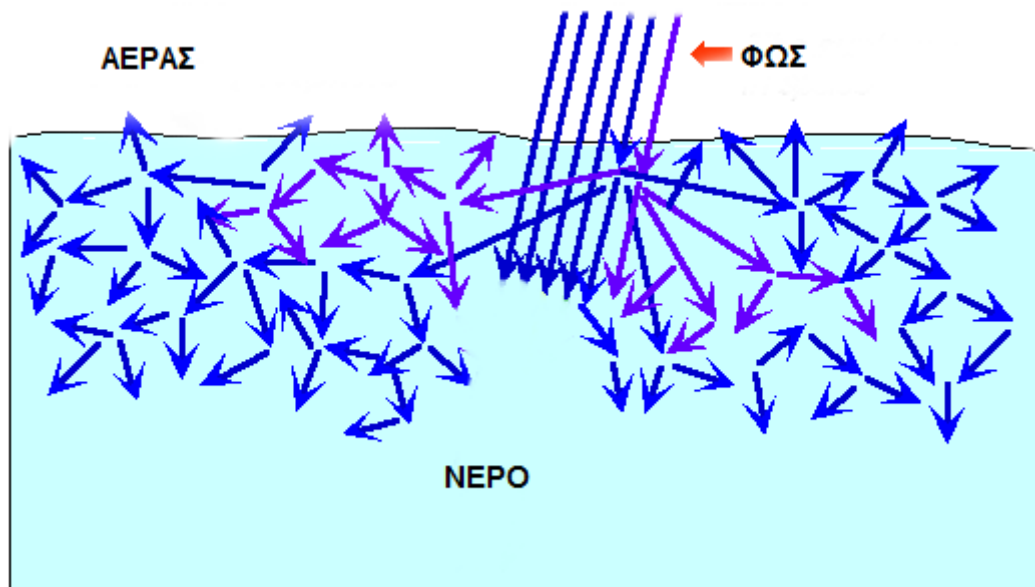
4.1.2 Απορρόφηση του Φωτός

Η ενέργεια της φωτεινής ακτίνας μειώνεται με την απορρόφηση από τα μόρια του νερού. Σύμφωνα με τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός, το φως αποτελείται από σωματίδια τα οποία εκπέμπονται από τη πηγή του φωτός σε μορφή φωτονίων. Η

απορρόφηση οφείλεται στην απώλεια φωτονίων, η οποία οφείλεται με τη σειρά της στον μετασχηματισμό των φωτονίων σε θερμική και κινητική ενέργεια. Η παρουσία προσμίξεων, έχει ως αποτέλεσμα η φωτεινή δέσμη να μειώνεται ακόμη περισσότερο. Το οπτικό αποτέλεσμα που δημιουργείται είναι ο φωτισμός να παρουσιάζεται μειωμένος κάτω από την επιφάνεια σε μια προοδευτική εξάντληση με ταυτόχρονη αύξηση του βάθους, σε σημείο ώστε να έχει διατηρήσει μόνο το 20% περίπου της αρχικής του ενέργειας σε βάθος 150-200 μέτρων.

4.1.3 Σκέδαση του φωτός

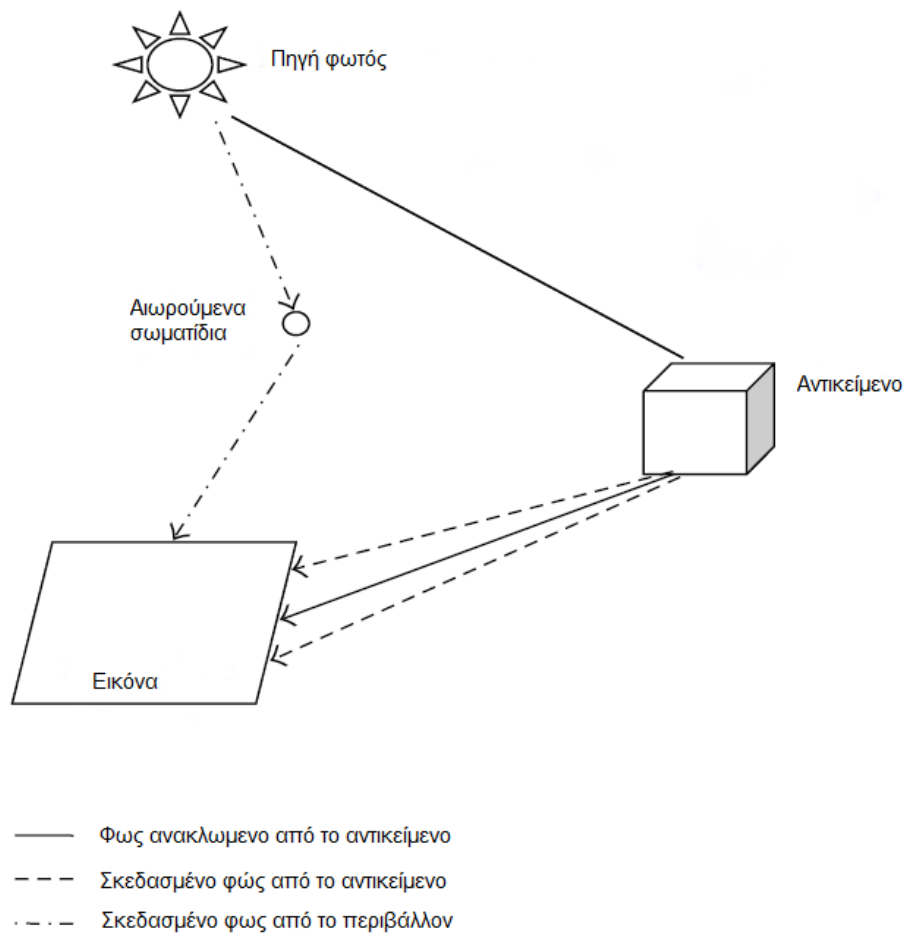
Εκτός από την απορρόφηση του φωτός, τα μόρια του νερού έχουν και άλλη επίδραση σε αυτό. Μέρος του φωτός που προσκρούει σε αυτά αλλάζει διεύθυνση διάδοσης προς πάσα κατεύθυνση. Εκτός από τα μόρια του νερού, κάθε μορφής αιωρούμενα σωματίδια (σκόνη, πλαγκτόν κλπ) σκεδάζουν το φως και δημιουργούν ένα γενικότερο αίσθημα ομίχλης. Η σκέδαση είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από το μήκος κύματος.



Εικόνα 4. 2 Σκέδαση του φωτός

Η παρακάτω εικόνα εξηγεί πώς η σκέδαση έχει αντίκτυπο στο σχηματισμό της εικόνας μέσα στο νερό. Σύμφωνα με τον Jaffe(1990), το φως που λαμβάνει η κάμερα αποτελείται από τρεις συνιστώσες. Ένα μέρος το οποίο ανακλάται απευθείας από το προς φωτογράφιση αντικείμενο και δεν έχει σκεδαστεί στο νερό, ένα μέρος ανακλώμενου φωτός από το αντικείμενο το οποίο έχει σκεδαστεί με μικρή γωνία και ένα μέρος σκεδασμένο φως που εισέρχεται στη μηχανή από αντικείμενα οποία δεν περιλαμβάνονται στη σκηνή (π.χ. αιωρούμενα σωματίδια). Η αντίθεση της εικόνας επηρεάζεται άμεσα από τη σκέδαση του φωτός. Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι σε μεγάλο βαθμό η αιτία για τη γενική μείωση του φωτισμού. Είναι αυτά που δημιουργούν το αίσθημα της ομίχλης, την απώλεια της αντίθεσης και τη μείωση των λεπτομερειών του αντικειμένου όσο μεγαλώνει η απόσταση αντικειμένου- μηχανής. Για να επιτευχθεί φωτογράφιση με ικανοποιητική αντίθεση, οι αποστάσεις λήψεις δεν

πρέπει να ξεπερνούν τα 5 μέτρα ακόμη και σε καθαρά νερά όπου η ορατότητα μπορεί να φτάνει και τα 50 μέτρα.



Εικόνα 4.3 Επίδραση σκέδασης στην Εικόνα (Jaffe,1990)

4.1.4 Άλλοι Παράγοντες Αλλοίωσης ποιότητας Εικόνας

Επιπτώσεις στην τελική ποιότητα της εικόνας μπορεί να προκληθούν και από διάφορες άλλες αιτίες όπως οι ακόλουθες :

- i. Διάχυση του φωτός. Στα υγρά το φως διαχέεται και απορροφάται από σωματίδια όπως διαλυμένες οργανικές ουσίες, το αλάτι, καθώς και ανόργανες ουσίες που δημιουργούνται από τη διάβρωση με αποτέλεσμα την μείωση της αντίθεσης της εικόνας
- ii. Η χρωματική διασπορά του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερη στο νερό απ' ό τι στον αέρα. Η διακύμανση του δείκτη διάθλασης στο νερό πάνω από το ορατό φάσμα είναι της τάξης του 1,4 % σε αντίθεση με 0,008 % που είναι στον αέρα (Höhle, 1971). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χρωματικές αλλοιώσεις και θολότητα πάνω στην εικόνα, ιδιαίτερα για ασπρόμαυρες εικόνες. Με προσοχή, επίσης θα πρέπει να γίνεται και η επιλογή εξωτερικών πηγών φωτισμού, όταν αυτές διακρίνονται από διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά.

- iii. Ύπαρξη θερμοκλινών στρωμάτων. Το θερμοκλινές στρώμα είναι η επιφάνεια επαφής μεταξύ δύο στρωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας. Αποτέλεσμα του θερμοκλινούς είναι να παρουσιάζεται μια μεταβαλλόμενη θολούρα σε ένα οριζόντιο επίπεδο του οποίου οι διαστάσεις δεν είναι σταθερές. Το βάθος στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο δεν είναι σταθερό για την ίδια περιοχή και εξαρτάται από τις γενικότερες κλιματολογικές συνθήκες της ημέρας. Επίσης, παρόμοια οπτική παραμόρφωση μπορεί να παρουσιαστεί στα σημεία όπου συμβάλλουν όγκοι νερού διαφορετικής πυκνότητας ή επίσης σε περιοχές με υποβρύχιας αναθυμιάσεις ή διαρροή φυσαλίδων.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες προκαλούν υποβάθμιση της τελικής εικόνας και δημιουργούν συστηματικά σφάλματα που δεν μπορούν να ανιχνευθούν πάντα και να ενταχθούν σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο διόρθωσης(Maas, 1995) .

4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων βελτίωσης και αποκατάστασης υποβρύχιας εικόνας

Εν γένει η επεξεργασία υποβρύχιας (και όχι μόνο) εικόνας αντιμετωπίζεται από δύο μεθοδολογίες με διαφορετική οπτική γωνία. Η μία είναι η τεχνική αποκατάστασης εικόνας (image restoration) και η δεύτερη είναι μέθοδος βελτίωσης εικόνας (image enhancement) .

Η αποκατάσταση της εικόνας στοχεύει να ανακτήσει τη 'χαμένη' εικόνα χρησιμοποιώντας κάποιο μοντέλο που προσεγγίζει την απώλεια της αρχικής πληροφορίας της εικόνας κατά τον σχηματισμό αυτής. Πρόκειται για αυστηρή μέθοδο που απαιτεί πολλές παραμέτρους (όπως π.χ. συντελεστές διάχυσης, απορρόφησης, συντελεστές που προσδιορίζουν τη θολότητα του νερού) οι οποίες είναι σπάνια γνωστές και μπορούν να έχουν μεγάλες διακυμάνσεις. Επίσης μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να είναι γνωστή είναι η εκτίμηση του βάθους για το αντικείμενο που φωτογραφίζεται.

Η τεχνικές βελτίωσης ή ενίσχυσης της εικόνας χρησιμοποιούν ποιοτικά, αντικειμενικά κριτήρια για να παραγάγουν μια εικόνα οπτικά ορθή χωρίς να βασίζονται σε κάποιο φυσικό μοντέλο και είναι συνήθως απλές και πιο γρήγορες από τις μεθόδους αποκατάστασης.

4.2.1 Ανασκόπηση μεθόδων αποκατάστασης εικόνας

Σύμφωνα με τον εμπειρικό νόμο των Lambert-Beer, η μείωση της έντασης του φωτός εξαρτάται σε εκθετικό βαθμό από τις ιδιότητες του μέσου που αυτό διασχίζει. Η ακτινοβολία E στη θέση r μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E(r) = E(0) e^{-cr} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

όπου c είναι ο συντελεστής συνολικής μείωσης. Μετράει την απώλεια φωτός που προκαλεί ο συνδυασμός της σκέδασης και της απορρόφησης σε μια μονάδα μήκους. Μέσοι συντελεστές απορρόφησης για τον ωκεανό, ακτή και κόλπο είναι 0.05 m^{-1} , 0.2 m^{-1} , 0.33 m^{-1} αντίστοιχα.

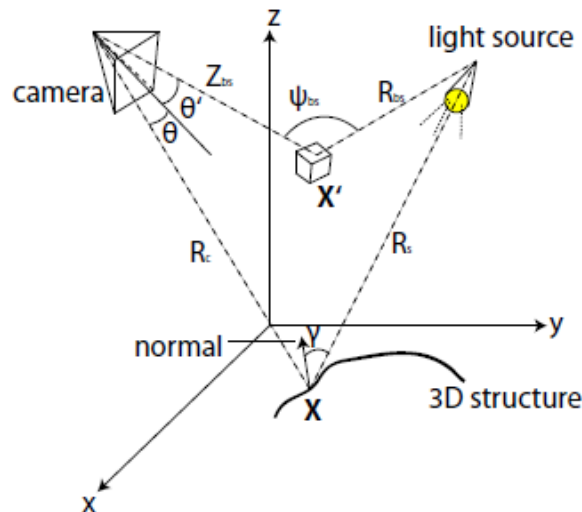
Υποθέτοντας ένα ομογενές και ισότροπο μέσο, ο συντελεστής c μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω ως το γινόμενο δύο ποσοτήτων a και b , συντελεστών απορρόφησης και σκέδασης.

$$E(r) = E(0) e^{-ar} e^{-br} \quad \text{Εξ. 4.2}$$

Οι παράμετροι a, b και c αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες του μέσου που διασχίζει το φως και η γνώση τους θεωρητικά επιτρέπει την πρόβλεψη του τρόπου διάδοσης του φωτός μέσα στο νερό. Όμως εξαρτώνται από την απόσταση r καθώς και από το χρόνο. Για το λόγο αυτό οι αντίστοιχες μετρήσεις είναι πολύπλοκο εγχείρημα.

Σύμφωνα με τον Jaffe (1990) το μοντέλο σχηματισμού της υποβρύχιας εικόνας μπορεί να αναπαρασταθεί ως γραμμική υπέρθεση τριών συνιστωσών :

$$ET \text{ (total)} = ED(\text{direct}) + E_f s(\text{ forwardScatter}) + E_{bs}(\text{backScatter}) \quad \text{Εξ. 4.3}$$



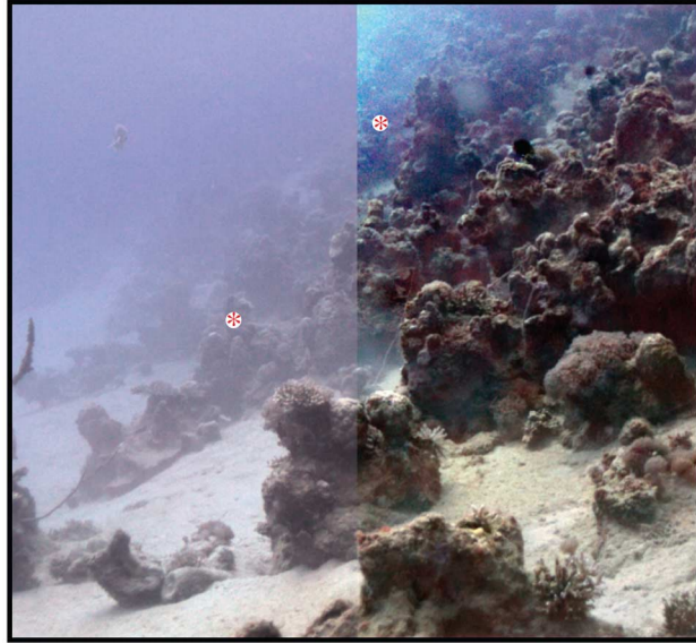
Εικόνα 4.4 Μοντέλο υπολογισμού λαμβάνουσας ακτινοβολίας Jaffe 1990 (Sedlazeck 2011)

Ο Ηου κ. α. (2007) ενσωμάτωσαν τις οπτικές ιδιότητες του νερού στο μοντέλο του Jaffe. Υπέθεσαν ότι η θολότητα προκαλείται στο μεγαλύτερο βαθμό από τη σκέδαση του νερού και των περιεχομένων του που περιλαμβάνουν διαφόρων μεγεθών σωματίδια. Η αντιμετώπισή τους συμπεριελάμβανε μετρήσεις της οπτικής συμπεριφοράς του νερού όσον αφορά στην εξάπλωση στο χωρικό πεδίο και τις αλλοιώσεις στο χώρο συχνοτήτων. Ενδεικτικά, μετρήθηκαν πειραματικά οι συντελεστές απορρόφησης, κατανομές μεγέθους σωματιδίων και συναρτήσεις σκέδασης κατ' όγκον. Για την εκτίμηση της ποιότητας της αποκατεστημένης εικόνας εισήγαγαν ένα απομονωμένο και χωρίς θόρυβο κυμάτιο (wavelet) μετρικά περιορισμένο από αναλογία φάσματος ισχύος.

Οι Trucco και Olmos (2006) παρουσίασαν ένα αυτορρυθμιζόμενο φίλτρο αποκατάστασης βασισμένο σε μια απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου Jaffe. Για το σχεδιασμό του φίλτρου έγιναν δυο υποθέσεις. Η πρώτη θεωρείτο φωτισμό ομοιόμορφο(ηλιακό φως σε ρηχά νερά) και η δεύτερη θεωρεί τη κύρια πηγή μείωσης το φωτός μόνο την $E_f s$ (forwardScatter), αγνοώντας το E_{bs} (backscatter). Αυτό φαίνεται να έχει βάση όταν η συγκέντρωση σωματιδίων που προκαλούν την 'έμμεση' σκέδαση είναι περιορισμένη αξιολόγηση έγινε ποιοτικά (οπτικός έλεγχος) και ποσοτικά εκτιμώντας την επίδραση του φίλτρου ως προεπεξεργασία για την ταξινόμηση των εικόνων. Για να επιτευχθεί αυτό τραβήχτηκαν βίντεο εκπαίδευσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα (δεξαμενή νερού, ρηχά νερά και ανοιχτή θάλασσα).

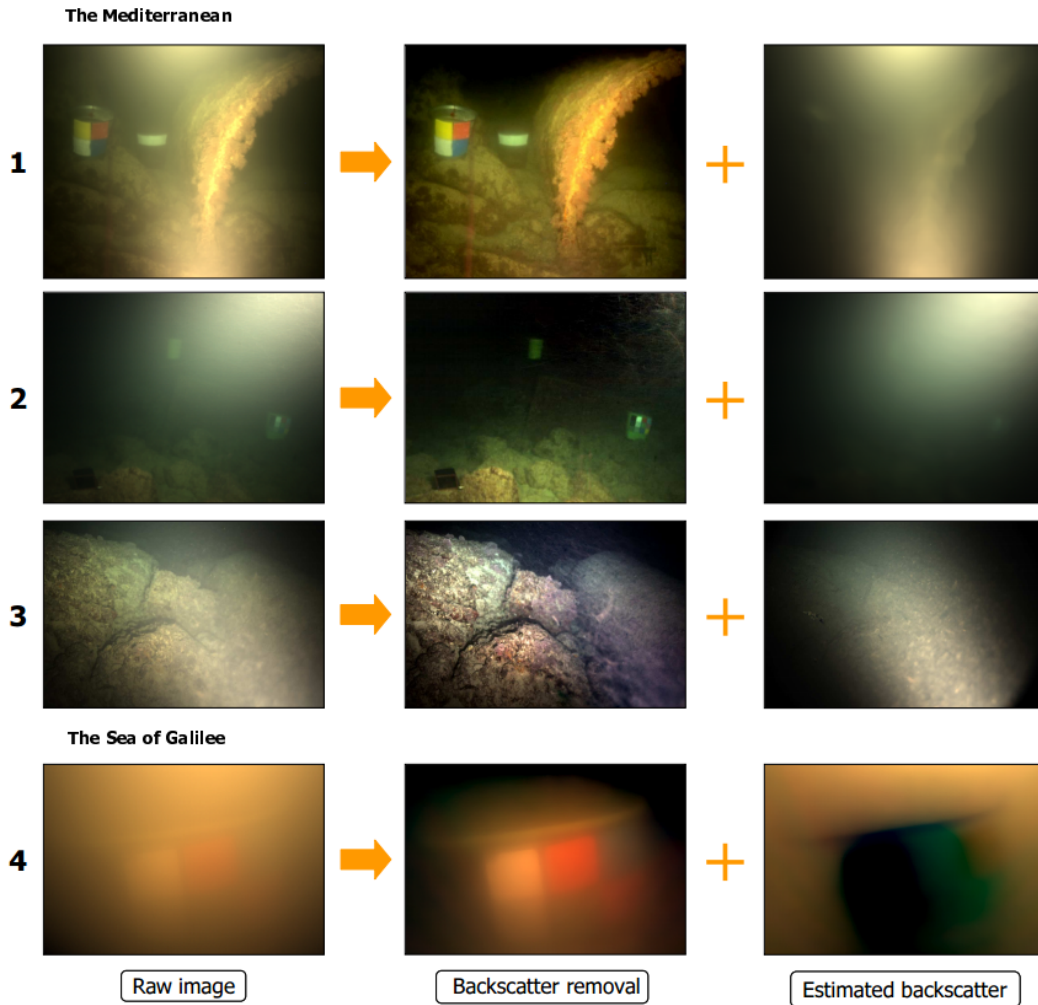
Οι Schechner και Karpel (2005) εκμεταλλεύονται την πόλωση του φωτός που προκαλείται στο νερό για να αντισταθμίσουν την μείωση της ορατότητας. Ισχυρίζονται ότι η θολότητα της εικόνας δεν είναι η κύρια αιτία για την απώλεια της αντίθεσης. Χρησιμοποιούν το μοντέλο του Jaffe υπό φυσικό φωτισμό (ηλιακό φως) αξιοποιώντας το γεγονός ότι το φως που έρχεται κάθετα προς την επιφάνεια

πολώνεται μερικώς οριζόντια. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε ζεύγος εικόνων που έχουν ληφθεί με πολωτή σε διαφορετικούς προσανατολισμούς. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση από την απόσταση του αντικειμένου και υπολογίζει αποστάσεις αυτόματα. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται αλγόριθμος αντιστάθμισης της ισχυρής μπλε απόχρωσης. Πειράματα που διεξήχθησαν στη θάλασσα δείχνουν την βελτίωση της αντίθεσης και τη διόρθωση των χρωμάτων σχεδόν διπλασιάζοντας το βεληνικές της ορατότητας (Εικόνα 4.5). Τα δυο μαρκαρισμένα σημεία έχουν την ίδια αντίθεση στην τριγύρω τους περιοχή.



Εικόνα 4.5 Σύγκριση του αρχικής με την ανακτημένη εικόνα με τη μεθοδο των Schechner και Karpel (Πηγή Schechner and Karpel, 2005)

Οι Treibitz και Schechner (2009) χρησιμοποίησαν παρόμοια μέθοδο με την προηγούμενη (πόλωση). Μελέτησαν τον σχηματισμό των εικόνων κάτω από τεχνητό φωτισμό μεγάλου εύρους. Δίνοντας βάση στα χαρακτηριστικά (εμπειρικά γνωστά) του 'εμμέσως' οπισθοσκεδαζόμενου (backscattered) φωτός παρουσίασαν μια προσέγγιση ανάκτησης της χαμένης ορατότητας η οποία παράγει επίσης μια πρόχειρη εκτίμηση της δομής του αντικειμένου σε τρεις διαστάσεις (3D). Λαμβάνονται ταυτόχρονα 2 εικόνες με χρήση πολωτή πακτωμένου στη μηχανή. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τη μέθοδο αυτή για να επιδείξουν την ανάκτηση του σχήματος του αντικειμένου και τη σημαντική βελτίωση της ορατότητας σε διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε ποιοτικά με οπτικό έλεγχο αλλά και με εκτιμήσεις της βελτίωσης της ορατότητας. Στη παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους. Στην πρώτη στήλη είναι οι φωτογραφίες όπως ελήφθησαν, στη δεύτερη με το backscattering αφαιρεμένο ενώ στη τρίτη φαίνεται η εκτίμηση της 'έμμεσης' σκέδασης.



Εικόνα 4.6 Αποτελέσματα από τα πειράματα των Treibitz και Shcechner (Treibitz και Schechner,2009

4.2.2 Ανασκόπηση σε μεθόδους βελτίωσης της εικόνας

Οι μέθοδοι αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη την διαδικασία σχηματισμού της εικόνας και δεν προϋποθέτουν γνώση των συνθηκών περιβάλλοντος. Είναι πιο απλές και γρηγορότερες από τις μεθόδους αποκατάστασης εικόνας. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω τα χρώματα μέσα στο νερό χάνονται όσο το βάθος αυξάνεται. Για αυτό και στις υποβρύχιας εικόνες κυρίαρχο χρώμα είναι το μπλέ-πράσινο. Οι διαφορετικές πηγές φωτός επηρεάζουν επίσης την αντίληψη των χρωμάτων. Συνέπεια των παραπάνω είναι μια τυπική υποβρύχια εικόνα να χαρακτηρίζεται από μεγάλες και μη ομοιόμορφες χρωματικές αποκλίσεις.

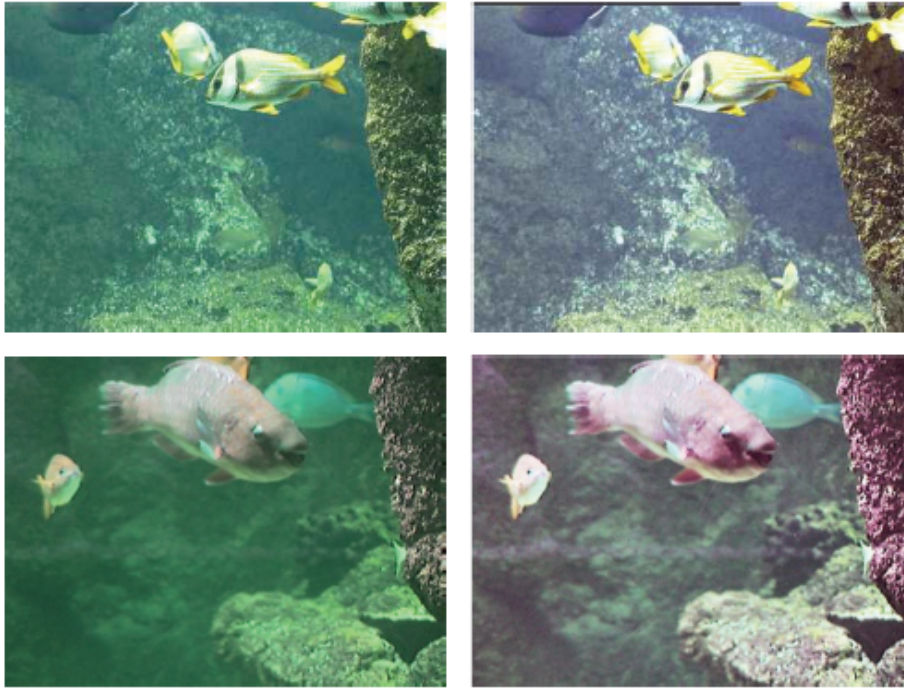
Ο Bazeille κ.ά.(2006) προτείνει ένα αλγόριθμο προεπεξεργασίας ο οποίος μειώνει τις διαταράξεις που δημιουργεί το νερό και βελτιώνει την ποιότητα της εικόνων. Αποτελείται από μερικά διαδοχικά αλλά ανεξάρτητα στάδια που διορθώνουν τον ανομοιομορφο φωτισμό (homomorphic φιλτράρισμα), αντιμετωπίζει το θόρυβο των κυματισμών, ενισχύει τις ακμές και την ευκρίνεια (anisotropic φιλτράρισμα) και διορθώνει το χρωματισμό ισοσταθμίζοντας τα τρία κανάλια (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Ο αλγόριθμος είναι πλήρως αυτοματοποιημένος και δεν απαιτεί κάποια ρύθμιση παραμέτρων. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε ως προκαταρκτικό βήμα για τον εντοπισμό ακμών. Για την αξιολόγηση της μεθόδου εκτός από τον οπτικό έλεγχο και τεστ αναγνώρισης αντικειμένων στο βυθό, έγινε έλεγχος σύμφωνα με το κριτήριο

των Arnold-Bos κ.ά.(2005). Το κριτήριο υποθέτει ότι μια εικόνα με καλή αντίθεση και απαλλαγμένη από το θόρυβο έχει εκθετικής μορφής ιστογράμμα αλλαγής κλίσεων (GradientMagnitudeHistogram). Στη παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εφαρμοσμένα σε φωτογραφίες.



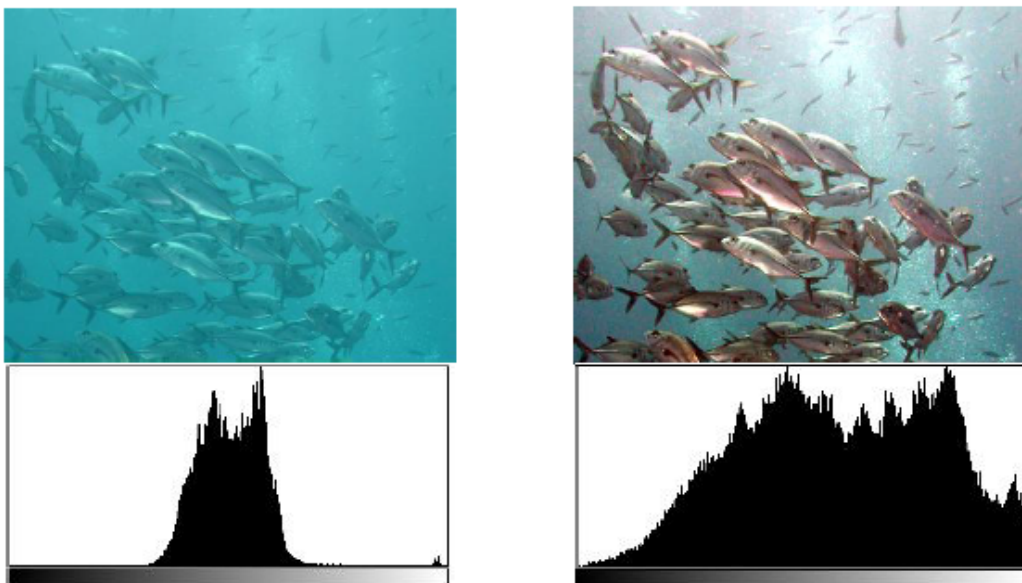
Εικόνα 4.7 Ζευγάρια εικόνων πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά την εφαρμογή του αλγορίθμου των Bazeille κ.ά. (Bazeille κ.ά. 2006).

Ο Chambah κ.ά.(2004) πρότεινε μια μέθοδο διόρθωσης βασισμένη στον ACE (AutomaticColorEqualization), έναν αλγόριθμο ισοστάθμισης χρωμάτων και μη επιβλεπόμενης ενίσχυσης της αντίθεσης. Πρόκειται για μια προσέγγιση εμπνευσμένη από κάποιους μηχανισμούς προσαρμογής της ανθρώπινης όρασης και συγκεκριμένα την σταθερότητα που επιδεικνύουν οι ανθρώπινοι οφθαλμοί στο να λαμβάνουν εικόνα άσχετα με τις μεταβολές στην ένταση του φωτός και των χρωμάτων. Εφαρμόστηκε σε καρέ βίντεο τραβηγμένα σε υποβρύχιο περιβάλλον με ανομοιόμορφες χρωματικές αποκλίσεις λόγω του βάθους και τεχνητό φωτισμό. Οι εσωτερικές παράμετροι του ACE ρυθμίστηκαν κατάλληλα ούτως ώστε να εξασφαλίζουν την φυσική μορφή των ιστογραμμάτων της εικόνας στις επικρατούσες συνθήκες. Στη παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου.



Εικόνα 4.8 Αποτελέσματα αλγορίθμου ACE (Chambah,2004)

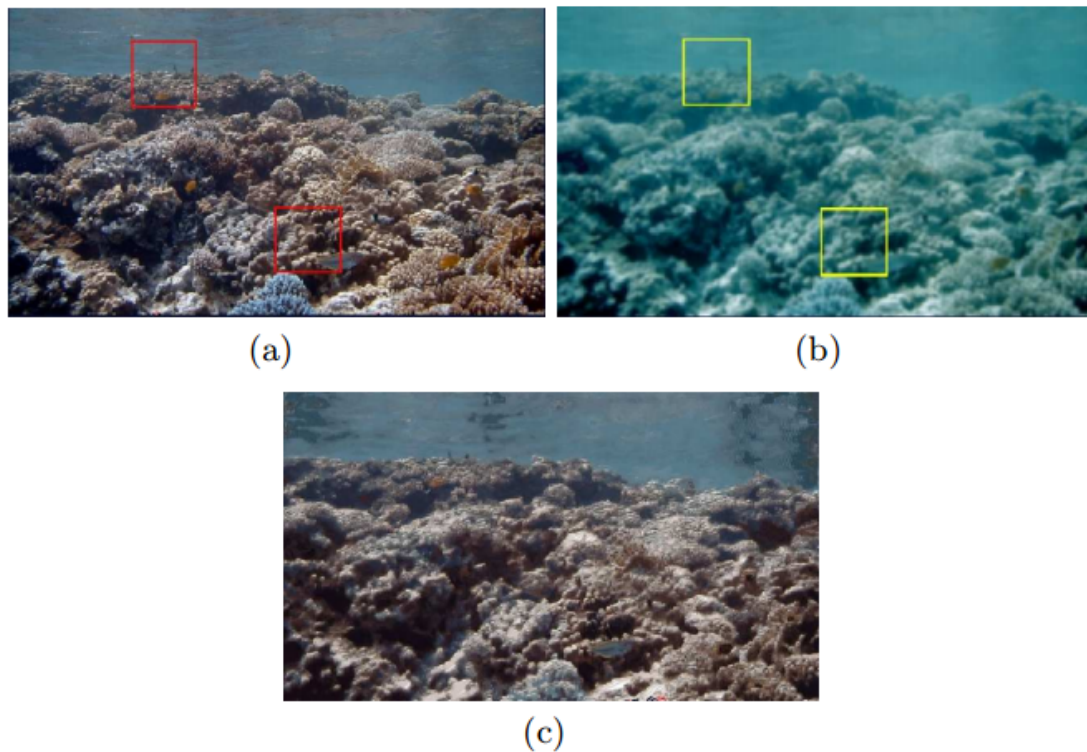
Ο Ιqbalκ.ά. (2012) παρουσίασαν μια μέθοδο διόρθωσης της εικόνας με χρήση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου χρωμάτων και μια διαδικασία διαδοχικών εκτάσεων. Πρώτα εφαρμόζουν έκταση στα κανάλια του κόκκινου, πράσινου και μπλε για να ισοσταθμίσουν την μεταξύ τους αντίθεση. Έπειτα εφαρμόζουν έκταση στον κορεσμό (saturation) και ένταση (intensity) στον χώρο HSI για να λύσουν το πρόβλημα του φωτισμού και να ενισχύσουν τα αληθή χρώματα. Το μπλε στην εικόνα ελέγχεται από τις δύο συνιστώσες του HSI και καταλαμβάνει εύρος από γαλάζιο έως βαθύ μπλε και η αντίθεση πλέον ελέγχεται από την αυξομείωση της τιμής του. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα της διόρθωσης μαζί με το εκτεταμένο πλέον ιστόγραμμα.



Εικόνα 4.9 Αποτέλεσμα μεθόδου Ιqbal αρχική εικόνα με το ιστόγραμμά της (δεξιά) και η διορθωμένη (αριστερά)(Ιqbalκ.ά. 2012)

Ο Arnold-Bos κ.ά. (2005) ερευνήσε την δυνατότητα συνολικής διόρθωσης του θορύβου στις υποβρύχιες εικόνες χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό αποσυνέλιξης και μεθόδων ενίσχυσης. Αρχικά προτείνεται ένα σύστημα ισοστάθμισης της αντίθεσης για την απαλοιφή της 'έμμεσης' οπισθοσκέδασης (backscattering), της μείωσης και γενικά της ανομοιομορφίας του φωτός. Ακολουθεί ψαλίδισμα και επέκταση του ιστογράμματος. Η σκέδαση λαμβάνεται σαν η πρώτη πηγή θορύβου που διορθώνεται από τον αλγόριθμο όμως η ισοστάθμιση της αντίθεσης διορθώνει και την απόσβεση του φωτός η οποία αυξάνεται εκθετικά με την απόσταση. Ο υπολοιπόμενος θόρυβος (σωματίδια, αισθητήρας κλπ) αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός γενικού αυτορυθμιζόμενου αλγόριθμου εξομάλυνσης.

Οι Torres-Mendez και Dudek (2005) αναλύουν την αποκατάσταση χρώματος από διαφορετική σκοπιά. Το διατυπώνουν ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης ενέργειας με χρήση περιορισμών. Η διόρθωση χρώματος γίνεται δίνοντας τιμή χρώματος σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας η οποία περιγράφει καλύτερα το περιβάλλοντα χώρο με χρήση όμως εικόνων εκπαίδευσης. Το μοντέλο χρησιμοποιεί αναπαραστάσεις των υποβαθμισμένων και διορθωμένων χρωματικά εικόνων για να κατασκευάσει ένα πιθανολογικό αλγόριθμο ο οποίος βελτιώνει το χρώμα της εικόνας. Παρακάτω φαίνονται αποτελέσματα από τα πειράματα.



