



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Περιβάλλοντος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ
ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ,
ΕΥΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΑΣΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Στεφανάκης Δημήτρης

Μάρτιος 2019

Στη κόρη μου Άρια...

Copyright © Δημήτρης Στεφανάκης 2019

Copyright © Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Η έγκριση διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου, δεν υποδηλώνει την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παράγραφος 2).



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στεφανάκης Δημήτρης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ, ΕΥΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΑΣΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χατζόπουλος Ιωάννης: Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο
Αιγαίου (Κύριος επιβλέπων)

Σουλακέλλης Νικόλαος: Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
(Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Δαναλάτος Νικόλαος: Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και
Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Μέλος Τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Τοπουζέλης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Επιστημών της
Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου (Μέλος Επταμελούς)

Πηλίνης Χριστόδουλος, Καθηγητής, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
(Μέλος Επταμελούς)

Δημητρακόπουλος Παναγιώτης, Καθηγητής, Τμήμα Περιβάλλοντος Πανεπιστήμιο
Αιγαίου (Μέλος Επταμελούς)

Γαγάνης Πέτρος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Περιβάλλοντος Πανεπιστήμιο
Αιγαίου (Μέλος Επταμελούς)

Μάρτιος 2019

Copyright © Δημήτρης Στεφανάκης 2019

Copyright © ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΡΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ, ΕΥΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ
ΔΑΣΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

ISBN

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ ιδιαίτερω τον δάσκαλό μου, Καθηγητή Τηλεπισκόπησης του Τμήματος Περιβάλλοντος Παν. Αιγαίου, Ιωάννη Χατζόπουλο, που με τίμησε με την επιλογή του και του οποίου η καθοδήγηση, η επιστημονική συμβολή, το συνεχές ενδιαφέρον και οι επικοινωνητικές παρατηρήσεις, συνέβαλαν καθοριστικά σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης έως την ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Νίκο Δαναλάτο του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, του Πανεπιστήμιο, μέλος της τριμελούς μου Επιτροπής, για την αμέριστη βοήθεια του, σε όλες τις φάσεις διεξαγωγής της ερευνάς μου.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή Νίκο Σουλακέλλη του Τμήματος Γεωγραφίας του Παν. Αιγαίου, , μέλος της τριμελούς Επιτροπής, για την εμπιστοσύνη του και την πολύτιμη υποστήριξη του στην υλοποίηση της έρευνάς μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον δάσκαλο μου Νίκο Μάργαρη, με τον οποίο είχα ξεκινήσει την διατριβή μου και δυστυχώς δεν είναι πια μαζί μας.

Ένα «ευχαριστώ» δεν αρκεί, για την οικογένεια μου, τους φίλους και τους συνεργάτες μου για την υπομονή τους και την συνεχή τους συνδρομή μέχρι σήμερα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	21
1.1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος	21
1.1.2 Σκοπός και στόχοι Διδακτορικής Διατριβής.....	23
1.2 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	24
1.2.1 Οικονομική βιωσιμότητα εφαρμογής ΣμηΕΑ στην γεωργία ακριβείας.....	24
1.2.2 Αντιμετώπιση έλλειψης χωρικής πληροφορίας.....	25
1.2.3 Εμπλουτισμός παραμέτρων συσχέτισης κατά την διαδικασία μοντελοποίησης	25
1.2.4 Συμβολή της Διδακτορικής Διατριβής στην τρέχουσα έρευνα	25
1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	28
2.1 Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ & Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	29
2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ ΦΥΤΩΝ & ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	29
2.3 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	30
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ(ΣμηΕΑ).....	31
2.4.1 Drones και Unmanned Aircraft Systems (UAS) – Εισαγωγικές έννοιες....	32
2.4.2 Drones – Η γέννηση μιας Αγοράς	33
2.4.3 Από τα Drones στα UAS – Η έκρηξη.....	34
2.5 ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	36
2.5.1 Η Αγορά ΣμηΕΑ (μια παγκόσμια ματιά, με τοπικό ενδιαφέρον).....	36
2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ, ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ & ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	59
3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	61
3.1.1 Ρυθμός αύξησης ξηρής μάζας (DWI)	61
3.1.2 Μετάφραση Χωρικού υπολογιστικού μοντέλου και δημιουργία επιφανειών με την μέθοδο ordinary kriging	70
3.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ	78
3.2.1 Αισθητήρες Χαρτογράφησης.....	78
3.2.2 Δεδομένα θέσεως & Αδρανειακής μονάδας μέτρησης.....	91
3.2.3 Δεδομένα περιβαλλοντικών αισθητήρων	105
3.2.4 Δείκτες Βλάστησης.....	114
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ.....	123

3.3.1 Γενική ιδέα επιχειρησιακού σχεδιασμού	123
3.3.2 Εξοπλισμός ΣμηΕΑ.....	124
3.3.3 Σχεδίαση Εναέριας Πλατφόρμας	125
3.3.4 Κατασκευή του μη επανδρωμένου αεροσκάφους «Φορέας»	131
3.3.5 Πτητικές δοκιμές.....	141
3.3.6 Δοκιμαστική Καταγραφή δεδομένων με την Αυτόνομη Εναέρια πλατφόρμα	142
3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	147
3.4.1 Προκαθορισμός Ενεργειών Συλλογής	147
3.4.2 Κατάρτιση Σχεδίου Πτήσης.....	149
3.4.3 Προκαθορισμός Σημείων Ελέγχου	151
3.4.4 Διαδικασίες και κανονισμοί ασφαλείας κατά την πτήση.....	153
3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	155
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	157
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	157
4.1.1 Αποτελέσματα Σημειακών μοντέλων Ρυθμού αύξησης ξηράς μάζας.....	157
4.1.2 Αποτελέσματα χωρικών Μοντέλων.....	159
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ	162
4.2.1 Αποτελέσματα αισθητήρων χαρτογράφησης.....	162
4.2.2 Αποτελέσματα περιβαλλοντικών αισθητήρων	183
4.2.3 Αποτελέσματα δεικτών βλάστησης	185
4.2.4 Αποτελέσματα Φωτογραμμετρικών υπολογισμών	190
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	191
4.4 ΤΕΛΙΚΗ - ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	193
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	195
5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	195
5.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων σημειακών μοντέλων.....	195
5.1.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων χωρικών μοντέλων.....	195
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	197
5.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων αισθητήρων χαρτογράφησης	197
5.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών αισθητήρων	200
5.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων δεικτών βλάστησης.....	200
5.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων φωτογραμμετρικών υπολογισμών	202
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	202
5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ-ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	203
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	205
6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	205

6.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ.....	206
6.2.1 Οικονομικά οφέλη και ο αντίκτυπος της διατριβής στην αγροτική παραγωγή	206
6.2.2 Πρωτοτυπία της διατριβής.....	206
6.2.3 Συμβολή της διατριβής στην συνέχεια της έρευνας	207
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	211

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των SMALL UAV	45
Πίνακας 2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των TACTICAL UAV	45
Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των STRATEGIC UAV.....	46
Πίνακας 4 Τεχνικά χαρακτηριστικά των SPECIAL PURPOSE UAV.....	46
Πίνακας 5 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά κατηγορία UAV σε εκατ.\$	46
Πίνακας 6 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά τύπο UAV σε εκατ.\$ Πηγή : Press Releases, Investor Presentations, Euro UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036), Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis	47
Πίνακας 7 Μέγεθος και τάση αγοράς ανα κατηγορία εφαρμογής UAV σε εκατ, \$....	50
Πίνακας 8 Μέγεθος και τάση αγοράς ανα Τύπο εφαρμογής UAV σε εκατ, \$ (Στρατιωτικές).....	50
Πίνακας 9 Μέγεθος και τάση αγοράς ανα τύπο εφαρμογών UAV σε εκατ. \$ (Εμπορικές).....	50
Πίνακας 10 Μέγεθος και τάση αγοράς ανα τύπο εφαρμογών UAV σε εκατ. \$ (Εσωτερικής ασφαλείας & πολιτικής προστασίας)	51
Πίνακας 11 Μέγεθος και τάση αγοράς UAV ανα φέροντα εξοπλισμό (payloads) σε εκατ \$.....	53
Πίνακας 12 Μέγεθος και τάση αγοράς UAV ανά γεωγραφική περιοχή. Πηγή Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis.	55
Πίνακας 13 Μέγεθος και τάση ευρωπαϊκής αγοράς UAV σε εκατ.\$ Πηγή Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis.	55
Πίνακας 14 Συγκεντρωτικός πίνακας απαιτούμενων λογισμικών.....	60
Πίνακας 15 Υπολογισμένες τιμές ρυθμού αφομοίωσης CO ₂ (kg ha ⁻¹ d ⁻¹) για κλειστή φυλλοστιβάδα με σφαιρική κόμη, για ανέφελη (FCL) και πλήρως νεφοσκεπής (FOV) ημέρες και μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης, AMAX=40 Kg ha ⁻¹ d ⁻¹	62
Πίνακας 16 Υπολογισμένες τιμές ρυθμού αφομοίωσης CO ₂ (kg ha ⁻¹ d ⁻¹) για κλειστή φυλλοστιβάδα με σφαιρική κόμη, για ανέφελη (FCL) και πλήρως νεφοσκεπής (FOV) ημέρες και μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης, AMAX=70 Kg ha ⁻¹ d ⁻¹	62
Πίνακας 17 (Α) Ολικής Ακτινοβολίας, TOTRAD (10 ⁶ J m ⁻² d ⁻¹) για τυπική ανέφελη ημέρα και (β) μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας (h) σε συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και μέρας του έτους	63
Πίνακας 18 Φωτοσυνθετικός μηχανισμός (C3/C4), ειδική φυλλική επιφάνεια (SLA, m ² / kg) συντελεστής διεισδυτικότητας για ορατό φάσμα (KE), σχετικός ρυθμός αναπνοής διατήρησης (RMorg, kg kg ⁻¹ d ⁻¹), και συντελεστής μετατροπής ξηρής ουσίας, EC (kg kg ⁻¹).....	65
Πίνακας 19 Αγνώστων τιμών, πηγών και μεταφραστικής διαδικασίας Μοντέλου πρόβλεψης σε Μοντέλο Γ.Σ.Π.....	69
Πίνακας 20 Χαρακτηριστικών κάμερας Canon Ixus 160.....	82
Πίνακας 21 Χαρακτηριστικών κάμερας Modified Sony A6000	85
Πίνακας 22 Χαρακτηριστικών πολυφασματικής κάμερας Parrot SEQUOIA.....	90
Πίνακας 23 Χαρακτηριστικά επιδόσεων GPS Ublox LEA-6H (Ublox, 2017a)	93
Πίνακας 24 Χαρακτηριστικά επιδόσεων GPS Ublox NEO-M8P σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας (mode) GNSS (βασική: Σύγχρονη λήψη GPS & GLONASS)(Ublox, 2017b).....	96
Πίνακας 25 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Ardupilot MEGA 2560.....	100
Πίνακας 26 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Pixhawk	102
Πίνακας 27 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Pixhawk 2	104
Πίνακας 28 Τεχνικών χαρακτηριστικών αισθητήρα MS5525.....	110

Πίνακας 29 Τεχνικών προδιαγραφών Mastech Digital Environmental Multimeter..	113
Πίνακας 30 Σύγκριση ορισμών δείκτη LAI.....	115
Πίνακας 31 Εξοπλισμού υποσυστημάτων ΣμηΕΑ	125
Πίνακας 32 Γεωμετρικών παραμέτρων Αεροχήματος	127
Πίνακας 33 Υπολογισμών χαρακτηριστικών Πτερύγων και φακέλου πτήσης	130
Πίνακας 34 Παράδειγμα υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης καλλιέργειας καλαμποκιού στη Λάρισα (ΒΓΠ=39°30') υποθέτοντας συνολική απώλεια αναπνοής ίση με 40%.....	157
Πίνακας 35 Στοιχείων αισθητήρα και έργου	163
Πίνακας 36 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης φακού	164
Πίνακας 37 ΜΟ, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών	164
Πίνακας 38 ΜΟ, σφαλμάτων περιστροφής φωτοληψιών.....	165
Πίνακας 39 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου	166
Πίνακας 40 Στοιχείων αισθητήρα και έργου	170
Πίνακας 41 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης	171
Πίνακας 42 ΜΟ, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών	172
Πίνακας 43 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου	172
Πίνακας 44 Στοιχείων αισθητήρα και έργου	178
Πίνακας 45 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης	179
Πίνακας 46 ΜΟ, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών	180
Πίνακας 47 ΜΟ, σφαλμάτων περιστροφής φωτοληψιών.....	180
Πίνακας 48 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου	181

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Η έννοια του ΣμηΕΑ/UAS (Unmanned Aircraft Systems) & οι εφαρμογές τους (uav applications).....	35
Σχήμα 2 Παγκόσμια αγορά UAV . μέγεθος και αναμενόμενοι ρυθμοί ανάπτυξης ανά γεωγραφική περιοχή	56
Σχήμα 3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	58
Σχήμα 4 Η τυπολογία λειτουργίας των δεκτών GPS RTK σε ζεύγη, όπου ο δέκτης αποστέλλει μηνύματα διορθώσεων στον κινούμενο δέκτη	95
Σχήμα 5 Κλιματικά Δεδομένα επιλεγμένων σταθμών ΕΜΥ, καρτέλα Θερμοκρασία	106
Σχήμα 6 Πληροφοριακό σύστημα ΕΜΥ και Κλιματικός Άτλαντας της Ελλάδος	107
Σχήμα 7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ (CONOPS).....	124
Σχήμα 8 Αναφοράς Μετρήσεων	129
Σχήμα 9 Ελεγκτής σταθεροποίησης Roll.....	144
Σχήμα 10 Ελεγκτής σταθεροποίησης Pitch	144
Σχήμα 11 Ελεγκτής σταθεροποίησης Yaw	144
Σχήμα 12 Ελεγκτή πτήσης L1, σε κατάσταση εκτέλεσης κυκλικών ελιγμών.....	145
Σχήμα 13 Ελεγκτή πλοήγησης L1 σε κατάσταση πλοήγησης ακολουθίας σημείων	146
Σχήμα 14 Πεδίο δοκιμών πτήσεως με εγκατάσταση του σταθμού εδάφους και της τηλεμετρίας.....	146