Εικόνα 4.10 Αποτελέσματα μοντέλου Torres-Mendez και Dudek (Torres-Mendez και Dudek, 2005)

Η εικόνα (α) είναι η αληθής (ground truth) εικόνα, η (β) είναι η αρχική και η (c) είναι η διορθωμένη. Τα τετράγωνα δείχνουν τις περιοχές εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

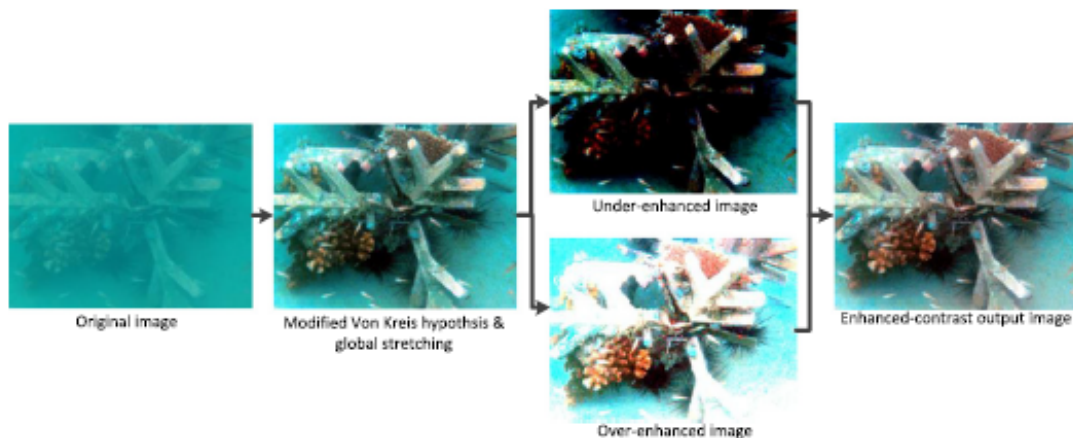
Οι Ahlen κ.ά. (2005), για την παρακολούθηση κοραλλιογενών υφάλων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων χρησιμοποιούν υπερφασματικά δεδομένα για την εφαρμογή της διόρθωσης. Αναπτύσσουν ένα μαθηματικό μοντέλο σταθερότητας που δίνει εύρη τιμών για μήκη κύματος τα οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των συντελεστών μείωσης και είναι κατά το δυνατόν σταθερά για αντίστοιχα βάθη.

Γίνονται μετρήσεις με φασματογράφο σε διάφορα βάθη μιας χρωματικής κλίμακας, τα διορθώνουν και υπολογίζουν τους αντίστοιχους συντελεστές. Με τον τρόπο αυτό 'σηκώνουν' τις εικόνες σε βάθη περίπου 2 μέτρων όπου υπάρχουν όλα τα μήκη κύματος.

Ο Hitamκ.ά. (2013) παρουσίασε τη τεχνική διόρθωσης CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Πρόκειται για μια μέθοδο που αναπτύχθηκε ειδικά για τη βελτίωση υποβρύχιας εικόνας. Όπως μαρτυράει και το όνομα, εφαρμόζει ισοστάθμιση αντίθεσης σε περιορισμένο χώρο (κομμάτια της εικόνας) στον χώρο RGB και HSV και συνδυάζει τα αποτελέσματα μέσω του Ευκλείδειου κανόνα(νόρμας).

Ο Sahuk.ά. (2014) χρησιμοποίησε φίλτρο USM (Φίλτρο Όξυνσης) μαζί με ενίσχυση χρωμάτων στον RGB χώρο με αποτέλεσμα να διορθώνεται μεν η εικόνα αλλά και να υπάρχουν προβλήματα στην ακρίβεια απεικόνισης του αντικειμένου.

Ο Ghani κ.ά. (2014) εφαρμόζουν μια μέθοδο ενίσχυσης αποτελούμενη από δύο στάδια. Στο πρώτο γίνεται διόρθωση της αντίθεσης και δημιουργούνται δυο ισοσταθμισμένες εικόνες με διαφορετική μέση τιμή έντασης, σύμφωνα με την υπόθεση VonKreiss. Αποτέλεσμα είναι μία υπερενισχυμένη και μια υποενισχυμένη εικόνα. Στη συνέχεια οι δύο εικόνες συνδυάζονται και αφού γίνει ισοστάθμιση των καναλιών του κορεσμού (S) και της τιμής (V) στον HSV χώρο η εικόνα μετατρέπεται ξανά στον RGBχώρο για το τελικό αποτέλεσμα. Παρακάτω φαίνονται τα διαδοχικά στάδια της επεξεργασίας, και πώς από την αρχική θολή εικόνα καταλήγει στην διορθωμένη, με ευκρίνεια και χωρίς θόρυβο τελική εικόνα.

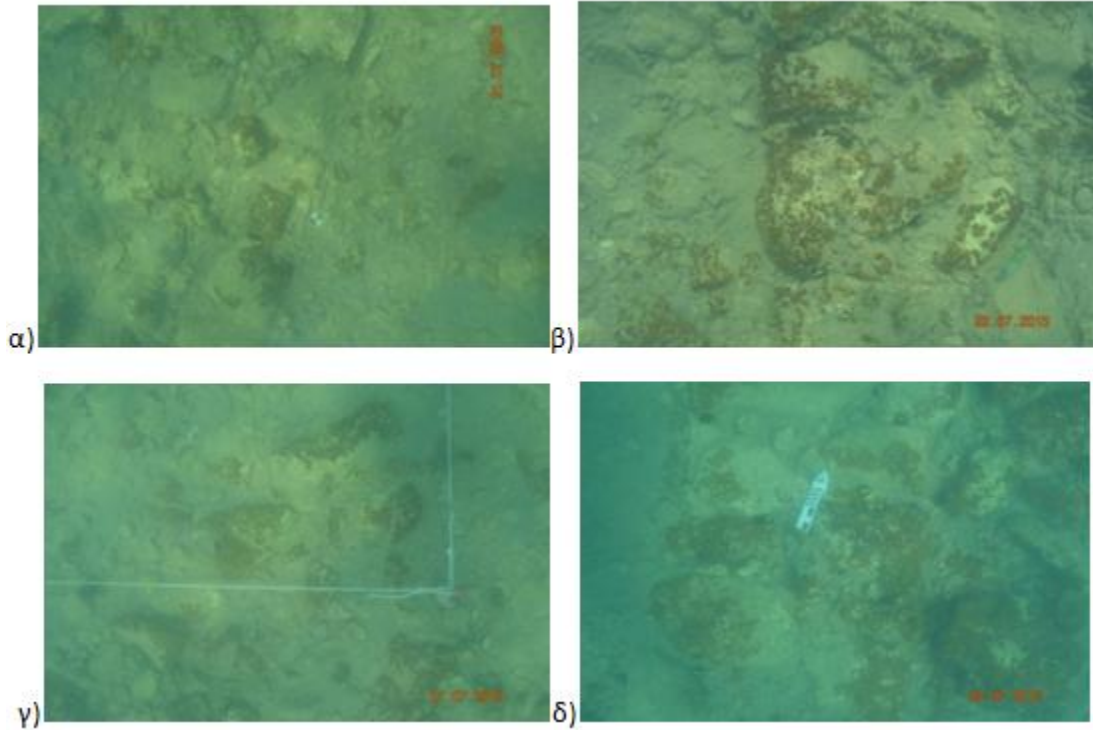


Εικόνα 4.11 Στάδια επεξεργασίας μεθόδου των Ghanik.ά. (Ghanik.ά. 2014)

4.3 Διερεύνηση τρόπων ραδιομετρικής βελτίωσης υποβρύχιας εικόνας

Για την πρακτική εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής(Κεφάλαιο 5) συλλέχτηκαν εικόνες από την ανασκαφή στην τοποθεσία Λαμπαγιαννάς Κοιλιάδας Αργολίδος. Με βάση την μελέτη της βιβλιογραφίας διερευνήθηκε η δυνατότητα διόρθωσης και βελτίωσης των αρχικών εικόνων. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ταξινομείται στη δεύτερη κατηγορία βελτίωσης εικόνας καθώς δεν είναι γνωστές με ποσοτικούς όρους οι συνθήκες του περιβάλλοντος και δεν έχουν ληφθεί μετρήσεις για την μοντελοποίηση του. Κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Συνεπώς τα κριτήρια διόρθωσης είναι υποκειμενικά και η ποιοτική τους αξιολόγηση γίνεται με οπτικό έλεγχο.

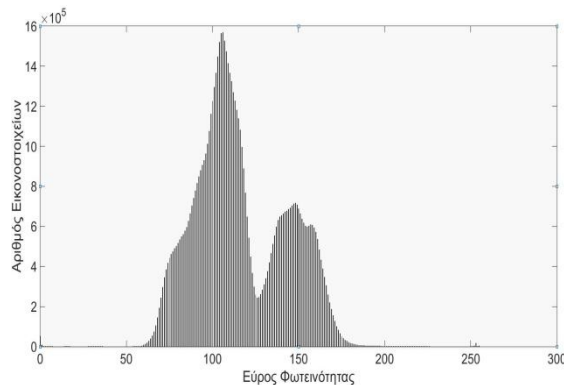
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται δείγμα από τα δεδομένα που ελήφθησαν στο πεδίο.



Εικόνα 4.12 Αρχικές εικόνες από το αντικείμενο α) "φωτοσταθερό" β) "ψάρι" γ) "γωνία" δ) "κλίμακα"

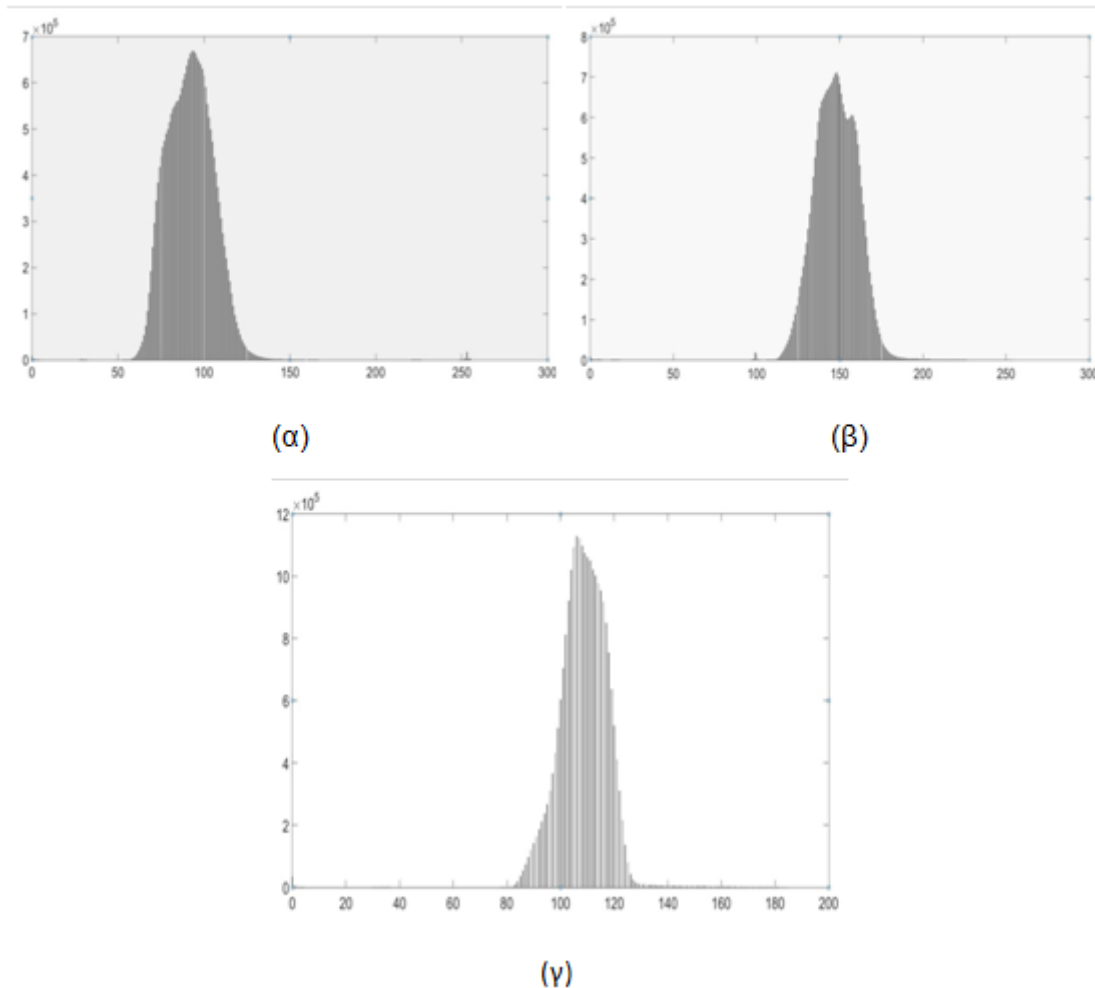
4.3.1 Διόρθωση με το λογισμικό AdobePhotoshop

Οι ευκολίες και η μεγάλη γκάμα εργαλείων που διαθέτει το συγκεκριμένο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας δίνουν πολλές δυνατότητες στο χρήστη. Στο πρώτο στάδιο της διερεύνησης, τα δεδομένα τέθηκαν υπό επεξεργασία. Η πρασινωπή απόχρωση είναι η κυρίαρχη στο σύνολο των δεδομένων. Αυτό οφείλεται στο μικρό βάθος και στη θολότητα του πυθμένα η οποία επίσης ευθύνεται για την χαμηλή αντίθεση.



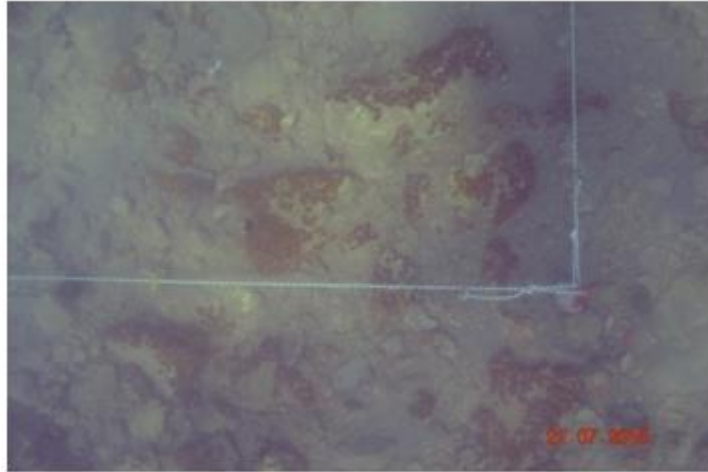
Εικόνα 4.13 Ιστόγραμμα εικόνας 4.12β

Παρατηρώντας το ιστόγραμμα της εικόνας 4.12β καταλαβαίνει κάποιος ότι υπάρχει ανομοιομορφία στην κατανομή των τόνων της φωτεινότητας στα τρία κανάλια. Αν τα κανάλια αυτά αναλυθούν εύκολα γίνεται αντιληπτό γιατί το κυρίαρχο χρώμα είναι το πράσινο-μπλε.

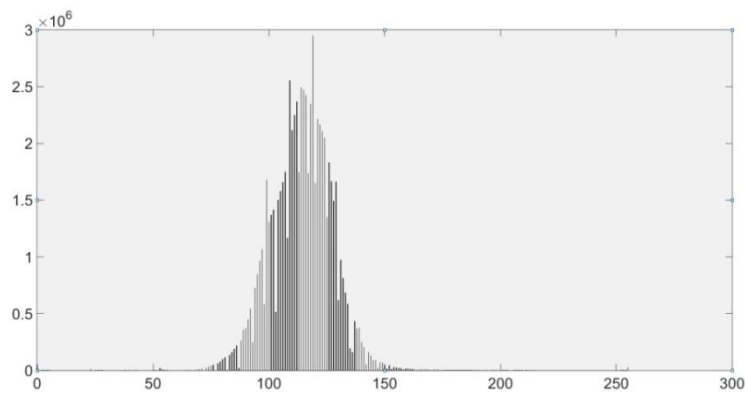


Εικόνα 4.14 Ιστογράμματα Κόκκινου (α) Πράσινου (β) και μπλέ (γ)

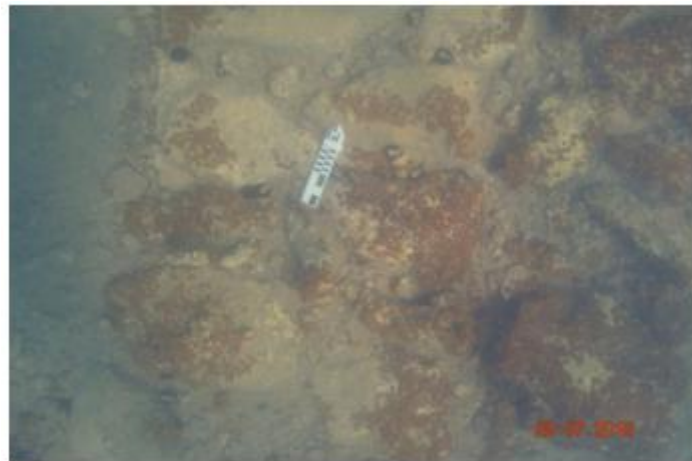
Το AdobePhotoshop διαθέτει πληθώρα αυτόματων ρουτινών διόρθωσης. Έπειτα από πειραματισμούς χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος "Find Dark and Light Colors". Επίσης επιλέχθηκε και η εύρεση μιας τιμής ουδέτερου χρώματος και να γίνει διόρθωση 'γάμμα' σύμφωνα με αυτή τη τιμή. Δεν είναι γνωστό πώς ακριβώς δρα ο αλγόριθμος. Σύμφωνα με την υποστήριξη του λογισμικού βρίσκει μια μέση τιμή ανάμεσα στα σκοτεινότερα εικονοστοιχεία και μια μέση τιμή ανάμεσα στα φωτεινότερα εικονοστοιχεία και τις χρησιμοποιεί για να μεγιστοποιήσει την αντίθεση και ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το κλιπάρισμα (αποκοπή μεγίστων και ελαχίστων εντάσεων). Με την εφαρμογή της διόρθωσης αυτής τα αποτελέσματα πλησιάζουν την πραγματικότητα. Η θολότητα έχει περιοριστεί αρκετά και τα χρώματα φαίνονται σωστά κρίνοντας από το ασπρόμαυρο σκοινί, το φωτοσταθερό, τον κίτρινο σπάγγο και τη κόκκινη μπογιά πάνω στη γωνία (Εικόνα 4.15). Άκρως χρήσιμη στην εφαρμογή αυτή θα ήταν η παρουσία μιας χρωματικής κλίμακας για την αντικειμενική αξιολόγηση των διορθώσεων. Ένα πρόβλημα που παρατηρείται είναι ότι παραμένει ανομοιομορφία στο φωτισμό λόγω των κυματισμών της επιφάνειας. Στην Εικόνα 16 φαίνεται η διαμόρφωση του ιστογράμματος της νέας εικόνας. Ναι μεν τα κανάλια έχουν παρόμοιο σχήμα και ίδιο εύρος τιμών αλλά το εύρος αυτό καλύπτει το ένα τέταρτο περίπου του συνολικού εύρους με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ισχυρή αντίθεση. Επίσης επειδή οι συνθήκες περιβάλλοντος διαφοροποιούνται αισθητά μεταξύ κάποιων λήψεων, ο αλγόριθμος δεν έδινε το ίδιο αποτέλεσμα σε όλες τις εικόνες (Εικόνα 4.23). Αυτό επηρέασε την δημιουργία του 3D μοντέλου αργότερα σε σημείο που να είναι αδύνατος ο σχετικός προσανατολισμός τμήματος του.



Εικόνα 4.15 Τελική εικόνα 4.12.γέπειτα από επεξεργασία στο AdobePhotoshop



Εικόνα 4.16 Ιστόγραμμα εικόνας 15

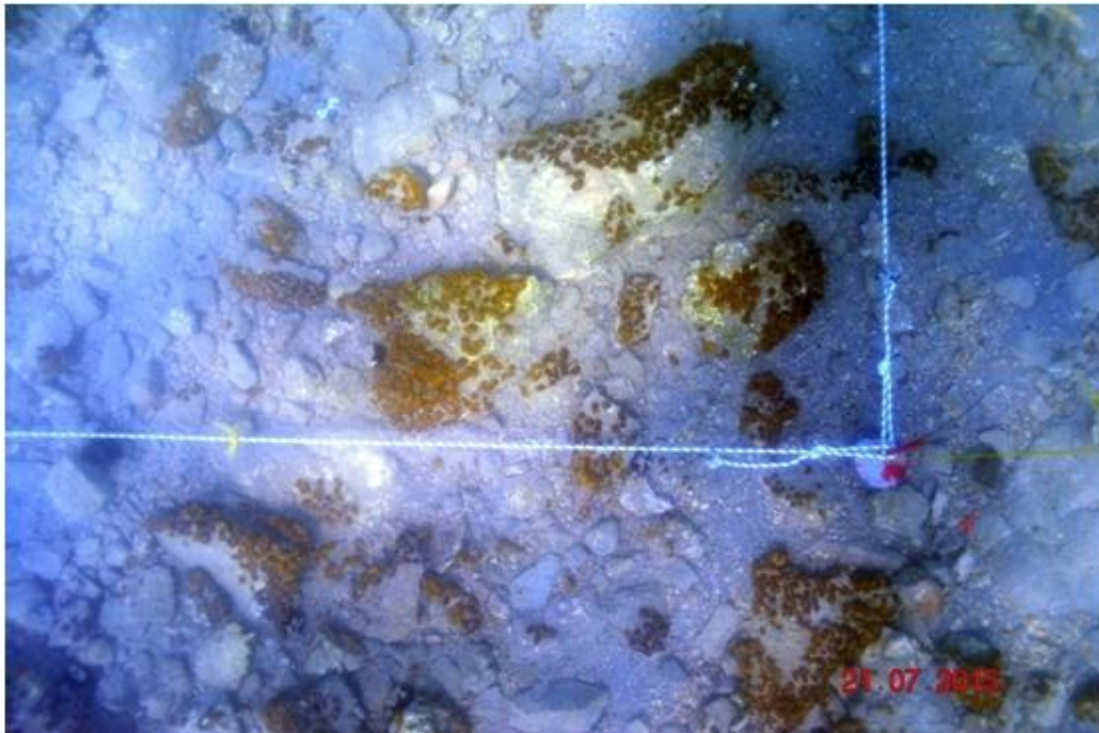


Εικόνα 4.17 Τελική εικόνα επειτα από επεξεργασία Photoshop 12.δ

Η δεύτερη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό είναι το whitebalancing. WhiteBalance ή Ισορροπία Λευκού ονομάζεται η διαδικασία αφαίρεσης χρωμάτων με τρόπο τέτοιο ούτως ώστε τα αντικείμενα που είναι λευκά στη πραγματικότητα να γίνουν λευκά και στην φωτογραφία. Επειδή οι αισθητήρες των μηχανών δεν αντιλαμβάνονται το λευκό χρώμα τόσο αποτελεσματικά όπως οι ανθρώπινοι οφθαλμοί έχουν ενσωματωμένη την λειτουργία ισορροπίας λευκού. Πολλές φορές όμως οι συνθήκες είναι τέτοιες (π.χ. κακός φωτισμός) που κάνουν την μηχανή να

αντιμετωπίζει δυσκολίες με την αυτόματη ισορροπία λευκού. Η ειδική περίπτωση των υποβρυχίων λήψεων όπου υπάρχει υπεραφθονία του μπλε, ενός ψυχρού χρώματος, η αυτόματη εξισορρόπηση του λευκού δεν είναι εφικτή. Για το λόγο αυτό επιχειρήθηκε να αποκατασταθεί η ισορροπία του ως εναλλακτική προσέγγιση της χρωματικής διόρθωσης των εικόνων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής. Δουλεύοντας ταυτόχρονα και στα τρία κανάλια γίνεται κατωφλίωση της εικόνας για να βρεθεί η μικρότερη τιμή μαύρου πάνω της. Αφού γίνει αυτό, γίνεται δειγματοληψία στην περιοχή που εμφανίστηκε η τιμή αυτή και επιλέγεται ως το κάτω όριο του εύρους των τιμών. Η τιμή δε είναι σταθερή για όλες τις εικόνες αλλά έχει ένα εύρος από 2 έως 5. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα είδος ισοστάθμισης ιστογράμματος αλλά με οπτικά κριτήρια. Αφού επιλεγεί το κάτω όριο, γίνεται κατωφλίωση στη νέα εικόνα αλλά αντίστροφα. Με το τρόπο αυτό βρίσκεται η τιμή του άσπρου. Λαμβάνεται δειγματοληπτικά από την περιοχή της εικόνας ο τόνος και τοποθετείται στο άνω όριο του εύρους των τιμών φωτεινότητας. Και πάλι η τιμή δεν είναι σταθερή αλλά κυμαίνεται από 255 έως 250. Τέλος δημιουργείται ένα επίθεμα γκριζου τόνου (50%) και αφαιρείται από την εικόνα. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η αληθινή τιμή του γκριζου πάνω στην αρχική φωτογραφία. Αφού βρεθεί αυτή τοποθετείται στο μέσο του εύρους των τιμών φωτεινότητας και το αποτέλεσμα είναι η εικόνα ισορροπημένη στο λευκό.

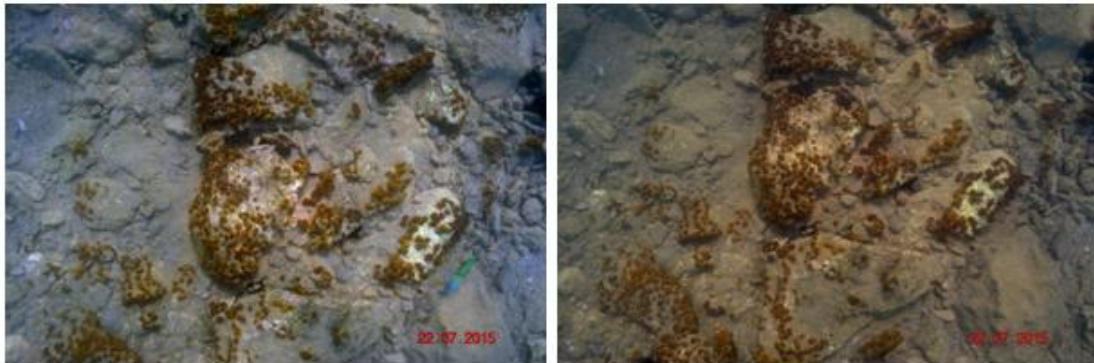


Εικόνα 4.18 Εικόνα 12.βέπειτα από διόρθωση whitebalancing

Είναι φανερό ότι το αποτέλεσμα είναι καλύτερο οπτικά με τα χρώματα να φαίνονται ρεαλιστικά και την ολική αντίθεση ενισχυμένη. Όμως επειδή τα κανάλια του RGB υποκείνται ταυτόχρονα σε επεξεργασία, παρατηρούνται χρωματικές αποκλίσεις μεταξύ διαδοχικών λήψεων.

Στην εικόνα 4.19 παρατηρείται η χρωματική απόκλιση μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων οι οποίες διορθώθηκαν με τον ίδιο τρόπο. Ενώ στη πρώτη τα χρώματα φαίνονται να έχουν διορθωθεί (το ψάρι φαίνεται να έχει ρεαλιστικά χρώματα) η δεύτερη λήψη διαφοροποιείται ελαφρώς με μια πιο κόκκινη απόχρωση. Αυτό καθιστά την μέθοδο της εξισορρόπησης λευκού αναποτελεσματική για την εφαρμογή καθώς οι

διαφορές αυτές στα χρώματα δημιουργούν πρόβλημα στην αυτόματη αναγνώριση ομόλογων σημείων κατά την φωτογραμμετρική επεξεργασία. Επίσης πρόκειται για μια χρονοβόρα διαδικασία καθώς οι διορθώσεις γίνονται χειρωνακτικά σε μια φωτογραφία τη φορά και αυτό αυξάνει σημαντικά τις ανθρωποώρες εργασίας .



Εικόνα 4.19 Δυό διαδοχικές λήψεις διορθωμένες με whitebalancing

4.3.2 Διόρθωση Εικόνων με επεξεργασία Ιστογραμμάτων

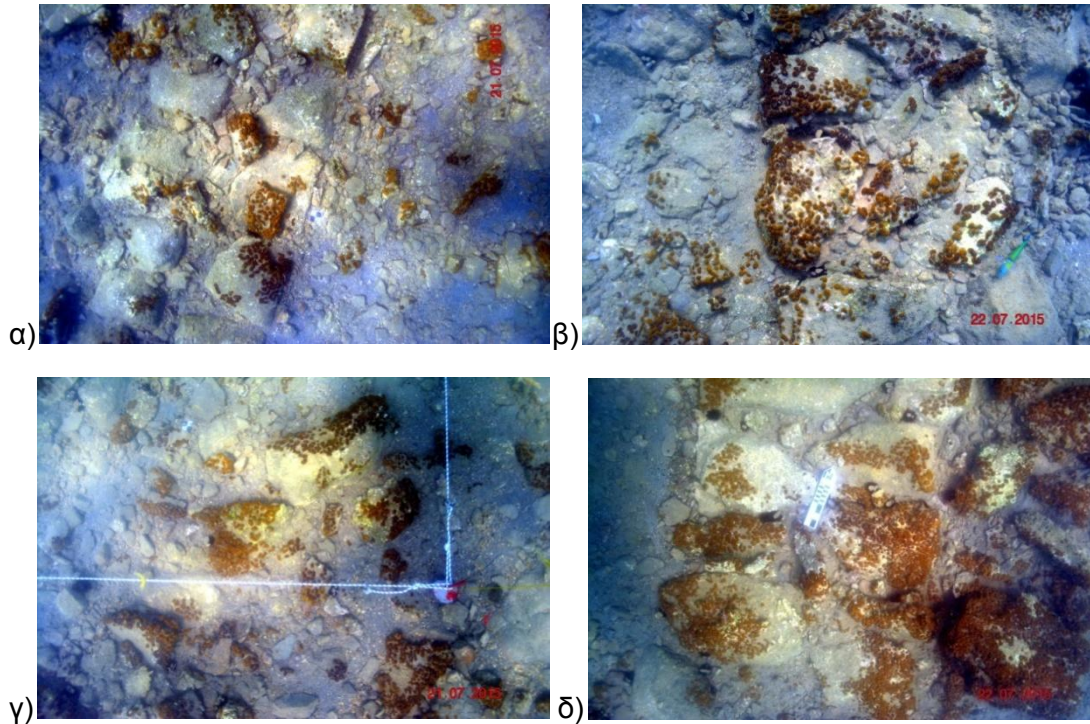
Το Adobe Photoshop αποτελεί ένα κλειστό λογισμικό και ο ακριβής τρόπος λειτουργίας των αλγορίθμων του δεν είναι γνωστός. Αυτό σε συνδυασμό με τις διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι εικόνες στο τελικό αποτέλεσμα της διόρθωσης οδήγησαν στην αντιμετώπιση του προβλήματος με περισσότερο ελεγχόμενες διαδικασίες.

Όπως φαίνεται από τα ιστογράμματα των αρχικών εικόνων μπορεί να υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή των τιμών φωτεινότητας, αλλά η παρουσία των τιμών και στα τρία κανάλια είναι επαρκής για να δοκιμαστεί μια επέκταση (stretching) των ιστογραμμάτων. Η εξίσωση που περιγράφει την επέκταση του ιστογράμματος είναι η :

$$G(x, y) = \frac{F(x, y) - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} * 2^{bpp} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

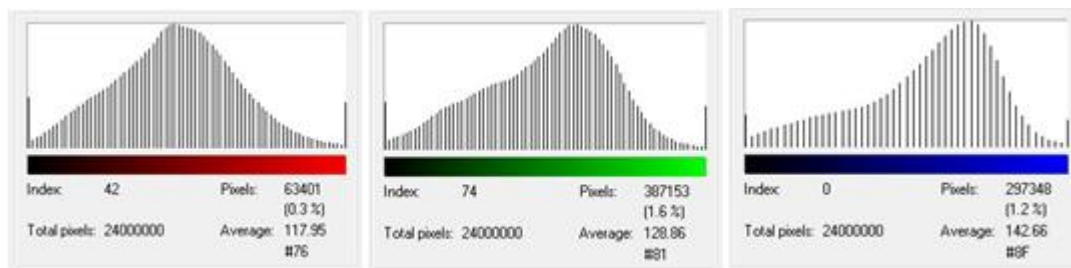
όπου $G(x, y)$ το εικονοστοιχείο της τελικής εικόνας, $F(x, y)$ το εικονοστοιχείο της αρχικής εικόνας, F_{min} η ελάχιστη τιμή έντασης της αρχικής εικόνας, F_{max} η μέγιστη τιμή έντασης της αρχικής εικόνας και 2^{bpp} το βάθος έντασης. Οι εικόνες έχουν βάθος 2^8 byte ή 256 byte.

Η διόρθωση αυτή πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab. Συντάχθηκε αλγόριθμος που εντοπίζει αυτόματα τις τιμές για κάθε εικονοστοιχείο και κανάλι και εφαρμόζει την επέκταση όχι στο σύνολο του εύρους αλλά αποκόπτοντας 1% από τις άκρες, δηλαδή από το 1% έως το 99% του συνολικού εύρους. Οι τιμές που αντιστοιχούν στις εντάσεις αυτές είναι 2.5 και 252.4. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 4.20 Τελικές εικόνες έπειτα από διόρθωση επέκτασης ιστογραμμάτων

Είναι εμφανής η βελτίωση στα χρώματα και στην αντίθεση. Η θολότητα έχει εξαιρεθεί εξ ολοκλήρου και οι λεπτομέρειες έχουν αναδειχθεί. Όμως αν κοιτάξει κάποιος τα νέα ιστογράμματα παρατηρεί μεν ότι οι τιμές της φωτεινότητας έχουν καλύψει το σύνολο των τιμών, αλλά το σχήμα τους έχει μείνει ίδιο. Συνέπεια αυτού είναι το ιστογράμμο να έχει ανομοιόμορφη κατανομή και κάποιο κανάλι να υπερισχύει έναντι των υπολοίπων. Για παράδειγμα στην Εικόνα 4.20β το κανάλι του μπλέ έχει υπερισχύσει έναντι των άλλων δύο και στις άκρες της εικόνας η σκηνή έχει μπλέ απόχρωση κάτι που δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Όπως φαίνεται και από τα ιστογράμμάτα της, το μπλε κανάλι έχει μεγαλύτερη μέση τιμή (142) ενώ το κόκκινο και πράσινο έχουν μικρή απόκλιση στη μέση τιμή και το σχήμα. Επίσης πολλές τιμές που ήταν πέραν των ορίων που ελήφθησαν ως αρχικές τιμές (θεωρήθηκαν θόρυβος από το λογισμικό) έχουν πάρει ελαχιστη ή μέγιστη τιμή (0,255) και έχουν δημιουργήσει πολύ σκοτεινές ή φωτεινές περιοχές.



Εικόνα 4.21 Ιστογράμματα κόκκινου πράσινου και μπλέ καναλιού της Εικόνας 20.β

4.3.3 Διόρθωση με τη μέθοδο "Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization"

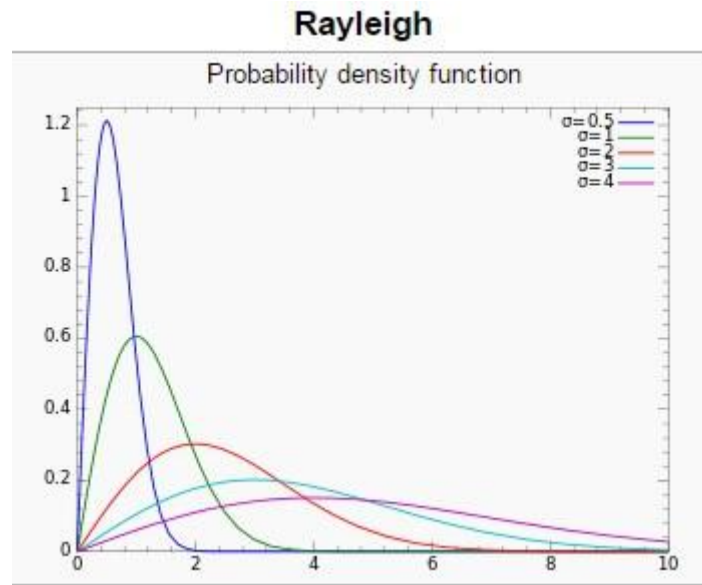
Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν με την εφαρμογή της προηγούμενης μεθόδου επιχειρήθηκε να αντιμετωπιστούν με την εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης των Hitam κ.ά. (2013) CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αλγόριθμος τους εφαρμόζει ισοστάθμιση

ιστογράμματος σε υποπεριοχές της εικόνας και τις επανασυνθέτει με χρήση διγραμμικής παρεμβολής.

Υπάρχει έτοιμη συνάρτηση στο MATLAB με την οποία ο χρήστης μπορεί να ορίσει μεταβλητές και να την εφαρμόσει. Οι μεταβλητές που ορίστηκαν είναι το μέγεθος του παραθύρου εφαρμογής, το όριο αποκοπής της αντίθεσης και η επιθυμητή μορφή του ιστογράμματος της τελικής εικόνας. Έπειτα από πειραματισμούς το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα επιτεύχθηκε με παράθυρο εφαρμογής 9X9 pixel, όριο αποκοπής 2.5 % για τα κανάλια του κόκκινου και μπλε και 1.5% για το πράσινο και μορφή ιστογράμματος ίδια με τη συνάρτηση αθροιστικής πυκνότητας Rayleigh. Η συνάρτηση έχει εξίσωση :

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \quad x \geq 0, \quad \text{Εξ. 4.2}$$

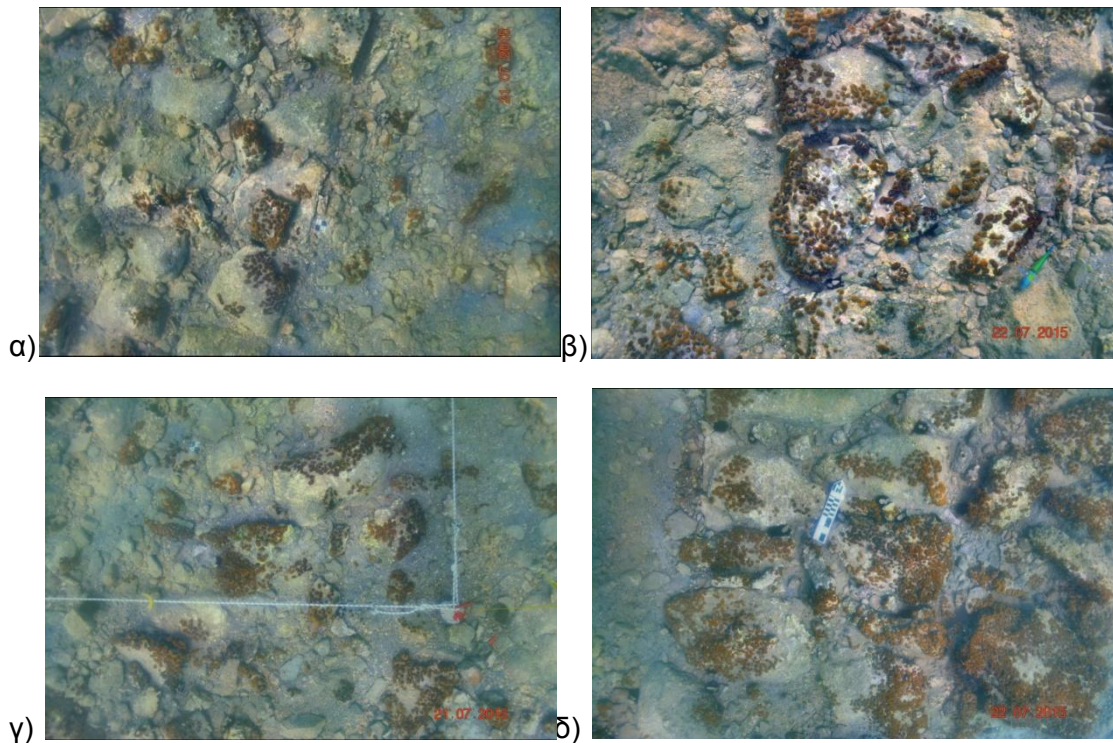
όπου σ είναι η παράμετρος κλίμακας. Στην Εικόνα 4.22 φαίνεται το σχήμα της συνάρτησης για διάφορες τιμές του σ .



Εικόνα 4.22 Συνάρτησεις αθροιστικής πυκνότητας Rayleigh (Wikipedia)

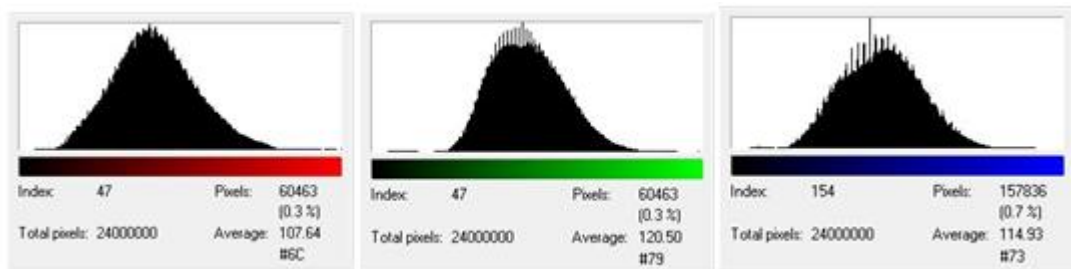
Η κατανομή Rayleigh είναι κατάλληλη για την ισοστάθμιση ιστογραμμάτων υποβρύχιας εικόνας καθώς το σχήμα καμπάνας δίνει την δυνατότητα στα εικονοστοιχεία να καταταξιολογηθούν στις μεσαίες τιμές του εύρους φωτεινότητας και όχι σε ακραίες. Ο ανθρώπινος οφθαλμός αντιλαμβάνεται καλύτερα την αντίθεση με αυτόν το τρόπο.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διόρθωσης.



Εικόνα 4.23 Τελικές εικόνες έπειτα από διόρθωση CLAHE

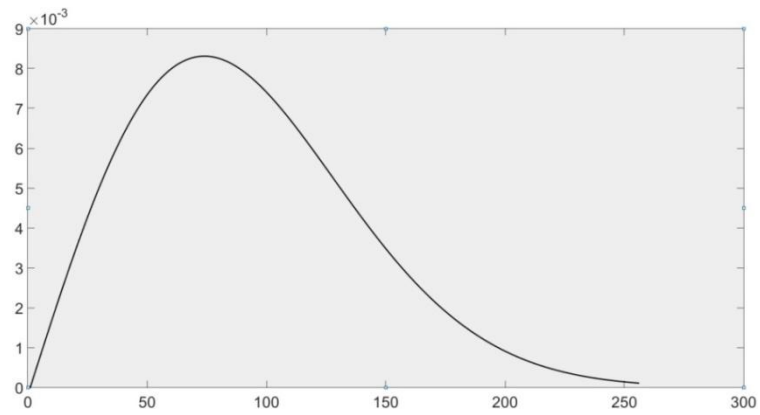
Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Η θολότητα εξαλείφθηκε, δεν υπάρχει ανομοιομορφία φωτισμού και τα χρώματα παρουσιάζουν ισορροπία ως προς το λευκό. Όμως η κατανομή των ιστογραμμάτων δεν προσεγγίζει την κατανομή Rayleigh αλλά περισσότερο την κανονική κατανομή. Επίσης στα κανάλια του πράσινου και μπλέ και λιγότερο στο κόκκινο παρουσιάζονται κάποιες απότομες αυξήσεις στις μεσαίες τιμές. Παρόλα αυτά συγκεκριμένη μεθοδολογία έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα τόσο επειδή εκτελείται σε μικρό χρονικό διάστημα όσο και ότι διεξάγεται αυτόματα και παρέχει καλό οπτικό αποτέλεσμα.



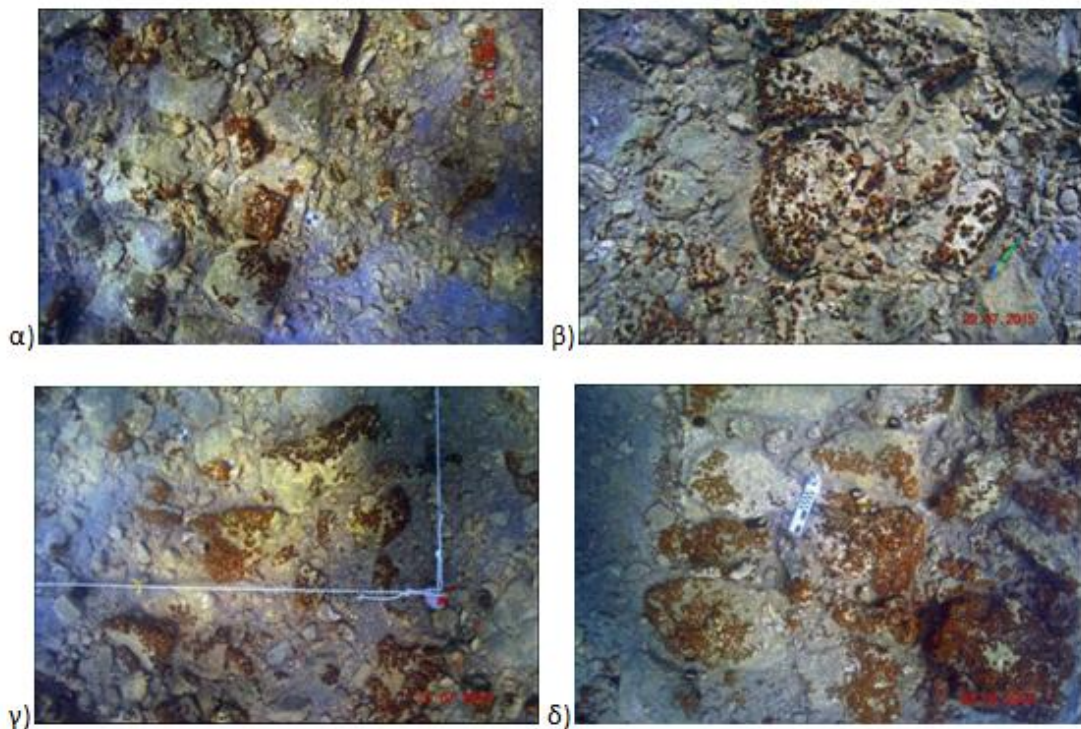
Εικόνα 4.24 Ιστογράμματα Εικόνας 23.β

Για να ελεγχθεί εάν γίνεται να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία δοκιμάστηκε πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου CLAHE να γίνει πρώτα μια ισοστάθμιση των ιστογραμμάτων των τριών καναλιών. Δημιουργήθηκε μια συνάρτηση αθροιστικής πυκνότητας τύπου Rayleigh με εύρος 0 έως 255 (όσο και το εύρος φωτεινότητας των εικόνων) και μέγιστη τιμή στη θέση 76.5 (στο 30% του συνολικού εύρους). Έπειτα εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος αλλά με εύρος παραθύρου 49X49 και το εύρος αποκοπής της αντίθεσης στη προεπιλογή 1% και για τα τρία κανάλια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

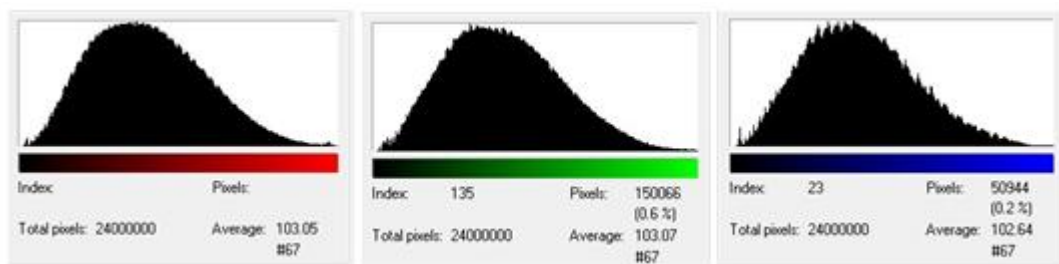
Επίδραση της ραδιομετρίας της υποβρύχιας εικόνας στην 2D και 3D ανακατασκευή



Εικόνα 4.25 Η συνάρτηση κατανομής που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική ισοστάθμιση.



Εικόνα 4.26 Τελικές εικόνες με εφαρμογή Ισοστάθμισης και έπειτα CLAHE



Εικόνα 4.27 Ιστογράμματα Εικόνας 26.γ

Η εφαρμογή της ισοστάθμισης πριν τον αλγόριθμο έχει αποτέλεσμα τα τελικά ιστογράμματα να έχουν πανομοιότυπη μορφή και μέση τιμή (103). Η ευκρίνεια έχει βελτιωθεί περισσότερο από πριν (μόνο CLAHE) και τα χρώματα φαίνονται εξίσου ρεαλιστικά.

4.4 Συγκρίσεις-Αξιολόγηση τρόπων Διόρθωσης

Μετά από την εφαρμογή τριών διαφορετικών τρόπων διόρθωσης και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιχειρείται μια αξιολόγηση αυτών :

- Διόρθωση με Photoshop (Αλγόριθμος "Find dark and Light Colors")

Μέθοδος γρήγορη και φιλική για το χρήστη. Βελτιώνει την ορατότητα με μείωση της θολότητας , αφαιρεί την πράσινο-μπλε απόχρωση αλλά δημιουργεί χρωματικές διαφορές σε φωτογραφίες.

- Διόρθωση με Photoshop (White Balancing)

Διορθώνει αποτελεσματικά την ευκρίνεια και αφαιρεί τη θολότητα. Τα χρώματα γίνονται πιο ρεαλιστικά. Παρατηρούνται όμως διαφοροποιήσεις σε διαδοχικές λήψεις. Χειροκίνητη διαδικασία άρα χρονοβόρα.

- Επέκταση Ιστογραμμάτων (Histogram Stretching)

Απλή μέθοδος, προγραμματίζεται από το χρήστη και γρήγορη, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις εικόνες. Αποτελεσματική στην ενίσχυση της αντίθεσης και τη βελτίωση της ευκρίνειας αλλά δεν διορθώνει την ανομοιομορφία του φωτισμού (την ενισχύει). Οι διαφορές στο σχήμα των ιστογραμμάτων έχουν επίπτωση στο τελικό χρώμα.

- Διόρθωση CLAHE

Γρήγορη μέθοδος, προγραμματίζεται από το χρήστη. Αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ανομοιομορφίας του φωτισμού και βελτιώνει αισθητά την ευκρίνεια αλλά χωρίς να αφαιρεί τελείως το αίσθημα της "ομίχλης". Με την εφαρμογή της ισοστάθμισης με τη συνάρτηση Rayleigh το τελευταίο διορθώνεται. Σε σύγκριση με τις προηγούμενες εφαρμόζει την καλύτερη δυνατή βελτίωση.

4.5 Διερεύνηση Επίδρασης υποβρύχιου περιβάλλοντος στη μετρητική αξιοπιστία της εικόνας

4.5.1 Γεωμετρία της μηχανής

Στη φωτογραμμετρία το βασικό εργαλείο συλλογής δεδομένων είναι η φωτογραφική μηχανή. Είναι απαραίτητο επομένως να είναι γνωστές με ακρίβεια οι παράμετροι της εσωτερικής της γεωμετρίας, δηλαδή ο Εσωτερικός Προσανατολισμός. Οι βασικές παράμετροι του Εσωτερικού προσανατολισμού είναι :

- η απόσταση (c) του προβολικού κέντρου (O) από το εστιακό επίπεδο.
- η θέση (x_o, y_o) σε κάποιο γνωστό σύστημα αναφοράς προβολής (H) του προβολικού κέντρου (O) στο επίπεδο της εικόνας.
- το μέτρο της ακτινικής διαστρόφης του φακού (Δr).

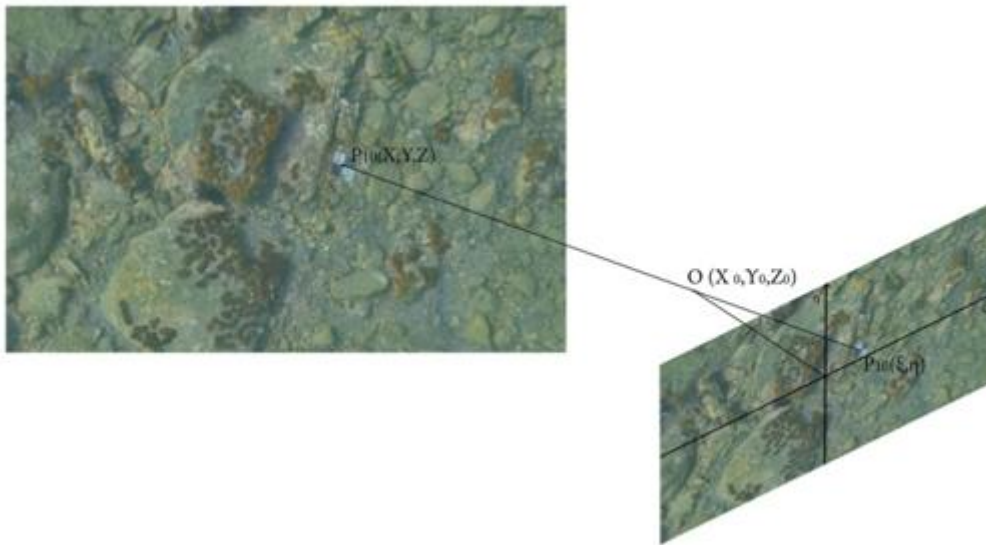
Δευτερεύουσες παράμετροι είναι το μέτρο της έκκεντρης διαστρόφης Δp (decentering distortion), η απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνικότητα (skewness) και η αναλογία καρτέ (aspect ratio).

4.5.2 Σημασία αποκατάστασης εσωτερικού προσανατολισμού

Για να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης ενός αντικειμένου από φωτογραφική λήψη πρέπει να κατανοηθούν οι μαθηματικές σχέσεις που παραμετροποιούν τη γεωμετρία της φωτογραφίας.

$$\xi - \xi_o + \Delta\xi = -c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

$$\eta - \eta_o + \Delta\eta = -c \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (\text{Εξ. 4.4})$$



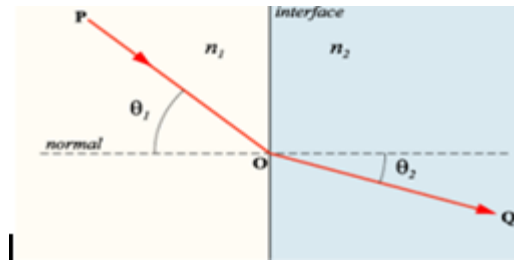
Εικόνα 4.28 Η Συνθήκη Συγγραμμικότητας

Στην Εικόνα 4.28 το σημείο $P_{10}(X, Y, Z)$, το προβολικό κέντρο O και η προβολή του P_{10} πάνω στην εικόνα (εικονοσημείο) βρίσκονται πάνω σε μια και μοναδική ευθεία γραμμή στο χώρο. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται Συνθήκη Συγγραμμικότητας και περιγράφεται από τις Εξισώσεις 4.3 και 4.4. Οι εξισώσεις αυτές δείχνουν ότι σε κάθε σημείο του αντικειμένου αντιστοιχεί ένα και μοναδικό σημείο στην εικόνα.

Η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φωτογραφικής μηχανής είναι απαραίτητη εφόσον οι φωτογραφίες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για ακριβείς μετρήσεις αντικειμένων και επομένως πρέπει να αποκατασταθούν οι ευθείες αυτές στον χώρο. Αυτό καθιστά την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού απαραίτητη για τη φωτογραμμετρική διαδικασία. Στο υποβρύχιο περιβάλλον οι συνθήκες διαφέρουν από τις συνήθεις και αυτό επηρεάζει τον εσωτερικό προσανατολισμό. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η διάθλαση του φωτός στο νερό.

4.5.3 Η διάθλαση της φωτεινής ακτίνας στα δύο μέσα

Όταν οι ακτίνες του φωτός που διαδίδονται σε ένα σώμα ορισμένης πυκνότητας προσπίπτουν υπό γωνία πάνω σε ένα άλλο σώμα διαφορετικής πυκνότητας, αλλάζουν ταχύτητα και διεύθυνση.

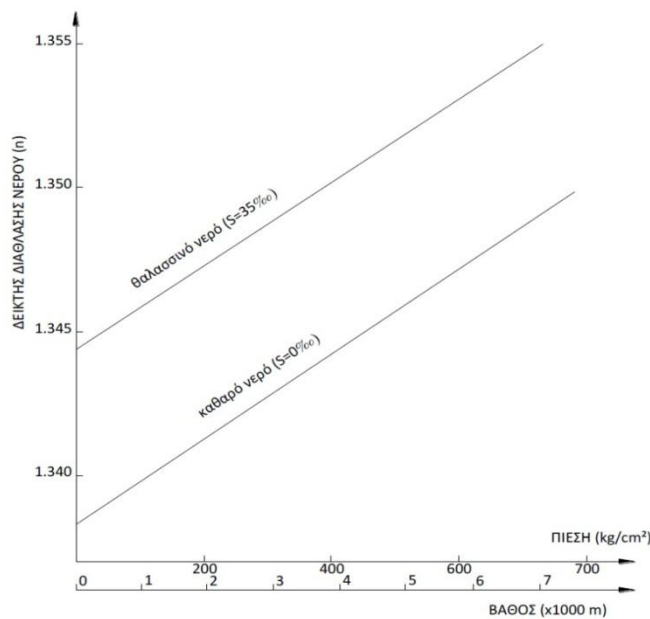


Εικόνα 4.29 Η διάθλαση της οπτικής ακτίνας (Wikipedia)

Η ακτίνα διαθλάται σύμφωνα με το νόμο του Snell : $n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2$

όπου θ_1, θ_2 οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης και n_1, n_2 οι δείκτες διάθλασης των δύο μέσων.

Δείκτης διάθλασης (n) ενός οπτικού μέσου ορίζεται ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό, προς την ταχύτητά του στο μέσο από το οποίο διέρχεται. Ο δείκτης διάθλασης παίζει σημαντικό ρόλο στη γεωμετρική οπτική. Η ταχύτητα αυτή είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό και συνεπώς, ο δείκτης διάθλασης είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας. Ο δείκτης διάθλασης του θαλασσινού νερού εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, την πίεση, την αλατότητα καθώς και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτίνας φωτός. Μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ενώ αυξάνεται όσο αυξάνεται η αλατότητα. Η πίεση, επηρεάζει τον δείκτη διάθλασης τόσο του καθαρού νερού όσο και του θαλασσινού με τρόπο σχεδόν γραμμικό.



Εικόνα 4.30 Ο δείκτης διάθλασης νερού (για $\lambda=500$ nm) συναρτήσεως της πίεσης και της αλατότητας (Αγραφιιώτης 2012)

Μια μέση τιμή του δείκτη διάθλασης του θαλασσινού νερού μπορεί να θεωρηθεί η 1,345 για βάθη μικρότερα των 100 μέτρων. Σε μια υποβρύχια λήψη είναι δύσκολο να υπάρξει μεταβολή του δείκτη διάθλασης, γιατί η διαφορά βάθους δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 100 μέτρων σε περιορισμένο χώρο εργασίας. Το ίδιο ισχύει και για την μεταβολή της αλατότητας. Μεταβολή πιθανώς να υπάρξει μόνο σε περίπτωση ρεύματος νερού με αισθητά διαφορετικές θερμοκρασίες, όπου και δημιουργούνται διαφορετικά στρώματα νερού.

Το νερό, ως διαθλαστικό σώμα, παρουσιάζει διαφορετικό δείκτη διάθλασης για τα διάφορα μήκη κύματος του φωτός. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ανάλυση της φωτεινής δέσμης στα επιμέρους συστατικά της χρώματα (μήκη κύματος). Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος λ μίας οπτικής ακτίνας (π.χ. κόκκινο χρώμα ~700- 635nm), τόσο μικρότερη η εκτροπή της λόγω της διάθλασης. Το φαινόμενο αυτό καλείται χρωματική εκτροπή του φωτός και επηρεάζει τις εικόνες που λαμβάνονται καθώς είναι μια μορφή παραμόρφωσης όμοια με την χρωματική παραμόρφωση που προκαλείται από τους φωτογραφικούς φακούς. Στην παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζεται το φαινόμενο της χρωματικής εκτροπής. Τα διαφορετικά μήκη κύματος διαθλώνονται με διαφορετικό δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα το αντικείμενο να παρουσιάζει ασάφεια στις ακμές και τις αποχρώσεις.



Εικόνα 4.31 Χρωματική εκτροπή (www.camerasunderwater.co.uk)

4.5.4 Γεωμετρική συμπεριφορά μηχανής σε υποβρύχιο περιβάλλον

Για να καταστεί δυνατή η υποβρύχια λήψη, η φωτογραφική μηχανή τοποθετείται σε ειδικές υδατοστεγείς θήκες (συνήθως από plexiglas) ή αλλιώς housing. Δύο είναι οι βασικοί τύποι θύρας του φακού, οι θολωτές (dome) και οι επίπεδες (flat).



Εικόνα 4.32 IkeliteHousing για Canon EOS 600D Nexus Housing for Nikon D10

Όσον αφορά στις γεωμετρικές οπτικές τους ιδιότητες, των οποίων η γνώση είναι απαραίτητη για την φωτογραμμετρική διαδικασία, κάθε τύπος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο όρος "φωτογραμμετρία δυο μέσων" υποδεικνύει ότι η οπτική ακτίνα ταξιδεύει μέσα από διαφορετικά μέσα: το νερό όπου και βρίσκεται το αντικείμενο, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το housing και τον αέρα μέσα σε αυτό, όπου δουλεύει και το σύστημα φακός-μηχανή. Το "ταξίδι" αυτό μεταξύ των τριών διαφορετικών μέσων αλλοιώνει την κατεύθυνση της ακτίνας σε σύγκριση με το αν θα διερχόταν αποκλειστικά από αέρα. Η απόκλιση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη για να εξαλειφθεί ως μια σημαντική πηγή σφαλμάτων στη διαδικασία των μετρήσεων. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία: (α) Εφόσον η συνθήκη της Συγγραμμικότητας παύει να ισχύει, το μοντέλο προσαρμόζεται να λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στη διάδοση του φωτός μέσα στα διαφορετικά μέσα. (β) Χρησιμοποιώντας το καθιερωμένο μοντέλο κάμερας, το φαινόμενο της διάθλασης απορροφάται από τις παραμέτρους της βαθμονόμησης η οποία εκτελείται *insitu*.

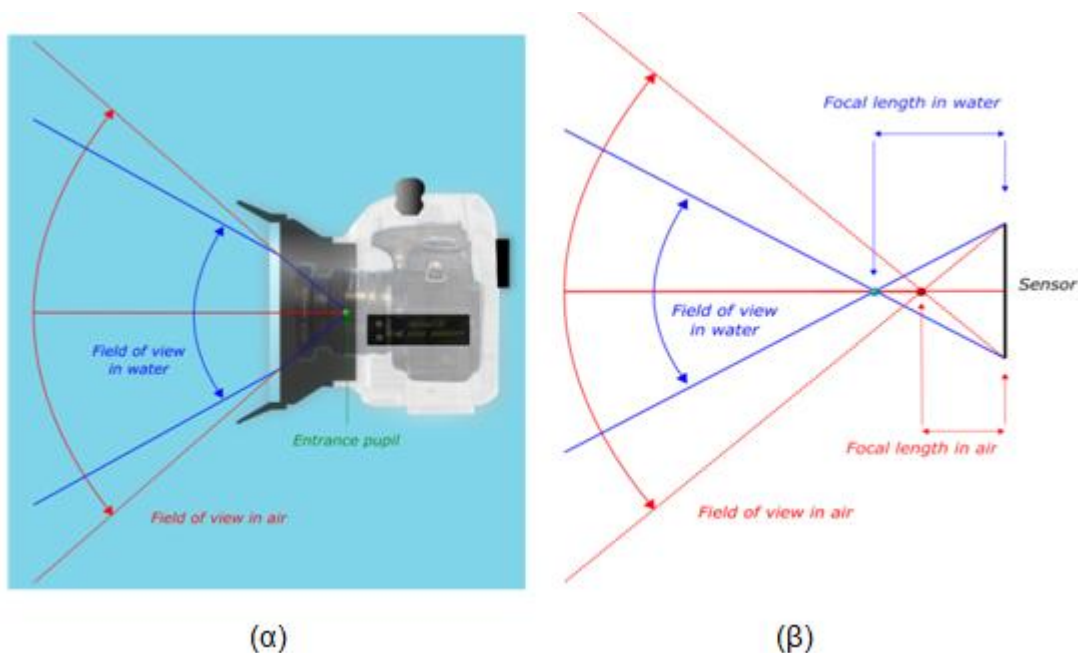
Όσον αφορά την πρώτη προσέγγιση έχει προταθεί μια ποικιλία από μεθόδους για την αυστηρή μοντελοποίηση του σχηματισμού της υποβρύχιας φωτογραφίας. Χρήση μοντέλου διάδοσης του φωτός στο νερό μαζί με υποβρύχια βαθμονόμηση υπό αυστηρές συνθήκες (Jordt-Sedlazeck and Koch 2012). Η Treibitz κ.ά. (2012) πρότείνει την παραμετροποίηση και με βάση την απόσταση του φακού από την επιφάνεια του μέσου, εκτός από την εστιακή απόσταση. Οι Αγραφιώτης και Γεωργόπουλος (2015) περιλαμβάνουν ως παράμετρο τα ποσοστά αέρα και νερού μεταξύ της απόστασης κάμερα-αντικείμενο.

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι τα σφάλματα που επιφέρει το φαινόμενο της διάθλασης μπορεί να απορροφηθούν κυρίως από το πολυώνυμο της ακτινικής διαστροφής, ενώ άλλα τυχόν συστηματικά σφάλματα, π.χ. η απόκλιση του κέντρου της θύρας της υδατοστεγούς θήκης από τον οπτικό άξονα απορροφάται από την έκκεντρη διαστροφή. Λόγω της ιδιαιτερότητας του υποβρύχιου περιβάλλοντος, είναι δύσκολο οι παράμετροι που επηρεάζουν γεωμετρικά τη φωτογράφιση να μοντελοποιηθούν *apriori*, καθώς ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται ανάλογα με τη πίεση, το βάθος, τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Για το λόγο αυτό είναι

προτιμότερο και πιο αποτελεσματικό η βαθμονόμηση να εκτελείται στο σύστημα μηχανή-υδατοστεγής θήκη ταυτόχρονα με την πορεία των εργασιών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζονται ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος και ελαττώνεται ο κίνδυνος εισαγωγής σφαλμάτων. Αρκετές εφαρμογές (Canciani,2003; Harvey,2003;Shortis&Harvey,1998 κ.ά.) έχουν αντιμετωπίσει το σύστημα μηχανή-θήκη σαν μια ολότητα μέσω μιας αυτοβαθμονόμησης όπως αυτή θα εκτελείτο στη στεριά. Ο Höhle το 1971 πραγματοποίησε βαθμονόμηση υποβρυχίως, υπολογίζοντας όμως μόνο την εστιακή απόσταση τοποθετώντας έναπλάισιο γνωστών διαστάσεων πάνω από το ναυάγιο. Ο Lavest πρότεινε το 2003 η βαθμονόμηση να εκτελείται στη στεριάκάνοντας αναγωγή της εστιακής απόστασης και των διαστροφών στο δείκτη διάθλασης του νερού.

4.5.4.1 Περίπτωση επίπεδης θύρας (flatport)

Οι επίπεδες θύρες έχουνμελετηθεί εκτενώς όσον αφορά στην υποβρύχια βαθμονόμηση, ένα πρόβλημα πού αντιμετωπίζεται εδώ και σχεδόν 50 χρόνια. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα επίπεδο κατασκευασμένο από γυαλί ή πλαστικό που παρεμβάλλεται μεταξύ του φακού και του εξωτερικού περιβάλλοντος, δημιουργώντας έτσι δυο μέσα με διαφορετικό δείκτη διάθλασης(τρία αν συνυπολογιστεί το πάχος του υλικού). Μοιραία, οι οπτικές ακτίνες παρεκκλίνουν της αρχικής τους πορείας(σύμφωνα με το νόμο Snell) με αποτέλεσμα να μειώνεται το οπτικό πεδίο της μηχανής.

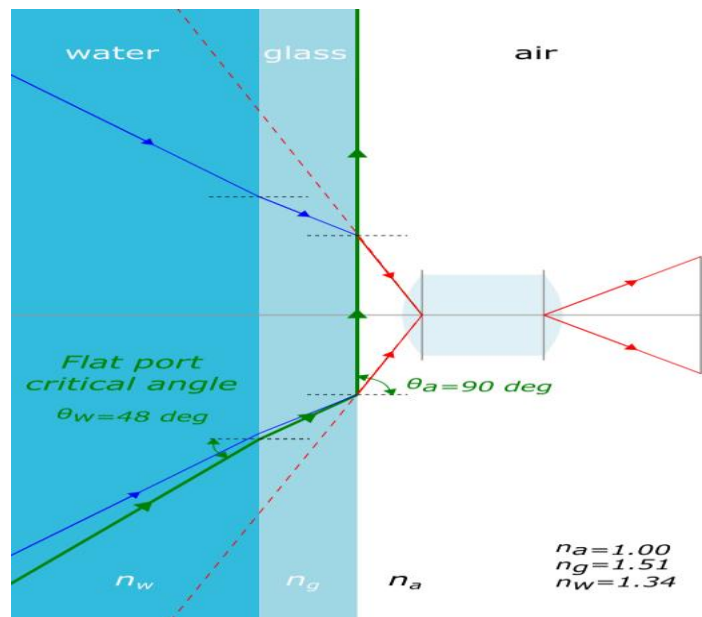


Εικόνα 4.33 Μείωση οπτικού επιπέδου (Menna κ.ά. 2015)

Στην Εικόνα 4.33 (α) φαίνεται πώς μειώνεται το οπτικό πεδίο της κάμερας λόγω της διάθλασης από το νερό στο υλικό της θήκης και τον αέρα. Για λόγους απλοποίησης το πάχος της θήκης δεν έχει ληφθεί υπόψη. Οι κόκκινες ακτίνες αφορούν τον αέρα και οι μπλε το νερό. Η μείωση αυτή του οπτικού πεδίου της κάμερας στη πράξη μεταφράζεται σε αύξηση της ονομαστικής τιμής της εστιακής απόστασης (β).

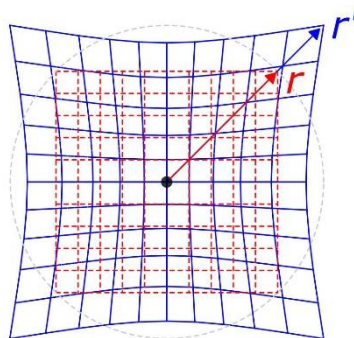
Ένας ακόμα χαρακτηριστικό των επίπεδων θυρών είναι ότι έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο. Οι φωτεινές ακτίνες που περνούν από το νερό, διασχίζουν το υλικό της θύρας (π.χ. γυαλί), πριν εισέλθουν στο εσωτερικό της θήκης. Αυτό σημαίνει ότι περνούν από ένα μέσο με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης σε μέσο με μικρότερο και υπάρχει πιθανότητα να υποστούν ολική ανάκλαση. Εφαρμόζοντας το νόμο του Snell μπορεί να υπολογιστεί η κρίσιμη γωνία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.34. Η κρίσιμη γωνία για το γυαλί είναι 48 μοίρες. Όσες ακτίνες εισέρχονται με γωνία μεγαλύτερη των 48° ανακλώνται πριν περάσουν μέσα στη θήκη(και στη μηχανή). Αυτό επομένως καθορίζει το μέγιστο οπτικό πεδίο σε 96° για τις επίπεδες θήκες .

Η μείωση του οπτικού πεδίου, με σταθερή την απόσταση μηχανής-αντικειμένου, μεγεθύνει το αντικείμενο σε αναλογία ίση με το λόγο του δείκτη διάθλασης του νερού προς τον δείκτη διάθλασης του αέρα, περίπου 33%. Επίσης το αντικείμενο φαίνεται πιο κοντά απ' την πραγματική του απόσταση.



Εικόνα 4.34 Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης (Menna κ.ά. 2015)

Εκτός από την εστιακή απόσταση η χρήση επίπεδης θήκης επηρεάζει και τη διαστρόφη του φακού. Θεωρητικά η εικόνα πρέπει να είναι απαλλαγμένη από γεωμετρικές αλλοιώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα, όμως η διαστρόφη που εισάγει η παρουσία της διαχωριστικής επιφάνειας αλλάζει την θέση των εικονοστοιχείων με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 4.35. Η μορφή της έχει το σχήμα "μαξιλαριού", όπως φαίνεται με το μπλε χρώμα, και είναι ο συνδυασμός της υπάρχουσας διαστρόφης του φακού μαζί με αυτήν που εισάγει η επίπεδη θήκη.

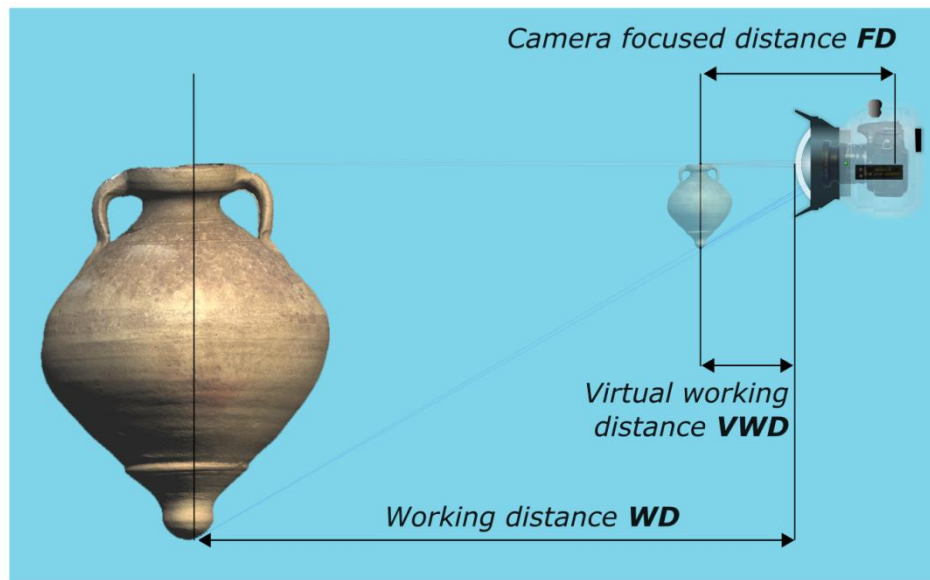


Εικόνα 4.35 Επίδραση της επίπεδης θήκης στην διαστρόφη του φακού (Menna κ.ά. 2015)

Επιπρόσθετα από τις γεωμετρικές παραμορφώσεις η επίπεδη θήκη εισάγει και ραδιομετρικές αλλοιώσεις. Οι ακτίνες που περνούν μέσα στο υλικό χωρίζονται σε επιμέρους ακτίνες διαφορετικού μήκους κύματος καθώς διαθλώνται διαφορετικά. Ο χρωματικός αυτός διαχωρισμός επιφέρει απώλεια της ευκρίνειας και χρωματικού κορεσμού.

4.5.4.2 Περίπτωση θόλου(domehousing)

Οι θολωτές θήκες αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που εισάγουν οι επίπεδες. Η εστιακή απόσταση παραμένει ίδια όπως και το οπτικό πεδίο, κάτι που είναι ιδιαίτερης σημασίας όταν χρησιμοποιούνται ευρυγώνιοι φακοί. Παρόλα αυτά, εγείρονται άλλα προβλήματα από τη χρήση τους. Η σφαιρική-θολωτή θύρα είναι ομόκεντρος φακός που δρα σαν επιπλέον οπτικό στοιχείο στο φακό της μηχανής. Πρόκειται για ένα φακό αρνητικό ή αποκλίνοντα: η εστιακή απόσταση και το είδωλο είναι αρνητικά και σχηματίζονται στην αριστερή πλευρά του φακού, δηλαδή μπροστά από το θόλο. Το είδωλο αυτό είναι ευθύ και μικρότερο από το πραγματικό αντικείμενο. Ο φακός της μηχανής δεν εστιάζει στο πραγματικό αντικείμενο αλλά στο είδωλο που σχηματίζεται από το θόλο σε απόσταση μικρότερη από το πραγματικό αντικείμενο (Εικόνα 4.36).