Εικόνα 1 Ψηφιδωτή επιφάνεια ισοϋψών σε μορφή πλέγματος.	71
Εικόνα 2 Δημιουργία νέου σημειακού επιπέδου σε περιβάλλον ArcMap 10.1.....	75
Εικόνα 3 Χρήση της εντολής Identity και συμπλήρωση των περιγραφικών δεδομένων του σημειακού επιπέδου (ArcMap 10.1)	76
Εικόνα 4 Η κάμερα Canon Ixus 160.....	82
Εικόνα 5 Ηλεκτρονική διάταξη καλωδίου ελέγχου camera canon ixus 160.....	83
Εικόνα 6 Το καλώδιο και η διασύνδεση της μονάδας αυτόματου πιλότου με την κάμερα canon ixus 160	83
Εικόνα 7 Η κάμερα Modified Sony A6000	84
Εικόνα 8 Το καλώδιο και η διασύνδεση της μονάδας αυτόματου πιλότου με την κάμερα Modified Sony A6000.....	86
Εικόνα 9 Αποσυναρμολόγηση φωτογραφικής μηχανής Point & Shoot και αλλαγή του φίλτρου φάσματος.....	87
Εικόνα 10 Φωτογραφία από τον τροποποιημένο αισθητήρα κάμερας Canon ixus 160, φαίνεται η έντονη απορρόφηση του υπέρυθρου φάσματος απο τα φύλλα των δένδρων στο κανάλι του μέχρι πρότινος κόκκινου.	87
Εικόνα 11 Η πολυφασματική κάμερα Parrot SEQUOIA και ο αισθητήρας προσπίπτουσας ακτινοβολίας.....	90
Εικόνα 12 Ο δέκτης GPS Ublox LEA-6H, 3D Robotics, Αριστερά παρατηρούμε την κεραία τύπου Patch υψηλής απολαβής και τις ενδείξεις της πυξίδας, δεξιά το chipset της Ublox	92
Εικόνα 13 Του ζεύγους δεκτών GPS Here+, αριστερά ο δέκτης εδάφους(base), στο κέντρο ο δέκτης του αεροσκάφους με την ενσωματωμένη κεραία(Rover) και δεξιά η εξωτερική κεραία του Δέκτη βάσης.....	94
Εικόνα 14 Αριστερά: Αδρανειακή μονάδα μέτρησης Carousel Navigation Unit, Α/φους εμπορικών αερογραμμών, δεξιά: Ολοκληρωμένο κύκλωμα 9 βαθμών ελευθερίας MPU9625 που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ρομποτικής (πηγή US National Air and Space Museum).....	96
Εικόνα 15 Τα μοντέλα αυτόματων πιλότων βασισμένα σε Ardupilot και το έτος έκδοσης(Ardupilot, 2019).....	98
Εικόνα 16 Μονάδα αυτόματου πιλότου Ardupilot Mega 2560 v1.4 (πηγή: diydrones.com).....	98
Εικόνα 17 Οι δυο πλακέτες, επάνω Ardupilot και κάτω oilpan, που απαρτίζουν το σύστημα αυτόματου πιλότου με τις σημάνσεις ανά στοιχείο (πηγή: diydrones.com) 99	99
Εικόνα 18 Η μονάδα αυτόματου πιλότου Pixhawk της 3D Robotics.....	102
Εικόνα 19 Μονάδα αυτόματου πιλότου Cube (Pixhawk2.1)	103
Εικόνα 20 Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π.....	108
Εικόνα 21 MS5525 ψηφιακός αισθητήρας διαφορικής πίεσης και ο συνοδευτικός σωλήνας Pitot.....	109
Εικόνα 22 Τα σημεία συλλογής δεδομένων σε τρισδιάστατη προβολή.....	110
Εικόνα 23 Εισαχθέντα σημειακά δεδομένα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου σε περιβάλλον Γ.Σ.Π.	111
Εικόνα 24 Εφαρμογή χωρικής παρεμβολής Kriging, σε δεδομένα ταχύτητας αέρα. 112	112
Εικόνα 25 Ψηφιακό Περιβαλλοντικό πολύμετρο Mastech MS300.....	113
Εικόνα 26 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA)..	116
Εικόνα 27 Παράδειγμα εφαρμογής σε λειτουργικό σύστημα Android, για μέτρηση του δείκτη LAI.....	116

Εικόνα 28 Τρισδιάστατη απεικόνιση νέφους σημείων, καταγραφής σε καλλιέργεια αμπέλου(χωρική διακριτικότητα 3.4εκ).....	117
Εικόνα 29 Μέτρηση επιφάνειας σε ορθή προβολή στο λογισμικό Agisoft Metashape	117
Εικόνα 30 Μέτρηση της συνολικής επιφάνειας του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας στο λογισμικό Agisoft Metashape	118
Εικόνα 31 Ταξινόμηση νέφους σημείων, εξαγωγή Μοντέλου επιφανείας από σημεία εδάφους και μέτρηση επιφάνειας σε ορθή προβολή, στο λογισμικό Agisoft Metashape	118
Εικόνα 32 Καθορισμός φακέλου εργασίας, εισαγόμενων δεδομένων και εξισώσεων ψηφιδωτών σε περιβάλλον R.....	122
Εικόνα 33 Αυτοματοποιημένη εκτέλεση εντολών. Προεπισκόπηση και εξαγωγή ψηφιδωτών αρχείων δεικτών βλάστησης	123
Εικόνα 34 Αποτέλεσμα εφαρμογής γεωμετρικών παραμέτρων σε περιβάλλον CAD	127
Εικόνα 35 Εισαγωγή γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης σε Λογισμικό Προσομοίωσης και Αεροδυναμικής ανάλυσης (XFLR5).....	128
Εικόνα 36 Εικονοποίηση τελικών αποτελεσμάτων σε περιβάλλον CAD	131
Εικόνα 37 Συγκόλληση των τομών διογκωμένης πολυστερίνης και δημιουργία προτύπου της ατράκτου	132
Εικόνα 38 Ολοκλήρωση του πρωτότυπου μοντέλου (Μήτρας).....	133
Εικόνα 39 Αποτέλεσμα αρνητικού καλουπιού (μήτρας) της ατράκτου	133
Εικόνα 40 Επίστρωση των υλικών κατασκευής σε μορφή Sandwich (Carbon Fiber, Aramid Honeycomb, Carbon Fiber) στο καλούπι κατασκευής και εμποτισμός με εποξειδική ρητίνη.....	134
Εικόνα 41 Εφαρμογή πίεσης με την μέθοδο Vacuum	134
Εικόνα 42 Εξαγωγή της ατράκτου	135
Εικόνα 43 Πυρήνας κύριας πτέρυγας από διογκωμένη πολυστερίνη διαμορφωμένη σε CNC θερμού Νήματος	135
Εικόνα 44 Τελική πτέρυγα.....	136
Εικόνα 45 Οι πυρήνες σταθεροποιητικών επιφανειών πριν την διαδικασία εμποτισμού/ελασματοποίησης	137
Εικόνα 46 Το τελικό αποτέλεσμα του Ουραίου συστήματος.....	137
Εικόνα 47 Τελική συναρμολόγηση του αεροχήματος Φορέας.....	138
Εικόνα 48 Παραμετροποίηση συστημάτων του αεροχήματος στο λογισμικό σταθμού εδάφους (Mission Planner)	139
Εικόνα 49 Φορητός Σταθμός Εδάφους.....	140
Εικόνα 50 Διαδικασία απογείωσης (Hand Launch) του αεροχήματος Φορέας.....	142
Εικόνα 51 Εσφαλμένος (αριστερά) και σωστός (δεξιά) προσανατολισμός διαδρομών πτήσεως σε σχέση με τον επικρατούντα άνεμο	150
Εικόνα 52 Menu παραμετροποίησης ιδιοτήτων ωφέλειμου φορτίου καταγραφής στο λογισμικό σταθμού εδάφους)Mission Planner.....	150
Εικόνα 53 Εικονοποίηση και υπολογισμός αποτελεσμάτων επιλογών παραμέτρων σχεδίου πτήσης (Mission Planner).....	151
Εικόνα 54 Σήμανση φωτοσταθερού σημείου με χρήση μιογιάς (Spray).....	152
Εικόνα 55 Χρήση εκτυπωμένων στόχων έντονης αντίθεσης και γνωστού μεγέθους.....	152
Εικόνα 56 Χάρτης αναφοράς μετρήσεων και υπολογισμών(Danalatos, 1993). Συστ. αναφοράς WGS84 & ΕΓΣΑ87, υπόβαθρο Digital Globe USGS.	158
Εικόνα 57 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης.....	159

Εικόνα 58 Υπολογισμός Μοντέλου Επιφανείας μέσης Θερμοκρασίας με την μέθοδο Kriging και διόρθωση υψομέτρου	159
Εικόνα 59 Μοντέλο επιφανείας μέσης θερμοκρασίας (πηγή EMY, Κλιματικός Ατλαντας).....	160
Εικόνα 60 Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους από δεδομένα ΣμηΕΑ. Νιγρίτα Σερρών (Lat 40°50') 7/5/2015, GSD 5cm, Αισθητήρας Canon Ixus 160.....	160
Εικόνα 61 Ολική Ακτινοβολία, TOTRAD (10 ⁶ J/m ²) για τυπική ανέφελη ημέρα και περίοδο 01/05/2015 έως 15/8/2015. Καλλιέργειες: Καλαμπόκι, Σόργο.....	161
Εικόνα 62 Ολική Ακτινοβολία, TOTRAD (10 ⁶ J/m ²) για τυπική ανέφελη ημέρα και περίοδο 01/04/2015 έως 10/09/2015 σε παράδειγμα περιοχής με έντονο ανάγλυφο. Καλλιέργειες: Αμπέλου	161
Εικόνα 63 Ορθομωσαϊκό απο φωτοληψίες 05/07/2016 με δέκτη Canon ixus 160 και αλληλεπίθεση κοντινού υπέρυθρου φάσματος maxmax Canon ixus. (μέγεθος εικονοστοιχείου 5,69cm. /ύψος πτήσης 262μ),(περίγραμμα λεπτομέρειας)	162
Εικόνα 64 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Canon ixus 160, ύψος πτήσης 260m AGL	163
Εικόνα 65 Θέσεις φωτοληψιών και αλληλεπικαλύψεις.....	163
Εικόνα 66 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα Canon IXUS 160 (5mm).....	163
Εικόνα 67 θέσεις φωτοληψιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης.....	164
Εικόνα 68 Προσδιορισμού προσανατολισμού και σφαλμάτων. Τα τόξα παρουσιάζουν τον προσδιορισμό σφαλμάτων κατά Kappa.....	165
Εικόνα 69 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου	165
Εικόνα 70 Δορυφορική εικόνα, Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 (09/07/2015). LandsatLook. Μεγεθος εικονοστοιχείου: 30m	167
Εικόνα 71 Δορυφορική εικόνα, Sentinel-2a (29/07/2015). LandsatLook. Μεγεθος εικονοστοιχείου: 20m	167
Εικόνα 72 Ορθοφωτοχάρτης, Κτηματολόγιο ΑΕ, (2009). Μέγεθος εικονοστοιχείου: 0,25m	167
Εικόνα 73 Ορθομωσαϊκό απο φωτοληψίες 06/06/2016 με δέκτη Parrot Sequoia. (μέγεθος εικονοστοιχείου 10,1cm. /ύψος πτήσης 111μ),(περίγραμμα λεπτομέρειας)	168
Εικόνα 74 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Green band, ύψος πτήσης 111m AGL	168
Εικόνα 75 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Near Infrared band, ύψος πτήσης 111m AGL	169
Εικόνα 76 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Red band, ύψος πτήσης 111m AGL	169
Εικόνα 77 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Red Edge band, ύψος πτήσης 111m AGL	170
Εικόνα 78 Θέσεις φωτοληψιών και αλληλεπικαλύψεις.....	170
Εικόνα 79 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα Parrot Sequoia (3.98mm).....	171
Εικόνα 80 θέσεις φωτοληψιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης.....	172
Εικόνα 81 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου	172
Εικόνα 82 Δείγμα στόχου Albedo, πριν την καταγραφή. Τιμές: Green: 18.9%, Red: 20.1%, Red Edge: 22.7%, NIR: 26%.....	173

Εικόνα 83 Αποτελέσματα απορρόφησης/ανάκλασης αισθητήρα και εισαγωγή δεδομένων αισθητήρα ηλιοφάνειας(Agisoft Metashape, 1.5.0/ Calibrate Reflectance)	173
Εικόνα 84 Ιστόγραμμα δείγματος αμπέλου σε ορθομωσαϊκό χωρίς διόρθωση ανάκλασης(ESRI, ArcMap 10.1)	174
Εικόνα 85 Ιστόγραμμα δείγματος αμπέλου σε ορθομωσαϊκό με διόρθωση ανάκλασης((ESRI, ArcMap 10.1)	174
Εικόνα 86 Δορυφορική εικόνα, Sentinel-2 L1C (08/06/2017). LandsatLook. Μεγεθος εικονοστοιχείου: 10m	175
Εικόνα 87 Δορυφορική εικόνα, CNES/Airbus (/06/2017). Μεγεθος εικονοστοιχείου: 25cm	175
Εικόνα 88 Ορθοφωτοχάρτης, Κτηματολόγιο ΑΕ, (2009). Μέγεθος εικονοστοιχείου: 0,50m	176
Εικόνα 89 Ορθομωσαϊκό απο φωτοληψίες 08/09/2018 με δέκτη Modified Sony APS-C. (μέγεθος εικονοστοιχείου 2,01cm. /ύψος πτήσης 160μ),(περίγραμμα λεπτομέρειας)	176
Εικόνα 90 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Modidied Sony APS-C, ύψος πτήσης 160m AGL	177
Εικόνα 91 Θέσεις φωτοληπιών και αλληλεπικαλύψεις	178
Εικόνα 92 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα modified Sony 28mm	179
Εικόνα 93 θέσεις φωτοληπιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης.	180
Εικόνα 94 Προσδιορισμού προσανατολισμού και σφαλμάτων. Τα τόξα παρουσιάζουν τον προσδιορισμό σφαλμάτων κατά Kappa	180
Εικόνα 95 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου	181
Εικόνα 96 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. χωρική διακριτικότητα 4,03cm. Πυκνότητα σημείων 617/m ²	182
Εικόνα 97 Μοντέλο επιφανείας θερμοκρασίας από δεδομένα αισθητήρα αέρα Pitot(TEMP), ΣμηΕΑ, Νιγρίτα Σερρών, 05/07/2015 14:00	183
Εικόνα 98 Μοντέλο επιφανείας μέγιστης θερμοκρασίας δεδομένων κλιματικού άτλαντα EMY, Ιούλιος	183
Εικόνα 99 Μοντέλο επιφανείας Βαρομετρικής πίεσης σε millibar Hg, από δεδομένα αισθητήρα βαρόμετρου (BARO), ΣμηΕΑ, Νιγρίτα Σερρών, 05/07/2015 14:00, MSL Alt. 274m, Ground Alt. 6-10m(Βαθμονόμηση Mastech)	184
Εικόνα 100 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη βλάστησης από τις μπάντες: Red, της Canon IXUS 160 και NIR της MaxMax Canon IXUS 160(καλλιέργειες Καλαμπόκι, Σόργο)	185
Εικόνα 101 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη LAI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	186
Εικόνα 102 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη NDVI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	186
Εικόνα 103 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη NDRE, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	187
Εικόνα 104 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη GNDVI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	187
Εικόνα 105 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη GRVI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	188
Εικόνα 106 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη SAVI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)	188