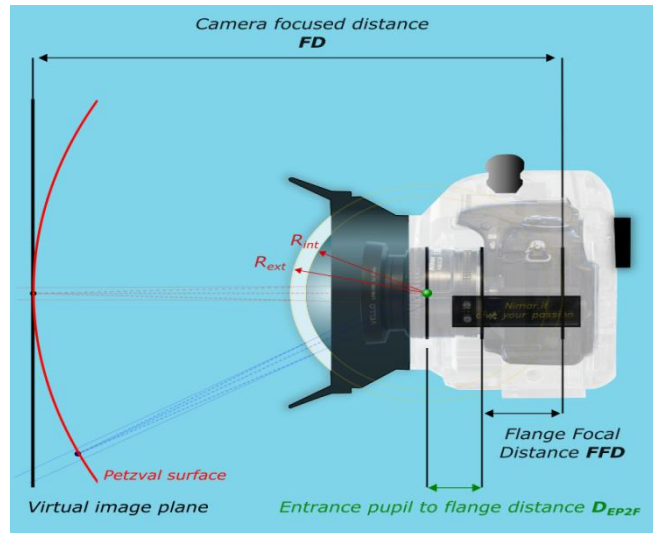


Εικόνα 4.36 Η επίδραση της θολωτής θύρας (Menna κ.ά. 2015)

Η ακριβής θέση του προβολικού κέντρου δεν παρέχεται από τους κατασκευαστές και είναι δύσκολο να υπολογιστεί καθώς όταν αλλάζει η εστίαση το σύστημα των φακών της μηχανής κινείται και κάνει τη πρόβλεψη της θέσης του κέντρου δύσκολη. Όταν τοποθετείται μέσα στη θήκη και πίσω από το θόλο ο οποίος έχει ακτίνα R , το αντικείμενο που βρίσκεται στο άπειρο θα προβληθεί σε απόσταση $4R$ από το κέντρο καμπυλότητας του θόλου ή $3R$ από την εξωτερική του επιφάνεια. Για θόλο ακτίνας 8 εκατοστών τα αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση από το άπειρο έως και 1 μέτρο προβάλλονται σε απόσταση περίπου 25 εκατοστών.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται λόγω του σφαιρικού σχήματος είναι το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής. Οι οπτικές ακτίνες που διέρχονται από τα περιφερειακά τμήματα του φακού δεν συγκλίνουν στο ίδιο σημείο εστίασης με τις ακτίνες που διέρχονται από το κέντρο. Το αποτέλεσμα είναι να μην σχηματίζεται η εικόνα σε ένα επίπεδο και να παράγεται θολή.

Ακόμη μια οπτική επίδραση είναι η καμπυλότητα πεδίου η οποία κάνει τις επίπεδες επιφάνειες να προβάλλονται πάνω σε παραβολική επιφάνεια, γνωστή και ως επιφάνεια Petzval. Το αντικείμενο μπορεί να εμφανιστεί μη εστιασμένο και όχι ευκρινές σε κάποια σημεία της φωτογραφίας. (Εικόνα 4.37).

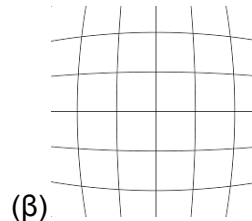
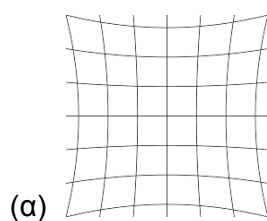


Εικόνα 4.37 Σχηματισμός εικόνας και επιφάνεια Petzval (Menna κ.ά. 2015)

Συνοψίζοντας οιθολωτέςθής :

- i. Διατηρούν την εστιακή απόσταση της μηχανής αμετάβλητη
- ii. Δεν επηρεάζουν σημαντικά τη διαστρόφη του φακού
- iii. αναγκάζουν τον φακό να εστιάσει πολύ πιο κοντά από ό,τι στον αέρα
- iv. παρουσιάζουν σφαιρική εκτροπή και καμπυλότητα πεδίου δημιουργώντας μη ευκρινή εικόνα
- v. αυξάνουν το βάθος πεδίου

Τα i, ii ισχύουν όταν το προβολικό κέντρο συμπίπτει με το κέντρο καμπυλότητας του θόλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόστασή τους τόσο μεγαλώνουν και τα σφάλματα διαστρόφης. Σε περίπτωση που δεν συμπίπτουν τα δύο σημεία διακρίνονται εν γένει δυο περιπτώσεις. Μη σύμπτωση σε επίπεδο κάθετο του οπτικού άξονα δημιουργεί σφάλματα έκκεντρης διαστρόφης ενώ μη σύμπτωση κατά μήκος του οπτικού άξονα δημιουργεί ακτινική διαστρόφη τύπου "μαξιλάρι" εάν το προβολικό κέντρο βρίσκεται πιο κοντά στο θόλο από το κέντρο καμπυλότητας αυτού (α) ενώ σε αντίθετη περίπτωση δημιουργείται ακτινική διαστρόφη τύπου "βαρέλι" (β).



4.5.5 Βαθμονόμηση σε υποβρύχιο Περιβάλλον και σύγκριση με συνθήκες περιβάλλοντος

Η βαθμονόμηση μηχανής σε υποβρύχιο περιβάλλον εμπεριέχει μεγαλύτερες αβεβαιότητες σε σύγκρισή με την 'κλασσική' μέθοδο. Οι αβεβαιότητες αυτές προκαλούνται από φαινόμενα όπως η διάθλαση, αντανάκλασεις λόγω της ανομοιομορφίας του υδάτινου περιβάλλοντος, θολότητα, χλωρίδα. Συνεπώς η ακρίβεια αναμένεται σχεδόν πάντα να είναι χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη διαδικασία στον αέρα.

Στο πλαίσιο της γεωμετρικής τεκμηρίωσης μέρους του βυθισμένου οικισμού στην ανασκαφή στη παραλία Λαμπαγιαννάς Κοιλιάδας Αργολίδος(βλ. Κεφάλαιο 5), πραγματοποιήθηκε υποβρύχια βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιήθηκε.

4.5.5.1 Βαθμονόμηση συστήματος μηχανή θήκη σε 3D πεδίο ελέγχου

Για να μπορέσουν να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο νερό κρίθηκε απαραίτητο να γίνει βαθμονόμηση στο τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου του Εργαστηρίου Μετρολογίας της ΣΑΤΜ. Με το τρόπο αυτό γίνονται γνωστές οι παράμετροι της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ("CalibrationCCD") αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας (Σαμαρά 2004) και χρησιμοποιεί τη συνθήκη συγγραμμικότητας και την συνόρθωση με δέσμες για τον υπολογισμό των παραμέτρων. Ελήφθησαν 3 φωτογραφίες των στύλων του πεδίου ελέγχου από αριστερά, μετωπικά και δεξιά. Η διαδικασία έγινε με τη κάμερα τοποθετημένη μέσα στη θήκη αλλά και χωρίς αυτήν.



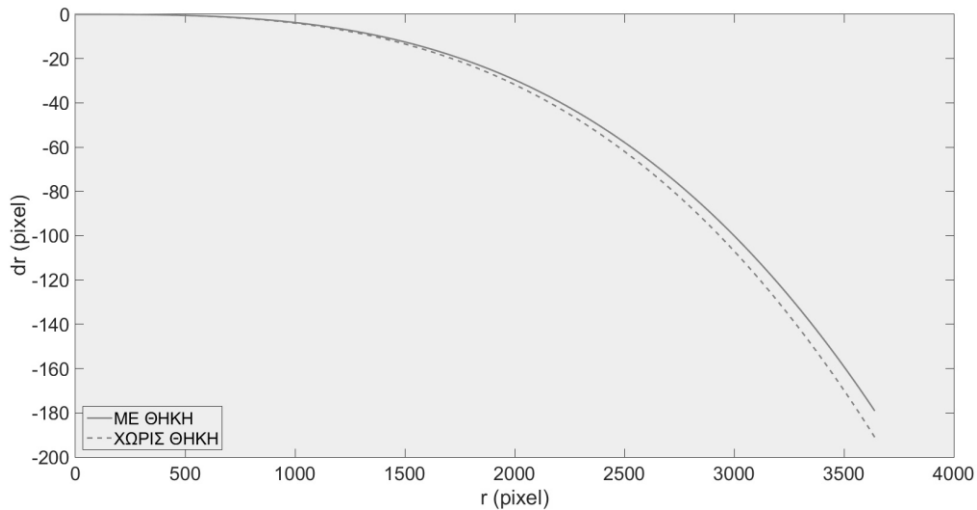
Εικόνα 4.38 Λήψη από το πεδίο ελέγχου

Οι στόχοι σκοπεύθηκαν στο Autocad και συντάχθηκε το κατάλληλο αρχείο εικονοσυντεταγμένων. Στη συνέχεια εισήχθησαν στο λογισμικό και εκτελέστηκε η βαθμονόμηση. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ως μέσες τιμές των τριών ξεχωριστών βαθμονομήσεων.

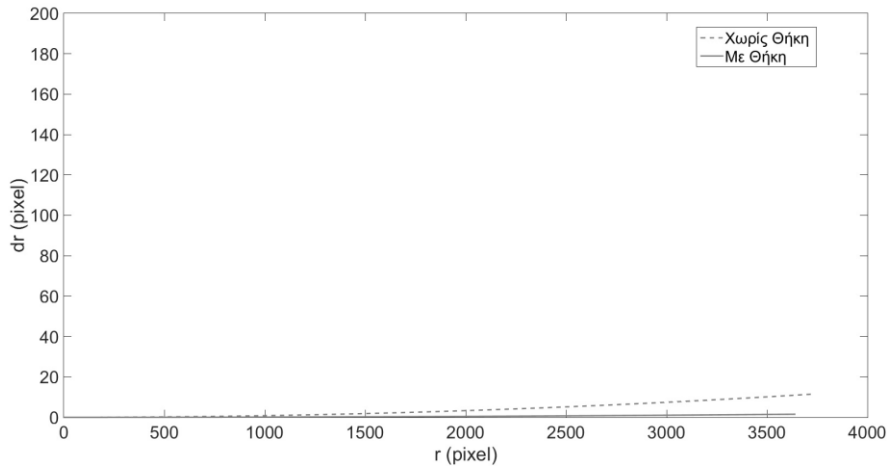
Πίνακας 4.2 Παράμετροι εστ. προσ/μου CCD

	Μέση τιμή (μηχανή-θήκη)		Μέση τιμή (Μηχανή)	
	<i>pixel</i>	<i>mm</i>	<i>pixel</i>	<i>mm</i>
X_o	3027.01	11.81	3048.17	11.89
Y_o	2018.53	7.87	2164.30	8.44
C	4758.12	18.56	4724.76	18.43
K1	-3.687 E-09		-3.963 E-09	
K2	-2.048 E-018		-1.306 E-19	
P1	2.945 E-09		3.521 E-08	
P2	-1.161 E-07		-8.269 E-07	
σ_o	0.46	0.002	0.46	0.002

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η θολωτή θήκη έχει μικρή επίδραση στην εστιακή απόσταση με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται στην τεταγμένη του πρωτεύοντος σημείου (0,57 mm). Παρακάτω παρουσιάζονται και οι καμπύλες των ακτινικών διαστροφών. (Εικόνα 4.39)

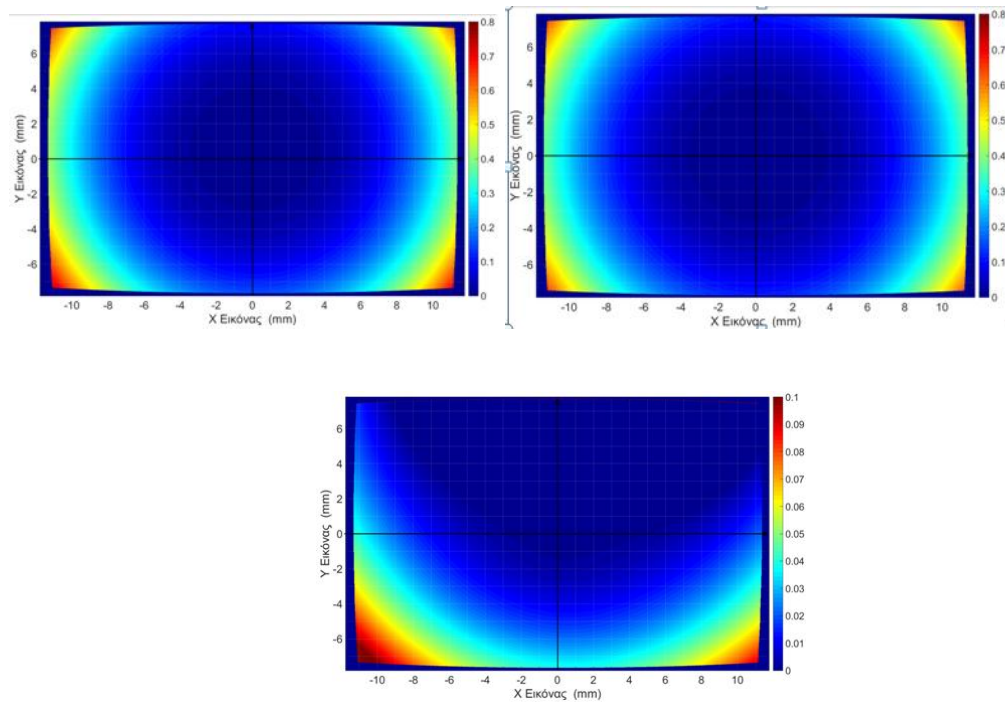


Εικόνα 4.39 Σύγκριση καμπυλών συστήματος μηχανή-θήκη και μηχανή



Εικόνα 4.40 Σύγκριση έκκεντρης διαστροφής συστήματος μηχανή-θήκη και μηχανή

Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών της ακτινικής διαστροφής είναι μηδαμινή με τη θήκη να μειώνει το μέτρο της διαστροφής και να έχει μέγιστη τιμή 179 pixel ή 0,69 mm έναντι 190 pixel ή 0,74 που παρουσιάζει μηχανή χωρίς τη θήκη. Η έκκεντρη διαστροφή σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να αγνοηθεί καθώς η μέγιστη τιμή είναι περίπου μηδενική.



Εικόνα 4.41 Χάρτες της διαστροφής της μηχανής (αριστερά) και του συστήματος μηχανή θήκη (δεξιά) και η διαφορά τους(κάτω)

Στην Εικόνα 4.41 φαίνεται το μέτρο της διαστροφής πάνω στην εικόνα. Το χρώμα δείχνει το μέτρο της διαφοράς της πραγματικής θέσης του εικονοσημείου από την σωστή του θέση. Είναι φανερό ότι η παρουσία του θόλου επηρεάζει τη συμμετρία του θόλου. Αυτό προκύπτει από τον χάρτη της διαφοράς στην κάτω εικόνα όπου είναι 10 φορές μεγαλύτερη στο κάτω της μέρος σε σχέση με το πάνω. Αυτό πιθανότατα

οφείλεται σε μη σύμπτωση του κέντρου καμπυλότητας του θόλου και του προβολικού κέντρου ως προς το επίπεδο κάθετο στον οπτικό άξονα.

4.5.5.2 Εκτέλεση βαθμονόμησης με το λογισμικό *PhotomodelerScanner*

Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης στηνπρακτική εφαρμογή, ακολουθήθηκε η δεύτερη προσέγγιση (βλ.4.5.4). Δισδιάστατο πεδίο ελέγχου (κάνναβος) διαστάσεων 0.9x0,9 m κατασκευασμένος από Plexiglas, το οποίο παρουσιάζει αρνητική πλευστότητα, βυθίστηκε στη περιοχή που επρόκειτο να αποτυπωθεί. (Εικόνα 4.42). Στη μια πλευρά είχε τυπωμένη ειδική διάταξη κωδικοποιημένων στόχων οι οποίοι αναγνωρίζονται αυτόματα από το λογισμικό *PhotomodelerScannerCalibrationProject* της EosSystems. Στην άλλη πλευρά είχε τυπωμένο μοτίβο 'Σκακιέρα'.



Εικόνα 4.42 Το πεδίο ελέγχου τοποθετείται στη περιοχή εργασίας για φωτογράφιση

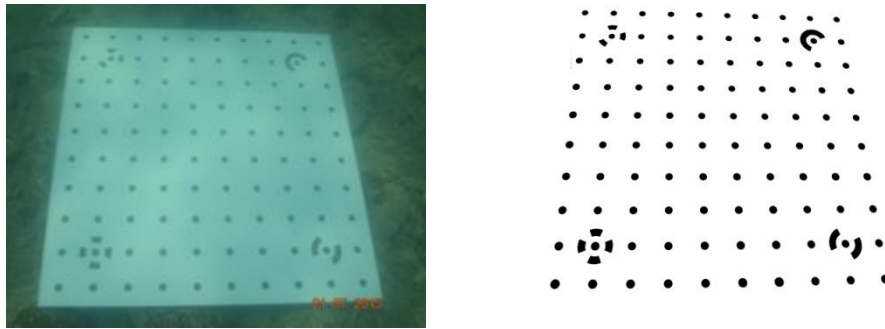
Για την συλλογή των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, τηρήθηκαν τα παρακάτω κριτήρια:

α) Η διατήρηση των ίδιων παραμέτρων της φωτογραφικής μηχανής τόσο και στις διαδοχικές λήψεις του πεδίου ελέγχου αλλά και στις λήψεις του αντικειμένου για την φωτογραμμετρική επεξεργασία.

β) Η εικόνα να καλύπτεται στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό από το πεδίο ελέγχου

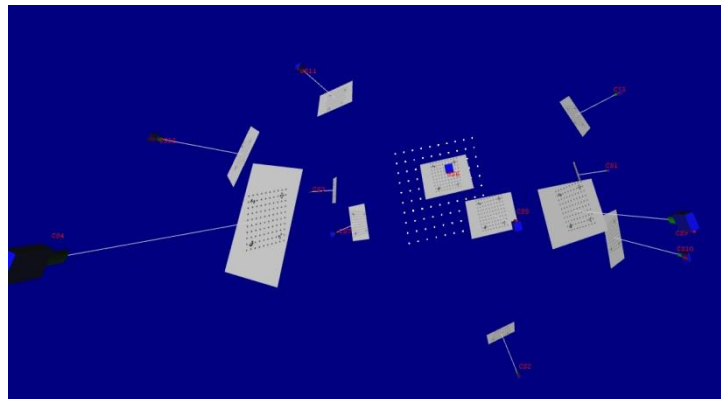
γ) Να υπάρχουν λήψεις από όλες τις γωνίες και τις πλευρές του πεδίου ελέγχου

Πρίν την εισαγωγή των εικόνων στα λογισμικά για την εκτέλεση της βαθμονόμησης κρίθηκε απαραίτητο να γίνει πρώτα ραδιομετρική επεξεργασία, ούτως ώστε να εξαιρεθεί ο θόρυβος(Εικόνα X.12) και βελτιστοποιηθεί η αυτόματη αναγνώριση των στόχων. Το λογισμικό *AdobePhotoshop* χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή.

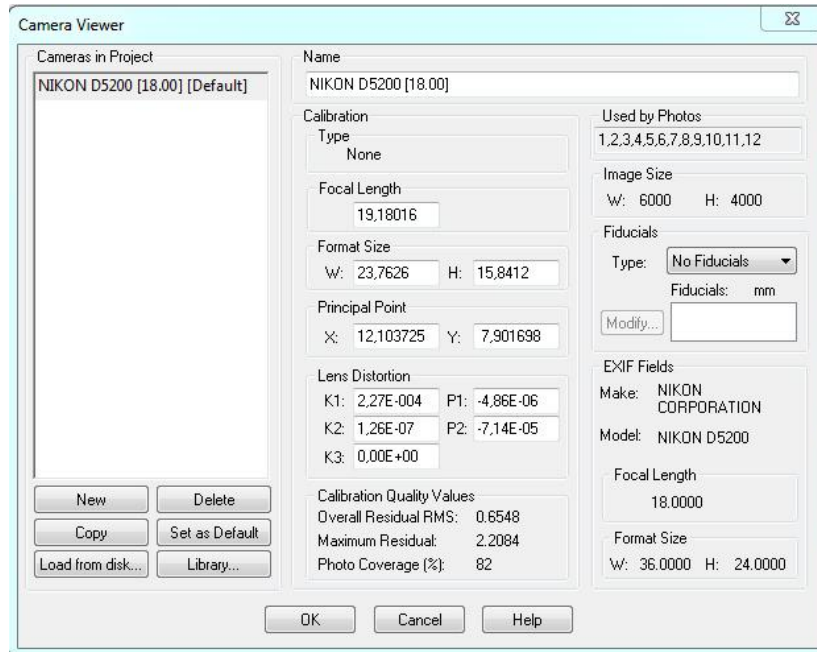


Εικόνα 4.43 Αρχική εικόνα και επεξεργασμένη για χρήση στο Photomodeler

Στο λογισμικό φορτώθηκε ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός εικόνων (12) και εκτελέστηκε η βαθμονόμηση. Τα στοιχεία της εσωτερικής γεωμετρίας που υπολογίστηκαν είναι: η εστιακή απόσταση (c), οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (x_0, y_0), το μέγεθος του αισθητήρα (F_w, F_h) και οι συντελεστές της ακτινικής και εφαπτομενικής διαστρόφης (K_1, K_2, K_3, P_1, P_2). Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



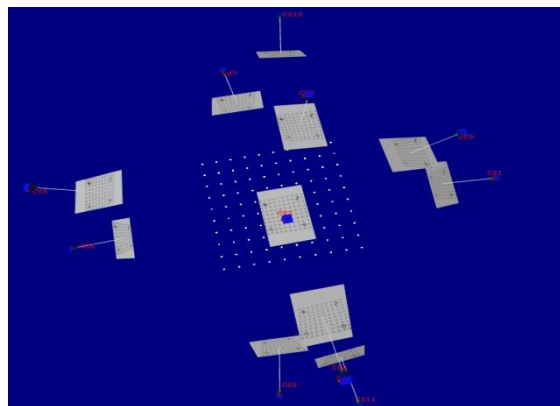
Εικόνα 4.44 Θέσεις λήψεις των φωτογραφιών, 3DViewer του Photomodeler



Εικόνα 4.45 Αποτελέσματα υποβρύχιας βαθμονόμησης στο λογισμικό Photomodeler

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.48 η εστιακή απόσταση βρέθηκε ίση με 19.18mm περίπου 1mm μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή του φακού, τα 18 mm. Το μέσο τετραγωνικό σφάλματος σχετικού προσανατολισμού βρέθηκε 0.65 pixel ενώ το ολικό σφάλμα της συνόρθωσης (σ_0) είναι 5,1. θεωρητικά για να είναι αποδεκτό το αποτέλεσμα και να έχουν εκτελεσθεί όλα σωστά θα πρέπει το σ_0 να είναι κοντά στο 1. Σύμφωνα με το λογισμικό όταν η τιμή είναι μεταξύ της μονάδας και του 5 έχει γίνει λάθος υπόθεση στην ακρίβεια σκόπευσης. Κάτι τέτοιο στην παρούσα περίπτωση δεν ισχύει καθώς το μέσο σφάλμα είναι μικρότερο του 1 pixel.

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν έκαναν απαραίτητη την εκτέλεση βαθμονόμησης του ίδιου συστήματος μηχανή-θήκη σε συνθήκες εργαστηρίου με το ίδιο λογισμικό. Ελήφθησαν φωτογραφίες με την φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τις υποβρύχιας εργασίες τοποθετημένη μέσα στην υδατοστεγή θήκη και με τα ίδια κριτήρια που αναφέρονται παραπάνω. Οι φωτογραφίες υπέστησαν επεξεργασία στο Adobe Photoshop και έπειτα φορτώθηκαν στο λογισμικό.

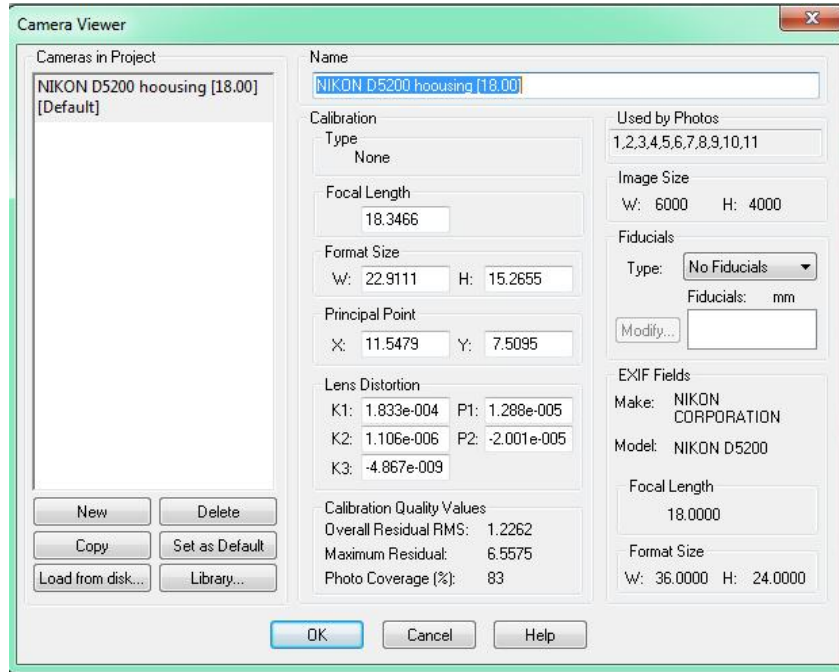


Εικόνα 4.47 Θέσεις λήψεις των φωτογραφιών, 3DViewer (Εργαστήριο)

Μια παρατήρηση σχετικά με τις θέσεις λήψεις είναι ότι αυτές παρουσιάζουν καλύτερη κατανομή στη δεύτερη βαθμονόμηση (περιβάλλον αέρα). Αυτό οφείλεται στη

δυσκολία φωτογράφισης μέσα στο νερό όπου ο δύτες δεν έχει πλήρη αίσθηση του χώρου και αποπροσανατολίζεται.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης στο εργαστήριο φαίνονται στην παρακάτω εικόνα και συγκρίνονται με τα προηγούμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.46 Αποτέλεσμα βαθμονόμησης στο εργαστήριο

Η εστιακή απόσταση υπολογίστηκε από το πρόγραμμα 18.34 mm πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή των 18 mm. Αξίζει να σημειωθεί βέβαια ότι βαθμονομήθηκε το σύστημα μηχανή-θήκη επομένως δεν είναι αναμενόμενο να υπάρχουν διαφορετικές παραμέτρους. Ο λόγος των δυο εστιακών αποστάσεων ισούται με 1.04, σχεδόν μονάδα, γεγονός που αιτιολογείται από την γεωμετρία των θολωτών θυρών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα. (Πίνακας 4.3).

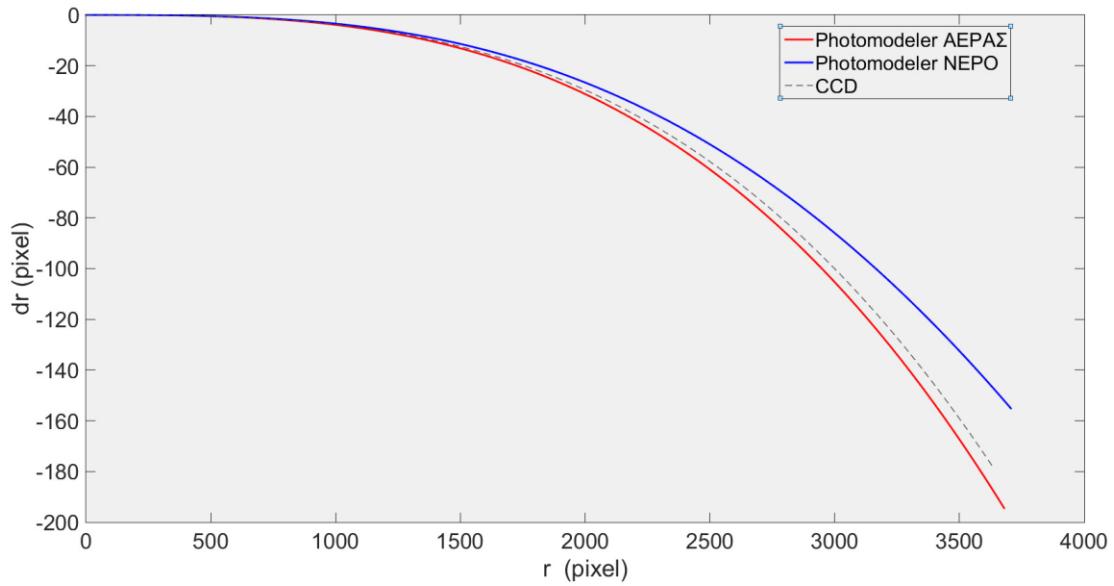
Πίνακας 4.3 Παράμετροι Εσ. Προσ/μου από Photomodeler

	ΑΕΡΑΣ		ΝΕΡΟ		Διαφορές
	ΤΙΜΗ	ΤΥΠ.ΣΦΑΛΜΑ	ΤΙΜΗ	ΤΥΠ.ΣΦΑΛΜΑ	
C (mm)	18.35	0.007	19.18	0.011	-0.83
Xo (mm)	11.55	0.006	12.10	0.005	-0.56
Yo (mm)	7.51	0.006	7.90	0.006	-0.39
Fw (mm)	22.91	0.001	23.76	0.001	-0.85
Fh (mm)	15.27	0.001	15.84	0.001	-0.58
K1	2.56 E-04	6.9 E-06	2.27 E-04	4.2 E-06	
K2	3.58 E-09	3.9 E-08	1.26 E-07	2.9 E-08	
P1	1.25 E-05	5.1 E-06	-4.86 E-06	4.6 E-06	
P2	-2 E-05	4.7 E-06	-7.14 E-05	4.6-06	
LAST ERROR		9.742		4.927	

Οι διαφορές που παρατηρούνται στον Πίνακα 4.3 είναι μικρότερες από 1 mm. Παρατηρείται όμως και περίπου διπλάσιο ολικό σφάλμα για την περίπτωση του αέρα και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Για την σύγκριση των τιμών της ακτινικής διαστροφής χρησιμοποιείται το μοντέλο της "μη-ισορροπημένης" ακτινικής διαστροφής σύμφωνα με το λογισμικό. Η εξίσωση είναι η :

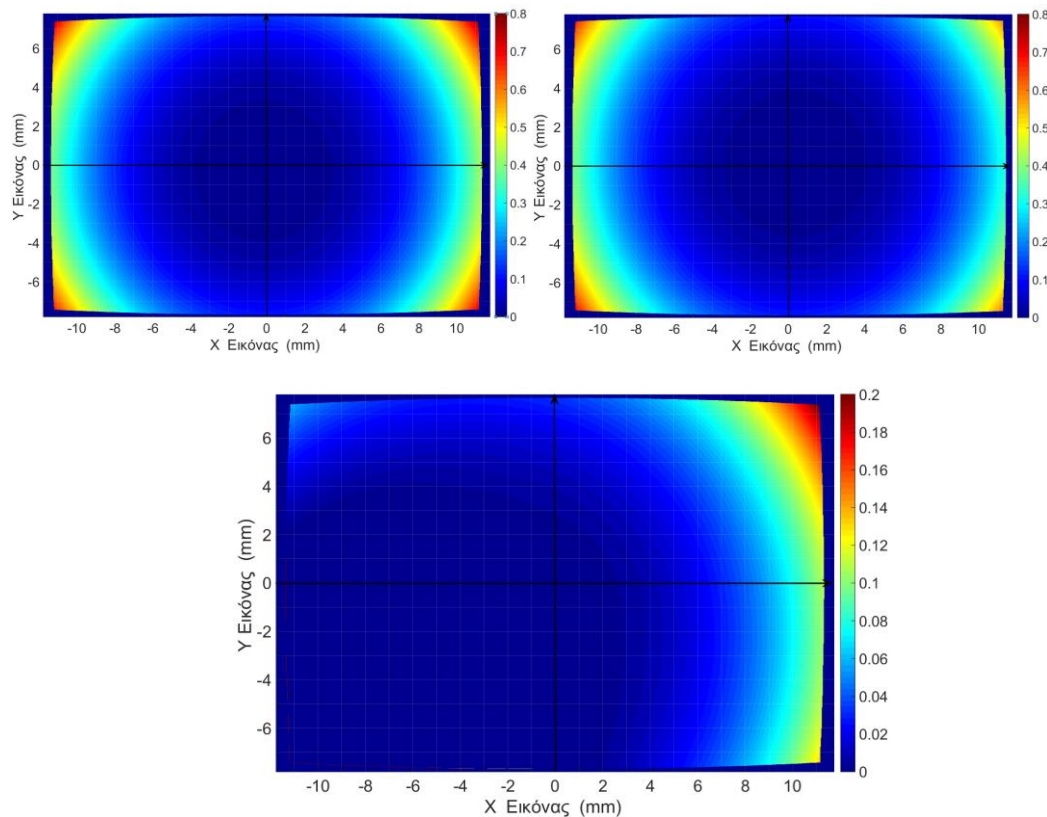
$$dr = K1 * r^3 + K2 * r^5 \quad \text{Εξ. 4.5}$$

όπου dr, το μέτρο της ακτινικής διαστροφής και r, η απόσταση από το πρωτεύον σημείο. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι καμπύλες για τις δύο περιπτώσεις, μέσα στο νερό (μπλε χρώμα) και στον αέρα (κόκκινο χρώμα). Μαζί τους παρατίθεται και η καμπύλη από τη βαθμονόμηση με το Calibration_CCD για σύγκριση (γκρι χρώμα).



Εικόνα 4.48 Οι καμπύλες της ακτινικής διαστρόφης

Οι μέγιστη απόλυτη τιμή για την περίπτωση του νερού είναι 155 pixel ή 0,6mm ενώ για τη περίπτωση του αέρα, είναι 194 pixel ή 0,75 mm. Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το νερό μειώνει το μέτρο της ακτινικής διαστρόφης για το σύστημα μηχανή-θήκη.



Εικόνα 4.49 Χάρτες διαστρόφης PhotomodelerScanner για αέρα (αριστερά), νερό (δεξιά) και διαφορά τους (κάτω)

Από τους χάρτες της διαστρόφης προκύπτει μια μικρή ασυμμετρία μεταξύ των δύο περιπτώσεων, κάτι που εξηγείται από τη διαφορά στη θέση του πρωτεύοντος σημείου. Επίσης διαφορά υπάρχει μεταξύ του πρωτεύοντος σημείου και του κέντρου της φωτογραφίας για την περίπτωση του νερού. Τέλος στον κάτω χάρτη είναι φανερό ότι η διαφορά των διαστροφών παίρνει μέγιστη τιμή στις άκρες (περίπου 0.2 mm).

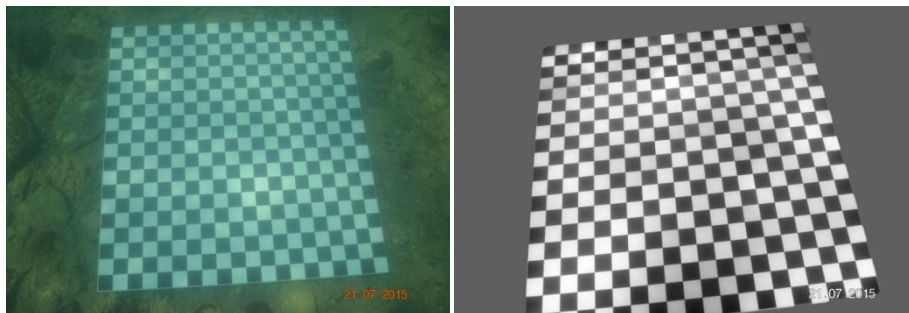
4.5.5.3 Εκτέλεση βαθμονόμησης με μοτίβο "Σκακιέρας"

Η δυνατότητα απλών δισδιάστατων μοτίβων "σκακιέρας" να χρησιμοποιούνται ως πεδία ελέγχου μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών και αλγορίθμων, όπως το *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet) ή το ελεύθερο λογισμικό "DLRCalDeandDLRCalLab" του DRIstitute of Robotics & Mechatronics (χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Zhang, Sturm και Maybank) καθιστούν την βαθμονόμηση μια διαδικασία απλή και φιλική προς το χρήστη.

Σημαντική διαφορά της μεθόδου αυτής από άλλες δισδιάστατες, είναι η απουσία σημείων ελέγχου. Χωρίς αυτά υπάρχει αντίκτυπος στην ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων. Όμως η συμμετρία που παρουσιάζει η σκακιέρα δίνει τη δυνατότητα χρήσης αυθαίρετων συντεταγμένων (και κλίμακας) στη τελική συνόρθωση, καθιστώντας τον εξωτερικό προσανατολισμό της εικόνας δευτερεύουσας σημασίας. Αν η ακρίβειά τους θεωρηθεί με μεγάλο βάρος η αυθαίρετη, αυτή επιλογή δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των παραμέτρων της βαθμονόμησης. Υπό την προϋπόθεση ότι τα τετράγωνα είναι συνεχόμενα και ίδιου μεγέθους και τα σετ εικόνων τηρούν συγκεκριμένα κριτήρια όπως μεγάλη κάλυψη της εικόνας, σημαντικές διαφορές στη προοπτική, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικά και συγκρίσιμα με αποτελέσματα βαθμονομήσεων με επίπεδα αντικείμενα. (Ντούσκος κ.ά. 2007).

Στο υποβρύχιο περιβάλλον, όπου ο χρόνος παραμονής είναι περιορισμένος, η ευκολία που παρέχει ο συγκεκριμένος τρόπος βαθμονόμησης είναι μεγάλη καθώς δεν απαιτούνται μετρήσεις, παρά μόνο η τοποθέτηση της σκακιέρας και η φωτογράφησή της.

Μαζί με τις φωτογραφίες που ελήφθησαν στη περιοχή εργασίας αλλά και στο εργαστήριο αργότερα ελήφθησαν και φωτογραφίες του πεδίου της σκακιέρας (Εικόνα 4.50). Υπέστησαν επεξεργασία στο Adobe Photoshop για να καταστούν επεξεργάσιμες από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε καθώς η απευθείας εισαγωγή τους οδηγούσε σε σφάλμα αναγνώρισης των κόμβων.