Εικόνα 107 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη EVI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου).....	189
Εικόνα 108 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη Total VI, απο αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου).....	189
Εικόνα 109 Υπολογισμός ψηφιδωτού αρχείου(raster) διεύθυνσης ροής υδάτων, πηγή: ψηφιακό μοντέλο εδάφους, GSD:10cm, αισθητήρας Canon IXUS 160	190
Εικόνα 110 Υπολογισμός διανυσματικών αρχείων, δικτύου ροής υδάτων.....	190
Εικόνα 111 Παράδειγμα υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) στη Λάρισα υποθέτοντας συνολική απώλεια αναπνοής ίση με 40%, με χωρική αποτύπωση (καλλιέργεια καλαμποκιού).....	193

Διάγραμμα 1 Η ΠΑΓΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ UAV –ΜΕΓΕΘΟΣ, ΤΑΣΕΙΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ. Πηγή : Press Releases, Investor Presentations, EURO UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036), Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis.....	36
Διάγραμμα 2 Μεριδία αγορας ανά κατηγορία UAV για το έτος 2014.....	48
Διάγραμμα 3 Εξέλιξη αγοράς ανα τύπο UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης	48
Διάγραμμα 4 Εξέλιξη αγοράς ανά κατηγορία UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης	49
Διάγραμμα 5 Εξέλιξη αγοράς ανά κατηγορία εφαρμογής UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης	51
Διάγραμμα 6 Μεριδία αγοράς ανά κατηγορία εφαρμογής UAV για το έτος 2014.(<i>Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020</i> , 2014).....	52
Διάγραμμα 7 Εξέλιξη αγοράς ανά φέροντα εξοπλισμό (Payloads) 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης	53
Διάγραμμα 8 Τα μερίδια αγορας UAV ανα φέροντα εξοπλισμό για το έτος 2014	54
Διάγραμμα 9 Μεριδία αγοράς UAV ανά γεωγραφική περιοχή για το ετος 2014. Πηγή Press Releases, Investor Presentations, EURO UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036)	56
Διάγραμμα 10 Συνολική εικόνα αγοράς UAV για το έτος 2014	57
Διάγραμμα 11 Διάγραμμα 15 Γενικές καμπύλες αντίδρασης AMAX σε θερμοκρασίες για διαφορετικές ομάδες καλλιεργειών (Versteeg & van Keulen, 1986). I = C3 plants in cold and temperate climates, II = C3 plants in hot climates, III = C4 plants in warm climates, IV = C4 plants in cold climates	66
Διάγραμμα 12 Η αυτοσυσχέτιση ως συνάρτηση της συσχέτισης και της απόστασης κατά Kriging	72
Διάγραμμα 13 Παράδειγμα προσαρμογής μοντέλου ημιβαριογράμματος.....	74
Διάγραμμα 14 Αποδοτικότητα απορρόφησης φάσματος της MAXMAX Canon Elph 120.....	89
Διάγραμμα 15 Αποδοτικότητα απορρόφησης φάσματος του αισθητήρα ακτινοβολίας και της πολυφασματικής κάμερας Parrot SEQUOIA αντίστοιχα.....	91
Διάγραμμα 16 Αγορά UAS, Πωληθήσες μονάδες και Τζίρος ανά κατηγορία.....	101
Διάγραμμα 17 Ανάλυση τιμών ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στο λογισμικό του Σταθμού Εδάφους (Mission Planner)	111
Διάγραμμα 18 Ροής συλλογής και επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων.....	155

Διάγραμμα 19 Πραγματικών ρυθμών αύξησης καλαμποκιού, βαμβακιού και σιταριού στη Θεσσαλία κάτω από σχεδόν άριστες συνθήκες ανάπτυξης, συγκρινόμενοι με ρυθμούς αύξησης 450 και 350 kg ha ⁻¹ d ⁻¹	158
Διάγραμμα 20 Απόκριση πλοήγησης Roll.....	191
Διάγραμμα 21 Λεπτομέρεια απόκρισης Roll.....	191
Διάγραμμα 22 Απόκριση πλοήγησης Pitch	191
Διάγραμμα 23 Ώσης και Κατανάλωσης.....	192
Διάγραμμα 24 Ταχύτητας αέρος και ταχύτητας εδάφους.....	192
Διάγραμμα 25 Συνολικής κατανάλωσης (mAh) και Volt στοιχείων συσσωρευτών Λιθίου Πολυμερούς(Li-po).....	192

Κατάλογος Συντομεύσεων

CAD	Computer Aided Design
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
CONOPS	Concept of Operations
COTS	Commercial of the Self
DROC	Drivers Restrains Opportunities Challenges
GIS	Geographic Information Systems
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphic Processing Unit
CSV	Comma Separated Values
IMU	Inertial measurement unit
INS	Inertial Navigation System
LOS	Line of Sight
MAV	Micro Air Vehicle
NMEA	National Marine Electronics Association standard
PC	Personal Computer
PID	Proportional/Integral/Derivative control method
RC	Remote Control
RTK	Real Time Kinematics
SME	Small Medium Enterprise
SWOT	Strength Weakness Opportunities Threats
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VC	Venture Capital
VTOL	Vertical Take off and Landing
WMS	Web Map Service
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΣμηΕΑ	Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους
ΦΜΚ	Φυτά Μεγάλης Καλλιέργειας

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τη δημιουργία μιας αυτόνομης εναέριας πλατφόρμας τηλεπισκόπησης, με κύριο εργαλείο ένα Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ), η οποία σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε με γνώμονα την γεωργία ακριβείας και κύριο στόχο τη δημιουργία χαρτών δεικτών βλάστησης και τον προσδιορισμό δυναμικών παραγωγής στην υπό μελέτη περιοχή, καθώς και τη δυνατότητα παροχής σημαντικού αριθμού πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και χαμηλό κόστος, σε σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνικές.

Το μη επανδρωμένο αεροσκάφος που φέρει αισθητήρες και κάμερες και πετώντας πάνω από την υπό μελέτη περιοχή, μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο, τα δεδομένα που έχει προγραμματιστεί να συλλέξει. Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι: δεδομένα βλάστησης-κάλυψης γης, γεωγραφικής θέσης, μετεωρολογικά δεδομένα, γεωμορφολογικά και κτηματολογικά δεδομένα, αεροφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες, καθώς και παράγωγα ποιοτικά δεδομένα τα οποία αφορούν στο είδος κάλυψης, την παραγωγή βιομάζας και άλλες παραμέτρους που έχουν εισαχθεί στην πλατφόρμα μέσω υπολογιστικών ρουτινών.

Η δημιουργία μιας αυτόνομης εναέριας πλατφόρμας τηλεπισκόπησης, με στόχο την δημιουργία χαρτών δεικτών βλάστησης και τον προσδιορισμό δυναμικών παραγωγής αγροτικών εκμεταλλεύσεων, προέκυψε αναλύοντας τα αποτελέσματα της λειτουργικής οικολογίας στα Ελληνικά αγροοικοσυστήματα, στα πλαίσια χωρικής αποτύπωσης, με την πραγματική αξιοποίηση της χρήσης των δυναμικών εργαλείων της πληροφορικής, όπως: τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) και τα έμπειρα συστήματα, τα παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης και τη δορυφορική τηλεπισκόπηση της διαστημικής επιστήμης, καθώς και των εργαλείων της γεωργικής μηχανικής, όπως οι αισθητήρες μέτρησης εδαφοκαλλιεργητικών παραμέτρων και οι αυτόνομες γεωργικές μηχανές.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση, που αποτελεί το δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής αναλύει την υπάρχουσα κατάσταση στην γεωργία ακριβείας, την οικονομική βιωσιμότητα της εφαρμογής ΣμηΕΑ και τις τεχνικές ανάλυσης, ανατρέχοντας ιστορικά στη χρήση και συνεισφορά των προτύπων - μοντέλων στην γεωργία και την οικολογία, ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύει τις πηγές πάνω στις οποίες στηρίχθηκε η έρευνα.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, η οποία αναλύεται εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο χωρίζεται σε τέσσερα στάδια, και εστιάζεται στα υπάρχοντα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ολοκληρωμένη γεωργική διαχείριση, τη χρήση τους, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο θα προσεγγίσουμε την ανάπτυξη, μετάφραση και ενσωμάτωση τους στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.). Στο πρώτο στάδιο αναλύεται η μετατροπή των μαθηματικών μοντέλων σε υπολογιστικές ρουτίνες Γ.Σ.Π. Στο δεύτερο στάδιο, διακρίνονται τα απαραίτητα τηλεπισκοπικά δεδομένα που πρέπει να συλλέξει η εναέρια πλατφόρμα. Στο τρίτο στάδιο, παρατίθενται αναλυτικά τα μέρη που αποτελείται η εναέρια πλατφόρμα, καθώς και η ανάπτυξη λογισμικού που απαιτείται για την πλήρη αυτονόμηση της και σύνδεση της με τα συστήματα Γ.Σ.Π. Στο τελευταίο στάδιο, αναπτύσσεται η πειραματική διαδικασία με την οποία επαληθεύονται τα αποτελέσματα που παράγει ολοκληρωμένα το σύστημα μας, με μετρήσεις πεδίου και έπειτα την αξιολόγηση τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των μοντέλων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, από τις αντίστοιχες μεταφράσεις του σε σύστημα Γ.Σ.Π., καθώς και συγκριτικά αποτελέσματα τηλεπισκόπησης, χρησιμοποιώντας υπόβαθρα δορυφορικών εικόνων από δορυφορικούς δέκτες, Ορθομωσαϊκά Public Domain (ΓΥΣ, Κτηματολόγιο ΑΕ, Υπουργείο Γεωργίας) και ορθομωσαϊκών που συλλέχτηκαν από την πλατφόρμα μας.

Η διεξοδική ανάλυση των αποτελεσμάτων, στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μέσω της σύγκρισης των διαφόρων μεθόδων με την μοντελοποίηση τους σε σύστημα Γ.Σ.Π., καθώς και της σύγκρισης της ποιότητας παράγωγων προϊόντων τηλεπισκόπησης από διάφορες πλατφόρμες.

Συμπερασματικά, το σύστημα εναέριας πλατφόρμας που περιγράφουμε, δημιουργήθηκε προκειμένου να συσχετίσει τις υφιστάμενες μεθόδους προσδιορισμού δυναμικών παραγωγής με χωρική πληροφορία, να συνδέσει τη διασφάλιση ποιότητας με την ολοκληρωμένη διαχείριση της παραγωγής, καθώς και να αξιοποιήσει τις νέες τεχνολογίες στη γεωργία ακριβείας παρέχοντας συνολική εικόνα της φαινολογικής εξέλιξης της καλλιέργειας και παρακολούθηση της μελλοντικής εξέλιξής της.

Διαπιστώθηκε ότι για πρώτη φορά η εφαρμογή της μεθόδου χωρικού υπολογισμού, παρέχει ταυτόχρονη και ταχύτατη επίλυση στο σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων

έναντι τη σημειακής επίλυσης. Το σημαντικότερο εύρημα της διατριβής είναι, ότι μπορούμε να εισάγουμε όσες παραμέτρους απαιτούνται, χωρίς να προβούμε σε δραματική απλοποίηση μιας φυσικής λειτουργίας για την ανάλυση και μοντελοποίηση της.

Summary

The present thesis deals with the creation of an autonomous aerial remote sensing platform, with main tool an Unmanned Aerial System the board (UAS), which was designed and used in perspective of precision agriculture and its main objective was the creation of maps of vegetation indices and determination of dynamic production in various study areas, as well as the ability to provide a significant amount of real-time information at low cost compared to existing techniques.

The unmanned aircraft carries sensors and cameras and flies over the study area and transmits in real time the data that is planned to collect. The collected data are: vegetation-land cover data, geographic location, meteorological data, geomorphological and cadastral data, aerial photographs and orthomosaics, as well as derived qualitative data related to the cover type, biomass production and other parameters introduced on the platform through computational routines.

The creation of an Unmanned Aerial Remote Sensing platform, with the aim of creating various vegetation indices to determine growth, development, yield crop production, arisen analyzing the results of the functional ecology in Greek agro-ecosystems, within the spatial mapping, the actual utilization of dynamic tools of IT, such as Geographic Information Systems (GIS) and expert systems, the Global Positioning Systems and Satellite remote sensing of space science, as well as the tools agriculture engineering such as soil measurement sensors and autonomous tractors.

The bibliographic review, which consists the second chapter of the thesis, analyzes the current situation in precision agriculture, the economic viability aspect of UAS usage and analytical techniques, the historically usage and contribution of model models in agriculture and ecology, while at the same time highlighting the sources on which research was based.

The methodology used, which is extensively analyzed in the third chapter, is divided into four stages, focusing on the existing models used in integrated agricultural management, their use, and the way we approach their development, translation and integration to Geographic Information Systems (GIS). The first step analyzes the conversion of mathematical models into GIS computational routines. In the second

stage, are distinguished all the necessary remote sensing data that the aerial platform has to collect. In the third stage, the parts that comprise the Aerial platform are presented in detail, as well as the development of the software required for its complete autonomy and connection to the GIS systems. At the final stage, we develop the experimental process, by which we verify the results that our system produces in full, with field measurements and then their evaluation.

The fourth chapter presents the results obtained by solving the models mentioned in the previous chapters, from the corresponding translations into a GIS system, as well as comparative results of remote sensing data using basemaps of satellite imagery, Public Domain Orthomosaics (Hellenic Military Geographical Services, Hellenic Cadastral Agency, Hellenic Ministry of Agriculture) with the Orthomosaics collected from our platform.

The detailed analysis of the results, in the fifth chapter, is done by comparing the different methods by modeling them into GIS, as well as the comparison of the quality of derived remote sensing products from different platforms.

In conclusion, the described aerial platform, created to correlate the existing methods for determining dynamic production with spatial information, to link quality assurance protocols with integrated production management and to utilize new technologies in precision agriculture by providing an overview of the phenological development of the crop and monitor its future development.

It was found that the application of the spatial calculation method for the first time provides a simultaneous and rapid solution to all the collected data versus the point solution. The most important finding of the thesis is that we can introduce as many parameters as needed without dramatically simplifying a physical function for its analysis and modeling.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

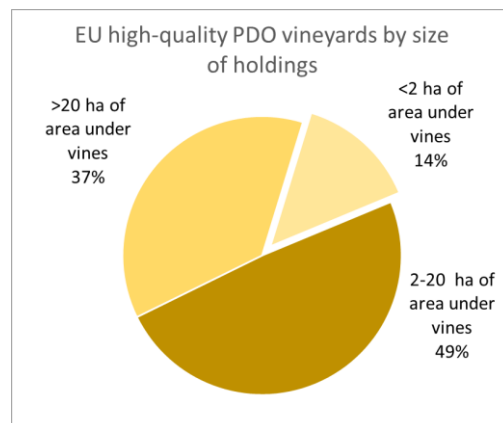
Η ολοκλήρωση των αγορών και η αύξηση του ανταγωνισμού στη γεωργία τα τελευταία χρόνια, έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για δραστική μείωση του κόστους της γεωργικής παραγωγής, ενώ τα οξυμένα προβλήματα του περιβάλλοντος έχουν κάνει επιτακτική τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση των επιβλαβών εισροών στον αγρό. Παράλληλα, η Πληροφορική έχει δημιουργήσει δύο νέα δυναμικά εργαλεία, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και τα Έμπειρα Συστήματα. Η Διαστημική Επιστήμη έκανε πραγματικότητα τα Παγκόσμια Συστήματα Εντοπισμού Θέσης και τη δορυφορική Τηλεπισκόπηση, ενώ η Γεωργική Μηχανική επεξεργάζεται Αισθητήρες μέτρησης εδαφοκαλλιεργητικών παραμέτρων και Αυτόνομες γεωργικές μηχανές.

1.1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Αναλύοντας διεξοδικά την βιβλιογραφική ανασκόπηση (βλ. κεφ.2), παρατηρήσαμε σημαντικούς περιορισμούς στην σύνδεση των παραπάνω τεχνολογιών και μεθόδων για την αξιοποίηση τους στην γεωργία ακριβείας.

Όπως θα παρατηρήσουμε στο κεφ. 2.5, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και ο φαινομενικά έντονος ρυθμός ανάπτυξης της αγοράς ΣμηΕΑ και η χρήση τους στην γεωργία ακριβείας, καθώς και της τεχνολογίας ωφέλιμων φορτίων (payloads), δεν αντικατοπτρίζεται στις αγορές του Νότου της Ε.Ε. οι οποίες αποτελούν τον πυρήνα της γεωργικής παραγωγής (*Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020*, 2014). Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί, αφού ο κατακερματισμός του κλήρου δεν επιτρέπει ανάλογες επενδύσεις τόσο από τους προμηθευτές για την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών υψηλής συγκέντρωσης γνώσεως για μικρή ομάδα καταναλωτών όσο και από τους καλλιεργητές.

Αξίζει σημειωθεί, ότι σήμερα σε επίπεδο Ε.Ε., οι μικροί αμπελοκαλλιεργητές (έως 20 εκτάρια) παράγουν το 63% του παραγόμενου οίνου. Σε επίπεδο εισροών (εξόδων) οι



καλλιεργητές αμπέλου με εκτάσεις μικρότερες των 20 εκταρίων έχουν ετήσια έξοδα/εκτάριο 4000€ με τζίρο 30.000€, ενώ οι καλλιεργητές με εκτάσεις 100 εκταρίων έχουν ετήσια έξοδα/εκτάριο 200€ με τζίρο 40.000€, λόγω της ενσωμάτωσης και πρόσβασης στην εκβιομηχάνιση της παραγωγής (European Commission portal).¹

Τα παραπάνω μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι πρέπει να μελετηθεί μια οικονομικά βιώσιμη λύση, με βάση τις ανάγκες της αγοράς, της γεωργικής παραγωγής και της δυνατότητας των παραγωγών για την εφαρμογή νέων τεχνολογιών όπως τα ΣμηΕΑ και οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης, όπου οι έτοιμες προτεινόμενες λύσεις από την αγορά ΣμηΕΑ δε καλύπτουν τις ανάγκες αυτές, ούτε τεχνικά ούτε οικονομικά.

Συνεχίζοντας την ανασκόπηση, παρατηρήσαμε πολλαπλούς περιορισμούς στην χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης από δορυφορικούς δέκτες και επανδρωμένες πτήσεις για την αξιοποίηση τους σε μελέτες γεωργίας ακριβείας και μελέτες ευφλεξιμότητας δασών όπου απαιτείται υψηλή χωρική διακριτικότητα (Ρετσιλίδου, 2017), προκύπτουν περιορισμοί από τον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Zormpas et al., 2017), χαρακτηρίζονται από σχετικά περιορισμένη περιοδικότητα που σε πολλές περιπτώσεις δεν ταυτίζεται με τα φαινολογικά στάδια της καλλιέργειας ή προκύπτει πρόβλημα νεφοσκεπής στα συλλεχθέντα δεδομένα (Stefanakis et al., 2013) και τέλος δεν ανταποκρίνονται κοστολογικά όπως προαναφέρθηκε στις απαιτήσεις των παραγωγών (Ozdogan et al., 2010).

Επιπρόσθετα, στην αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών, η απουσία ενιαίου φορέα διαχείρισης δασών (στην Ελλάδα), έχει σαν αποτέλεσμα την έλλειψη ουσιαστικών στοιχείων πληροφοριών και διάσπαση της προετοιμασίας/πρόληψης και αντιμετώπισης/καταστολής (Ντάφης, 1986) όπως:

- Ποιο είναι το είδος της βλάβης
- Ποια είναι η τοπογραφία της περιοχής
- Ύπαρξη δρομολογίων εισόδου και εξόδου στην περιοχή (βατότητα, εναλλακτική πρόσβαση κ.α.)
- Ύπαρξη σημείων υδροληψίας
- Περιεχόμενη υγρασία και εκτίμηση καύσιμης ύλης

¹ ec.europa.eu/agriculture/wine/statistics_en European Commission Agriculture and rural development Wine EU Wine Market Data Portal.

- Ποια είναι η ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου
- Ποιος είναι ο τύπος της πυρκαγιάς

Συμπληρώνοντας στον τομέα της καταστολής, συναντούμε τον αποκλεισμό της επιστημονικής γνώσης, της καινοτομίας και της τεχνολογίας από την επιχειρησιακή πράξη της διαχείρισης των πυρκαγιών, κάτι που συνδέεται με την έλλειψη ενός εθνικού επιστημονικού, συντονιστικού φορέα για τον σχεδιασμό πολιτικής και στρατηγικής για την προστασία των δασών από τις πυρκαγιές ο οποίος να συνδέεται με την επιχειρησιακή πράξη (Goldammer et al, 2019).

Το σημαντικότερο στοιχείο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ήταν η έλλειψη της συσχέτισης των υφιστάμενων μεθόδων προσδιορισμού δυναμικών παραγωγής με χωρική πληροφορία (Danalatos, 1993), καθώς και η απουσία σύνδεσης της διασφάλισης ποιότητας με την ολοκληρωμένη διαχείριση της παραγωγής (Amekawa, 2009). Επίσης, οι υφιστάμενες μέθοδοι και υλοποιήσεις για αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών στην γεωργία ακριβείας, επικεντρώνονται στον εντοπισμό της φαινολογικής εξέλιξης παθογενειών και άλλων παραγόντων των φυτών που έχουν ήδη συμβεί στην καλλιέργεια χωρίς να παρέχουν μια συνολική εικόνα αυτής και κυριότερα χωρίς να συνδέονται με την μελλοντική εξέλιξη της (Gevaert et al., 2015).

1.1.2 Σκοπός και στόχοι Διδακτορικής Διατριβής

Σκοπός του συγκεκριμένου εγχειρήματος, είναι η δημιουργία μιας ενιαίας ψηφιακής πλατφόρμας με την χρήση των παραπάνω τεχνολογιών, που θα παρέχει πληθώρα πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους για την υπό μελέτη περιοχή.

Το κύριο εργαλείο για την εξαγωγή και παραγωγή πληροφορίας είναι ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος που φέρει αισθητήρες και κάμερες και πετώντας πάνω από την υπό μελέτη περιοχή, μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο, τα δεδομένα που έχει προγραμματιστεί να συλλέξει. Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι: δεδομένα βλάστησης-κάλυψης γης, γεωγραφικής θέσης, μετεωρολογικά δεδομένα, γεωμορφολογικά και κτηματολογικά δεδομένα, αεροφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες καθώς και παράγωγα ποιοτικά δεδομένα που αφορούν το είδος κάλυψης, την παραγωγή βιομάζας και άλλες παραμέτρους που έχουν εισαχθεί στην πλατφόρμα μέσω υπολογιστικών ρουτινών.

Η πλατφόρμα έχει πλήθος εφαρμογών και χρησιμοποιείται ως εργαλείο σε πολλούς τομείς, με κυριότερους τους τομείς της γεωργίας ακριβείας, γεωγραφίας, γεωμορφολογίας, τοπογραφίας, αστικής γεωγραφίας, διαχείρισης περιβάλλοντος και της τηλεπισκόπησης.

Η πλατφόρμα στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε με γνώμονα την γεωργία ακριβείας. Το αεροσκάφος συλλέγει πληροφορίες πετώντας πάνω από την καλλιεργήσιμη έκταση και εξάγει σε πραγματικό χρόνο μέσω των υπολογιστικών ρουτινών, πληροφορίες για τον όγκο της σοδειάς, για τα στρεσαρισμένα φυτά, για την έλλειψη ή επάρκεια λίπανσης & νερού.

Οι αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένο το αεροσκάφος μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα για:

- Δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων επιφανειών (είτε φυσικών επιφανειών, είτε αστικών τοπίων)
- Ανάστροφη αναζήτηση κατάλληλων περιοχών για γεωργική εκμετάλλευση, από web based εφαρμογή με βάση το γένος και είδος του φυτού, σε πανελλήνια γεωβάση
- Άμεση συσχέτιση της καταγραφόμενης και της παραγόμενης πληροφορίας με το Εθνικό Κτηματολόγιο, τους Δασικούς χάρτες και τις διεθνείς συμβάσεις που αφορούν το περιβάλλον
- Δημιουργία φωτομωσαϊκού και ορθοφωτοχάρτη (αεροφωτογραφίες απαλλαγμένες από την στρέβλωση της φωτογραφικής μηχανής και του αναγλύφου)
- Καταγραφή υπάρχουσας κατάστασης σε αστικό και φυσικό περιβάλλον
- Προσομοίωση δυναμικών βλάστησης και υπολογισμού βιομάζας μέσω λογισμικού ανοιχτού κώδικα GIS, για γεωργικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

1.2 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

1.2.1 Οικονομική βιωσιμότητα εφαρμογής ΣμηΕΑ στην γεωργία ακριβείας

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο ΣμηΕΑ, αξιοποιώντας τον διεπιχειρησιακό σχεδιασμό (CONOPS), την ραγδαία προσφορά σε συστήματα Commercial Of The Self (COTS), όπως οι σύγχρονοι αισθητήρες υψηλών επιδόσεων χαμηλού κόστους και τις προσβάσιμες μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής όπως τα λογισμικά ανοιχτού κώδικα και οι μηχανές CAM όπως το 3D Printing, που να ανταποκρίνεται στις τάσεις της αγοράς και τις ανάγκες-δυνατότητες των παραγωγών.

1.2.2 Αντιμετώπιση έλλειψης χωρικής πληροφορίας

Ένας λόγος, που δεν γίνεται σύνδεση του προσδιορισμού των δυναμικών παραγωγής και άλλων γεωργικών παραμέτρων με χωρική πληροφορία, είναι η απουσία διαλειτουργικότητας της μεθόδου επίλυσης της και την έλλειψη χωρικής αποτύπωσης των παραμέτρων αυτής. Στην συνέχεια της διατριβής αναλύονται οι υπάρχοντες περιορισμοί, η μέθοδος μετατροπής των παραπάνω παραμέτρων σε μοντέλα επιφανείας καθώς και μέθοδοι εισαγωγής νέων πηγών δεδομένων που αυξάνουν το πλήθος και την αξιοπιστία τους.

1.2.3 Εμπλουτισμός παραμέτρων συσχέτισης κατά την διαδικασία μοντελοποίησης

Η ανάπτυξη των υπολογιστών, οδήγησε στην ανάπτυξη προτύπων/μοντέλων, με αποτέλεσμα την ταχύτερη υπολογιστική ισχύ που απαιτείται. Ωστόσο, η ανάλυση διεργασιών μιας φυσικής λειτουργίας, παραμένει εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία, με αποτέλεσμα την απλοποίηση της.