Εικόνα 4.50 Εικόνα πριν και μετά από επεξεργασία για χρήση στο FAUCCAL

Η επεξεργασία των φωτογραφιών ήταν αρκετά περίπλοκη καθώς το μικρό βάθος της περιοχής και οι κυματισμοί φώτιζαν ανομοιόμορφα την πλάκα με αποτέλεσμα τα

μοτίβα να μην εναλλάσσονται αυστηρά σε άσπρο και μαύρο αλλά να υπάρχει θόρυβος. Η θολότητα του νερού που επικρατούσε τις ημέρες της φωτογράφισης πρόσθεσε επιπλέον θόρυβο στις εικόνες.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της βαθμονόμησης είναι το FAUCCAL. Πρόκειται για ελεύθερη εργαλειοθήκη που τρέχει σε περιβάλλον MATLAB και αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σ.Α.Τ.Μ. (Ντούσκος Β., 2008). Τρέχει πλήρως αυτοματοποιημένα και χρησιμοποιεί το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο :

$$x = x_o - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} - c \cdot \alpha \cdot sk \cdot \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x^{rad} + \Delta x^{dec} \quad \text{Εξ. 4.6}$$

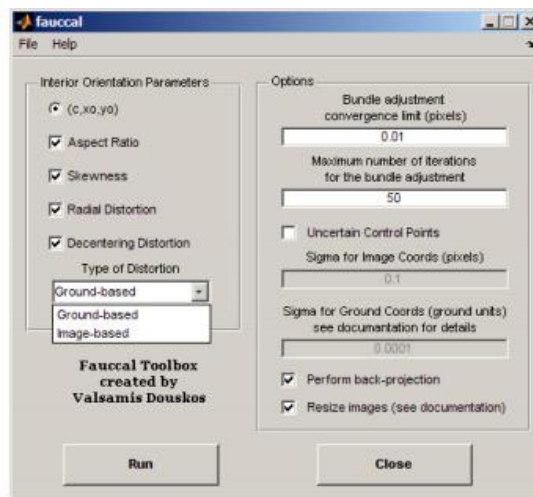
$$y = y_o - c \cdot \alpha \cdot \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y^{rad} + \Delta y^{dec} \quad \text{Εξ. 4.7}$$

$$\begin{aligned} \Delta x^{rad} &= (\tilde{x} - x_o) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \\ \Delta y^{rad} &= (\tilde{y} - y_o) \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) \\ \Delta x^{dec} &= p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (\tilde{x} - x_o)^2) + 2 \cdot p_2 \cdot (\tilde{x} - x_o) \cdot (\tilde{y} - y_o) \\ \Delta y^{dec} &= p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot (\tilde{y} - y_o)^2) + 2 \cdot p_1 \cdot (\tilde{x} - x_o) \cdot (\tilde{y} - y_o) \\ r^2 &= (\tilde{x} - x_o)^2 + (\tilde{y} - y_o)^2 \end{aligned}$$

όπου :

Δx^{rad} , Δy^{rad} , οι συνιστώσες της ακτινικής διαστρόφης, Δx^{dec} , Δy^{dec} , οι συνιστώσες της έκκεντρης διαστρόφης, sk η απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνικότητα και η αναλογία.

Αφού ανοίξει το πρόγραμμα εμφανίζεται το παράθυρο όπου ρυθμίζονται οι παράμετροι της βαθμονόμησης που θέλει ο χρήστης να υπολογιστούν καθώς και κάποιες επιπλέον επιλογές (Εικόνα 4.51).



Εικόνα 4.51 Παράθυρο ρυθμίσεων

Στη συνέχεια φορτώνονται οι εικόνες και αναγνωρίζονται οι κόμβοι, εκτελείται συνόρθωση δέσμης και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εξαιρέσει κάποια

σημείαν κρίνει ότι αυξάνουν την αβεβαιότητα. Έπειτα το πρόγραμμα εξάγει τα τελικά αποτελέσματα.

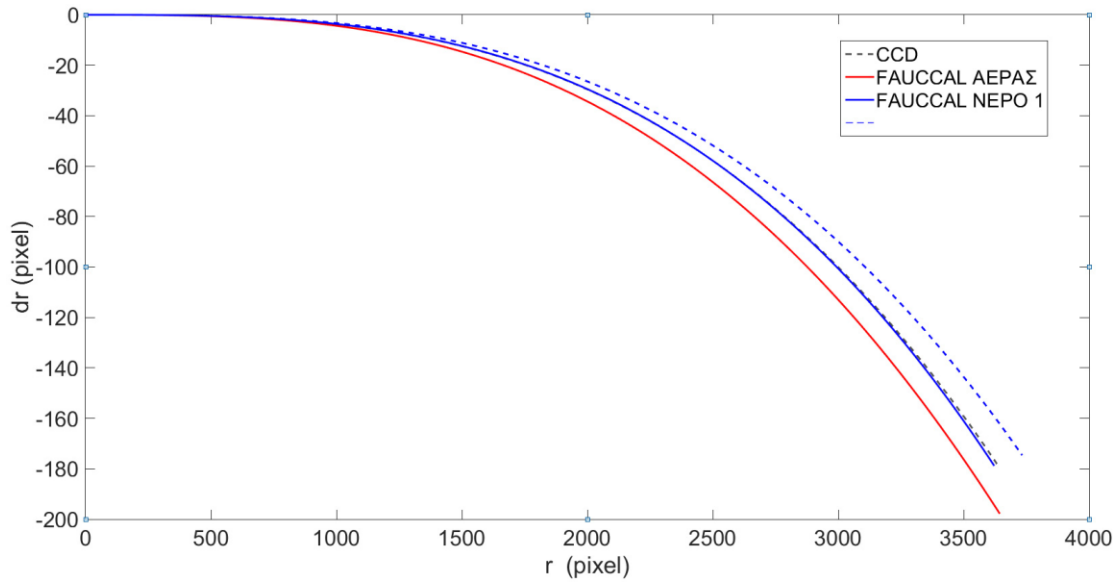
Στη παρούσα εφαρμογή το λογισμικό παρουσίασε πολλά προβλήματα όπως αδυναμία εύρεσης κόμβων, μη σύγκλιση επαναλήψεων συνόρθωσης δέσμης και αποτέλεσμα ήταν να χρησιμοποιηθούν λίγες φωτογραφίες. Πραγματοποιήθηκε βαθμονομηση για δυο σετ εικόνων καθώς η πρώτη απο τις δυο περιλαμβάνει μόνο 2 εικόνες. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στις φωτογραφίες της σκακιάρας που ελήφθησαν στο εργαστήριο. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων.

Πίνακας 4.4 Παράμετροι Εσ. Προσ/μου FAUCCAL

	ΝΕΡΟ				ΑΕΡΑΣ	
	<i>Pixel</i>	<i>mm</i>	<i>Pixel</i>	<i>mm</i>	<i>Pixel</i>	<i>mm</i>
Cx	4856.36	18.94	4815.57	18.78	4810.69	18,76
Cy	4850.89	18.92	4813.36	18.77	4808.5	18.75
Xo	3005.489	11.72	3100.01	12.09	3015.51	11.76
Yo	2016.96	7.87	2076.39	8.10	2041.72	7.96
Ar	0.998		0.999		0.999	
K1	-3.645 E-09		-3.28 E-09		-4.38 E-09	
K2	-9.04 E-018		-5.508 E-17		2.219 E-17	
P1	-3.48 E-07		2.28 E-07		-4.3 E-08	
P2	3.205 E-07		4.42 E-07		-3.61 E-06	
σ_o	2.018		1.721		2.821	

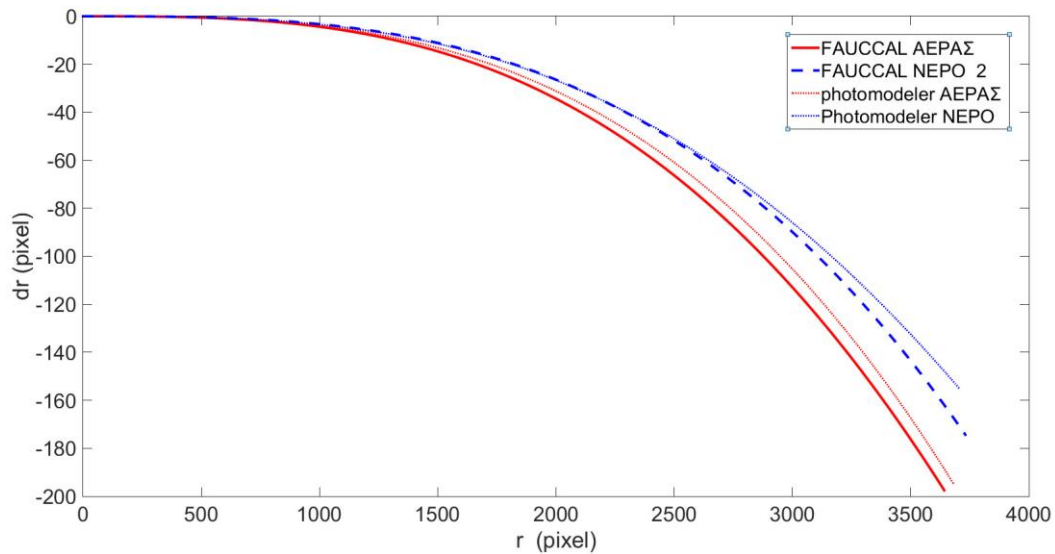
Δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις στις τιμές των παραμέτρων ενώ οι μικρές αυτές διαφορές μπορούν να αιτιολογηθούν από το θόρυβο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι καμπύλες της ακτινικής διαστροφής συγκρίνονται στη παρακάτω εικόνα. Δεν πρόκειται για κανονικοποιημένες καμπύλες αλλά της μορφής :

$$Dr = K1 \cdot x^3 + K2 \cdot x^5$$



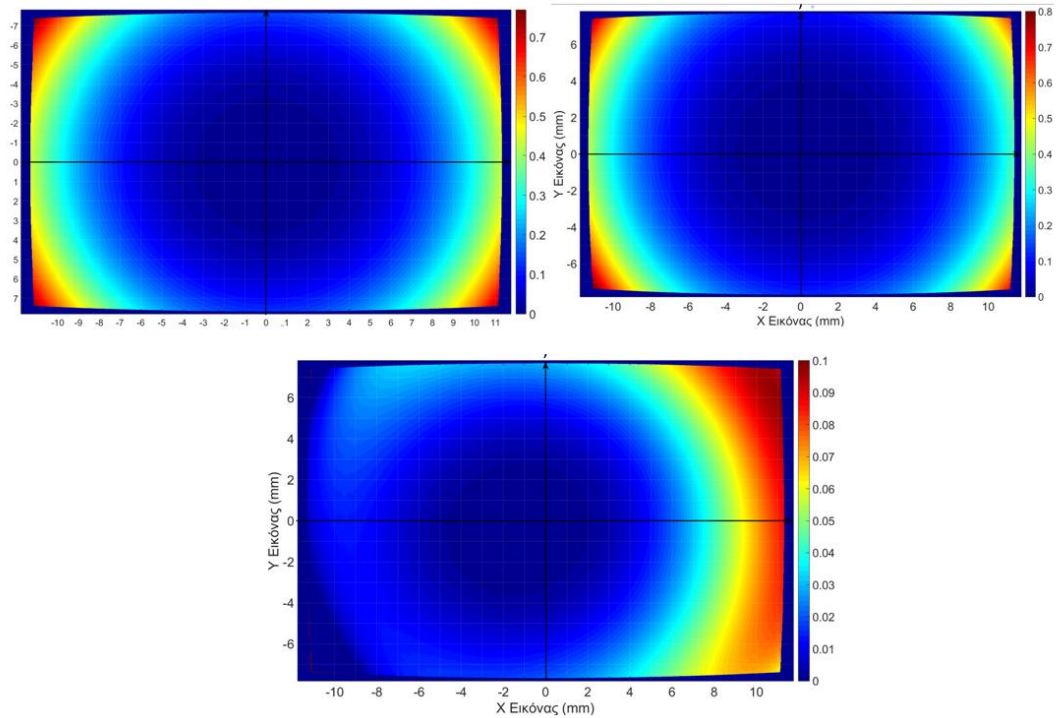
Εικόνα 4.52 Καμπύλες ακτινικής διαστρόφης FAUCCAL

Και εδώ το μέτρο της ακτινικής διαστρόφης είναι μεγαλύτερο για τις συνθήκες αέρα. Η μέγιστη τιμή σε απόλυτη τιμή είναι $\Delta r = 197$ pixel ή 0,76mm. Για το πρώτο σετ η μέγιστη τιμή είναι $\Delta r = -178$ pixel ή 0,68 mm, και για το Σετ 1 η μέγιστη τιμή (σε μέτρο) είναι ίδια $\Delta r = -174$ pixel. Για να γίνει καλύτερη αξιολόγηση οι καμπύλες συγκρίνονται με αυτές που προέκυψαν από το Photomodeler.



Εικόνα 4.53 Σύγκριση καμπύλων Photomodeler και FAUCCAL

Οι ακτινικές διαστρόφες παρουσιάζουν αντίστοιχες μετατοπίσεις (το ΣΕΤ 1 παραλείπεται), και πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους. Σε περιβάλλον αέρα η διαφορά είναι μόνο 3 pixel ενώ στο νερό 19 pixel.



Εικόνα 4.54 Χάρτες Διαστρόφης FAUCCAL περίπτωση αέρα (αριστερά) νερού (δεξιά) και η διαφορά τους (κάτω)

Σύμφωνα με το FAUCCAL η διαστρόφη εκτείνεται ακτινικά από το πρωτεύον σημείο προς τις άκρες της εικόνας και λίγο ασυμμετρικά σε βάρος της αριστερής πλευράς μέσα στο νερό, η οποία πλευρά παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δυο περιπτώσεων. Η μέτρο της μάλιστα είναι ίδιο με το Photomodeler.

4.5.5.4 Αυτοβαθμονόμηση Photoscan και σύγκριση με βαθμονόμηση σε AgisoftLens

Το λογισμικό Photoscan της Agisoft, που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του 3D μοντέλου του πυθμένα για την πρακτική εφαρμογή, δύναται να εκτελέσει και αυτοβαθμονόμηση. Για να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα της αυτοβαθμονόμησης θα συγκριθεί με τις προηγούμενες υποβρύχιας καθώς και με αυτή που εκτελέστηκε από το λογισμικό βαθμονόμησης AgisoftLens. Πρόκειται για ένα ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό αυτόματης βαθμονόμησης φακού, το οποίο χρησιμοποιεί οθόνη LCD ως πεδίο ελέγχου. Χρησιμοποιεί το μοντέλο της μηχανής σημειακής οπής (pinhole camera) για τη βαθμονόμηση του φακού. Οι παραμορφώσεις μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας το μοντέλο παραμόρφωσης του Brown (Brown 1968). Το μοντέλο της κάμερας προσδιορίζει το μετασχηματισμό από σημειακές συντεταγμένες στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων της μηχανής σε εικονοσυντεταγμένες στο πλαίσιο της εικόνας. Η διαδικασία της αυτόματης βαθμονόμησης στο λογισμικό AgisoftLens πραγματοποιείται με τη χρήση δισδιάστατου κανάβου (2D), ο οποίος έχει σχήμα σκακιάρας και διαστάσεις ανάλογες με τις διαστάσεις της οθόνης LCD, από την οποία γίνεται η έκθεση. Η διαδικασία της φωτογράφισης αρχίζει με την φωτογράφιση του πεδίου βαθμονόμησης σε ελαφρώς διαφορετικές γωνίες. Ο ελάχιστος αριθμός φωτογραφιών για μία δεδομένη εστιακή

απόσταση είναι τρεις (3). Κατά την πραγματοποίηση της φωτογράφισης του πεδίου βαθμονόμησης, πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω οδηγίες (AgisoftLensmanual):

- α) Η εστιακή απόσταση πρέπει να διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια
- β) Πρέπει να αποφεύγονται οι λάμπεις στις φωτογραφίες, μετακινώντας τις πηγές φωτός μακριά αν είναι απαραίτητο.
- γ) Κατά προτίμηση, ολόκληρη η έκταση της φωτογραφίας πρέπει να καλύπτεται από το πεδίο βαθμονόμησης, μετακινώντας την κάμερα πιο κοντά στην οθόνη LCD, αν είναι απαραίτητο.



Εικόνα 4.55 Επιλεγμένες λήψεις που χρησιμοποιήθηκαν

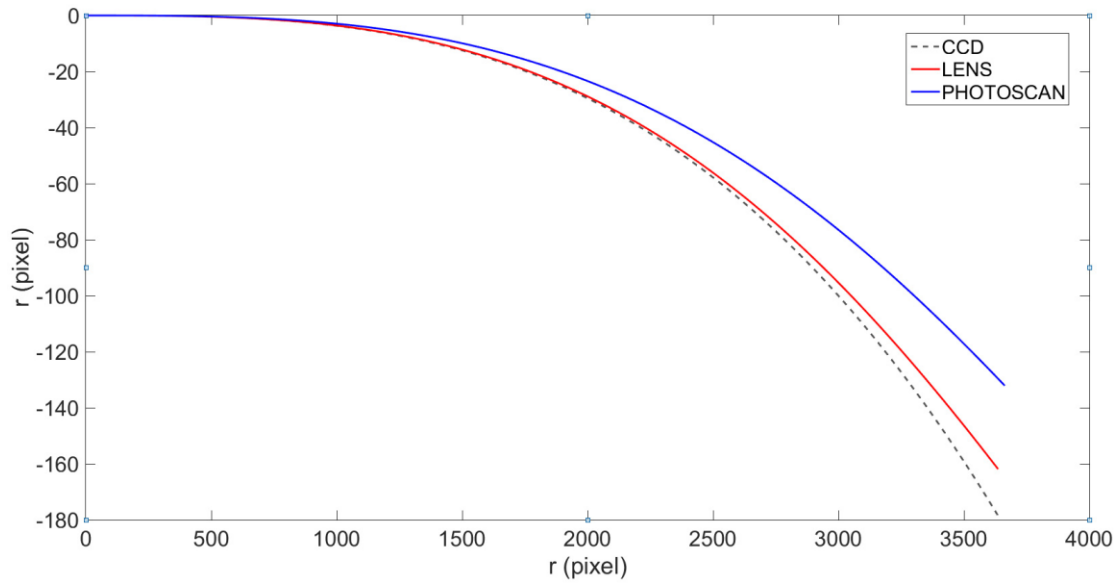
Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 7 λήψεις. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.5):

Πίνακας 4.5

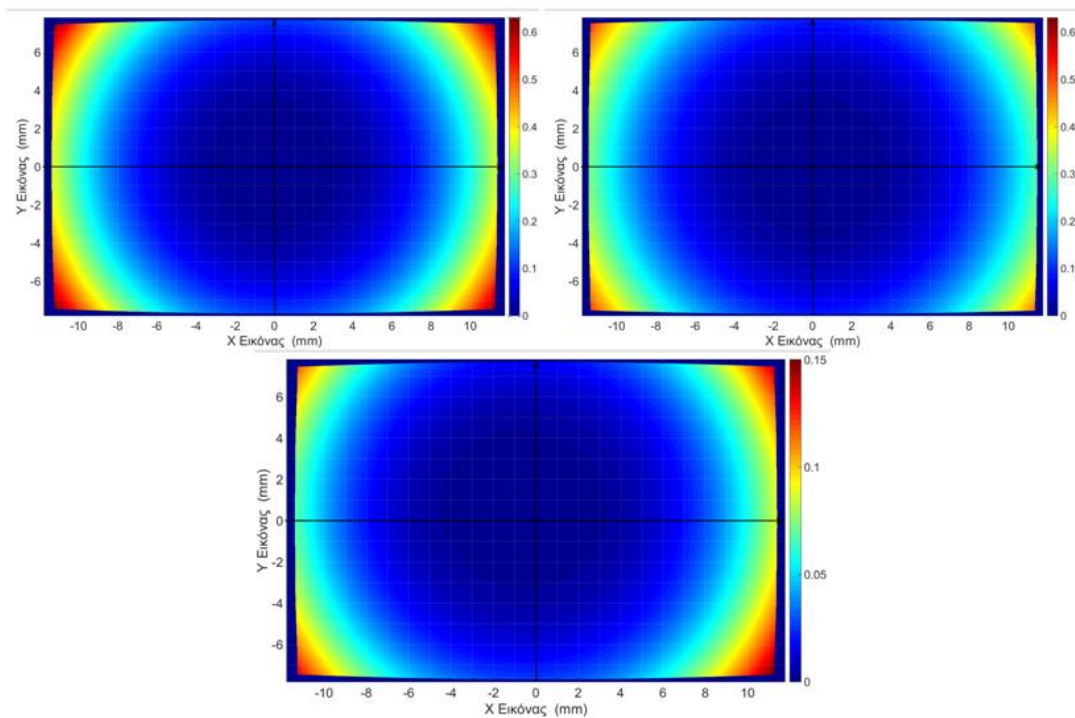
	LENS		ΑΥΤΟΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ		ΔΙΑΦΟΡΑ
	Pixel	mm	Pixel	mm	mm
Fx	4682	18.26	4882.67	19.04	-0.78
Fy	4683	18.26	4884.1	19.05	-0.78
Cx	3022.5	11.79	3059.11	11.93	-0.14
Cy	2018.4	7.87	1989	7.76	0.11
K1	-7.852 E-02		-7.022 E-02		
K2	-8.465 E-03		-7.791 E-04		
K3	2.696 E-02		2.073 E-02		

Οι τιμές της εστιακής απόστασης και η μεταξύ τους διαφορά είναι ίδιες με αυτά του Photomodeler ενώ οι διαφορές των συντεταγμένων πρωτεύοντος σημείου μεταξύ των δύο προγραμμάτων είναι κάτω των 0.3 mm. Για να συγκριθούν οι καμπύλες της ακτινικής διαστρόφησης (και να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο με τα προηγούμενα λογισμικά) διαιρούνται οι συντελεστές K1, K2, K3 με fx^2 , fx^4 , fx^6 αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.61 παρουσιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν. Και σε αυτή την περίπτωση η ακτινική διαστρόφηση έχει μικρότερη επίδραση στο νερό. Η μέγιστη τιμή

για το LENS είναι 158 pixel ή 0,61 mm και η μορφή της συγκλίνει με το CCD ενώ για την αυτοβαθμονόμηση η ελάχιστη τιμή είναι 126 pixel ή 0,49 mm.



Εικόνα 4.56 Σύγκριση ακτινικών διαστρώσεων LENS και Αυτοβαθμονόμησης Photoscan



Εικόνα 4.57 Χαρτες διαστρώσης Lens (αριστερά) , αυτοβαθμονόμησης Photoscan (δεξιά) και η διαφορά τους (κάτω)

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις η διαστρόφη είναι λίγο μικρότερη στο αριστερό άκρο της εικόνας.

4.5.5.5 Συγκρίσεις βαθμονομήσεων

Για να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτές οι διαφορές και να βγουν επιπλέον συμπεράσματα, τα αποτελέσματα συμπυκνώνονται παρακάτω.

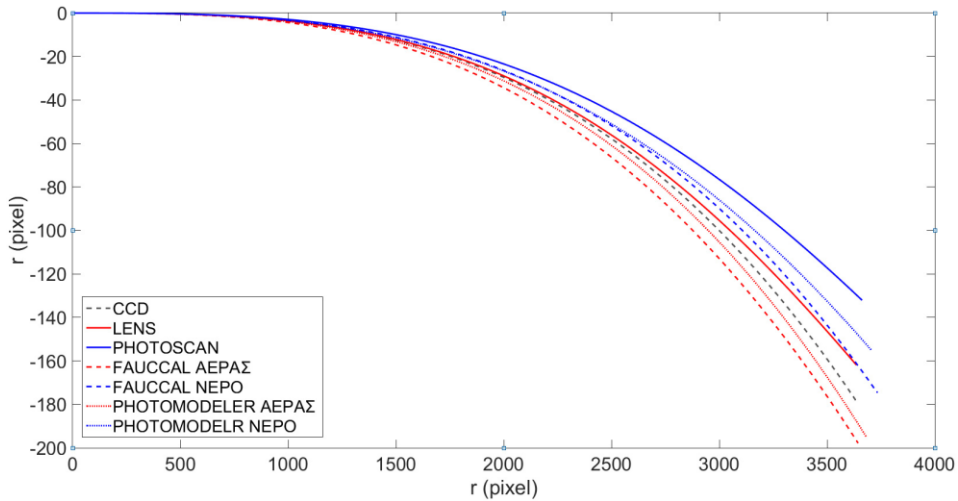
Πίνακας 4.6 Σύγκριση για περιβάλλον Αέρα

	CCD(μηχανή- θηκη)	Photomodeler	Fauccal	Lens	Τυπ. Απόκλιση
Xo (mm)	11.81	11.55	11.76	11.79	0,12
Yo(mm)	7.87	7.51	7.96	7.87	0,20
C (mm)	18.56	18.35	18.76	18.26	0,22
σ_o	0.46	9.74	2.82	-	

Πίνακας 4.7 Σύγκριση για περιβάλλον Νερού

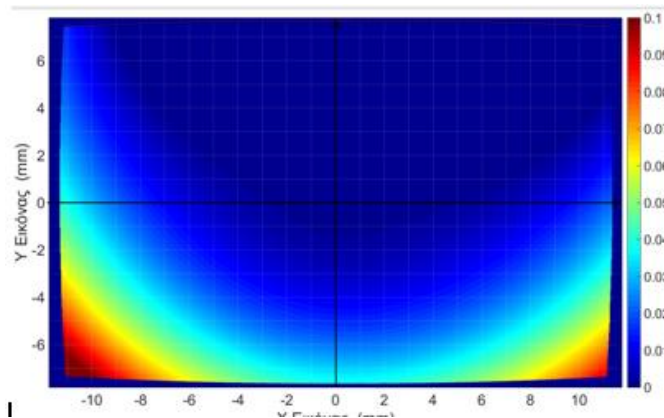
	CCD(μηχανή- θηκη)	Photomodeler	Fauccal	Lens	Τυπ. Απόκλιση
Xo (mm)	11.81	12,1	12,09	11,93	0,10
Yo(mm)	7.87	7.9	8,1	7,76	0,24
C (mm)	18.56	19,18	18.78	19,04	0,10
σ_o	0.46	4,9	1,72	-	

Παρόλο που θεωρητικά η τιμή της εστιακής απόστασης έπρεπε να είναι ίδια, στο υποβρύχιο περιβάλλον παρατηρείται μια μικρή αύξηση. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από την θέση του φακού μέσα στη θήκη. Η ακτίνα καμπυλότητας μικραίνει όσο πλησιάζει τον θόλο με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο σφαιρικός. Επίσης διαφορές παρατηρούνται στη θέση του πρωτεύοντος σημείου. Αυτό είναι απόρροια της κακής ευθυγράμμισης του κέντρου του θόλου με τον οπτικό άξονα και μη σύμπτωσης του κέντρου καμπυλότητας του θόλου με το προβολικό κέντρο σε επίπεδο κάθετο στον οπτικό άξονα. Οι καμπύλες της ακτινικής διαστροφής παρουσιάζουν αντίστοιχες διαφορές ανά ζεύγη λογισμικών.

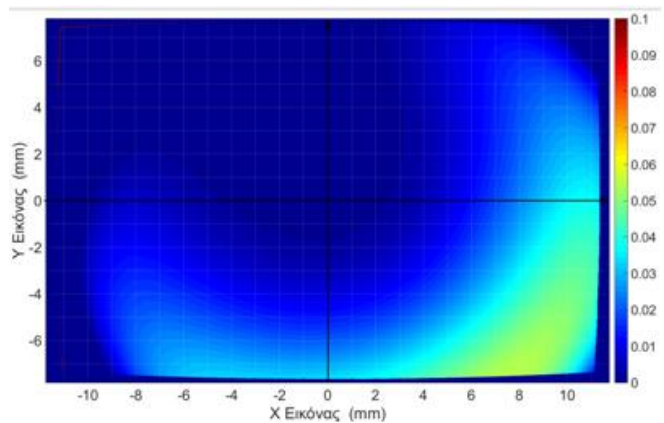


Εικόνα 4.58 Συγκεντρωτικός Πίνακας ακτινικής διαστρώσης

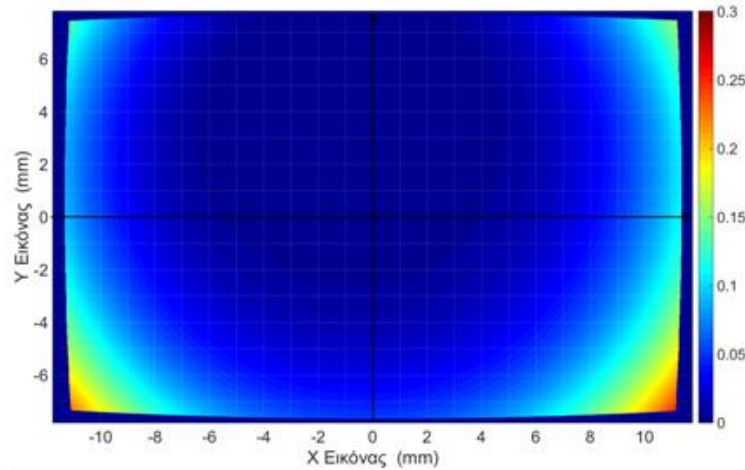
Στις παρακάτω εικόνες συγκρίνονται η διαστρώση που έχει η κάμερα με τις διαστρώσεις που παρουσίασαν οι διαφορετικές επεξεργασίες στα λογισμικά για την υποβρύχια βαθμονόμηση. Παρατηρείται μία συστηματικότητα ως προς το μέτρο και την κατεύθυνση της αύξησης της.



Εικόνα 4.59 Χάρτης Διαφοράς διαστρώσης CCD(μόνο κάμερα) και αυτοβαθμονόμησης Photoscan



Εικόνα 4.60 Χάρτης διαφοράς διαστρώσης CCD(μόνο κάμερα) και Faucal



Εικόνα 4.61 Χάρτης διαστρώσης CCD (μόνο κάμερα) και Photomodeler

Με βάση τις βαθμονομήσεις που έγιναν και την συγκριτική τους μελέτη μπορεί να ειπωθεί για το συγκεκριμένο σύστημα μηχανή-θήκη ότι η παρουσία του νερού μειώνει το μέτρο της ακτινικής διαστρώσης. Ο F.Menna κ.ά (2015) έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα αυτό και προτείνουν η οπτική συμπεριφορά του θολωτού housing να μοντελοποιείται από το μοντέλο διαστρώσης του Brown όσον αφορά ρηχά νερά. Συνεπώς για υποβρύχιας εφαρμογές αρκεί μια βαθμονόμηση του συστήματος μηχανή-θήκη μέσα στο νερό για να είναι δυνατή η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού.

Η Α. Παπαδάκη (2014) υποστηρίζει ότι για εφαρμογές γεωμετρικής τεκμηρίωσης μέσης ακρίβειας τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά παρέχουν αποδεκτά αποτελέσματα βαθμονόμησης με τρόπο αυτοματοποιημένο, γρήγορα και με μικρό υπολογιστικό κόστος. Στη παρούσα εφαρμογή όμως τα ελεύθερα λογισμικά παρέχουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς το τελικό τους σφάλμα φτάνει έως 3 pixels, ασήμαντο για υποβρύχιας εφαρμογές σε ρηχά νερά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πρακτική Εφαρμογή στην Ενάλια Αρχαιολογία

5.1 Αρχαιολογικά στοιχεία και γεωγραφικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης.

Ο Αργολικός κόλπος είναι ο κόλπος που βρίσκεται ανάμεσα στην Αργολική χερσόνησο και τα ανατολικά παράλια της Αρκαδίας και της Λακωνίας. Είναι ο ανατολικότερος από τους τρεις μεγάλους κόλπους που σχηματίζονται στην ακτογραμμή της νότιας Πελοποννήσου. Τα παράλια του Αργολικού είναι απόκρημνα στο τμήμα της νότιας Αργολίδας και Αρκαδίας και ομαλά στην βόρεια πλευρά του, που συναντά τον κάμφο του Άργους(Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 Αργολικός Κόλπος

Οι σημαντικότερες πόλεις και οικισμοί στα παράλια του Αργολικού κόλπου είναι το το Ναύπλιο, ο Τυρός, το Τολό, το Πορτοχλί, το Λεωνίδειο και η Νέα Κίος. Μέσα στον Αργολικό κόλπο υπάρχουν αρκετές νησίδες. Οι μεγαλύτερες από αυτές είναι οι Ψηλή, η Πλατειά και η Ρόμβη, που και οι τρεις βρίσκονται δίπλα στις ακτές της Αργολίδας. Στην έξοδο του Αργολικού κόλπου βρίσκονται οι Σπέτσες. Ο Αργολικός κόλπος αποτέλεσε το κέντρο του προϊστορικού πολιτισμού στον ελλαδικό χώρο, καθώς στα παράλιά του αναπτύχθηκαν ορισμένες από τις πιο σημαντικές κοινωνίες της προϊστορικής Ελλάδας, όπως η προϊστορική πόλη της Λέρνας και η προϊστορική κοινωνία του Στηπλαιού Φράγχθι(Wikipedia).

Το σπήλαιο Φράγγθι είναι μία από τις σημαντικότερες προϊστορικές θέσεις του Ελληνικού χώρου. Πιθανόν πρώτο κατοικήθηκε από τον άνθρωπο του Νεάντερταλ, κατά την Μουστιαία περίοδο 40.000 χρόνια π.Χ., αλλά σίγουρα από τον *Homo sapiens* την περίοδο μετά από το 30.000 π.Χ. Μέχρι σήμερα έχουν διερευνηθεί μέσω των ανασκαφών 25.000 χρόνια και υπάρχουν ενδείξεις ότι το σπήλαιο κατοικείτο συνεχώς από το 20.000 μέχρι το 3.000 π.Χ. όπου και γκρεμίστηκε (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 Εσωτερική άποψη σπηλαίου Φράγγθι. Στο βάθος διακρίνεται η γκρεμισμένη οροφή

Την εποχή που οι πρώτοι κυνηγοί βρήκαν καταφύγιο στη σπηλιά, το τοπίο ήταν διαφορετικό. Οι θάλασσες είχαν μαζευτεί αφήνοντας χώρο στην ξηρά. Η θάλασσα ήταν 6-8 χιλιόμετρα δυτικότερα από τη σημερινή της θέση και μεγάλες πεδιάδες απλώνονταν μπροστά στην είσοδο του σπηλαίου. Σήμερα η είσοδος είναι 12,5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και σε απόσταση 50 μέτρων. Τότε το σπήλαιο δέσποζε σε μια μεγάλη πεδιάδα που έφτανε μέχρι τις Σπέτσες και την Σπετσοπούλα. Κατά την πρώιμη περίοδο κατοίκησης του βρέθηκαν υπολείμματα από ελάφια, βίσωνες, αλεπούδες, άγριους γαϊδάρους, λαγούς και εργαλεία από πυριτόλιθο και σχιστόλιθο.

Ενώ το κλίμα βελτιωνόταν και πλούσια δάση γέμιζαν τον τόπο, οι κυνηγοί που το χρησιμοποιούσαν δεν ήταν περιστασιακοί κάτοικοι της σπηλιάς αλλά όλο και περισσότερο μόνιμοι. Το σπήλαιο φτάνει στην ακμή του στην Μέση Νεολιθική (5.000-4.500 π.Χ.) και στην ύστερη νεολιθική που ακολουθεί για τα επόμενα 500 χρόνια. Αυτήν την περίοδο βρέθηκε οψιδιανός, ένα πέτρωμα που υπάρχει μόνο στην Μήλο, 80 μίλια μακριά και φέρνει μια αληθινή επανάσταση σχετικά με την αντίληψη για τις θαλάσσιες μεταφορές. Ο οψιδιανός εξορίζει τα προηγούμενα εργαλεία από σχιστόλιθο και δίνει την δυνατότητα να φτιαχτούν πολύ καλύτερα με μεγαλύτερη αντοχή. Μια απόπειρα που έγινε να επιβεβαιωθεί η θαλάσσια επικοινωνία Ερμιονίδας – Μήλου ήταν στις 14/06/87 όταν τετραμελές πλήρωμα πήγε από την Ερμιόνη στην Μήλο με πλοiάριο από πεύκα που είχε κατάρτι και πανί. Πήραν οψιδιανό και γύρισαν στην Ερμιόνη.

Αυτή τη περίοδο στην τροφή προστίθενται γιγάντια ψάρια, φακές που συλλέγονταν με δρεπάνι από πυριτόλιθο, θαλασσινά όστρακα και προς το τέλος της περιόδου διαπιστώθηκε καλλιέργεια της γης και οικόσιτα ζώα. Οι κάτοικοι δεν είναι πια

συλλέκτες και κυνηγοί μόνο αλλά και παραγωγοί. Στην ακμή του, το 4.000 π.Χ., το σπήλαιο έφτασε τους 150 κατοίκους και ο οικισμός εξαπλώθηκε και έξω από την είσοδο. Εκεί που με το ανέβασμα της στάθμης είναι σήμερα η θάλασσα, βρέθηκαν κάποια οικήματα, άριστης ποιότητας εργαλεία οψιδιανού αλλά όχι ξύλινα σκεύη λόγω φυσικής φθοράς.

Όλα τα πήλινα θραύσματα που ανήκουν στην Νεολιθική εποχή είναι εσωτερικά μαύρα και εξωτερικά καφέ, δοχεία (κούπες) χωρίς βάσεις και χερούλια ή κάποια διακοσμητικά με επίπεδα χείλη. Βρέθηκαν ακόμα γυναικεία ειδώλια (νεώτερης νεολιθικής εποχής) αγαλματίδια, χάντρες, κοσμήματα και κατεργασμένα όστρακα. Όλα τα ευρήματα είναι στο αρχαιολογικό μουσείο Ναυπλίου.



Εικόνα 5.3 Σκελετός που ανακαλύφθηκε στο Σπήλαιο Φράχθι

Όμως η πιο σημαντική ανακάλυψη θεωρείται ένας σκελετός. Πρόκειται για τον αρχαιότερο πλήρη σκελετό στην Ελλάδα, ηλικίας 10.000 – 8.000 ετών. Ήταν άντρας 25 χρονών με ύψος 1,56 που δέχτηκε ισχυρό χτύπημα στο κεφάλι. Πάνω από τον νεκρό είχαν μπει πέτρες αλλά δεν βρέθηκαν κοσμήματα ή αφιερώματα. Είχε τα πόδια λυγισμένα και τα χέρια στο στήθος στην στάση του εμβρύου. Ήταν θαμμένος με το κεφάλι νότια και τα πόδια στον βορρά (Εικόνα 4.3). Βρέθηκαν ακόμα σκελετοί δύο παιδιών με αντίθετο προσανατολισμό.

Οι ανασκαφές έχουν γίνει μόνο στον μπροστινό χώρο του σπηλαίου σε επιφάνεια 700 τ.μ. Το υπόλοιπο είναι καταπλακωμένο από την οροφή και ίσως κρύβει μοναδικές πληροφορίες. Τις ανασκαφές έχουν κάνει τα πανεπιστήμια της Ιντιάνα και της Πενσυλβάνια την περίοδο 1967-1976 με επικεφαλής τον καθηγητή Thomas Jacobsen (Wikipedia).