Στην παρούσα διατριβή, περιγράφεται, πως η ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών την τελευταία 5ετία καθώς και οι τεχνικές ανάλυσης/επεξεργασίας δεδομένων, μπορούν να συμβάλουν σε θέματα όπως η αντιμετώπιση ζητημάτων δεδομένων μεγάλου όγκου (big data issues) (GPU Processing) (Si and Zheng, 2010) και τον εμπλουτισμό των εισαχθέντων δεδομένων και εισαγωγή νέων παραμέτρων (Machine learning) (Rogan et al., 2008), ώστε να αποφευχθεί η δραματική απλοποίηση μιας φυσικής λειτουργίας.

1.2.4 Συμβολή της Διδακτορικής Διατριβής στην τρέχουσα έρευνα

Η επιδίωξη κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής είναι η προσέγγιση μιας νέας, ολοκληρωμένης μεθόδου παρακολούθησης καλλιεργειών, επιλύοντας ζητήματα που προκύπτουν από την επιμέρους εφαρμογή, των διαθέσιμων μεθόδων και τεχνολογιών. Παράλληλα, επιδιώκεται τα εξαχθέντα αποτελέσματα να είναι άμεσα αξιοποιήσιμα και οικονομικά προσβάσιμα από τον πρωτογενή τομέα .

τα προβλήματα όμως που ανακύπτουν και προέρχονται:

- Από την χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων από δορυφορικούς δέκτες και επανδρωμένες πτήσεις

- Από την έλλειψη χωρικής απόδοσης των αποτελεσμάτων των υφιστάμενων μοντέλων προτύπων
- Από την περιορισμένη δυνατότητα ερμηνείας της χαρτογραφικής ή μη απόδοσης των αποτελεσμάτων που παρέχεται από τις υφιστάμενες μεθόδους,
- Από το κόστος πρόσβασης, σε τεχνολογίες αιχμής όπως τα ΣμηΕΑ, οι αισθητήρες συλλογής δεδομένων και τα λογισμικά εμπορικού τύπου.

Επιλύονται στην προτεινόμενη μεθοδολογία, με την σχεδίαση και ανάπτυξη ενός ΣμηΕΑ, που να καλύπτει πλήρως τον ζητούμενο φάκελο πτήσης για τις ανάγκες τηλεπισκόπησης στην γεωργία, την μετατροπή υφιστάμενων μοντέλων/προτύπων σε χωρικά μοντέλα και σύνδεση τους με τα ΓΣΠ και την ανάπτυξη μιας ροής εργασιών που να επιταχύνει όλα τα στάδια από την συλλογή πρωτογενών δεδομένων μέχρι την παραγωγή εύκολα αξιοποιήσιμης πληροφορίας, δίνοντας στον παραγωγό μια συνολική εικόνα της παρούσας και μελλοντικής καλλιέργειας του.

1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται επισκόπηση της βιβλιογραφίας που θα στηρίξει την αναζήτηση και τις πηγές πάνω στις οποίες θα στηριχθεί η πρόταση. Επίσης, θα δούμε την υπάρχουσα κατάσταση στην γεωργία ακριβείας και τις τεχνικές ανάλυσης, καθώς και μια ιστορική αναδρομή στην χρήση και την συνεισφορά των προτύπων - μοντέλων στην γεωργία και την οικολογία.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται τα υπάρχοντα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ολοκληρωμένη γεωργική διαχείριση, τη χρήση τους, καθώς και η μέθοδος με τον οποία προσεγγίζουμε την ανάπτυξη, μετάφραση και ενσωμάτωση τους στα συστήματα GIS.

Επίσης, αναλύονται οι δυνατότητες μιας αυτόνομης τηλεπισκοπικής πλατφόρμας να παράγει δεδομένα αμφίδρομα συμβατά με το σύστημα μας. Τέλος, εφαρμόζεται το σύστημα μας σε πειράματα αγρού όπου θα ακολουθήσει η επαλήθευση και ανάπτυξη κώδικα ανατροφοδότησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, καταγράφονται τα αποτελέσματα που υπάρχουν έως τώρα από τα υπάρχοντα μοντέλα για επιλεγμένες περιοχές μελέτης, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την μετάφραση τους στα Γ.Σ.Π. και όλα τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για να εξάγουμε τις τιμές των αγνώστων που μας ζητούνται από την

εκάστοτε εξίσωση, όπως χάρτες της Γ.Υ.Σ., ορθογεωαναφερμένα υπόβαθρα(WMS), Κλιματικά δεδομένα, στοιχεία παραγωγής αγρού κ.α.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις υπάρχουσες μεθόδους με την μοντελοποίηση τους σε σύστημα Γ.Σ.Π., καθώς και η σύγκριση της ποιότητας των παράγωγων προϊόντων τηλεπισκόπησης από διάφορες πλατφόρμες.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση, από όπου φαίνεται η επίτευξη των στόχων που θέσαμε με τη δημιουργία του συστήματός μας και συγκεκριμένα:

- τη σύνδεση των υπάρχουσών τεχνολογιών της πληροφορικής και μεθόδων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, Έμπειρα συστήματα, Δορυφορική τηλεπισκόπηση, εργαλεία γεωργικής μηχανικής κτλ.)
- την χωρική αποτύπωση της υπό μελέτη περιοχής, η οποία υπερτερεί της σημειακής
- τη διεπιστημονική αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών στη γεωργία ακριβείας, ώστε να παρέχεται η συνολική εικόνα της καλλιέργειας και της μελλοντικής εξέλιξής της
- Το χαμηλό κόστος και η ευελιξία του συστήματός μας έναντι των υπάρχουσών μεθόδων

Τέλος αναφέρονται εφαρμογές της έρευνας μας, καθώς και προτάσεις για τη συνέχεια και επέκτασή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ & Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη στήριξη της γεωργίας ακριβείας (Pinter et al., 2003). Σε αμπελώνες, η τηλεπισκόπηση έχει συνδεθεί με την ποιότητα των παραγόμενων φρούτων και οίνου, καθώς και στην αποτελεσματική διαχείριση και παρακολούθηση της φυλλοστοιβάδας (Johnson et al., 2003; Raun et al., 2001). Επιπλέον, επειδή η γεωργία θεωρείται ένας τομέας υποδομής ζωτικής σημασίας στο πλαίσιο της εθνικής στρατηγικής για την Ευρωπαϊκή Ένωση σε θέματα εθνικής ασφάλειας, θα ζητώνται όλο και περισσότερο υπηρεσίες τηλεπισκόπησης και in situ παρακολούθηση σε υψηλής αξίας καλλιέργειες (Φ.Μ.Κ, βιομάζα, ελιά) (Herwitz et al., 2004), σε προσιτό κόστος (Stefanakis et al., 2013).

2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ ΦΥΤΩΝ & ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Η μελέτη σε επίπεδο φυσιολογίας, για τον σχηματισμό-ανάπτυξη των νέων ιστών στα φυτά, λαμβάνει υπόψη τις βιοχημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται, την δράση των φυτο-ορμονών και τον τρόπο μεταφοράς ουσιών στα φυτικά όργανα. Η μελέτη σε αγρονομικό επίπεδο, για την φυτική παραγωγή λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες διαχείρισης, όπως η άρδευση, η θρέψη, η αμειψισπορά και η κατεργασία του εδάφους, έχοντας ως βάση τις διεργασίες που μελετά η φυσιολογία. Στόχος της γεωργικής οικολογίας είναι να εξηγήσει τα αποτελέσματα της αγρονομικής έρευνας, που αφορούν τους παράγοντες διαχείρισης, στο επίπεδο της φυσιολογίας. Γνωρίζουμε τον ποιοτικό ρόλο που παίζουν για την αύξηση των φυτών το νερό, τα θρεπτικά στοιχεία, το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά η γνώση μας είναι περιορισμένη για την προσαρμοστικότητα, την μορφολογία, τις βιοχημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά την αύξηση τους. Η κατασκευή προτύπων (μοντέλων) βοηθά να συσχετισθούν υποθέσεις εργασίας που αφορούν αυτές τις διεργασίες και να ποσοτικοποιηθούν μεταβλητές που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Τα μοντέλα, απλοποιώντας όσο είναι δυνατόν την πραγματικότητα, καθιστούν εφικτή την μελέτη ενός τμήματός της (Goudriaan & Van Laar, 1994). Έτσι τα βιολογικά μοντέλα και τα μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών, ως απλοποιημένες εκφράσεις πολύπλοκων συστημάτων και μέρους της πραγματικότητας (De Wit, 1968,1993) επιτυγχάνουν μόνο για τις περιπτώσεις για τις οποίες σχεδιάστηκαν.

Τα υπάρχοντα μοντέλα, επικεντρώνονται στο ιεραρχικό επίπεδο όπου το νερό και τα θρεπτικά συστατικά είναι διαθέσιμα στην υπό μελέτη καλλιέργεια και δεν υπάρχουν ζιζάνια, εχθροί ή ασθένειες που μειώνουν το δυναμικό παραγωγής. Έτσι η αύξηση της καλλιέργειας εξαρτάται από ότι γίνεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως η αφομοίωση του διοξειδίου του άνθρακα, η ανάπτυξη της καλλιέργειας, η αναπνοή και ο καταμερισμός της ξηράς ουσίας στα φυτικά όργανα (Danalatos and Archontoulis, 2004).

Σε κάθε περίπτωση τα υφιστάμενα μοντέλα και διαδικασίες παρακολούθησης, δίνουν αποτελέσματα ποσοτικών μεταβλητών στο ακριβές σημείο της περιοχής μελέτης, χωρίς την χωρική αποτύπωση, που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την γεωργία και το περιβάλλον.

2.3 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), σε συνδυασμό με την τηλεπισκόπηση μας δίνουν την δυνατότητα να αξιοποιήσουμε την πληθώρα των μοντέλων (Almhab and Busu, 2008) και για πρώτη φορά να αντιστρέψουμε την έκβαση των αποτελεσμάτων, από σημειακό επίπεδο (focal) σε τοπικό επίπεδο (local) (Li et al., 2011) καθιστώντας έτσι, εφικτή την αμφίδρομη χρήση τους και εμφανίζοντας τα στο χώρο αλλά και το χρόνο. Η ταχύτητα στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων οφείλεται στο αυτοματισμό τροφοδότησης του συστήματος (GIS & μοντέλων), από την αυτόνομη πλατφόρμα τηλεπισκόπησης που βασίζεται σε Arduino (Yoshimoto et al., 2008) και τροφοδοτεί συνεχώς με τα απαραίτητα δεδομένα «καλιμπράροντας» ταυτόχρονα το μοντέλο με την μέθοδο της μάθησης (machine learning) (Gashler, 2011).

Ο Georges Matheron του Centre de Geostatistique στην πόλη Fointainebleau της Γαλλίας στην μελέτη του για τη «Θεωρία των Χωρικών Μεταβλητών» έδωσε την ονομασία «Kriging» προς τιμή του Νοτιο-Αφρικανού μηχανικού μεταλλείων Daniel Gerhardus Krige, ο οποίος χρησιμοποίησε αυτή τη μεθοδολογία τη δεκαετία του 1950 για τον υπολογισμό αποθεμάτων στα μεταλλεία της Νοτίου Αφρικής. Από όλες τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής το Kriging βασίζεται σε καλές θεωρητικές βάσεις και παρέχει ένα πειστικό τρόπο υπολογισμού των τιμών παρεμβολής που θεωρείται ότι είναι ο Βέλτιστος Γραμμικός Αμερόληπτος Εκτιμητής (Best Linear Unbiased Estimator) (www.geosciences.mines-paristech.fr). Η βασική ιδέα είναι να ανακαλύψουμε πρώτα τα χαρακτηριστικά της χωρικής κατανομής και μετά να εφαρμόσουμε αυτές τις ιδιότητες στον υπολογισμό των υπόλοιπων τιμών της επιφάνειας. Η σχετικά ακριβής πρόβλεψη

των τιμών είναι η σημαντικότερη ιδιότητα και λειτουργεί στο Kriging με ένα διαφορετικό στατιστικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες μεθόδους παρεμβολής. Έτσι, η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η απόσταση και η διεύθυνση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας αντανακλά μία χωρική συσχέτιση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει τη μεταβολή στην επιφάνεια. Εφαρμόζει μία μαθηματική συνάρτηση σε ένα ορισμένο αριθμό σημείων, ή όλων των σημείων εντός μίας ακτίνας ανίχνευσης και υπολογίζει την τιμή σε κάθε θέση. Στην περίπτωση μας θα εφαρμοσθεί στον εντοπισμό και υπολογισμό των τιμών των κλιματικών παραμέτρων που είναι άγνωστοι μας στα μοντέλα προσομοίωσης.

Η Γεωστατιστική χρησιμοποιείται κυρίως στις Γεωεπιστήμες, στον υπολογισμό αποθεμάτων των μεταλλευμάτων, στην εφαρμοσμένη γεωχημική έρευνα (υδρογεωχημεία, εδαφογεωχημεία, λιθογεωχημεία κ.ά.), καθώς και όπου απαιτείται επεξεργασία χωρομεταβλητών, π.χ., Γεωγραφία, Κλιματολογία κ.ά. (Ανδρουλακάκης et al., 2010)

Η διαδικασία του Kriging εντάσσεται στη Γεωστατιστική Δομική Ανάλυση των δεδομένων. Περιλαμβάνει μία στατιστική ανάλυση των δεδομένων, στη συνέχεια προσαρμόζει ένα μοντέλο βαριογράμματος, δημιουργεί την επιφάνεια και προαιρετικά εξερευνά μία επιφάνεια μεταβολών.

Εκτός από την παραγωγή μίας προβλέψιμης επιφάνειας, έχει τη δυνατότητα να δώσει εκτιμήσεις του σφάλματος πρόβλεψης των τιμών της υπό μελέτης μεταβλητής σε κάθε θέση δειγματοληψίας. Έτσι έχουμε πληροφόρηση για τη σχετική ακρίβεια των προβλέψεων.

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ(ΣμηΕΑ)

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη αρχικά κατασκευάστηκαν για εξυπηρέτηση στρατιωτικών αναγκών. Μη επανδρωμένα αεροσκάφη χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά ως αναγνωριστικά κατά τη διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου. Μετά από αυτόν, συνέχισαν να χρησιμοποιούνται από τις ένοπλες δυνάμεις, κυρίως ως εναέριοι στόχοι κατά τη διάρκεια στρατιωτικών ασκήσεων, από όπου πιθανά πήραν και το όνομά τους (Drones = κηφήνες), το οποίο σαν όρος χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα από το ευρύ κοινό, αν και έχει συναντήσει την έντονη αντίθεση των επαγγελματιών της

αεροπλοΐας και των διαφόρων ρυθμιστικών αρχών, οι οποίες και έχουν καθιερώσει διεθνώς τον όρο UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

Στη συνέχεια, και με την πρόοδο της τεχνολογίας άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες στρατιωτικού τύπου αποστολές (αναγνωριστικές, πληροφοριακές, εντοπισμού στόχων κλπ.), ενώ ταυτόχρονα αγκαλιάστηκαν από τους διάφορους ανά τον κόσμο πρωτοπόρους αερομοντελιστές ως χόμπι και ως παιχνίδι.

Μια ξαφνική ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας και των ευζωνικών δικτύων και υπηρεσιών, σε συνδυασμό με την διαδεδομένη πλέον συστηματική αξιοποίησή τους από τις ένοπλες δυνάμεις, έκαναν την εξ αποστάσεως επιχειρησιακή δυνατότητα των UAVs ακόμα πιο ρεαλιστική.

Η ζήτηση των UAVs αυξήθηκε θεαματικά κατά τη διάρκεια των πολέμων στο Ιράκ (2003) και Αφγανιστάν (2001) όπου χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον στον εντοπισμό και την εξουδετέρωση στόχων που κρύβονταν ανάμεσα στον άμαχο πληθυσμό.

2.4.1 Drones και Unmanned Aircraft Systems (UAS) – Εισαγωγικές έννοιες

Τα Drones ή UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) ή RPS (Remotely Piloted Systems) είναι τα κάθε είδους ιπτάμενα, μη επανδρωμένα οχήματα (χωρίς πιλότο), τα οποία μπορούν να κινούνται αυτόνομα, τηλεκατευθυνόμενα ή προγραμματισμένα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα σχετική νομοθεσία των ΗΠΑ, ως UAVs ορίζονται «αεροσκάφη χωρίς τη δυνατότητα άμεσης ανθρώπινης παρέμβασης από το εσωτερικό τους ή με δυνατότητα διαρκούς πτήσης σε σταθερή οπτική επαφή με το πρόσωπο που τα χειρίζεται εκ του μακρόθεν».

Τα οχήματα αυτά έχουν την μορφή μικρού αεροπλάνου ή ελικοπτέρου, με έναν ή περισσότερους κινητήρες και έλικες, συντονισμένους για πλήρως ελεγχόμενη πτήση από ειδικό πρόγραμμα H/Y ή χειριστήριο εδάφους.

Τα ΣμηEA Διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- Fixed Wings με σταθερά φτερά, όπως τα αεροπλάνα.

Διαθέτουν απλούστερη δομή, πιο αποτελεσματική αεροδυναμική και επιτρέπουν υψηλότερες ταχύτητες και πτήσεις μεγαλύτερης διάρκειας, καθιστώντας τα ιδανικά για επόπτευση μεγάλων περιοχών.

- Rotary Wings ή VTOL (Vertical Take Off / Landing) με έλικες και δυνατότητα κάθετης απογείωσης/προσγείωσης, όπως τα ελικόπτερα.

Είναι πιο περίπλοκα σε μηχανική δομή και έχουν μικρότερη εμβέλεια και χρόνο πτήσης. Ωστόσο, συγκρινόμενα με τα Fixed Wings, έχουν το πλεονέκτημα του ότι δεν απαιτούν διαδρόμους, είναι πιο ευέλικτα στον αέρα και μπορούν να αιωρούνται στο ίδιο μέρος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για τον προσδιορισμό του αριθμού των κινητήρων ή ελίκων χρησιμοποιείται ο όρος Multicopter ή Multirotor και διαχωρίζονται σε Quadcopter, Hexacopter, Octacopter κ.ο.κ

2.4.2 Drones – Η γέννηση μιας Αγοράς

Η προ 2010 Ιστορία των Drones, πάντως, προσομοιάζει με εκείνη της πρώιμης φάσης των υπολογιστών. Ήταν δυσκίνητα, δαπανηρά, απαιτούσαν ειδική εκπαίδευση και δεξιότητες και περιορίζονταν κυρίως σε κυβερνητικές υπηρεσίες, στις Ένοπλες Δυνάμεις, και την Ακαδημαϊκή κοινότητα. Η πολιτική (μη στρατιωτική) αγορά των Drones είχε σαφέστατα κοινά χαρακτηριστικά με την αγορά PCs στη δεκαετία του '70.

Επρόκειτο στην ουσία για μια αγορά για χομπίστες, χωρίς παγκοσμιοποιημένο σχέδιο και έλεγχο από παγκόσμιας εμβέλειας επιχειρηματικούς ομίλους. Ως προϊόντα πωλούνταν σε περιορισμένες ποσότητες κυρίως σε μορφή electronic kits, και ή όποια προϊόντική ανάπτυξη τους περιοριζόταν σε ιδιώτες και μικρές, ανεξάρτητες ομάδες.

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η αυξανόμενη ζήτηση για προϊόντα κινητής τηλεφωνίας και smartphones, οδηγούν στην ανάπτυξη συσσωρευτών ενέργειας, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αισθητήρων, GPS και υψηλών επιδόσεων, μικρού μεγέθους και μικρής κατανάλωσης επεξεργαστών. Το 2003, ομάδες ανάπτυξης ανοιχτού υλικό-λογισμικού (Pararazzi/ENAC, France), αντελήφθησαν ότι τα μέρη ενός smartphone, έχουν όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα για αυτόνομη πλοήγηση, σε χαμηλό κόστος και βάρος. Το 2005, κυκλοφορούν στο εμπόριο, οι πρώτες έτοιμες για χρήση πλακέτες ανάπτυξης ρομποτικής (Arduino/IDII, Italy). Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω καινοτομιών και η προσέγγιση δεκάδων χιλιάδων χρηστών σε φόρα του διαδικτύου για ανάπτυξη μη

Επανδρωμένων συστημάτων κάθε είδους, οδήγησε το 2009 στην δημιουργία της διαδικτυακής κοινότητας ανάπτυξης Ardupilot.

Όσον αφορά το ευρύ καταναλωτικό κοινό, η μεγάλη έκρηξη στην αγορά συνέβη το 2010, όταν η Γαλλική εταιρεία Parrot λανσάρισε το «A.R. Drone» το πρώτο smartphone-controlled consumer drone και ακολούθησε η Κινεζική DJI το 2012 με το «Phantom», το οποίο διέθετε ενσωματωμένη κάμερα και GPS. Έκτοτε οι δύο αυτές εταιρείες έχουν κυριαρχήσει στην καταναλωτική αγορά (Consumer UAV Market), έχοντας πουλήσει μέχρι σήμερα πάνω από 1 εκατομμύριο Drones.

2.4.3 Από τα Drones στα UAS – Η έκρηξη.

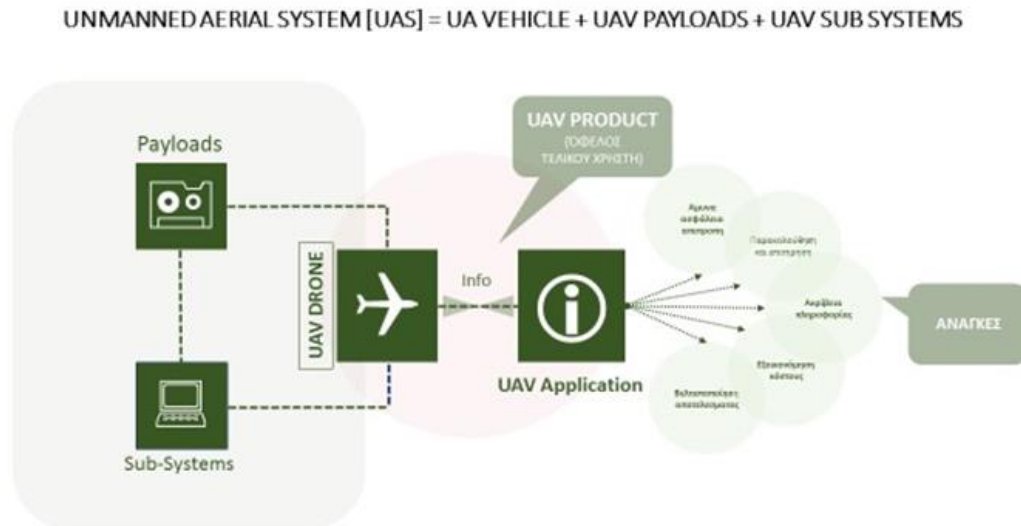
Το 2015, υπήρξε μια απότομα μεγάλη αύξηση του ρυθμού των νεοεισερχόμενων επιχειρήσεων στην UAV αγορά, ενώ οι επενδύσεις επιχειρηματικών κεφαλαίων (Venture Capital) σε κατασκευή UAV και σε ηλεκτρονικές εφαρμογές προγραμμάτων UAV υπερ-τριπλασιάστηκαν από το 2014.

Οι UAV εφαρμογές συνεχίζουν να αυξάνονται με όλο και πιο περίπλοκες λειτουργίες και ευρύτερο φάσμα εφαρμογών σε διάφορα τμήματα της αγοράς. Οι τιμές εξακολουθούν να πέφτουν και τα λογισμικά ανοικτού κώδικα για τον έλεγχο πτήσης, βελτιώνονται ολοένα και περισσότερο σε σταθερότητα και αξιοπιστία, ενώ αναμένεται η δραστηριοποίηση ακόμη περισσότερων χαμηλού κόστους καταναλωτικών drones κατασκευαστών κυρίως από Κίνα.

Σήμερα τα UAVs έχουν τη δυνατότητα να εξοπλίζονται με διάφορα όργανα προηγμένης τεχνολογίας (UAV Payloads), όπως αισθητήρες διαφόρων τύπων, κάμερες, ραντάρ, εξελιγμένα συστήματα πλοήγησης κλπ., τα οποία τους προσδίδουν τεράστιες δυνατότητες συλλογής δεδομένων με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια και σε σύντομο χρόνο.

Αυτό σε συνδυασμό με την εκρηκτική ανάπτυξη των Unmanned Technologies και των διαφόρων υποσυστημάτων UAV Sub-systems (Data Links, Software, Ground Control Systems) οδήγησαν σταδιακά στην μετατροπή τους από απλά τηλεχειριζόμενα μοντέλα αεροσκαφών σε δυναμικά συστήματα επικοινωνίας, έρευνας, εντοπισμού, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, φέρνοντας στο προσκήνιο την έννοια των UAS (Unmanned Aircraft Systems) και την ολοένα και μεγαλύτερη αξιοποίησή τους, εκτός των

στρατιωτικών, σε αστικές – πολιτικές, εμπορικές, βιομηχανικές, ερευνητικές, εφαρμογές.



Σχήμα 1 Η έννοια του ΣμΕΑ/UAS (Unmanned Aircraft Systems) & οι εφαρμογές τους (UAV Applications)

Όπως φαίνεται από το σχήμα 1, Ένα UAS περιλαμβάνει:

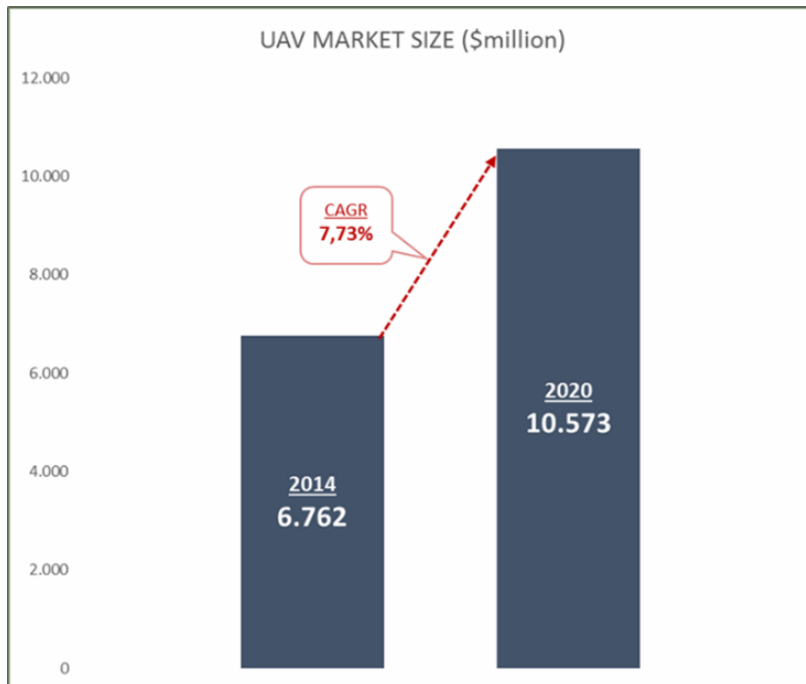
- a) το Drone ως μέσο, ως όχημα για μια μη επανδρωμένη πτήση - αποστολή,
- b) τον φέροντα εξοπλισμό του (UAV Payload) ως εργαλείο «λήψης» της πληροφορίας
- c) όλα τα επίγεια υποσυστήματα (Sub systems) ελέγχου, επικοινωνίας και επεξεργασίας - αποκωδικοποίησης των δεδομένων.

Μια UAV εφαρμογή, είναι η συντονισμένη χρήση των παραπάνω για την επίτευξη μιας αποστολής. Είναι το προϊόν που ικανοποιεί ανάγκες ταχύτητας και μεγαλύτερης ακρίβειας στη πληροφορία, βελτιστοποίηση της ποιότητάς της, μείωση του κόστους, εκμηδένιση της επικινδυνότητας κατά την κτήση της και δυνατότητα λήψης δεδομένων που με τις συμβατικές μεθόδους θα ήταν πρακτικά αδύνατη.