5.2 Υποβρύχια Ανασκαφή στην παραλία "Λαμπαγιαννάς"

Κατά την ερευνητική περίοδο του 2014 ήρθε στο φως προϊστορικός οικισμός στην ανατολική πλευρά του Αργολικού κόλπου και συγκεκριμένα στην παραλία "Λαμπαγιαννάς" Κοιλιάδας του νομού Αργολίδος. Η έρευνα, που ξεκίνησε από την θαλάσσια περιοχή του σπηλαίου Φράγχθι με την αποστολή TerraSubmersa και το ηλιακό σκάφος PlanetSolar, διεξάγεται υπό την διεύθυνση της προϊσταμένης της Εφορείας Εναλίων Αρχαιοτήτων Δρ. Αγγελικής Γ. Σίμωσι και του διευθυντή της Ελβετικής Αρχαιολογικής Σχολής Καθηγητή Karl Reber, με υπεύθυνους επί τόπου την καταδυόμενη αρχαιολόγο της ΕΕΑ, Δέσποινα Κουτσούμπα, και τον λέκτορα ελληνικής προϊστορίας του Πανεπιστημίου της Γενεύης, Julien Beck. Η αναζήτηση επικεντρώνεται στην αναζήτηση ιχνών προϊστορικής ανθρώπινης δραστηριότητας.

Τα αποτελέσματα των πρώτων αναλύσεων των γεωλογικών-γεωφυσικών δεδομένων έδειξαν:

1) Τον εντοπισμό της παλαιο-ακτής σε διάφορα βάθη (μέχρι 225 μέτρα κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας) και σε διάφορες χρονικές στιγμές της Προϊστορικής περιόδου (20.000 χρόνια, 60.000 χρόνια, 140.000 χρόνια πριν από σήμερα).

2) Πλούσια στοιχεία για την αναπαράσταση του προϊστορικού αναγλύφου κοντά στο Σπήλαιο Φράχθι, συμπεριλαμβανομένης της κοίτης του ποταμού που έρρεε κοντά

στο σπήλαιο και τώρα είναι βυθισμένη και καλυμμένη από θαλάσσιο ίζημα.

3) Την ύπαρξη μιας περιοχής καλυμμένης από 2-3 μέτρα λάσπης σε βάθος 10-12 μέτρων περίπου, κοντά στο Σπήλαιο Φράχθι, η οποία είναι πιθανόν να περιέχει υπολείμματα προϊστορικής ανθρώπινης παρουσίας και πρέπει να ερευνηθεί με υποβρύχια ανασκαφική έρευνα.

Ο οικισμός, που βρίσκεται σε βάθος από 1 μ. έως 3 μ., έχει έκταση τουλάχιστον 12 στρέμματα και ήταν οχυρωμένος και παραθαλάσσιος.



Εικόνα 5.4 Τοποθεσία Ανασκαφής

Εντοπίστηκε η θεμελίωση πληθώρας κτισμάτων όλων των χαρακτηριστικών πρωτοελλαδικών τύπων (ορθογώνια, κυκλικά, αψιδωτά) και πλακόστρωτα (πιθανώς από δρόμους) (Εικόνα 4.5). Εντοπίστηκε επίσης τμήμα του οχυρωματικού τείχους του οικισμού και τουλάχιστον τρεις υπερμεγέθεις (18X10μ.) πεταλόσχημες θεμελιώσεις προσαρτημένες στην γραμμή του τείχους, πιθανόν μέρος της οχύρωσης, ίσως και πύργοι (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.5 Τμήμα πλακόστρωτου από τον οικισμό



Εικόνα 5.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση της λίθινης θεμελίωσης του τείχους, που απολήγει σε υπερμεγέθη πεταλόσχημη κατασκευή (AchrafElKashe,2015).

Η κεραμική που περισυλλέγη από το χώρο του οικισμού, είναι χαρακτηριστική της Πρωτοελλαδικής ΙΙ περιόδου (μέσα 3ης χιλιετίας π.Χ., περίπου 2500 π.Χ.). Βρέθηκαν επίσης πληθώρα λίθινων εργαλείων, λεπίδες οψιανού και άλλα αντικείμενα.

Η περαιτέρω έρευνα του εκτεταμένου οικισμού, που έρχεται να προστεθεί στο πυκνό δίκτυο παραθαλάσσιων οικισμών της πρώιμης Χαλκοκρατίας στον Αργολικό Κόλπο (λ.χ. Λέρνα, Ασίνη, Σαλάντι κ.ά.), αναμένεται να δώσει πολύ ενδιαφέροντα στοιχεία για την κατοίκηση, το εμπόριο και τη ναυτιλιακή δραστηριότητα της περιόδου.

5.3 Στόχοι των Εργασιών Τεκμηρίωσης

Οι αρχαιολογικές ανασκαφές είναι αναπόφευκτα καταστροφικές με τρόπο μη αναστρέψιμο (βλ. Κεφ. 2). Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να συνοδεύονται με λεπτομερή τεκμηρίωση ούτως ώστε η συσσωρευμένη γνώση να αναλύεται και να καταγράφεται σε κάθε στάδιο της ανασκαφής. Η τεκμηρίωση είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της ανασκαφής καθώς οι εργασίες των αρχαιολόγων και ο τρόπος με τον οποίο θα ανασκάψουν είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον χώρο. Η παρουσία του νερού καθιστά την έρευνα της ανασκαφής ιδιαίτερα δύσκολη και δαπανηρή. Ο περιορισμένος χρόνος που μπορούν να παραμείνουν οι αρχαιολόγοι στο νερό δυσχεραίνει την πορεία των εργασιών. Επομένως είναι απαραίτητη η ύπαρξη σχεδιαγραμμάτων και κατόψεων της περιοχής μελέτης για την διεξαγωγή των ερευνών σε χρονικά όρια πολύ μεγαλύτερα από τις περιορισμένες σε διάρκεια ανασκαφικές ανασκαφικές εργασίες. Βασικός στόχος της εργασίας τεκμηρίωσης είναι η παραγωγή ορθοφωτογραφιών και 3D μοντέλων για να χρησιμοποιηθούν από την ερευνητική ομάδα των αρχαιολόγων κατά την διαδικασία των ανασκαφών. Για την παρούσα διπλωματική εργασία ως στόχος τέθηκε η δημιουργία ορθοφωτογραφίας κτιριακών θεμελιώσεων που εντοπίστηκαν στην περιοχή από την αρχαιολογική ομάδα.

5. 4 Συλλογή Δεδομένων

5.4.1 Αναγνώριση Περιοχής

Πριν από κάθε τοπογραφική εργασία, είναι αναγκαία η καλή γνώση του αντικειμένου και της περιοχής. Απαραίτητη για την επίτευξη των παραπάνω κρίνεται η λεπτομερής αναγνώριση της περιοχής. Αυτό επιτρέπει τον καλύτερο προγραμματισμό των εργασιών καθώς και την εκτίμηση του χρόνου διεξαγωγής τους. Η διαδικασία της αναγνώρισης πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις, στο γραφείο και στο ύπαιθρο. Αρχικά, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Google Earth καθώς και βασικές γνώσεις Φωτοερμηνείας, σχηματίστηκε μία πρώτη εικόνα για την περιοχή του μνημείου καθώς και την γύρω περιοχή. Κατά τη διάρκεια της αναγνώρισης στο ύπαιθρο, η αρχαιολογική ομάδα ενημέρωσαν για την πιθανή προέκταση του οικισμού και στη στεριά. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να ιδρυθεί δίκτυο τριών κορυφών με χρήση ενός σημείου στην ακτή και δύο ενδότερα από την ακτή για μελλοντική χρήση.

5.4.2 Οριοθέτηση αντικειμένου στο βυθό

Καθώς πρόκειται για μια έκταση 12 τουλάχιστον στρεμμάτων η οποία ακόμα ερευνάται και ο χρόνος παραμονής στο πεδίο αλλά και το ανθρώπινο δυναμικό δεν επαρκούσε για την πλήρη χαρτογράφηση του πυθμένα αποφασίστηκε να οριοθετηθεί ένα τμήμα του βυθού στο οποίο έχουν εντοπιστεί κτιριακές θεμελιώσεις και να αποτυπωθεί πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ανασκαφής. Οι διαστάσεις της περιοχής αποτύπωσης είναι 64 m². Η περιοχή οριοθετήθηκε στο βυθό με ένα κάνναβο 8x8 m που υλοποιήθηκε με 4 κορυφές από μπετό και σκονί. Χρησιμοποιήθηκε υποβρύχια μαγνητική πυξίδα για να δοθεί προσανατολισμός κατά τη διάρκεια της ίδρυσης. Οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών μετρήθηκαν σε aller και retour με μετροταινία. Την τελευταία μέρα των εργασιών πεδίου οι αρχαιολόγοι υπέδειξαν επιπλέον κτιριακά κατάλοιπα στο τοπογραφικό συνεργείο για τα οποία συλλέχθηκαν δεδομένα και επιχειρήθηκε η σύνδεσή τους με το τμήμα της προγραμματισμένης αποτύπωσης.

5.4.3 Διεξαγωγή μετρήσεων και επίλυση Δικτύου Οριζοντίου και Κατακόρυφου Ελέγχου

Για την σήμανση των κορυφών του Δικτύου T2 και T3 χρησιμοποιήθηκαν πασαλάκια. Στην επιφάνεια τους τοποθετήθηκε βίδα με σταυρό για καλύτερη κέντρωση. Η κορυφή T1 σημάνθηκε με μεγάλο καρφί που πακτώθηκε σε βράχο και χρησιμοποιήθηκε σαν η γνωστή κορυφή του δικτύου.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση Ολοκληρωμένου Γεωδαιτικού Σταθμού (TopconGTS 235) με ακρίβεια μέτρησης αποστάσεων $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$ και ακρίβεια μέτρησης γωνιών 10 cc. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκε ένα κατάφωτο Leica καθώς και στυλεός μήκους 4 μέτρων. Ελέγχθηκε η σταθερά πρίσματος του καταφώτου και έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις στο γεωδαιτικό σταθμό ούτως ώστε να απαλειφθεί το συστηματικό σφάλμα που θα εισήγαγε η σταθερά του πρίσματος λόγω διαφορετικού κατασκευαστή.



Εικόνα 5.7 Οριζόντιο Δίκτυο

Λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ των κορυφών, θεωρείται πως οι μεταξύ τους μετρήσεις αναφέρονται στο ίδιο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο και δεν απαιτούνται περαιτέρω διορθώσεις. Το δίκτυο επιλύθηκε σε τοπικό σύστημα αναφοράς σαν κλειστή ανεξάρτητη όδευση. Στις εφαρμογές Γεωμετρικής Τεκμηρίωσης Μνημείων χρησιμοποιούνται συνήθως αυθαίρετα τοπικά συστήματα που δεν απαιτείται διαφορετικά, ώστε να διασφαλιστεί η υψηλή απαιτούμενη εσωτερική ακρίβεια του δικτύου. Στην κορυφή T1 δόθηκαν οι συντεταγμένες (1000,1000 ,0.80)m υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των σημείων T2 και T3. Το συνολικό γραμμικό σφάλμα κλεισίματος της όδευσης προέκυψε 14 mm.

Πίνακας 5.1 Τελικές Συντεταγμένες (Χουντάλας,2016)

Κορυφή	X(m)	Y(m)	Z(m)
T1	1000	1000	0.8
T2	1034.193	1034.188	0.836
T3	1005.08	932.011	0.564

Το υψόμετρο της στάσης T1 επιλέχθηκε αυθαίρετα με βάση τον μέσο όρο των υψομέτρων σημείων της ακτογραμμής που σκοπεύθηκαν κατά τη διάρκεια αποτύπωσης της ευρύτερης περιοχής της παραλίας. Δεν αναφέρονται στη Μέση Στάθμη Θάλασσας καθώς απαιτείται η χρήση παλιρροιόμετρου και περιοδικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια των εργασιών.

Η επεξεργασία και τα αποτελέσματα του Δικτύου έγιναν στο πλαίσιο εκπόνησης διπλωματικής εργασίας (Χουντάλας 2016) με θέμα την υποβρύχια αποτύπωση με γεωδαιτικές μεθόδους τμήματος του οικισμού.

Οι μετρήσεις των φωτοσταθερών έγιναν μόνο από την κορυφή T1 η οποία θεωρήθηκε χωρίς σφάλμα κατά την επίλυση της Ώδευσης επομένως δεν επιβαρύνει τις μετρήσεις των φωτοσταθερών με επιπλέον αβεβαιότητα.

5.4.4 Τοποθέτηση, εντοπισμός και μέτρηση Φωτοσταθερών

Η παρουσία φωτοσταθερών καθιστά δυνατή τη γεωαναφορά του φωτογραμμετρικού μοντέλου στο σύστημα αναφοράς που μετρούνται αυτά και στην εισαγωγή κλίμακας εάν δεν υπάρχουν μετρημένες γνωστές αποστάσεις. Για τους σκοπούς της εργασίας τοποθετήθηκαν 15 περίπου φωτοσταθερά υλοποιημένα από καρφί και υλικό αρνητικής πλευστότητας και οι κωδικοποιημένοι αυτοί στόχοι τοποθετήθηκαν ισομοιράστηκαν στο χώρο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο του αναβιβασμού σημείου, μία από τις απλούστερες μεθόδους αποτύπωσης, όταν το αντικείμενο βρίσκεται σε μικρό βάθος. Ένας δύτες φορτωμένος με βάρη για να έχει σταθερότητα τοποθετεί τον στυλεό με το κατάφωτο στα καθορισμένα σημεία, το κατακορυφώνει με τη βοήθεια της αεροστάθμης. Απαραίτητη για τη διαδικασία αυτή είναι και η ύπαρξη ενός κολυμβητή στην επιφάνεια που κατακορυφώνει τον στυλεό και κάνει τις απαραίτητες συνεννοήσεις με τον παρατηρητή. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου ήταν η επίδραση των κυματισμών οι οποίοι προκαλούν μετακίνηση στο στυλεό μειώνοντας έτσι την οριζοντιογραφική ακρίβεια των μετρήσεων, η οποία εκτιμήθηκε στα 3 cm, έπειτα από παρατήρηση διαφορετικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το ίδιο φωτοσταθερό.



Εικόνα 5.8 Αυτοδύτης στυλεοφόρος επί το έργω

5.5 Φωτογράφιση

5.5.1. Φωτογραφικός εξοπλισμός

Για την φωτογράφιση χρησιμοποιήθηκε μια Nikon DSLR D5200 24 MP (διαστάσεις καρέ 6000x4000 pixel, ενεργός αισθητήρας 23,5x15,6 mm, μέγεθος εικονοστοιχείου 3,92 μm). Η θήκη στεγανοποίησης είναι θολωτής θύρας και κατασκευασμένη από την εταιρία Ikelite. (Εικόνα 5.10). Επίσης διατέθηκε φακός εστιακής απόστασης 18-55mm.



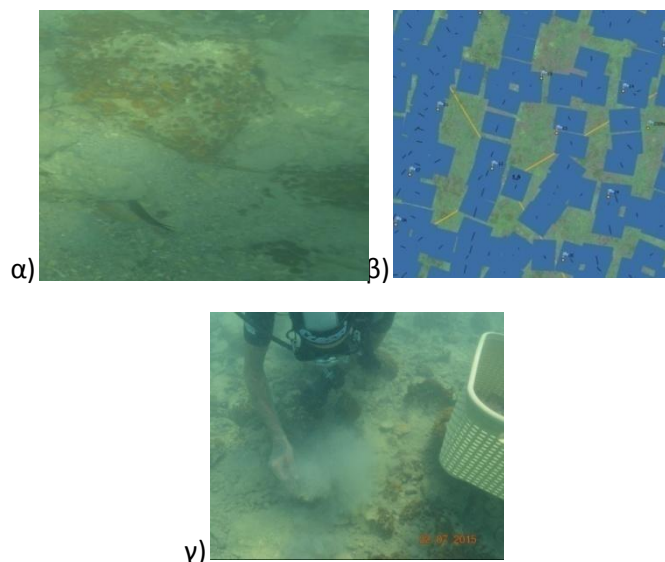
Εικόνα 5.9 Nikon D5200 και Ikelite Housing

5.5.1. Προγραμματισμός λήψεων

Για την πραγματοποίηση των λήψεων είναι απαραίτητο να προηγηθεί σχεδιασμός με βάση τις διαστάσεις του αντικειμένου, τον φακό που χρησιμοποιείται, την απόσταση λήψης και τις επικαλύψεις. Το βάθος κυμαίνεται από 2 έως 3 μέτρα. Η μικρή αυτή απόσταση λήψης σε συνδυασμό με την πολύ κακή ορατότητα λόγω θολότητας του νερού οδήγησε στην απόφαση χρήσης του εργοστασιακού φακού κλειδωμένου σε εστιακή απόσταση 18 mm για να μεγιστοποιηθεί το εύρος πεδίου. Οι υπόλοιπες φωτογραφικές παράμετροι (διάφραγμα, χρόνος έκθεσης, ισορροπία λευκού κ.λπ.) ρυθμίστηκαν στο αυτόματο. Για να εξασφαλισθεί η αυτόματη αναγνώριση ομόλογων σημείων από το λογισμικό επιχειρήθηκε να υπάρξει κατά το δυνατόν μεγάλη επικάλυψη (τουλάχιστον 80% κατά μήκος και 50% κατά πλάτος) η οποία εξασφαλίστηκε με 10 γραμμές πτήσης. Η σάρωση του αντικειμένου έγινε δυο φορές με προσανατολισμούς Δύση-Ανατολή και Βορράς-Νοτός. Ως κατάλληλη ώρα φωτογράφισης επιλέχθηκε η μεσημεριανή (11:00 - 13:00) για την αποφυγή σκιάσεων.

5.5.2 Προβλήματα φωτογράφισης

Λόγω της ιδιαιτερότητας του περιβάλλοντος καθώς και της απειρίας του δύτε φωτογράφου σε αντίστοιχες εφαρμογές, προέκυψαν κάποια προβλήματα κατά την φωτογράφιση, τα οποία έγιναν αντιληπτά αργότερα. Ρυτιδώσεις και κυματισμοί στην επιφάνεια προκάλεσαν συνθήκες ανομοιογενούς φωτισμού και δημιουργία σκιάσεων. Αναπόφευκτη είναι και η παρουσία υδρόβιας πανίδας σε κάποιες λήψεις (Εικόνα 5.10α). Βασικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι η πολύ κακή ορατότητα λόγω θολότητας των νερών από τους κυματισμούς. Επίσης η ταυτόχρονη εργασία των αρχαιολόγων για ανεύρεση κεραμικής επιδεινώνει την ήδη υπάρχουσα κατάσταση. Οι επικρατούσες συνθήκες επέτρεψαν τη διεξαγωγή της φωτογράφισης τις δύο τελευταίες ημέρες παραμονής στο πεδίο. Ένα ακόμα πρόβλημα ήταν η πιστή υλοποίηση του προγραμματισμού λήψεων. Η υποβρύχια φωτογράφιση είναι μια απαιτητική εργασία που απαιτεί εκπαίδευση, αυτοπειθαρχία, εμπειρία και αυξημένη υδροβιότητα. Ο φωτογράφος μπορεί να αποπροσανατολιστεί πολύ εύκολα παρεκκλίνοντας από τις γραμμές πλεύσης και να δημιουργήσει σκοτεινές περιοχές χωρίς πληροφορία (Εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.10 Προβλήματα φωτογράφισης α) Σκιάσεις και παρουσία πανίδας β) Απόκλιση από γραμμές πλεύσης γ) Θολότητα από αρχαιολογικές εργασίες

5.6 Επεξεργασία Δεδομένων

5.6.1 Βαθμονόμηση μηχανής και ραδιομετρική διόρθωση εικόνων

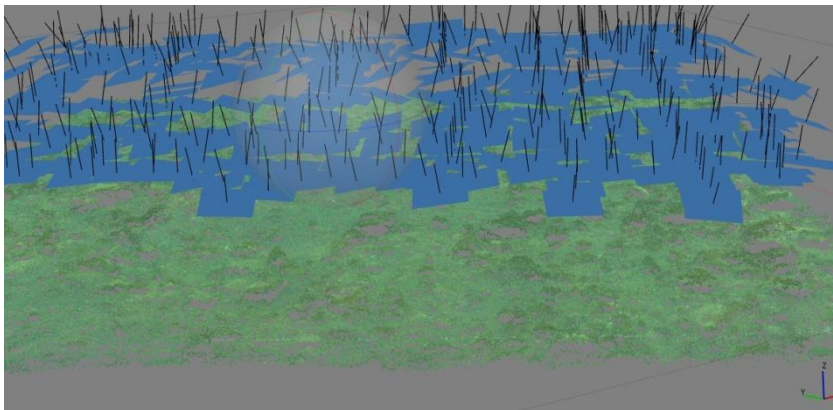
Στο Κεφάλαιο 4 επεξηγούνται εκτενώς η ραδιομετρία της εικόνας και η μετρητική της αξιοπιστία. Για την δημιουργία του 3D μοντέλου στα πλαίσια της πρακτικής εφαρμογής χρησιμοποιούνται σαν αρχικές τιμές οι παράμετροι της βαθμονόμησης που έγινε στο AgisoftLens και επιλέχθηκε να εκτελεστεί αυτοβαθμονόμηση για να βελτιστοποιηθούν. Επίσης αποφασίστηκε οι φωτογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν να μην υποστούν ραδιομετρική επεξεργασία καθώς η αποτελεσματικότητα της διερευνάται και εφαρμόζεται στο Κεφάλαιο 6.

5.6.2 Αυτοματοποιημένη Φωτογραμμετρική Επεξεργασία

Η επεξεργασία των εικόνων για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Photoscan της Agisoft. Το εμπορικό αυτό λογισμικό έχει χρησιμοποιηθεί ξανά σε αρχαιολογικές εφαρμογές σε υποβρύχιο περιβάλλον (Zuckovsky 2013, VanDamme 2015). Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την δημιουργία τμήματος με τις εικόνες που ελήφθησαν στο πεδίο. Πρώτο στάδιο είναι η «ευθυγράμμιση» (alignment) τους ή ορθότερα η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού. Ο αυτοματοποιημένος τρόπος που εκτελεί το στάδιο αυτό δημιουργεί ένα αραιό νέφος σημείων το οποίο ο χρήστης μπορεί να πυκνώσει στο δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας. Στο τρίτο στάδιο δημιουργείται η επιφάνεια του αντικειμένου με τη μορφή Δικτύου Ακανόνιστων Τριγώνων (TIN) χρησιμοποιώντας το πυκνό νέφος σημείων και τέλος στην επιφάνεια αυτή αποδίδεται υφή και έτσι το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο είναι ολοκληρωμένο.

5.6.1.1 Προσανατολισμός Εικόνων- Δημιουργία Αραιού Νέφους σημείων

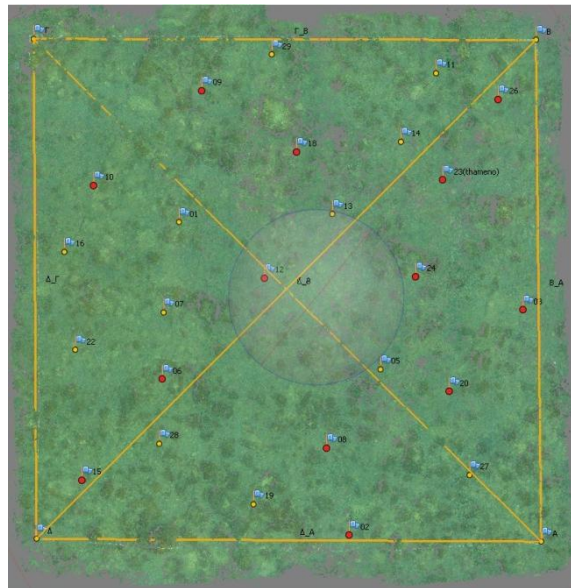
Αφού αρχειοθετήθηκαν 376 φωτογραφίες στο λογισμικό, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία του προσανατολισμού των εικόνων. Οι ρυθμίσεις που κάνει ο χρήστης είναι η ακρίβεια που χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, χαμηλή, μέση και υψηλή και ουσιαστικά αφορά τον αριθμό των ομόλογων σημείων που παράγονται για το αραιό νέφος σημείων και η κάθε μια έχει κλιμακούμενο υπολογιστικό κόστος. Επίσης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον τρόπο προεπιλογής των ζευγαριών εικόνων, ανάλογα με τη φύση του αντικειμένου και να θέσει όρια για τον αριθμό των χαρακτηριστικών σημείων που επιθυμεί να ανιχνευθούν σε κάθε ζεύγος. Επιλέχθηκε υψηλή ακρίβεια, ενώ οι υπόλοιπες ρυθμίσεις αφήθηκαν στην προεπιλογή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αραιό νέφος σημείων που δημιουργήθηκε. Ήδη από αυτό το στάδιο γίνεται αντιληπτή η μορφολογία του πυθμένα.



Εικόνα 5.11 Σχετικός προσανατολισμός εικόνων.

5.6.1.2 Βελτιστοποίηση Σχετικού Προσανατολισμού-Γεωαναφορά

Για την βελτιστοποίηση του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων αντί για τη χρήση του EXIF αρχείου που περιλαμβάνει τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που προέκυψαν από την εργαστηριακή βαθμονόμηση και επιλέχθηκε από το πρόγραμμα να γίνει αυτοβαθμονόμηση. Η αυτόματη εύρεση μεγάλου πλήθους σημείων σύνδεσης και η χρήση τους για αυτοβαθμονόμηση αναμένεται να προσδιορίσει τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού με καλύτερη ακρίβεια από τις υποβρύχιας βαθμονομήσεις και κυρίως τις τιμές της ακτινικής διαστρόφης. Μετά από αυτό το στάδιο σκοπεύθηκαν τα φωτοσταθερά για να γεωαναφερθεί το αρχικό μοντέλο.



Εικόνα 5.12 Κατανομή Φωτοσταθερών

Πίνακας 5.2 Σφάλματα φωτοσταθερών

Σημείο	DX(m)	DY(m)	DZ(m)	DR(m)
02	0.005	-0.01	0.007	0.049
03	-0.004	-0.01	-0.001	0.012
06	0.004	-0.003	0.013	0.015
08	0.03	-0.003	0	0.03
09	0.022	0.021	-0.002	0.031
10	0.013	0.03	0.005	0.033
12	-0.01	0.014	0.007	0.019
15	0.005	-0.031	-0.02	0.037
18	0.01	-0.002	-0.002	0.01
20	-0.01	0.005	-0.005	0.015
23	0.028	0.002	0.002	0.028
24	-0.01	0	0.005	0.011
RMSE	0.021	0.014	0.008	0.027

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των φωτοσταθερών είναι 2,7 cm όσο και η αρχική εκτίμηση. Εκτός από τα φωτοσταθερά, για να βελτιωθεί η ακρίβεια της κλίμακας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι μετρημένες αποστάσεις του κανάβου. Τρεις από τις έξι αποστάσεις χρησιμοποιήθηκαν ως δεσμεύσεις και οι υπόλοιπες τρεις κρατήθηκαν για έλεγχο.

Πίνακας 5.3 Διαφορές Αποστάσεων

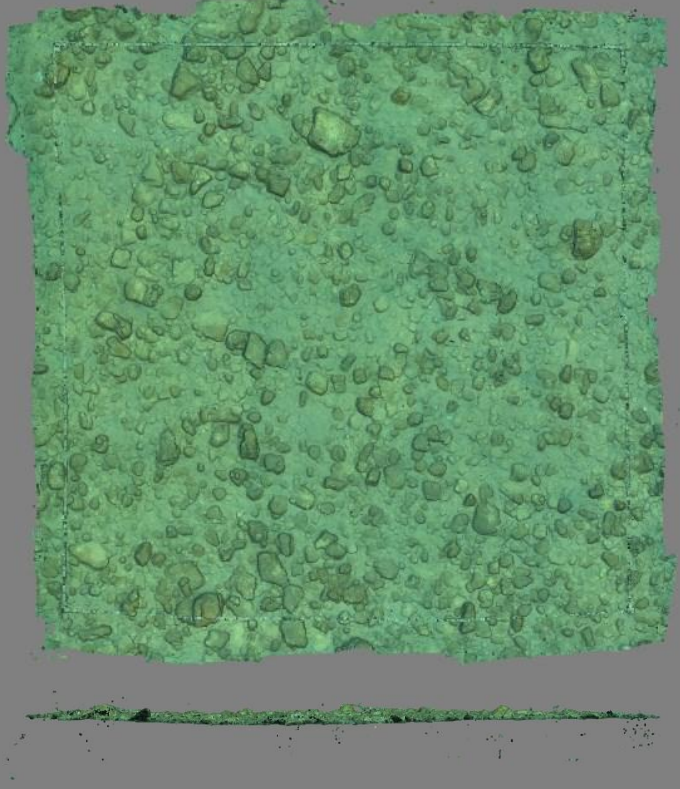
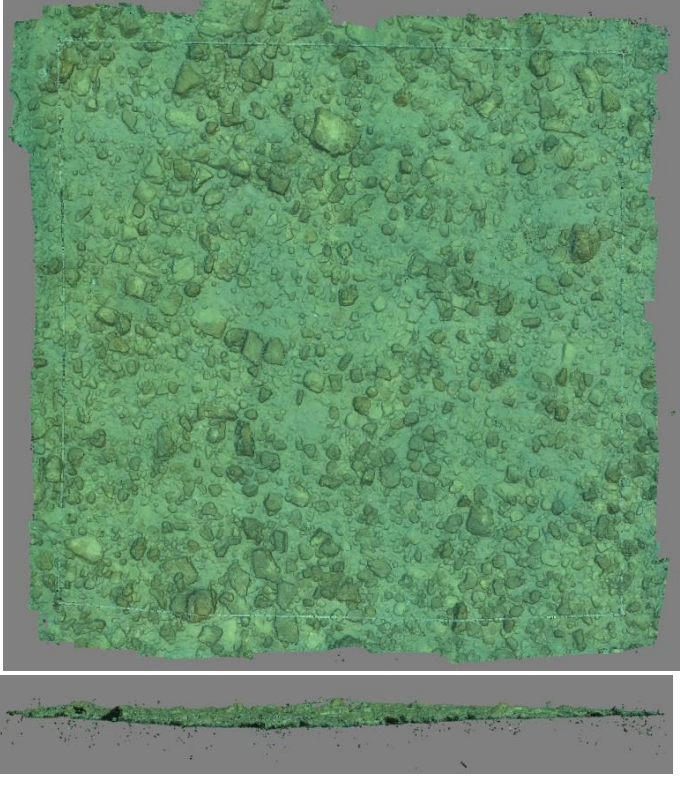
Τμήμα	Μετρημένη απόσταση(m)	Υπολογισμένη απόσταση(m)	Διαφορά (m)
ΑΒ	7,97	7,975	-0,003
ΒΓ	8,01	8,024	0,014
ΓΔ	8,00	7,992	-0,006
ΔΑ	8,00	8,017	0,017
ΑΓ	11,4	11,411	0,011
ΒΔ	11,22	11,22	-0,004


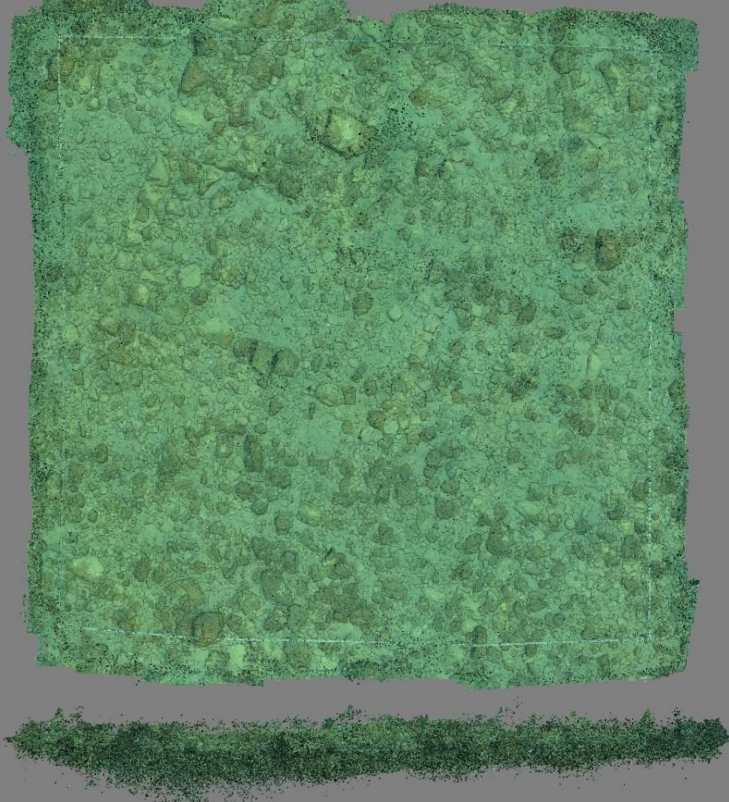
Με την εισαγωγή των μετρημένων με μετροταινία αποστάσεων το σφάλμα κλίμακας προκύπτει 1,4 cm, σαν μέσος όρος σφαλμάτων των τριών αποστάσεων ελέγχου.

5.6.1.3 Δημιουργία Πυκνού Νέφους Σημείων

Επόμενο στάδιο ήταν η παραγωγή του πυκνού νέφους σημείων. Το πυκνό νέφος σημείων έχει 5 διαφορετικά επίπεδα ποιότητας τα οποία έχουν να κάνουν και με τον αριθμό των παραγόμενων σημείων και κατ' επέκταση το πόσο λεπτομερώς θα αποδοθεί η επιφάνεια. Επίσης υπάρχει η επιλογή χρήσης φίλτρου όπου τοποθετεί τα σημεία στο χώρο ανάλογα τη φύση του αντικειμένου, εάν π.χ. πρόκειται για περίπλοκο αντικείμενο ή χωρίς πολλές λεπτομέρειες για. Για πειραματικούς σκοπούς το νέφος δημιουργήθηκε σε 4 από τα 5 επίπεδα με τη χρήση φίλτρου απενεργοποιημένη.

Πίνακας 5.4 Σύγκριση πυκνού νέφους σημείων για διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας

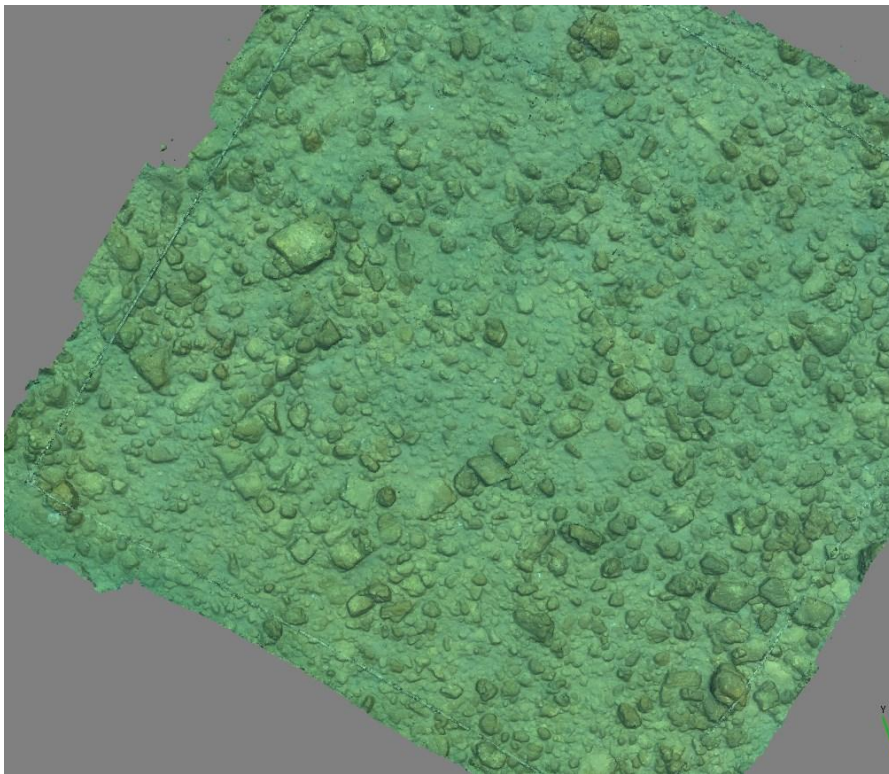
Επίπεδο ποιότητας	Αριθμός σημείων	Πυκνό Νέφος(κάτοψη& όψη)
Lowest	4.550.310	
Low	19.308.225	

Medium	80.784.443	
High	316.820.286	

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πρώτο επίπεδο είναι επαρκές για την συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς αύξηση του επιπέδου ποιότητας αυξάνει το θόρυβο χωρίς να παρέχει παραπάνω πληροφορία. Όσο αυξάνεται το επίπεδο ποιότητας οι θεμελιώσεις γίνονται περισσότερο δυσδιάκριτες. Αυτό αιτιολογείται από την πολύ υψηλή ανάλυση της κάμερας και τη πολύ μικρή απόσταση φωτογράφισης.

5.6.1.4 Δημιουργία Επιφάνειας- Απόδοση Υψής

Μετά τον καθαρισμό του πυκνού νέφους σημείων από την ύπαρξη θορύβου δημιουργείται η επιφάνεια και στην επιφάνεια αυτή αποδίδεται υψή από τις φωτογραφίες. Στο στάδιο αυτό το μοντέλο είναι έτοιμο για την εξαγωγή ορθοφωτογραφίας .