2.5 ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

2.5.1 Η Αγορά ΣμηΕΑ (μια παγκόσμια ματιά, με τοπικό ενδιαφέρον)

2.5.1.a. Η παγκόσμια αγορά UAVs – Μέγεθος, τάσεις & προοπτικές



Διάγραμμα 1 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ UAV –ΜΕΓΕΘΟΣ, ΤΑΣΕΙΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ. Πηγή : Press Releases, Investor Presentations, EURO UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036), Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

Το μέγεθος σε αξία της παγκόσμιας αγοράς UAV υπολογίζεται σε \$6.762 εκ. το 2014 και αναμένεται να φτάσει περίπου τα \$10.573 εκ. το 2020, καταγράφοντας ένα ρυθμό ανάπτυξης 7,73% από το 2014 έως το 2020.

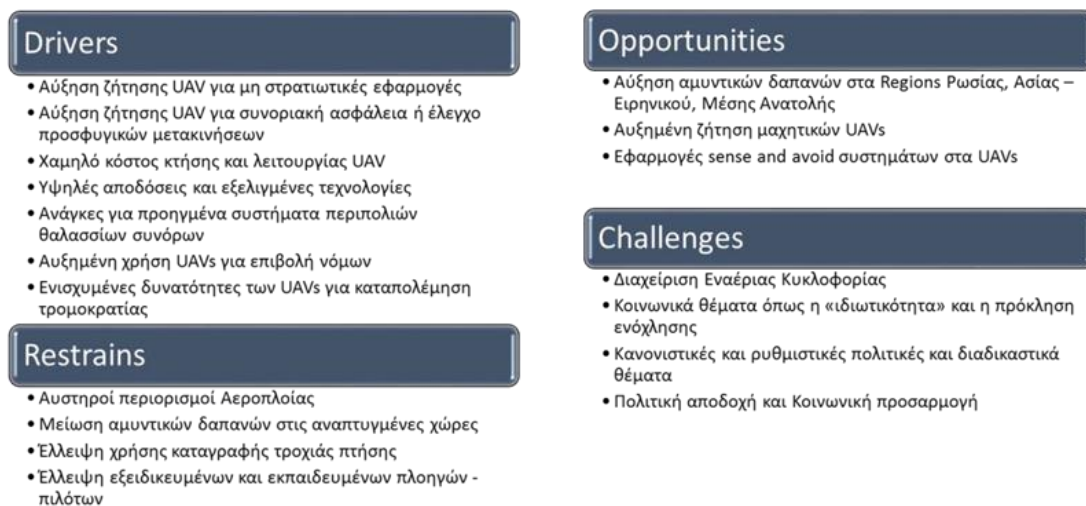
Από τα παραπάνω μεγέθη, η αξία της παγκόσμιας αγοράς UAV στη χρήση γεωργικών εφαρμογών υπολογίζεται σε \$442,39 εκ. το 2014 με πρόβλεψη να φτάσει τα \$845,43 εκ. το 2020, καταγράφοντας ένα ρυθμό ανάπτυξης 11,40% από το 2014 έως το 2020 (*Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020*, 2014).

Αναλύοντας τις αιτίες που οδηγούν τον ρυθμό ανάπτυξης στο παραπάνω σχήμα μπορούμε να αποδώσουμε την αυξανόμενη τάση στους εξής παράγοντες :

- Οι μειωμένοι προϋπολογισμοί αμυντικών δαπανών στις χώρες της Β. Αμερικής και της Ευρώπης τα τελευταία χρόνια, ενδέχεται να είχαν αντίκτυπο στην ανάπτυξη της αγοράς μέχρι το 2018.

- Οι αυστηροί κανονισμοί αεροπλοΐας (ή αλλού, η ανυπαρξία συγκεκριμένου κανονιστικού πλαισίου) καθώς και η έλλειψη σχετικού ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, θεωρούνται γενικά παράγοντες που μπορούν να αναχαιτίσουν την ανάπτυξη της UAV αγοράς.
- Από την άλλη, υπάρχει ένα τεράστιο πεδίο για έρευνα και ανάπτυξη UAVs στην κατεύθυνση αύξησης της επιχειρησιακής – λειτουργικής αποδοτικότητάς τους, αλλά και της παροχής πλήρους αυτονομίας τους.
- Επενδύσεις γίνονται από τις αναπτυσσόμενες περιοχές για υιοθέτηση συστημάτων αυτόματου ελέγχου για μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Υπάρχουν R&D προγράμματα σχετικά με την ανάπτυξη VTOLs (Vertical Take-off and Landing) δυνατοτήτων σε διάφορα UAVs στρατιωτικής χρήσης.
- Επίσης, η αγορά ωφέλιμων φορτίων (Payloads) (Unmanned Technologies για εξοπλισμό UAVs), υπόκειται σε πολλές διεργασίες έρευνας και ανάπτυξης για την κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών των τελικών χρηστών.

2.5.1.b Η δυναμική της αγοράς - DROC Analysis.



ΣΧΗΜΑ 1 Η δυναμική της αγοράς. DROC Analysis

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι προηγμένες τεχνολογίες οδηγούν την αγορά UAV με την αύξηση του ρόλου των εμπορικών εφαρμογών.

2.5.1.c. Ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας Μη επανδρωμένων Συστημάτων



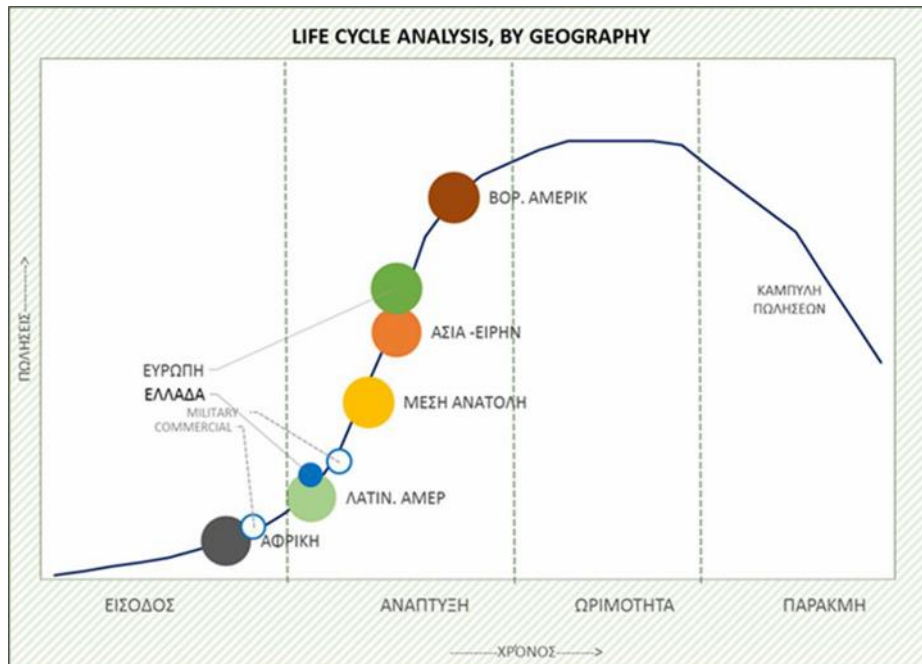
ΣΧΗΜΑ 2 Το ανταγωνιστικό περιβάλλον (Competitive Environment Analysis). Πηγή: Annual Reports, Press Releases, Investor Presentations, U.S. Unmanned Aerial Systems, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis.

Τα χαμηλά απαιτούμενα κεφάλαια κατασκευής και χρήσης ΜΕΑ έχουν οδηγήσει σε ένα μεγάλο αριθμό επενδυτών-επιχειρηματιών στις εμπορικές εφαρμογές της αγοράς ΜΕΑ.

Αυτό δεν συμβαίνει ακόμα στην Ελλάδα, η οποία στην ουσία βρίσκεται στη φάση εισόδου. Επίσης διαφαίνεται χαμηλός κίνδυνος από υποκατάστατα προϊόντα. Ως εκ τούτου το μικρό κόστος μεταστροφής από τον ένα αγοραστή στον άλλον, δίνει την δυνατότητα σε νέους κατασκευαστές να μπορούν να παράγουν εύκολα παρόμοια προϊόντα με αποτέλεσμα την αύξηση παικτών στην αγορά κατ' επέκταση μείωση της διαπραγματευτικής δύναμης προμηθευτών.

Όπως είναι φυσικό νέα προϊόντα υψηλής διαφοροποίησης με ενσωματωμένη τεχνολογική καινοτομία αυξάνουν την διαπραγματευτική δυνατότητα των προμηθευτών. Στον αντίποδα, παρουσιάζεται χαμηλός έως μέτριος ο αντίκτυπος της διαπραγματευτικής δύναμης των αγοραστών και αυτή η διαπραγματευτική δύναμη των αγοραστών, μπορεί να μειωθεί ακόμα πιο πολύ, αν τα προϊόντα των προμηθευτών είναι διαφοροποιημένα και τεχνολογικά ανώτερα των υπαρχόντων στην αγορά.

2.5.1.d Ανάλυση κύκλου ζωής - Life Cycle Analysis (παγκόσμια, ευρωπαϊκή & ελληνική αγορά).



ΣΧΗΜΑ 3 life cycle analysis: η παγκόσμια, η ευρωπαϊκή και η ελληνική αγορά

Όπως φάνηκε ήδη από το σχήμα 1, η παγκόσμια αγορά βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης. Αναλυτικότερα, η αγορά της Βορείου Αμερικής προσεγγίζει στα επόμενα χρόνια την ωριμότητά της και κατέχει την μερίδα του λέοντος στη συνολική αγορά UAV (>66%). Εδώ δραστηριοποιούνται οι σημαντικότερες επιχειρήσεις του κλάδου.

Η αγορά, έχει άμεση ανάγκη επέκτασης στις ταχέως αναπτυσσόμενες αγορές που βρίσκονται στη φάση εισόδου ή που περνούν στην φάση ανάπτυξης (με οχήματα μικρές δυναμικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται εκεί). Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3. Ασία-Ειρηνικός και Λατινική Αμερική βρίσκονται σε ραγδαία άνοδο στην καμπύλη.

Συνδυάζοντας όμως τις εφαρμογές υπό ανάπτυξη των Small UAVs αναμένεται να δημιουργήσει μεγάλες αγορές στην Αφρική και σε άλλες περιοχές που βρίσκονται στη φάση της εισόδου (όπως και η Ελλάδα).

Όσον αφορά την χρήση τους στην γεωργία ακριβείας, η Ευρώπη είναι σε φάση ανάπτυξης. Στο άμεσο μέλλον αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη αύξηση στην έρευνα και ανάπτυξη, στις προμήθειες και στην ανάπτυξη παροχής υπηρεσιών και εφαρμογών. Η Ελλάδα εκτιμάται πως βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, (υπολειπόμενη πάντως

κατά πολύ του μέσου βαθμού ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής αγοράς), κυρίως εξεταζόμενη με βάση τις στρατιωτικές εφαρμογές και τις εφαρμογές εσωτερικής ασφάλειας όπου εμφανίζεται αυξημένο ενδιαφέρον και κινητικότητα.

Δεν μπορούμε να πούμε το ίδιο και για τις εμπορικές εφαρμογές, όπου κινείται μάλλον αργά προς την φάση εισόδου στην αγορά.

Αυτό συνάγεται από τον βαθμό γνώσης και εξοικείωσης με τις UAS εφαρμογές και τα οφέλη τους, από το επίπεδο του ανταγωνισμού (ανύπαρκτος), από τις εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο κλάδο, τη χαμηλή διείσδυση και τους χαμηλούς προβλεπόμενους ρυθμούς ανάπτυξης, που την κατατάσσουν στα υπόλοιπα της Ευρώπης (0,2% μερίδιο και 4,3% CAGR όλα μαζί).

Ο Στρατηγικός αντίκτυπος στην εστίαση της διατριβής:

SWOT Analysis:

- Δυνατά Σημεία: Ευκαιρίες και προϋποθέσεις ηγεσίας στην νέα αγορά
- Αδύνατα σημεία: Επιφόρτιση επενδύσεων για λογαριασμό όλης της υπό διαμόρφωσης αγοράς (στρατηγική ηγεσίας).
- Απειλές: Πιθανή εισαγωγή νέων (διεθνών) παικτών με υπεροπλία πόρων – τεχνολογίας στη νέα αγορά που ανοίγει.
- Ευκαιρίες: Πιθανή συνεργασία με νέους δυνατούς παίκτες που αναζητούν SMEs για είσοδο σε νέες αγορές – Αυτούς τους εισάγει σε νέα αγορά, εσένα σου παρέχει τη δυνατότητα διαφοροποίησης μέσω προηγμένης τεχνολογίας και τη δυνατότητα να γίνεις σημαντικός παίκτης στην ευρύτερη Ευρωπαϊκή Αγορά.

2.5.1.e *Τυπολογία των Επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον κλάδο και η σύνδεση του με την ακαδημαϊκή ανάπτυξη των εφαρμογών ΜΕΑ.*

1. Prominent Companies (PCs)

Μεγάλοι, εδραιωμένοι και οικονομικά σταθεροί όμιλοι οι οποίοι επιχειρούν σε αυτή την αγορά εδώ και αρκετά χρόνια, με διαφοροποιημένο προϊόντικό χαρτοφυλάκιο, δικές τους ανεπτυγμένες τεχνολογίες και ισχυρά δίκτυα διανομής παγκοσμίως και γραφεία σε στρατηγικής σημασίας περιοχές.

Στην UAV αγορά υπάρχουν μόνο λίγες τέτοιου είδους εταιρίες, που επιχειρούν στον αμυντικό τομέα, καθώς απαιτούνται μεγάλες οικονομίες κλίμακας για κερδοφορία.

Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται εταιρίες όπως: η General Atomics Aeronautical Systems Inc. (US), η Northrop Grumman Corporation (US), BAE Systems Plc. (UK), Israel Aerospace Industries LTD (Israel) και άλλες, οι οποίες έχουν δεσπόζουσα θέση παρέχοντας τεχνολογική υποστήριξη, συντήρηση hardware & software, logistics και Ground Control.