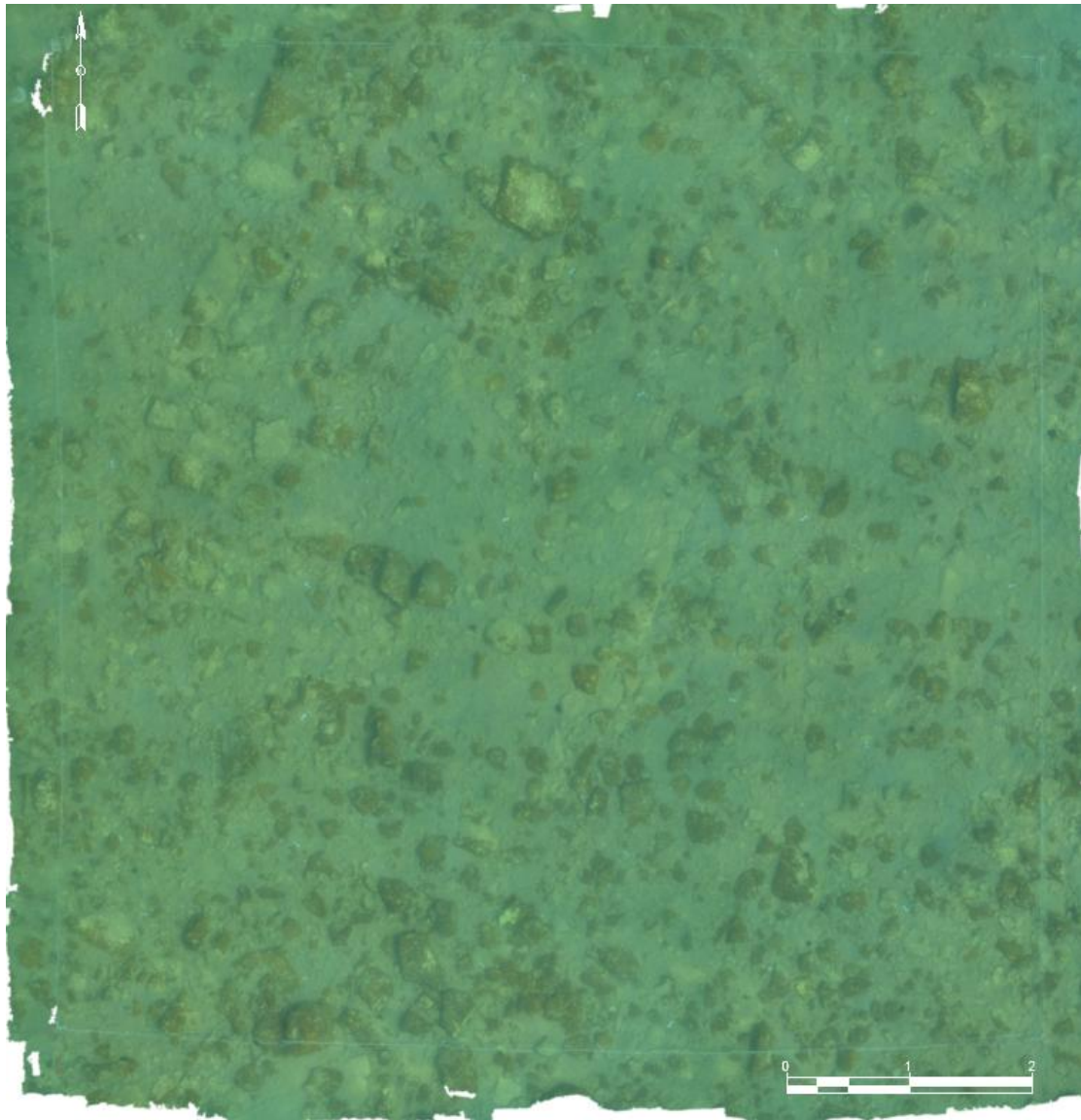


Εικόνα 5.13 Επιφάνεια-mesh αντικειμένου

5.6.1.5 Παραγωγή ορθοφωτογραφίας

Τελικό στάδιο της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας αποτέλεσε η παραγωγή ορθοφωτογραφίας. Για τον καθορισμό της κλίμακας της ορθοφωτογραφίας πρέπει να καθορισθεί το μέγεθος της εδαφοψηφίδας. Η μέση κλίμακα των φωτογραφιών είναι 1:138 για βάθος 2.5 μέτρα. Το μέγεθος της εικονοψηφίδας είναι 3.9 μm. Επομένως το μέγεθος της εδαφοψηφίδας δεν μπορεί να είναι μικρότερο από $138 \cdot 0.0039 = 0.53$ mm. Η αβεβαιότητα στη κλίμακα του μοντέλου είναι 20 mm. Δεδομένης της διακριτικής ικανότητας του ματιού (0.25mm) η μέγιστη δυνατή κλίμακα σχεδίασης είναι $20/0.25 = 56$ ή 1:56. Αν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα θέσης του μοντέλου, δηλαδή τα 27 mm η μέγιστη κλίμακα που μπορεί αυτό να αποδοθεί στο χαρτί είναι $27/0.25 = 108$ 1:108. Λαμβάνοντας υπόψη τις δυο αυτές κλίμακες αποφασίστηκε η κλίμακα

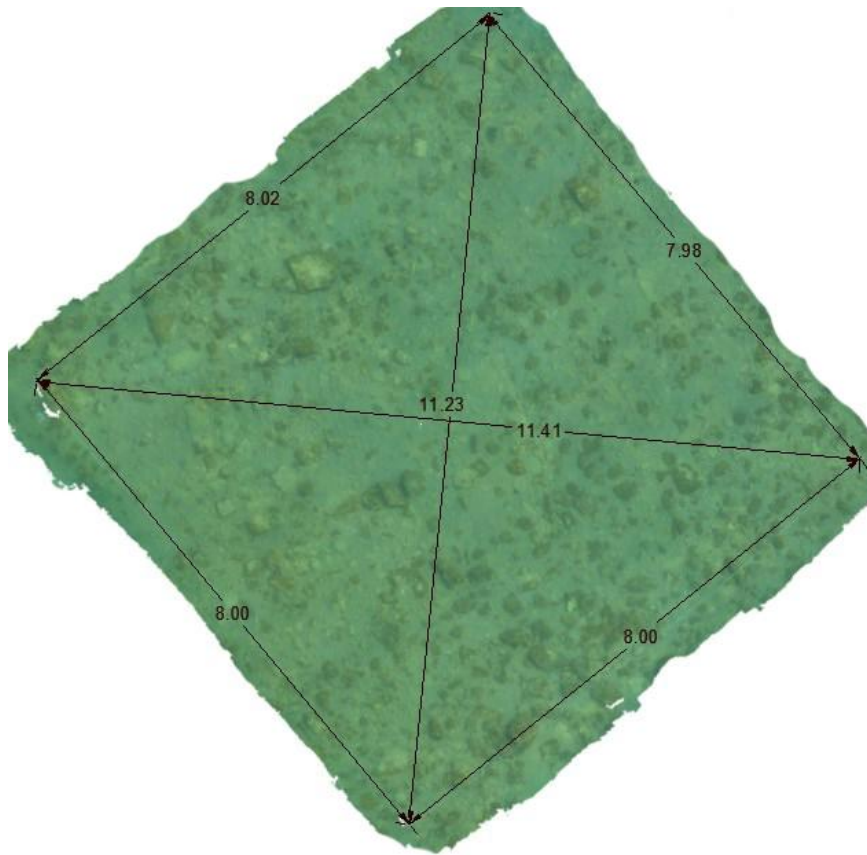
απόδοσης της ορθοφωτογραφίας να είναι 1:100. Για την αποφυγή δημιουργίας πλεονάζουσας πληροφορίας αποφασίστηκε το μέγεθος της εδαφοψηφίδας να είναι 5mm. Στην Εικόνα 5.14 φαίνεται τμήμα της τελικής ορθοφωτογραφίας με κλίμακα και προσανατολισμό.



Εικόνα 5.14 Ορθοφωτογραφία Ανασκαφικού Καννάβου

Έλεγχος κλίμακας Ορθοφωτογραφίας

Για να ελεγχθεί η ορθοφωτογραφία, μετρήθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των γωνιών του καννάβου και συγκρίθηκαν με τις τιμές των αποστάσεων που μετρήθηκαν στο πεδίο.



Εικόνα 5.15 Έλεγχος κλίμακας ορθοφωτογραφίας

Πίνακας 5.5 Έλεγχος κλίμακας

Τμήμα	Μετρημένη απόσταση(m)	Υπολογισμένη απόσταση(m)	Διαφορά (m)
ΑΒ	7,97	7,98	-0,01
ΒΓ	8,01	8,02	-0,01
ΓΔ	8,00	8,00	0,00
ΔΑ	8,00	8,00	0,00
ΑΓ	11,4	11,41	-0,01
ΒΔ	11,22	11,23	0,01

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5 η διαφορές δεν ξεπερνούν τα 10 mm τιμή μικρότερη των 25mm που είναι η διακριτική ικανότητα του ματιού για κλίμακα σχεδίου 1:100.

5.6.3 Επεξεργασία μεμονωμένων τμημάτων και τελική Ορθοφωτογραφία

Εκτός από τον ανασκαφικό κάρναβο ελήφθησαν φωτογραφίες και για κάποιες θεμελιώσεις που υπέδειξε η αρχαιολογική ομάδα. Η διαδικασία παραγωγής των τρισδιάστατων μοντέλων τους είναι η ίδια με αυτή του καννάβου. Για τα τμήματα αυτά

όμως δεν μετρήθηκαν φωτοσταθερά αλλά διατέθηκε μόνο μία αρχαιολογική κλίμακα. Αυτό συνεπάγεται ότι τα μοντέλα δεν έχουν γνωστή θέση στο χώρο.

Τμήματα Νο1 & Νο2

Τα τμήματα αυτά βρίσκονταν δίπλα στον ανασκαφικό κήρυκο. Τα μοντέλα δημιουργήθηκαν ξεχωριστά και έγινε η σύνδεσή τους με αυτόν στοχεύοντας κοινά σημεία. Τα τρία μοντέλα συγχωνεύθηκαν σε ένα κοινό μοντέλο το οποίο αποτελεί και το τελικό προϊόν της παρούσας πρακτικής εφαρμογής. Στο τμήμα Νο1 μετρήθηκαν σημεία για τη διπλωματική εργασία που γίνεται παράλληλα (Χουντάλας 2016). Τα σημεία αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν ως φωτοσταθερά αλλά σαν σημεία ελέγχου. Παρατηρώντας τις διαφορές στις τιμές δεν προκύπτει σφάλμα μεγαλύτερο του αποδεκτού δηλαδή μεγαλύτερο των 25 mm.

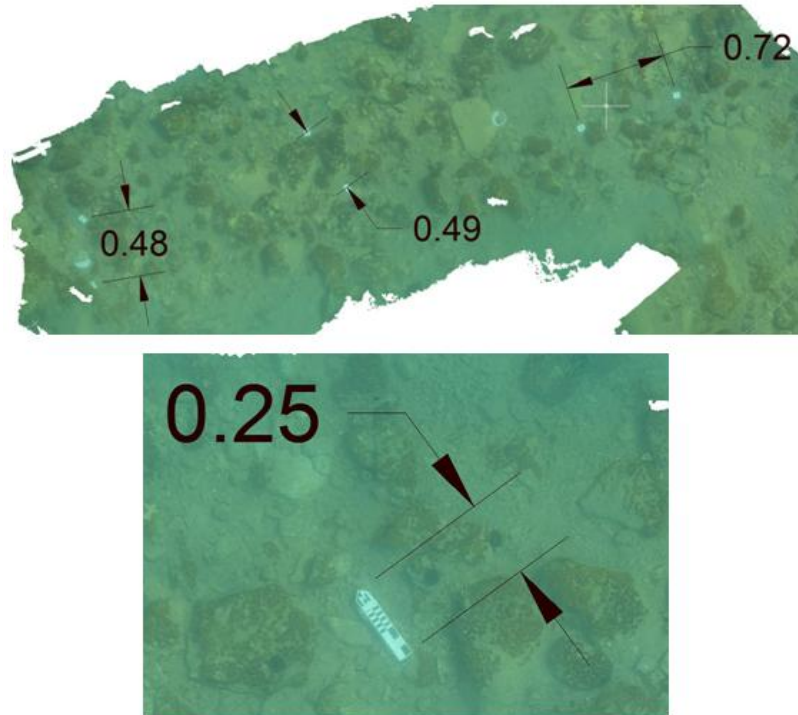
Πίνακας 5.6 Διαφορές συν/νων τμήματος Νο1

Σημείο	X(m)	Y(m)	X ορθ. (m)	Y ορθ.(m)	DX (m)	DY(m)
014	29,74	77,80	29,76	77,81	-0,02	-0,01
015	29,08	77,56	29,07	77,58	0,01	-0,02
016	27,41	77,13	27,40	77,15	0,01	-0,02
017	27,15	77,57	27,12	77,55	0,03	0,02
018	25,58	76,44	25,60	76,47	-0,02	-0,02
019	25,50	76,95	25,52	76,94	-0,02	0,01
Μέσο Σφ.					0.02	0.02

Πίνακας 5.7 Έλεγχος κλίμακας τμήματος Νο1

Τμήμα	Απόσταση σχέδιο(m)	Απόσταση συν/νες(m)	Διαφορά (m)
014-015	0,72	0,71	0,02
016-017	0,49	0,51	-0,02
018-019	0,49	0,50	-0,01

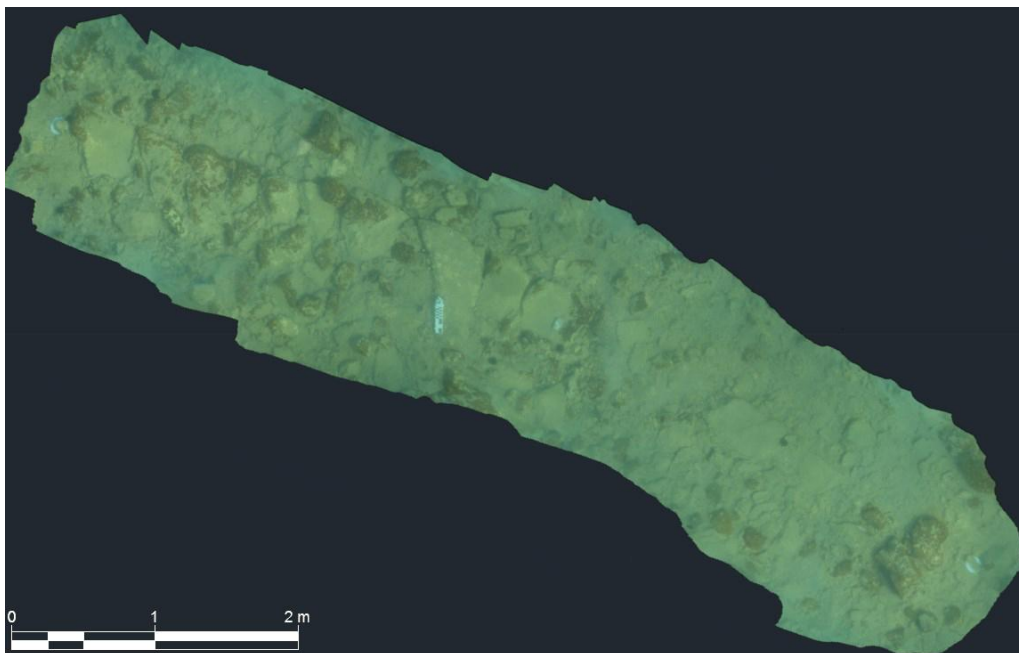
Για το τμήμα Νο2 δεν υπάρχουν σημεία ελέγχου και ελέγχθηκε μόνο η κλίμακα με βάση την γνωστές διαστάσεις της αρχαιολογικής κλίμακας.



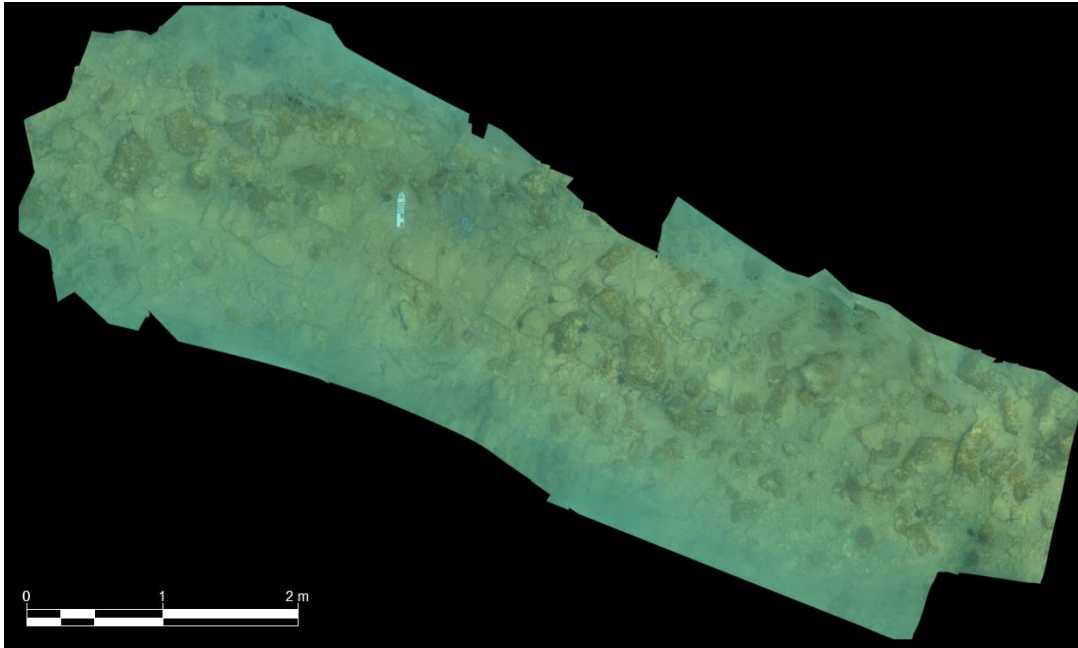
Εικόνα 5.16 Έλεγχος κλίμακας για τμήματα Νο1 & Νο2

Τμήματα Νο3, Νο4 & Νο5

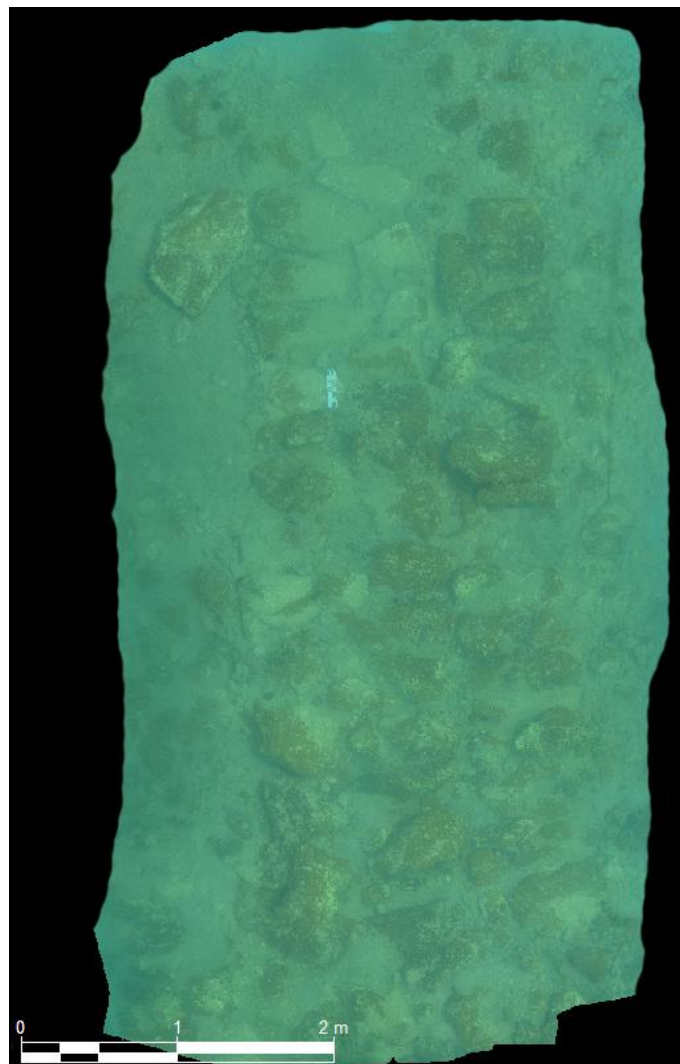
Τα τμήματα αυτά δεν γεωαναφέρθηκαν στην τελική ορθοφωτογραφία γιατί δεν μετρήθηκαν φωτοσταθερά. Η ορθοφωτογραφία είναι σε επίπεδο παράλληλο στους άξονες ΧΥ του λογισμικού, δηλαδή δεν είναι γνωστό αν πρόκειται για αυστηρά κατακόρυφο επίπεδο προβολής. Η κλίμακα δόθηκε στο AutoCAD και η εδαφοψηφίδα ισούται με 0,002m και προέκυψε από τη διαίρεση του πλήθους των εικονοστοιχείων με το πραγματικό μήκος της αρχαιολογικής κλίμακας



Εικόνα 5.17 Ορθοφωτογραφία τμήματος Νο3



Εικόνα 5.18 Ορθοφωτογραφία Τμήματος Νο4



Εικόνα 5.19 Ορθοφωτογραφία Τμήματος Νο5



Εικόνα 5.20 Τελική Ορθοφωτογραφία Καννάβου και τμημάτων Νο1 & Νο2

5.7 Αξιολόγηση- Συμπερασματικά Σχόλια

Όσον αφορά στην φωτογράφιση, καταβλήθηκε η μέγιστη δυνατή προσπάθεια να πραγματοποιηθεί στις ιδανικές συνθήκες, με κάθετο φωτισμό και καλή ορατότητα αλλά στο κομμάτι αυτό οι καιρικές συνθήκες καθορίζουν και το τελικό αποτέλεσμα.

Όσον αφορά στις γεωδαιτικές μετρήσεις, λόγω της πίεσης χρόνου και του περιορισμού παραμονής στο πεδίο που επιβάλλει η αναπνευστική συσκευή, δεν επιτεύχθη ο στόχος μέτρησης του συνόλου των φωτοσταθερών. Παρ' όλα αυτά η τελική ακρίβειά τους είναι αντίστοιχη με τις συνήθεις ακρίβειες που έχουν παρόμοιες εφαρμογές (Χουβαρδά 2014) έως και καλύτερη (Αγραφιώτης,2012). Αυτό οφείλεται κυρίως στην τοποθέτηση τεχνητών στόχων και στην αποφυγή χρήσης φυσικών σημείων ως φωτοσταθερών.

Σχετικά με τη παραγωγή του 3D μοντέλου και της ορθοφωτογραφίας η χρήση του λογισμικού Photoscan κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς δεν αντιμετώπισε προβλήματα στην διαδικασία ανακατασκευής παρά τις συνθήκες κακής ορατότητας των φωτογραφιών. Η πολύ δυνατή υπολογιστική ισχύς που είναι διαθέσιμη πλέον καθιστά δυνατή την αποτελεσματική και γρήγορη επεξεργασία μεγάλου όγκου φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης και δίνει προβάδισμα στην υποβρύχια φωτογράφιση πυθμένα μικρού βάθους έναντι της φωτογράφισης δυο μέσων η οποία απαιτεί και ειδική μεταχείριση (Αγραφιώτης 2012, Χουβαρδά 2014).

Οι τελικές ορθοφωτογραφίες κρίνονται παραπάνω από ικανοποιητικές, τόσο από μετρητική άποψη αλλά και οπτικά, και δίνουν στους αρχαιολόγους τη δυνατότητα να μελετήσουν τον αρχαιολογικό χώρο χωρίς δυσκολία και αξιόπιστα.

Κεφάλαιο 6

Συγκρίσεις- Αξιολογήσεις

6.1 Ποιοτική αξιολόγηση ραδιομετρικών διορθώσεων υποβρύχιας εικόνας

Στο Κεφάλαιο 4 διερευνήθηκε η δυνατότητα διόρθωσης των υποβρυχίων εικόνων με το εμπορικό λογισμικό επεξεργασίας εικόνας Photoshop και με δημιουργία αλγορίθμου που περιλαμβάνει την μέθοδο διόρθωσης CLAHE. Εκτός από τον οπτικό έλεγχο των διορθώσεων η ποιότητα της διόρθωσης εκτιμήθηκε και μέσα στο λογισμικό Photoscan. Το λογισμικό εκτιμά την ποιότητα της εικόνας με βάση μια παράμετρο που υπολογίζεται από το επίπεδο ευκρίνειας του πιο εστιασμένου σημείου της εικόνας. Το εγχειρίδιο χρήσης προτείνει την εξαίρεση από την φωτογραμμετρική διαδικασία όσων εικόνων έχουν συντελεστή μικρότερο του 0,5.

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για την γεωμετρική τεκμηρίωση του καννάβου της ανασκαφής ήταν 376. Από αυτές μόνον το 11% έχουν συντελεστή από 0.5 και άνω. Το 7% έχει συντελεστή κάτω του 0.5 ενώ το υπόλοιπο 84% έχει συντελεστή 0. Οι διορθωμένες με το photoshop αύξησαν το ποσοστό των αποδεκτών φωτογραφιών σε 26%. Κάτω από το όριο είναι το 30% και το υπόλοιπο 44% έχει συντελεστή 0. Ο αλγόριθμος διόρθωσης εκτοξεύει το ποσοστό των αποδεκτών φωτογραφιών στο 79% με το υπόλοιπο 21% να μην περνάει το όριο, όμως να βρίσκεται κοντά σε αυτό (πάνω από 0,4). Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα .

Πίνακας 6.1 Συγκριτικά αποτελέσματα Photoscan για ποιότητα εικόνων

	Άνω του 0.5		Κάτω του 0.5		0	
Αδιόρθωτες φωτ.	41	11%	26	7%	309	84%
Διόρθ. Photoshop	98	26%	113	30%	165	44%
Διόρθ. με αλγόριθμο	297	79%	79	21%	0	0

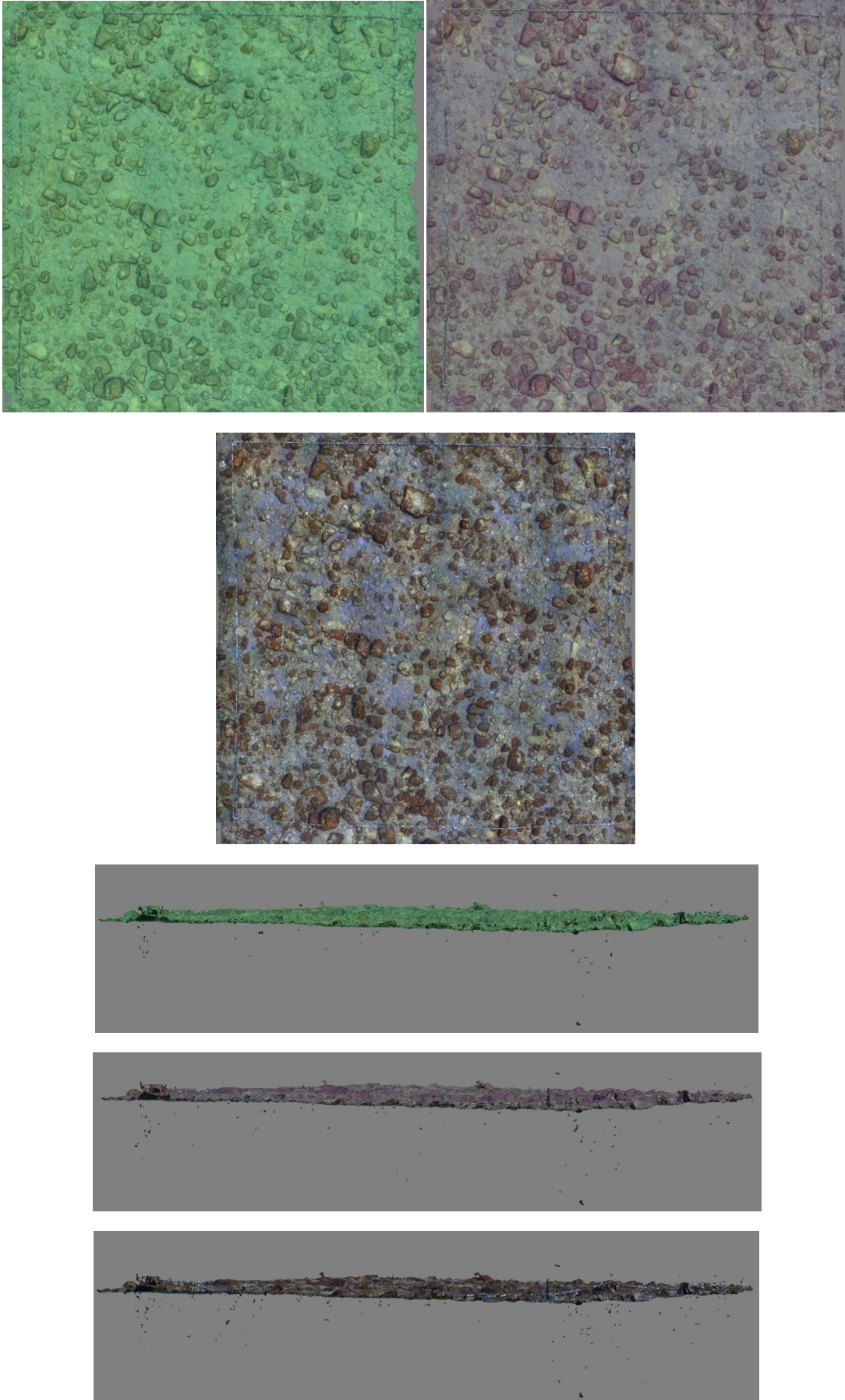
Είναι φανερό ότι η διόρθωση αυξάνει την ποιότητα της εικόνας σύμφωνα με το λογισμικό. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δυο διαφορετικών διορθώσεων είναι λογικές, γιατί ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται μια μέθοδο διόρθωσης σχεδιασμένη για υποβρύχιας εικόνες. Όπως φάνηκε όμως και από το Κεφάλαιο 5, παρά την "ποιοτική ανεπάρκεια", (σύμφωνα πάντα με το λογισμικό) η δημιουργία του μοντέλου έγινε χωρίς προβλήματα. Η αποτελεσματικότητα των διορθώσεων διερευνήθηκε περαιτέρω στην 3D ανακατασκευή.

6.2 Σύγκριση και αξιολόγηση νέφων σημείων

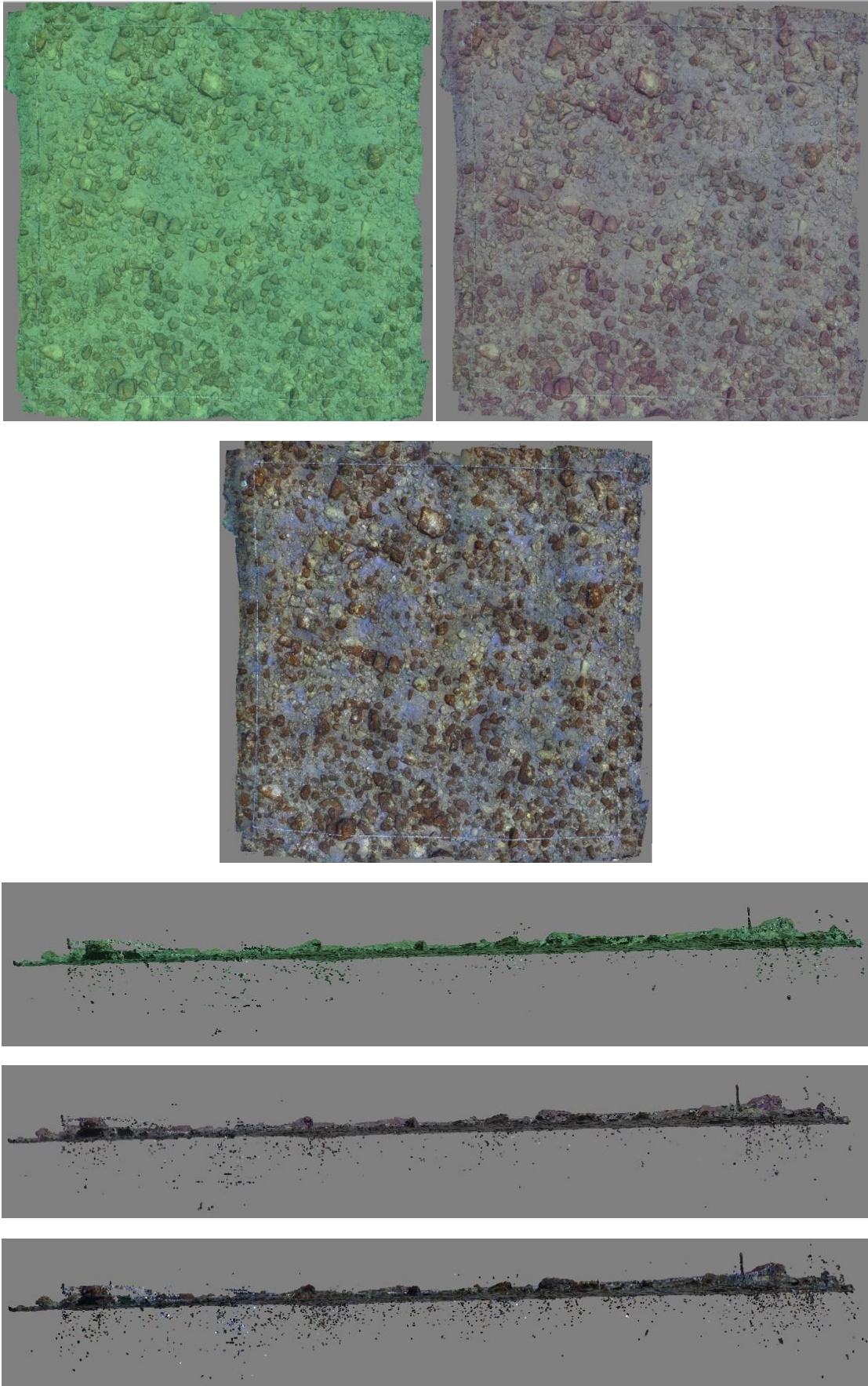
Δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά νέφη σημείων για τα τρία πρώτα επίπεδα ποιότητας, ένα από τις αρχικές φωτογραφίες, ένα από τις διορθωμένες από το Photoshop και ένα από τις διορθωμένες από τον αλγόριθμο. Για να γίνει αντικειμενική σύγκριση, και στις τρεις περιπτώσεις κρατήθηκε η ίδια γεωαναφορά. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα πλήθη των σημείων για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 6.2 Αριθμός σημείων για κάθε μοντέλο και επίπεδο ποιότητας

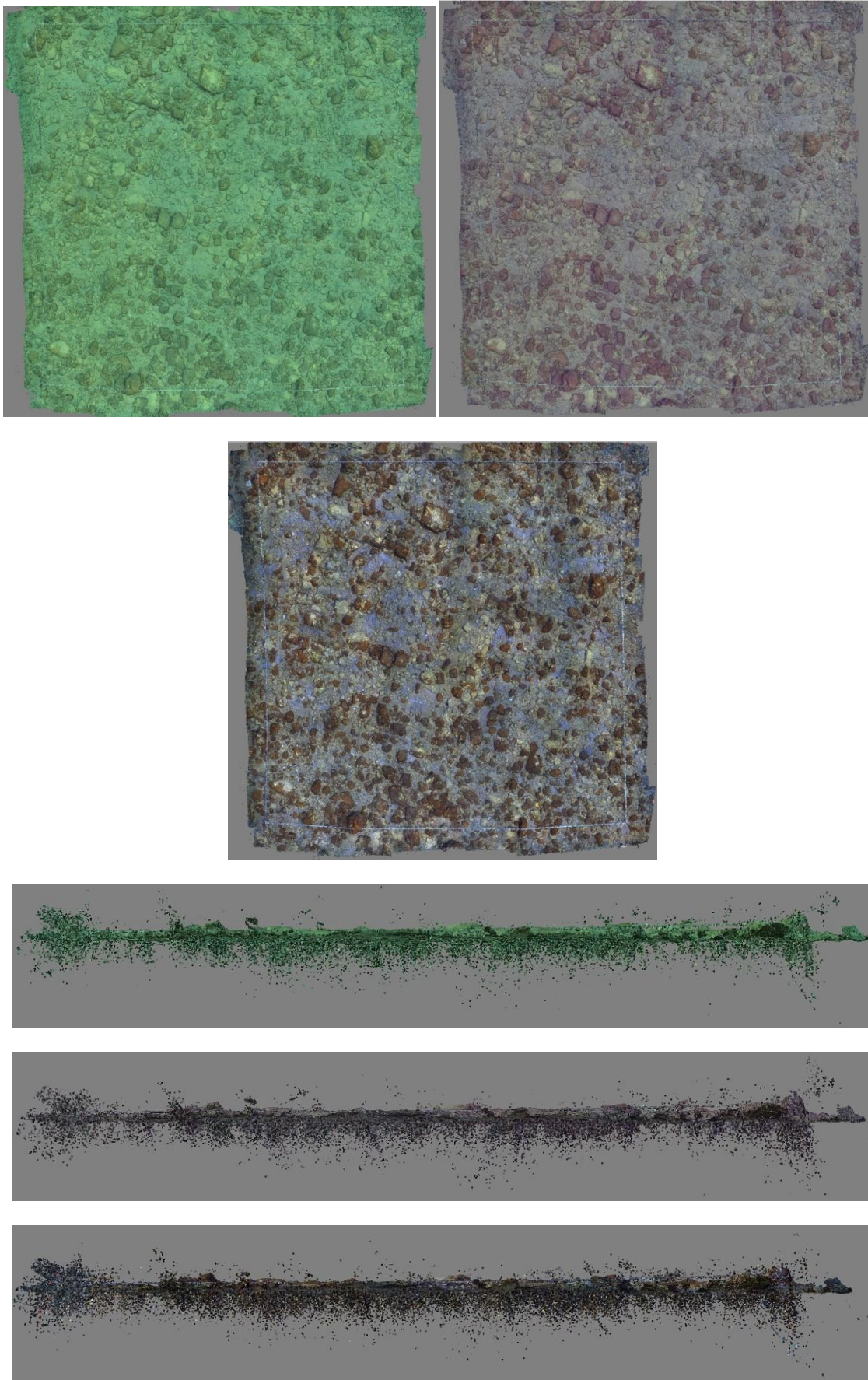
Ποιότητα	Αριθμός Σημείων		
	Lowest	Low	Medium
Αδιόρθωτες	4.550.310	19.308.225	80.784.443
Photoshop	4.533.021	19.207.211	79.757.365
Αλγόριθμος	4.566.653	19.327.252	80.448.244



Εικόνα 6.1 3D μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Lowest



Εικόνα 6.2 3D μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Low



Εικόνα 6.3 3D μοντέλα για επίπεδο ποιότητας Medium

Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.2 και τις εικόνες είναι φανερό ότι η αύξηση της ποιότητας του πυκνού νέφους αυξάνει και στις τρεις περιπτώσεις τον θόρυβο με τον μεγαλύτερο να παρουσιάζεται στην περίπτωση του αλγόριθμου διόρθωσης και έπειτα στην περίπτωση της διόρθωσης με το Photoshop. Επίσης σύμφωνα με τους πίνακες 6.3 και 6.4 ο αριθμός των σημείων δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφορές με τις διορθώσεις που εφαρμόζονται.

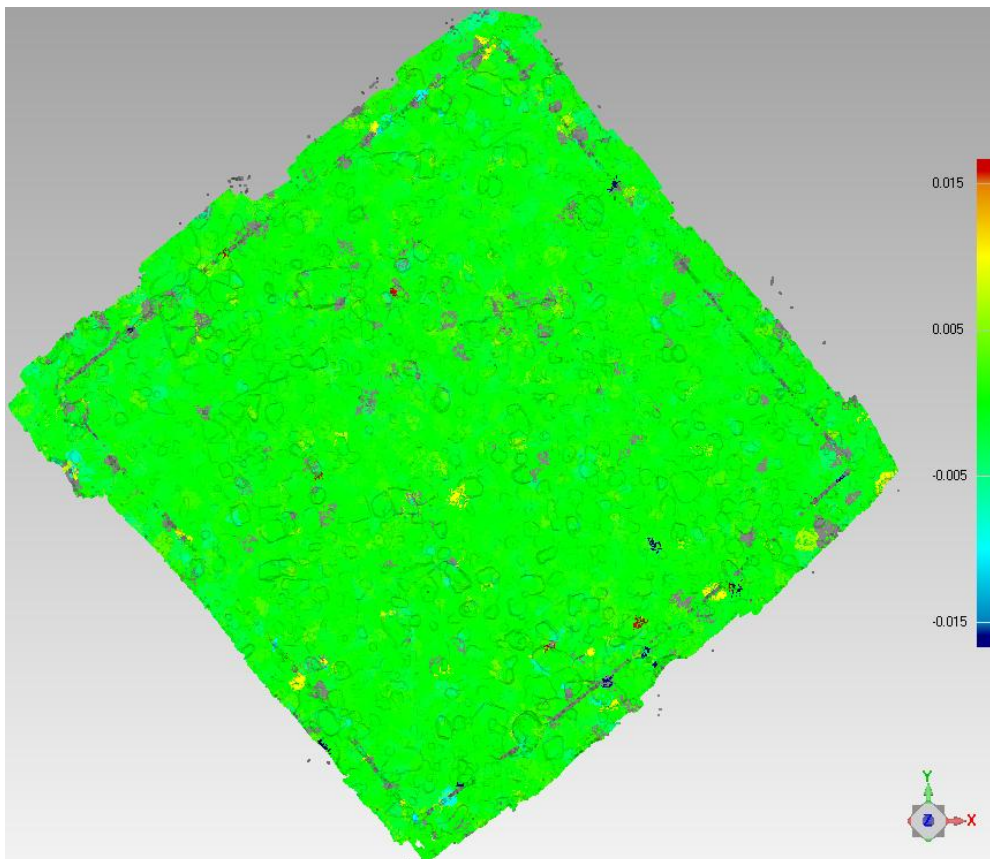
Πίνακας 6.3 Ποσοστιαία Μεταβολή αριθμού σημείων

Ποιότητα	Lowest	Low	Medium
Αδιόρθωτες	0	+324%	+1675%
Photoshop	0	+324%	+1659%
Αλγόριθμος	0	+323%	+1662%

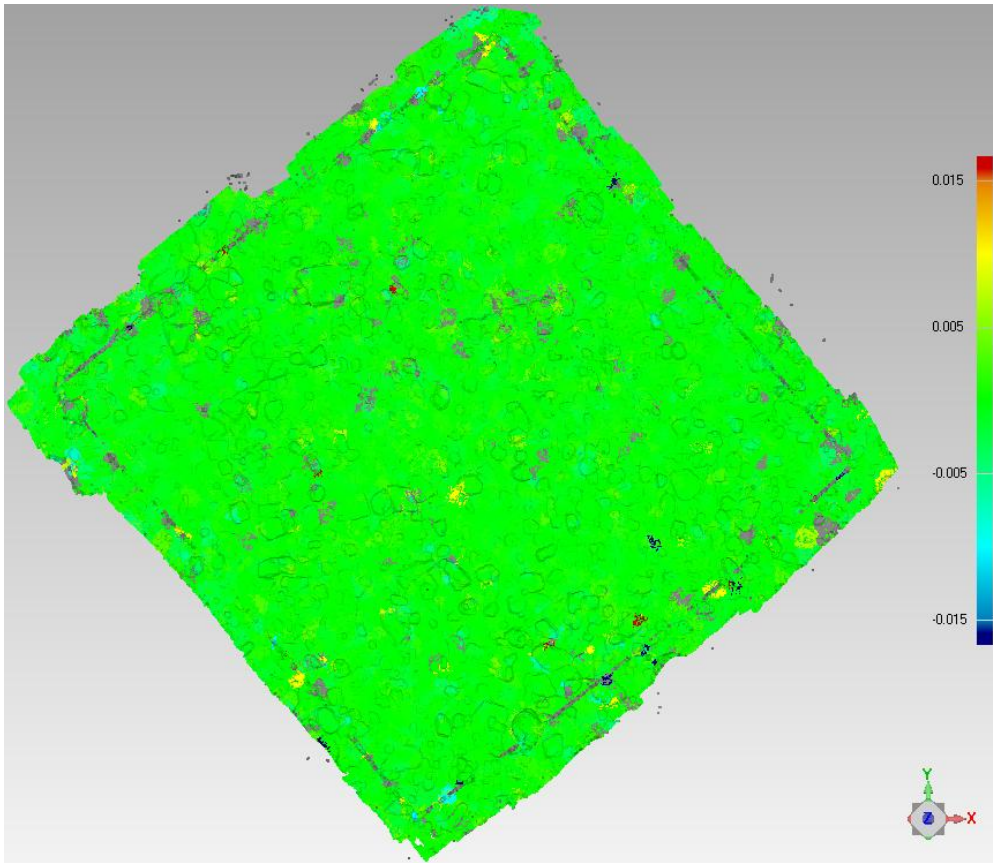
Πίνακας 6.4 Ποσοστιαία Διαφορά αριθμού σημείων

Ποιότητα	Αδιόρθωτες	Photoshop	Αλγόριθμος
Lowest	0	-0,38%	0,36%
Low	0	-0,52%	0,10%
Medium	0	-1,27%	-0,42%

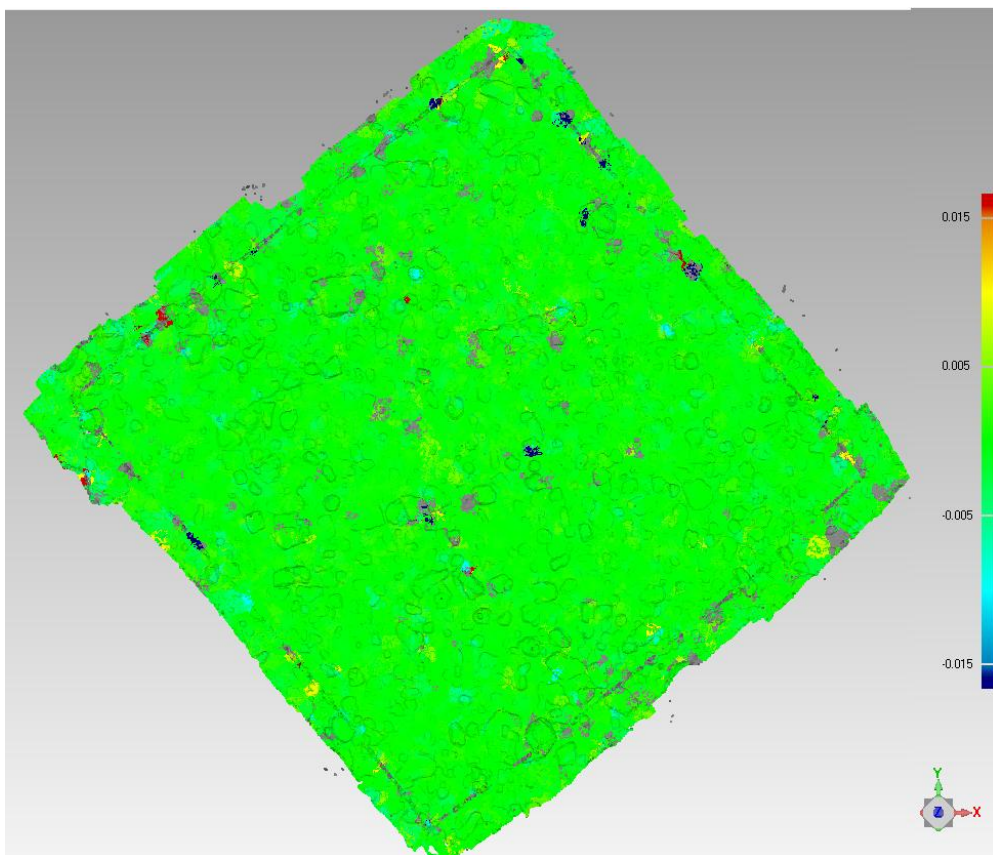
Εκτός από το πλήθος σημείων και την παρουσία θορύβου, τα νέφη συγκρίθηκαν ως προς την σχετική τους ακρίβεια ανακατασκευής, στο GeomagicQualify. Και τα τρία νέφη έχουν την ίδια γεωαναφορά και η διαφορά τους οπτικοποιήθηκε με χρωματική κλίμακα.



Εικόνα 6.4 Σύγκριση Αδιόρθωτου νέφους με διόρθωση Photoshop



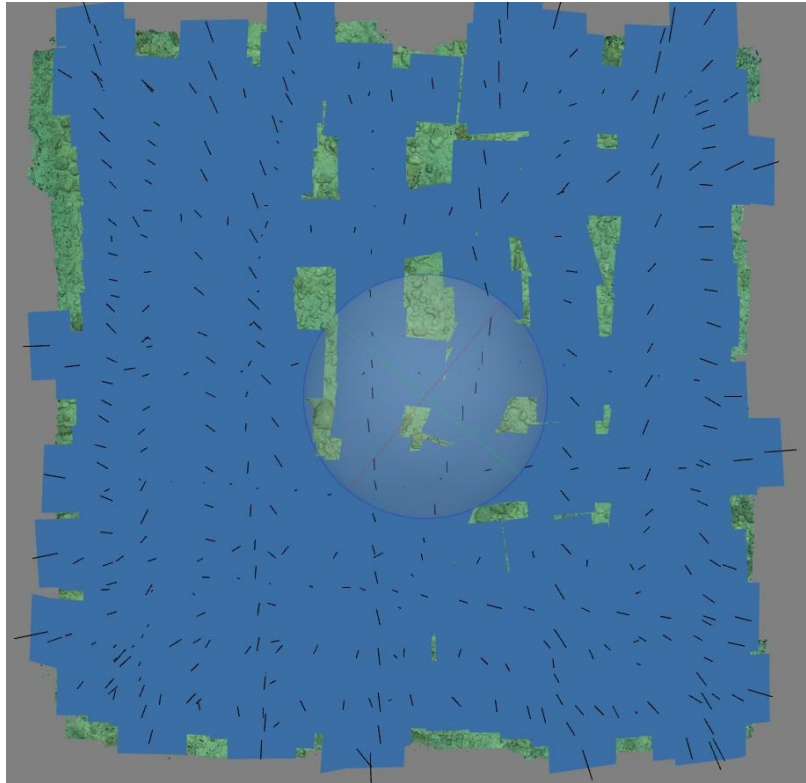
Εικόνα 6.5 Σύγκριση Αδιόρθωτου νέφους με διόρθωση Αλγόριθμου



Εικόνα 6.6 Σύγκριση διορθωμένου με Photoshop νέφους και διορθωμένου με τον αλγόριθμο

Πίνακας 6,5 Διαφορές μεταξύ 3D μοντέλων στο GeomagicQualify

Διαφορές αποστάσεων	Αδιορθ.- Photoshop	Αδιορθ.- Αλγόριθμος	Photoshop- Αλγόριθμος
Μεγιστη(m)	0,148	0,165	0,148
Μέση(m)	0,001	0,001	0,001
Τυπ. απ.(m)	0,003	0,003	0,003



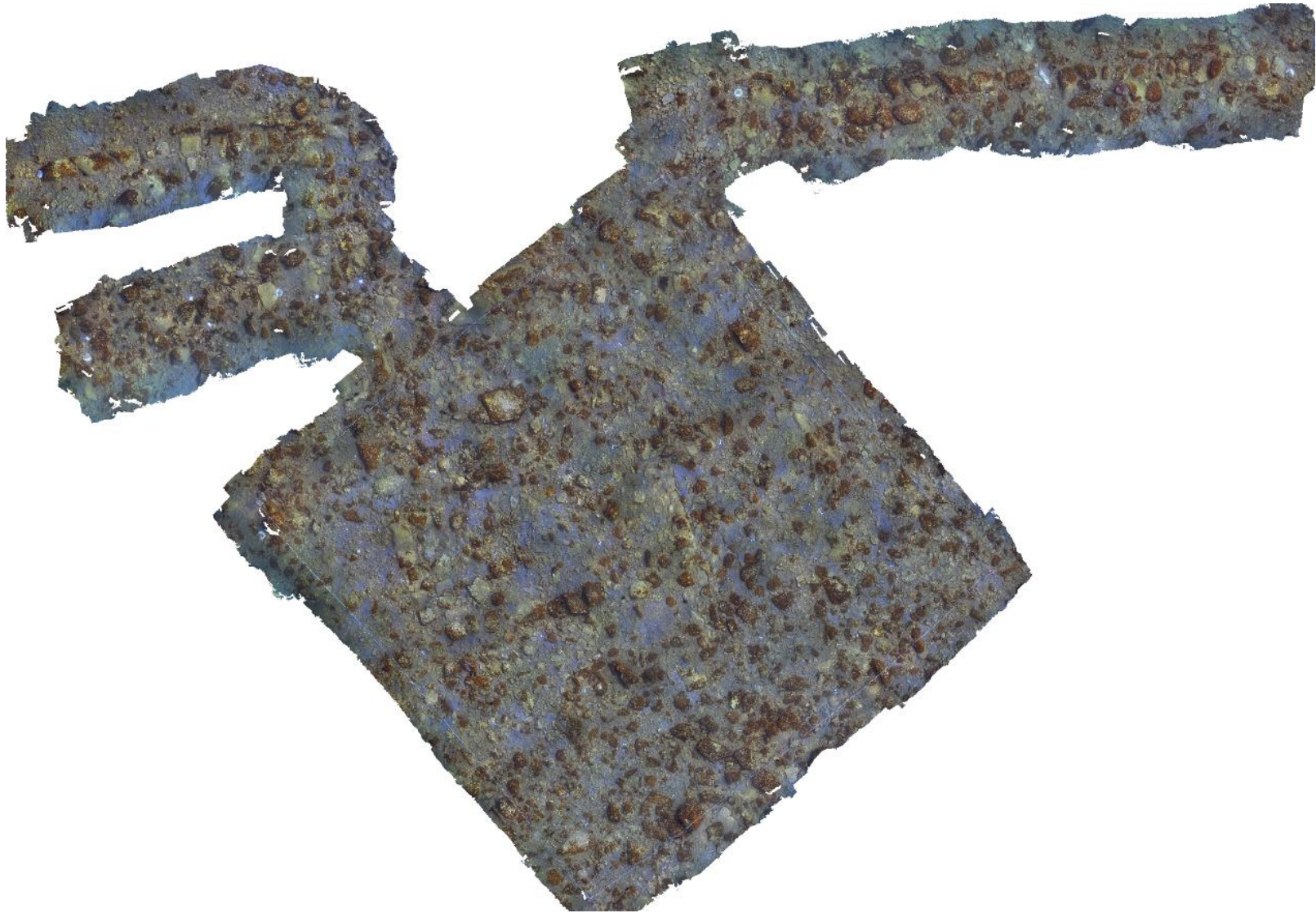
Εικόνα 6.6 Θέσεις λήψης κατά τη φωτογράφιση

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα μοντέλα δεν παρουσιάζουν διαφορές άξιες αναφοράς, καθώς σχεδόν στο σύνολό τους οι διαφορές είναι κάτω των 5 mm ενώ το συνολικό σφάλμα είναι 30 mm. Οι διαφορές που παρουσιάζονται σε σποραδικά σημεία στο κέντρο του τετραγώνου πιθανόν να οφείλονται σε παρουσία ψαριών ή να παρουσιάστηκαν λόγω της παρέκκλισης από τις γραμμές πλεύσης κατά την φωτογράφιση (Εικόνα 6.6).

Συνοψίζοντας, η αλλαγές στη ραδιομετρία της εικόνας δεν επηρεάζουν την διαδικασία της 3D ανακατασκευής με το συγκεκριμένο λογισμικό επομένως δεν έχει σημασία εάν οι φωτογραφίες διορθωθούν πριν. Παρακάτω ελέγχεται και η επίπτωση των διορθώσεων στην ορθοφωτογραφία.

6.3 Σύγκριση και Αξιολόγηση Ορθοφωτογραφιών

Οι μέθοδοι ραδιομετρικής διόρθωσης εφαρμόστηκαν και στην τελική ορθοφωτογραφία για να ελεγχθεί η βελτίωση της ποιότητάς της. Παρακάτω παρατίθενται οι ορθοφωτογραφίες που δημιουργήθηκαν με διορθωμένες εικόνες και οι ορθοφωτογραφίες που διορθώθηκαν με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4.



Εικόνα 6.7 Ορθοφωτογραφία με διορθωμένες από τον Αλγόριθμο φωτογραφίες



Εικόνα 6.8 Αρχική Ορθοφωτογραφία διορθωμένη με τον Αλγόριθμο



Εικόνα 6.9 Ορθοφωτογραφία με διορθωμένες από Photoshop φωτογραφίες



Εικόνα 6.10 Ορθοφωτογραφία διορθωμένη με Photoshop



Εικόνα 6.11 Τμηματική διόρθωση ορθοφωτογραφίας με Photoshop

Η διόρθωση που κάνει ο αλγόριθμος είναι πιο ομοιόμορφη από αυτή του Photoshop, όπου όπως φαίνεται από τις εικόνες 6.10 και 6.11 η διαφορά στο βάθος και άρα στην απόσταση λήψης επηρεάζει την αυτόματη διόρθωση και η ορθοφωτογραφία πρέπει να διορθωθεί τμηματικά για να είναι ομοιόμορφη. Από χρωματική άποψη, πιο σωστή φαίνεται η 6.7 όμως λόγω της υψηλής ευκρίνειας που πέτυχε ο αλγόριθμος, η τελική ορθοφωτογραφία φαίνεται να παρέχει περίσσεια πληροφορίας. Η Εικόνα 6.9 δείχνει ότι η διόρθωση των φωτογραφιών στο Photoshop πριν την αυτόματη φωτογραμμετρική επεξεργασία δεν συνιστάται καθώς το αποτέλεσμα δεν εξαργυρώνει τον χρόνο εργασίας.

Για να ελεγχθεί περαιτέρω ο αντίκτυπος της ραδιομετρικής διόρθωσης, οι ορθοφωτογραφίες αφαιρέθηκαν ανά ζευγάρια και κανάλι προς κανάλι με βάση τη μέθοδο διόρθωσης στο λογισμικό Qgis. Στις εικόνες 6.13 και 6.14 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της αφαίρεσης. Δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ και ο θόρυβος που εμφανίζεται δεν παρουσιάζει κάποια συστηματικότητα.



Εικόνα 6.13 Διαφορές μεταξύ 6.7 και 6.8



Εικόνα 6.14 Διαφορές 6.11 και 6.9

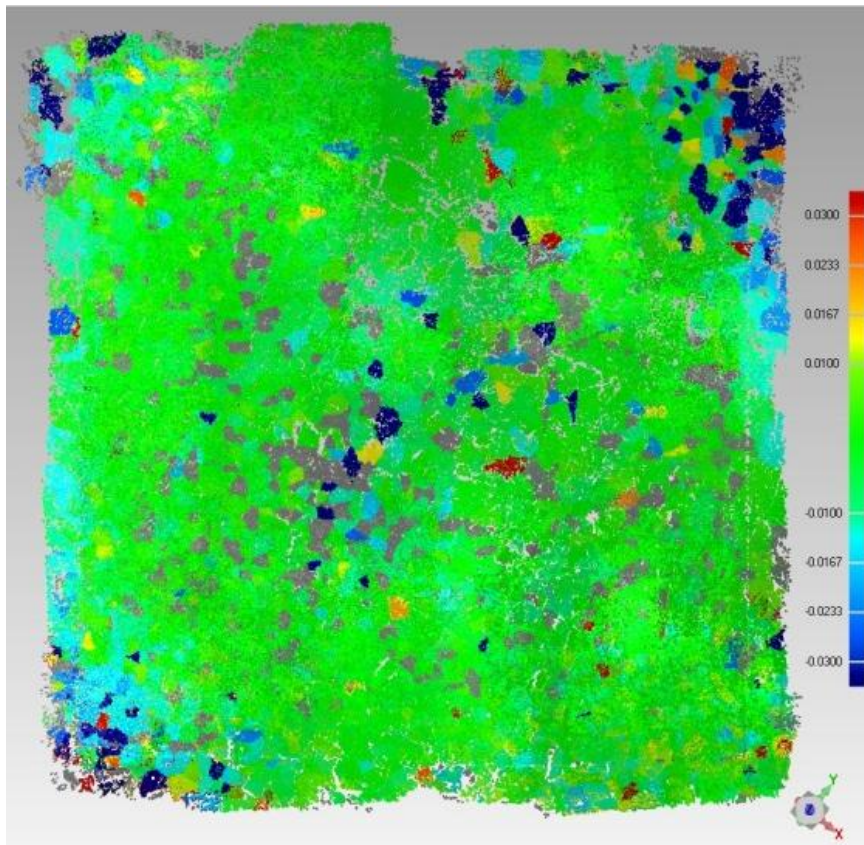
Συμπερασματικά η επέμβαση στη ραδιομετρία της υποβρύχιας εικόνας σε μικρά βάθη πριν την αυτόματη φωτογραμμετρική διαδικασία δεν φαίνεται να βελτιώνει την ποιότητα της 2D ανακατασκευής και δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των τρόπων διόρθωσης. Η διόρθωση πριν την φωτογραμμετρική διαδικασία προτείνεται μόνο εάν εφαρμόζεται αυτόματα και περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος που λαμβάνει χώρα.

6.4 Σύγκριση και αξιολόγηση 3D μοντέλων με διαφορετική βαθμονόμηση

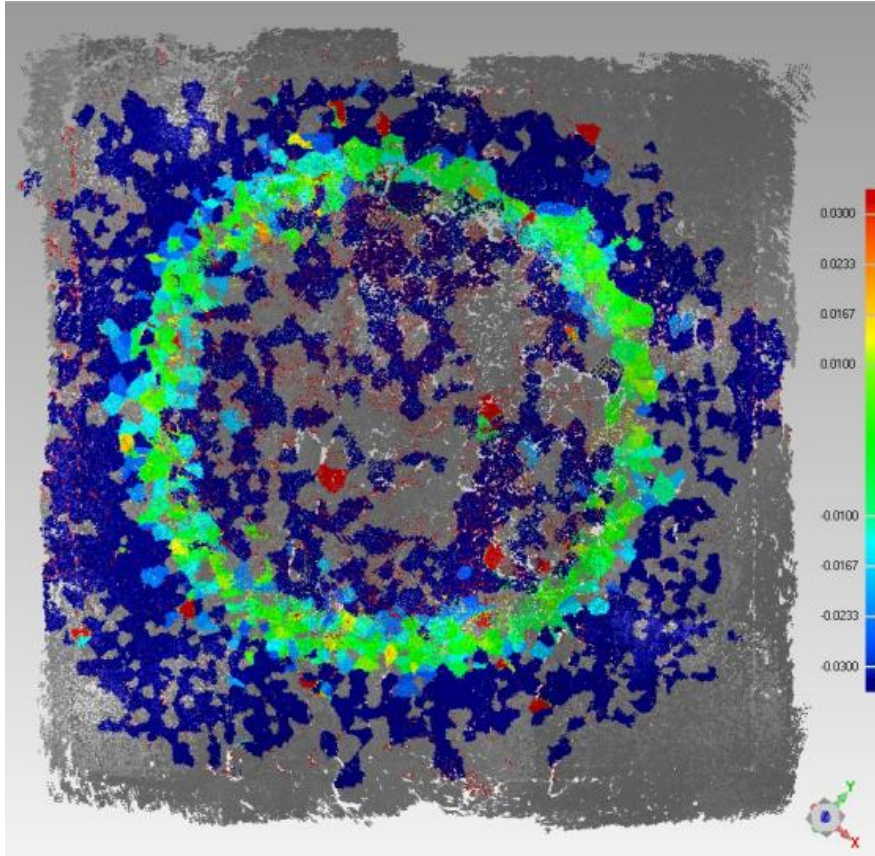
Για να ελεγχθεί ο αντίκτυπος που έχουν οι βαθμονομήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4, δημιουργήθηκαν 3D μοντέλα χρησιμοποιώντας ως αναφορά το αδιόρθωτο αραιό νέφος σημείων, και αλλάζοντας μέσα στο πρόγραμμα τις παραμέτρους της βαθμονόμησης. Τα νέα σφάλματα των φωτοσταθερών παρουσιάζονται στο πίνακα 6.5. Είναι φανερό ότι εφόσον πραγματοποιηθεί υποβρύχια βαθμονόμηση οι διαφορές μεταξύ των παραμέτρων δεν επηρεάζουν την ακρίβεια θέσης και κλίμακας. Η εργαστηριακή βαθμονόμηση ενώ δίνει ίδια οριζοντιογραφική ακρίβεια με τις υποβρύχιες, στην τρίτη διάσταση το σφάλμα τις ξεπερνά κατά πολύ. Πρόκειται για αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς η παρουσία του νερού διαφοροποιεί την σταθερά της μηχανής που σχετίζεται άμεσα με την τρίτη διάσταση.

Πίνακας 6.6 Επίδραση βαθμονόμησης στη συνόρθωση του μοντέλου

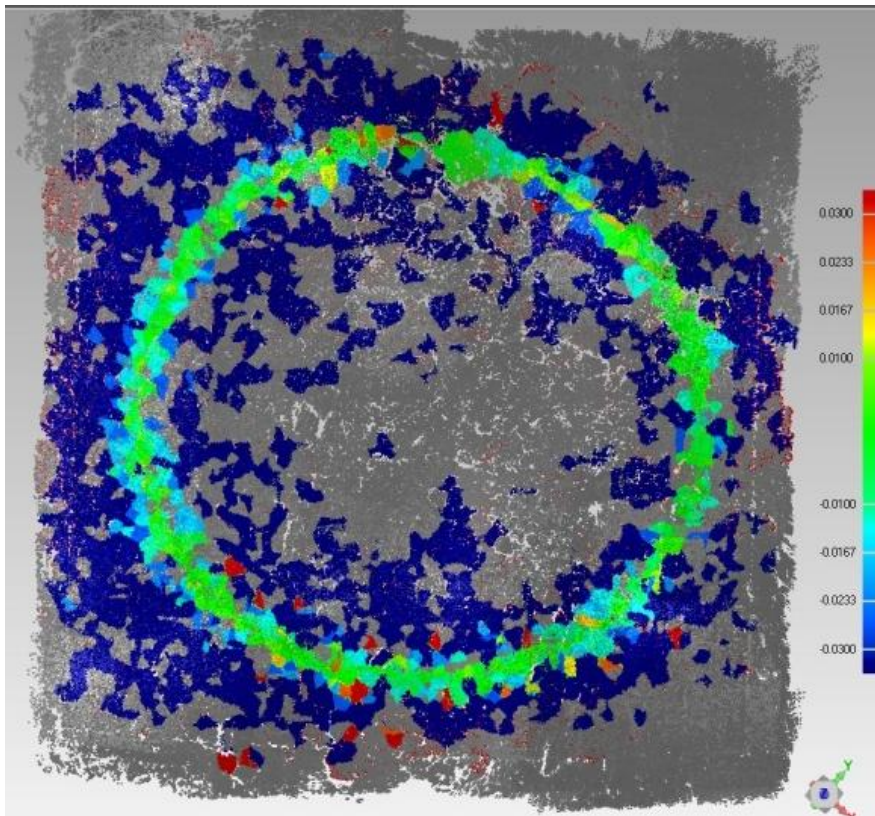
Σφάλματα (m)	X	Y	Z	Συνολικό	Αποστάσεων
Αυτοβαθμ.	0,025	0,015	0,008	0,3	0,014
FAUCCAL	0,025	0.016	0.013	0.032	0.023
Photomodeler	0.03	0.013	0.020	0.037	0.019
CCD	0.025	0.021	0.075	0.082	0.022



Εικόνα 6.15 Σύγκριση FAUCCAL με Αυτοβαθμολόγηση



Εικόνα 6.16 Σύγκριση Photomodeler και Αυτοβαθμολόγησης



Εικόνα 6.17 Σύγκριση CCD και Αυτοβαθμολόγησης

Πίνακας 6.7 Διαφορές μεταξύ μοντέλων με διαφορετική βαθ/ση και αυτοβαθμ/ση

Διαφορές PointCloud(m)	Μέγιστη	Μέση	Τυπ. Απόκλιση
FAUCCAL	0,18	0,005	0,01
Photomodeler	0.20	0.08	0.06
CCD	0.20	0.07	0.06

Παρατηρώντας τις εικόνες και τον πίνακα εύκολα αντιλαμβάνεται κάποιος ότι η βαθμονόμηση insitu με το λογισμικό FAUCCAL εξασφαλίζει ίδιο αποτέλεσμα με την αυτοβαθμονόμηση ενώ τα αποτελέσματα του Photomodeler συγκλίνουν με αυτά της εργαστηριακής βαθμονόμησης, και δημιουργούν σημαντικές παραμορφώσεις. Ένα μικρό τμήμα του τετραγώνου ταυτίζεται με την αναφορά και έχει ακτινικό σχήμα κάτι που υποδεικνύει ότι η διαφοροποίηση του μέτρου της ακτινικής διαστροφής έχει επίδραση στο σχηματισμό του μοντέλου. Ουσιαστικά αν και πρόκειται για υποβρύχια βαθμονόμηση, το αποτέλεσμα δείχνει ότι εκτελέστηκε έξω από τον νερό. Επομένως οι παράμετροι του δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού του συγκεκριμένου συστήματος μηχανή-θήκη για φωτογραμμετρικές εφαρμογές μικρού βάθους.

6.5 Τελικά Συμπεράσματα

Το υποβρύχιο περιβάλλον επηρεάζει σημαντικά την ραδιομετρία της εικόνας ακόμα και σε πολύ μικρά βάθη. Αλλαγές στα χρώματα, σκέδαση του φωτός και θολότητα είναι μερικά από τα προβλήματα που δημιουργεί. Η επεξεργασία των ιστογραμμάτων της εικόνας μπορεί να βελτιώσει αισθητά τις αρχικές εικόνες αυξάνοντας την ευκρίνεια και διορθώνοντας τα χρώματα. Οι βελτιώσεις αυτές δεν φαίνεται να αυξάνουν την αποτελεσματικότητα του εμπορικού λογισμικού Photoscan στην τρισδιάστατη ανακατασκευή το οποίο δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στην επεξεργασία των αρχικών εικόνων, χωρίς να είναι γνωστό εάν το ίδιο αποτέλεσμα είναι εφικτό σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Επίσης οι ραδιομετρικές διορθώσεις δεν φαίνεται επηρεάζουν την γεωμετρία του ανακατασκευασμένου μοντέλου καθώς δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην μεταξύ τους σύγκριση. Επομένως για το λογισμικό Photoscan δεν είναι απαραίτητη η ραδιομετρική διόρθωση πριν την έναρξη της αυτόματης φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Για μια αρχαιολογική εφαρμογή ανασκαφής η διόρθωση όχι των αρχικών εικόνων αλλά της ορθοφωτογραφίας στο τέλος θεωρείται επαρκής και ενδεχομένως είναι και οικονομικότερη. Τέλος ακόμα και με χρήση θολωτής θύρας στην υδατοστεγή θήκη, η βαθμονόμηση insitu κρίνεται απαραίτητη και η χρήση παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού για συνθήκες περιβάλλοντος οδηγούν σε παραμορφώσεις του υποβρυχίου μοντέλου και κατά συνέπεια εσφαλμένα παράγωγα.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Agrafiotis P. Georgopoulos A. , *Camera constant in the case of two media photogrammetry*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5. Piano di Sorrento Itay, 2015
2. Ahlen J. , Sundgren D. , Bengtsoon E., *Application of Underwater Hyperspectral Data for Color Correction Purposes*, ISSN 1054-6618, Pattern Recognition and Image Analysis, 2007, Vol. 17, No. 1, pp. 170–173, Pleiades Publishing, 2007
3. Arnold-Bos A., Jean-Philippe Malkasse, Gilles Kervern. *A preprocessing framework for automatic underwater images denoising*. European Conference on Propagation and Systems, Brest France, 2005
4. Bazeille S., Quidu I. Jaulin L. Phillipe J., *Automatic Underwater Image Pre-Processing*, CMM'06 - Characterisation du Milieu Marine, 2006
5. Bingham B. Foley, B, Delaporta K. Eustice R., Mallios A., Mindell D., Roman C., Sakellariou D., *Robotic Tools for Deep Water Archaeology: Surveying an Ancient Shipwreck with an Autonomus UnderWater Vehicle*, Journal of Field Robotics 27(6), 702-717, 2010
6. Canciani M, Gambogi P, Romano F. G, Cannata G, Drap P, *Low cost digital Photogrammetry for underwater archaeological site survey and artifact isertion. The case study of the Dollia wreck in Secche Della Meloria-Livorno-Italia* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12
7. Chambah M., D. Semani, Arnaud Renouf, P. Coutellemont, A. Rizzi. *Underwater Color Constancy : Enhancement of Automatic Live Fish Recognition*. 16th Annual symposium on electronic imaging, 2004, Inconnue, United States. pp.157-168, 2004.
8. Chiang J.Y., Chen Y., *Underwater Image Enhancement by Wavelength Compensation and Dehazing*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 21 No 4, 2012
9. Douskos V. Kalisperakis I. Karras G., *Automatic calibration of digital cameras using planar chess-board patterns*, Department of Surveying NTUA, 2007
10. Fryer J.G., Fraser Clive, *On the calibration of underwater cameras*, The photogrammetric record, 2006
11. Ghani A., Isa M., *Underwater image quality enhancement through composition of dual-ntensity images and Rayleigh-stretching*, SpringerPlus, 2014
12. Hou W., Weidemann, *Imagery-derived modulation transfer function and its applications for underwater imaging*, Applications of Digital Image Processing XXXX, 2007
13. Iqbal K., Abdul Salam R., Osman A. Talib A., *Underwater Image Enhancement Using an Intergrated Colour Model*, IAENG International Journal of Computer Science, 34:2, 2012
14. Jaffe J. *Computer Modeling and the Design of Optimal Underwater Imaging System*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 15 NO 2, 1990
15. Maas H., *New developments in Multimedia Photogrammetry*,
16. *Manual for Activities directed at Underwater Cultural Heritage Guidelines to the Annex of the UNESCO 2001 Convention*, Edited by Edited by Thijs J.

- Maarleveld, Ulrike Gurin and Barbara Egger, 2013, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, ISBN : 978-92-3-001122-2
17. Marcon Y., H. Sahling, and G. Bohrmann, *LAPM: a tool for underwater large-area photo-mosaicking*, Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2013
 18. Mc Glamery B. L., *Computer Analysis and simulation of underwater system performance*, Scripps Institution of Oceanography, San Diego California, 1975
 19. Prabhakar C J, Praveen Kumar P U , *3D Surface Reconstruction of Underwater Objects*, International Journal of Computer Applications (0975 – 8878) on National Conference on Advanced Computing and Communications - NCACC, 2012
 20. Schechner Yoav, Karpel Nir, *Recovery of Underwater Visibility and Structure by Polarization Analysis*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 30v No 3, 2005
 21. Sedlazeck A., Koch R., *Simulating Deep Sea Underwater Images Using Physical Models for Light Attenuation, Scattering, and Refraction*, The Eurographics Association, 2011
 22. Shettini R. Corchs S., *Underwater Image Processing State of the Art of Restoration and Image Enhancement Methods*, Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume, 2010
 23. Shortis M., *Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems*, Sensors 15 30910-30927, 2015
 24. Telem G. Filin S., *Calibration of consumer cameras in a multimedia environment*, Annual Conference Reno Nevada, 2006
 25. Torrez-Mendez Luz, Dudek G., *Color Correction of Underwater Images for Aquatic Robot Inspection*, Centre for Intelligent Machines, McGill University, Montreal Quebec, 2005
 26. Treibitz T. Hanumant S., *Flat Refractive Geometry*, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2008
 27. Treibitz T. Yoav Y. S., *Active Polarization Descattering*, IEEE Trans. PAMI, Vol. 31, #3, pp. 385-399, 2009
 28. *Underwater Archaeology: The NAS Guide to Principles and Practice Second Edition* Edited by Amanda Bowens, 2009, Nautical Archaeological Society ISBN: 978-1-405-17592-0
 29. Drap P., *Underwater Photogrammetry for Archaeology*, CNRS, French National Center for Scientific Research, France, 2012
 30. Zhukovsky M.O., Kuznetsov V.D, Olkhovsky S.V., *Photogrammetric Techniques for 3D Underwater Record of the Antique Time Ship from Phanagoreia*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013
 31. Balletti C., Beltrame C., Costa E., Guerra F., Vernier P., *Underwater Photogrammetry and 3D Reconstruction of Marble Cargos Shipwreck*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, Piano di Sorrento Italy, 2015
 32. Bruno F., Lagudi A., Gallo A., Muzzupappa M., Davide B , Passaro S., *3D Documentation of Archaeological Remains in the Underwater Park of Baiae*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, Piano di Sorrento Italy, 2015
 33. Drap P. Merad D. Hijazi B. Gaoua L., *Underwater Photogrammetry and Object Modeling: A Case Study of Xlendi Wreck in Malta*, Sensors 15 30351-30384, 2015

34. Van Damme T., *Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording in a Low-Visibility Environment*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W5, Piano di Sorrento Italy, 2015
35. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*, *Geomorphology* 179 (2012) 300-314, 2012
36. Massot-Campos M., Oliver-Codina G., *Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction*, *Sensors* 15 31525-31557, 2015
37. Menna F., Nocerino E., Francesco F., Remondino F., *Geometric and Optic Characterization of a Hemispherical Dome Port for Underwater Photogrammetry*, *Sensors* 16 00048, 2016

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Μούζας Α., *Υποβρύχιες Αποτυπώσεις: Εισαγωγή στις Επιστήμες της Θάλασσας*, Εκδόσεις Ερωδιός, Θεσσαλονίκη 2010, ISBN :978-960-454-115-8
2. Δουκάκης Ε. *Θαλάσσια Γεωδαισία*, Τομέας Τοπογραφίας, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1999
3. Αγραφιώτης Π. *Ανάπτυξη φωτογραμμετρικών μεθόδων δύο μέσων για τη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012
4. Χουβαρδά Ι. *Γεωμετρική Τεκμηρίωση Βυθισμένου Μνημείου*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014
5. Διαμαντή Ε. *Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ενάλιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011

Ιστότοποι

<http://www.wikipedia.org>

[http://www. http://nomosphysis.org.gr](http://www.nomosphysis.org.gr)

<http://photodeler.com>

<http://www.agisoft.com>