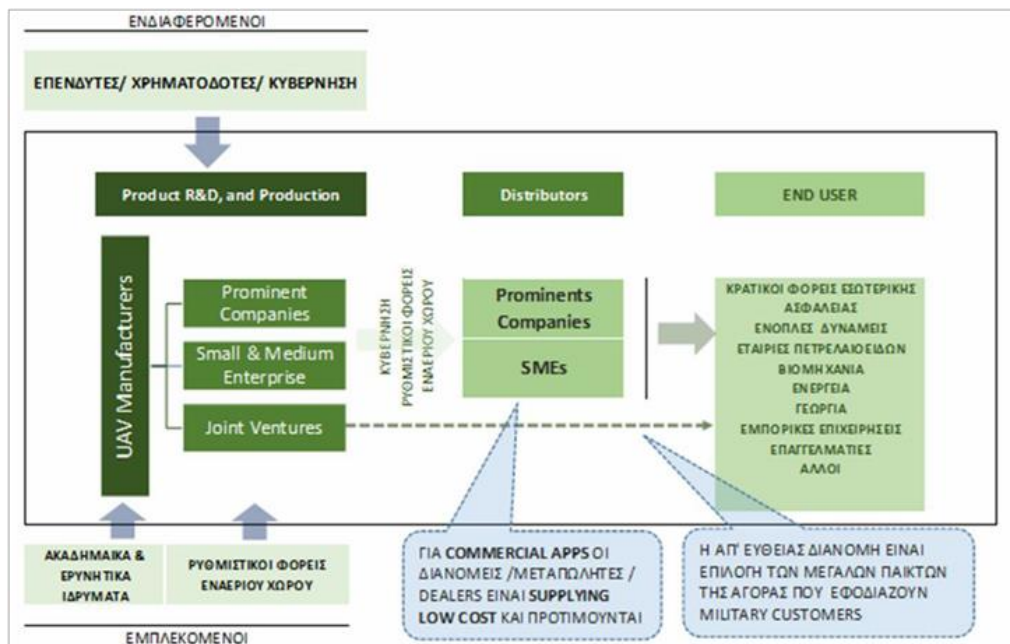
2. Small & Medium Enterprises (SMEs)

Είναι εταιρίες που ειδικεύονται περισσότερο στον τομέα των UAV αστικών και εμπορικών εφαρμογών, με περιορισμένο εύρος προϊόντικού χαρτοφυλακίου με λιγότερη οικονομική δύναμη και περιορισμένα δίκτυα συγκρινόμενες με τις PCs.

3. Joint Ventures (Prominent & SMEs)

Κάποιες από αυτές τις SMEs στρατηγικά προχωρούν σε συνεργασίες ή Joint Ventures με τις Prominent, εξασφαλίζοντας για τις ίδιες την διεύρυνση των δικτύων διανομής τους, την πρόσβαση σε νέες τεχνολογίες και το απαραίτητο τεχνικό, οργανωτικό και επιχειρησιακό Know How, και την δυνατότητα προσέγγισης και διείσδυση σε νέες αγορές για τους Prominent συνεργάτες τους.

2.5.1.f Ανάλυση εφοδιαστικής αλυσίδας - Supply Chain Analysis



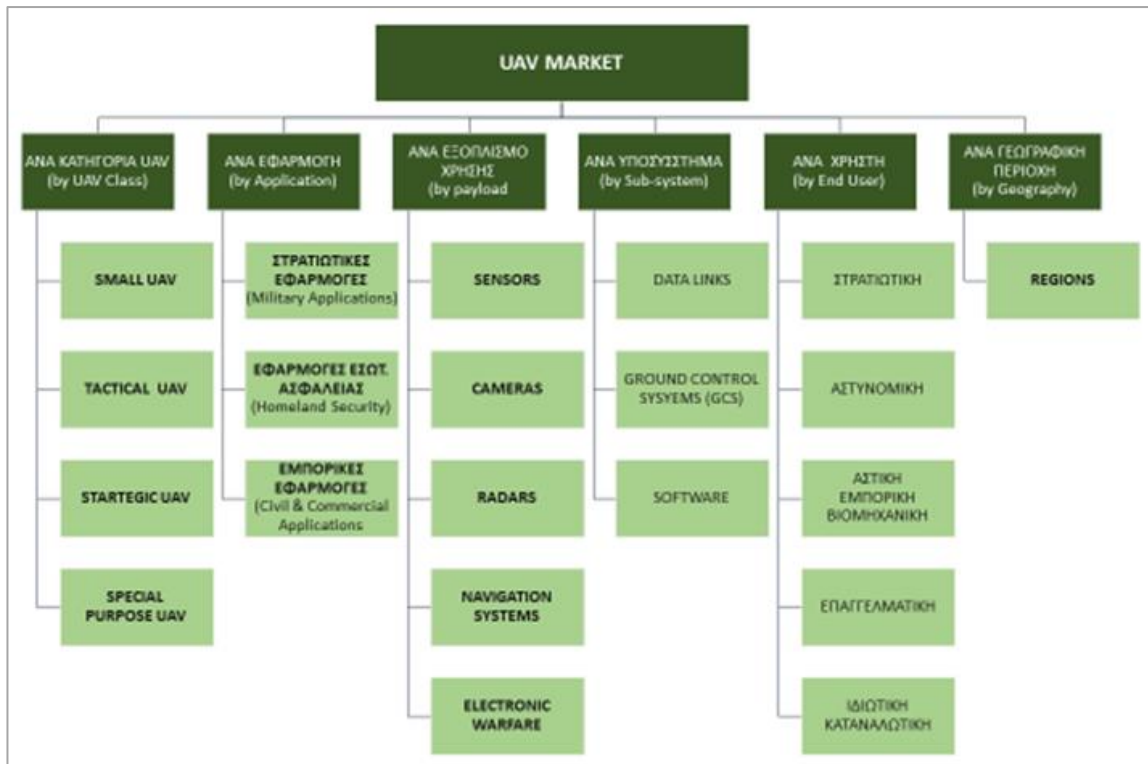
ΣΧΗΜΑ 4 Η αγορά UAV – supply chain analysis (ανάλυση εφοδιαστικής αλυσίδας). Πηγή : Annual Reports, SEC Filings, Press Releases, Investor Presentations, UAS Roadmap (2009-2037), Expert Interviews and MarketsandMarkets Analysis.

Η απ' ευθείας (χωρίς ενδιάμεσους) διανομή, είναι βασικά επιλογή των μεγάλων παικτών της αγοράς που εφοδιάζουν πελάτες στρατιωτικών εφαρμογών. Για τις εμπορικές εφαρμογές, προτιμώνται οι διανομείς και μεταπωλητές, καθώς θεωρούνται προμηθευτές χαμηλού κόστους και οι διαδικασίες μεταπώλησης είναι πιο ευέλικτες σε σχέση με τις διαδικασίες προμήθειας των ερευνητικών ιδρυμάτων.

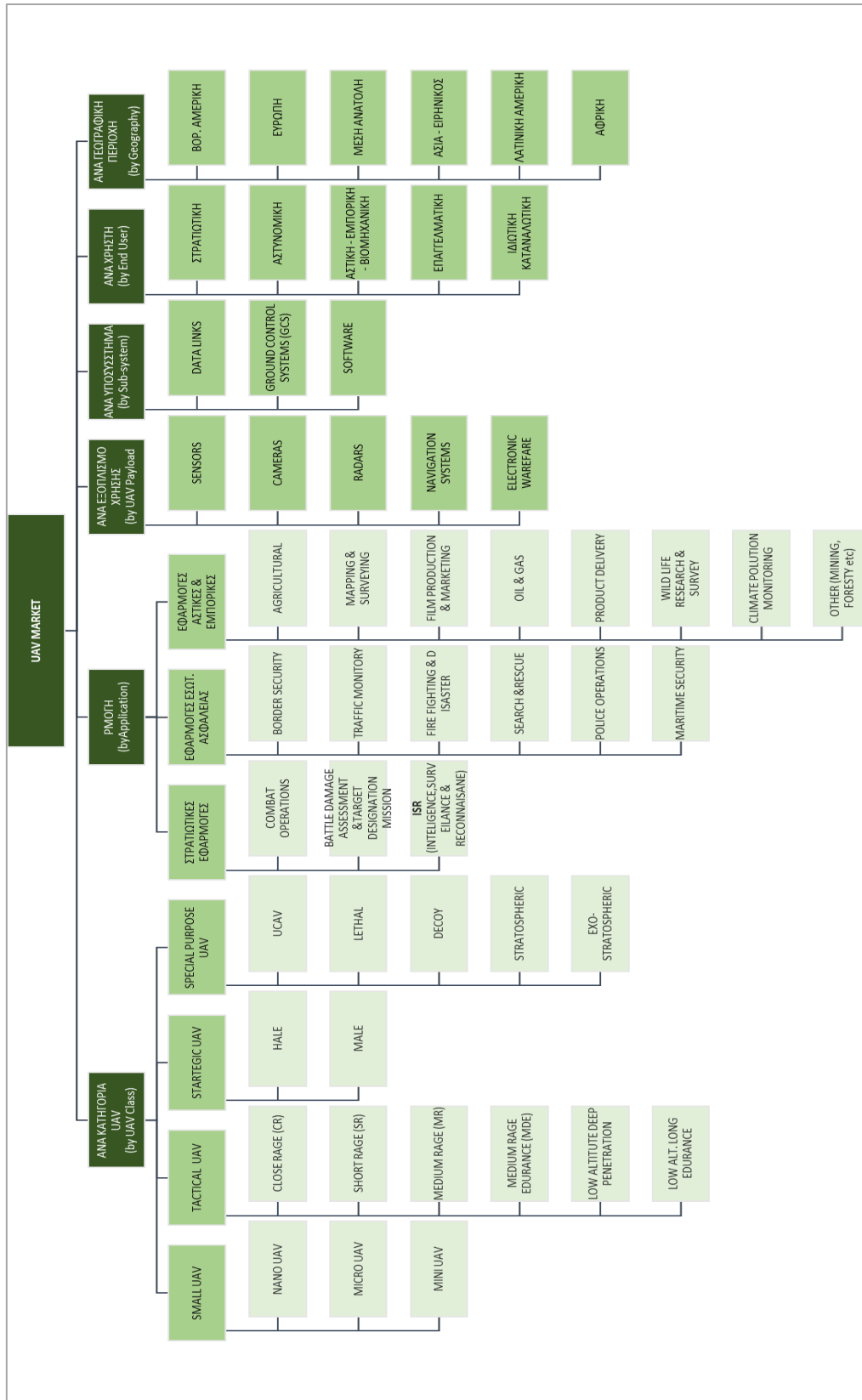
2.5.1.g Η βασική και η αναλυτική τμηματοποίηση της αγοράς UAV.

Τα βασικά κριτήρια της τμηματοποίησης της αγοράς UAV είναι τα εξής:

- Ο τύπος UAV με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές κατασκευής και δυνατότητες αυτονομίας, επιδόσεων κλπ.
- Το είδος των εφαρμογών (υπηρεσιών), που βασίζονται στην συνδυασμένη χρήση UAVs, UA Technologies και συστημάτων ελέγχου και ανάλυσης (που στην ουσία αποτελεί το παραγόμενο όφελος προς τον τελικό χρήστη).
- Το είδος του εξοπλισμού (UAV Payload).
- Ο τελικός χρήστης και οι ανάγκες του.
- Τα γεωγραφικά κριτήρια.



ΣΧΗΜΑ 5 Η αγορά UAV – βασική τμηματοποίηση (Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020, 2014)



ΣΧΗΜΑ 6 Η αγορά UAV – αναλυτική τμηματοποίηση. (Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020, 2014)

2.5.1.h Αγορά ανά κατηγορία – τύπο UAV

h 1. Κατηγοριοποίηση UAVs βάσει τεχνικών προδιαγραφών.

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται οι τέσσερις κατηγορίες UAVs βάσει των τεχνικών προδιαγραφών οι οποίες είναι : η απόσταση δράσης (range), το ύψος πτήσης (flight altitude), η διάρκεια πτήσης (endurance) και το βάρος του.

1^η κατηγορία : SMALL UAV

Πίνακας 1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των SMALL UAV

SMALL UAV	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			
ΤΥΠΟΣ	RANGE (km)	FLIGHT ALTITUDE (m)	ENDURANCE (hrs)	MASS (kg)
Nano UAV	<1	100	<1	<0,025
Micro UAV	<10	250	1	<5
Mini UAV	<10	150	<2	<20/30/150

2^η κατηγορία : TACTICAL UAV

Πίνακας 2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των TACTICAL UAV

TACTICAL UAV	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			
ΤΥΠΟΣ	RANGE (km)	FLIGHT ALTITUDE (m)	ENDURANCE (hrs)	MASS (kg)
Close Range (CR)	10-30	3000	2-4	150
Short Range (SR)	30-70	3000	3-6	20
Medium Range (MR)	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance (MRE)	>500	8000	10-18	1250
Low Altitude Deep Penetration (LADP)	>250	50-9000	0,5-1	350
Low Altitude Deep Endurance (LALE)	>500	3000	>24	>30

3^η κατηγορία : STRATEGIC UAV

Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των STRATEGIC UAV

STRATEGIC UAV	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			
ΤΥΠΟΣ	RANGE (km)	FLIGHT ALTITUDE (m)	ENDURANCE (hrs)	MASS (kg)
HALE	>2000	20000	24-48	4500-12000
MALE	>500	14000	24-48	1500

4^η κατηγορία : SPECIAL PURPOSE UAV

Πίνακας 4 Τεχνικά χαρακτηριστικά των SPECIAL PURPOSE UAV

SPECIAL PURPOSE UAV	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			
ΤΥΠΟΣ	RANGE (km)	FLIGHT ALTITUDE (m)	ENDURANCE (hrs)	MASS (kg)
UCAV	1500	10000	Approx. 2	10000
LETHAL	300	4000	3-4	---
Decoy	0-500	50-5000	<4	250
Stratospheric	>2000	>20000	>48	>2500
Exo-Stratospheric	---	>30500	---	---

h. 2 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά κατηγορία UAV σε εκατ. \$

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται το μέγεθος και η τάση της αγοράς ανά κατηγορία UAV σε εκατ. \$

Πίνακας 5 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά κατηγορία UAV σε εκατ.\$

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ UAV	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
SMALL UAV	782,33	872,62	962,68	1931,60	12,31%
TACTICAL UAV	865,88	880,09	936,54	1599,69	9,33%
STRATEGIC UAV	2767,80	2979,26	3049,66	4901,64	8,23%
SPECIAL PURPOSE UAV	1617,99	1719,03	1813,12	2140,06	2,80%
ΣΥΝΟΛΟ	6034,01	6451,00	6762,00	10572,99	7,13%

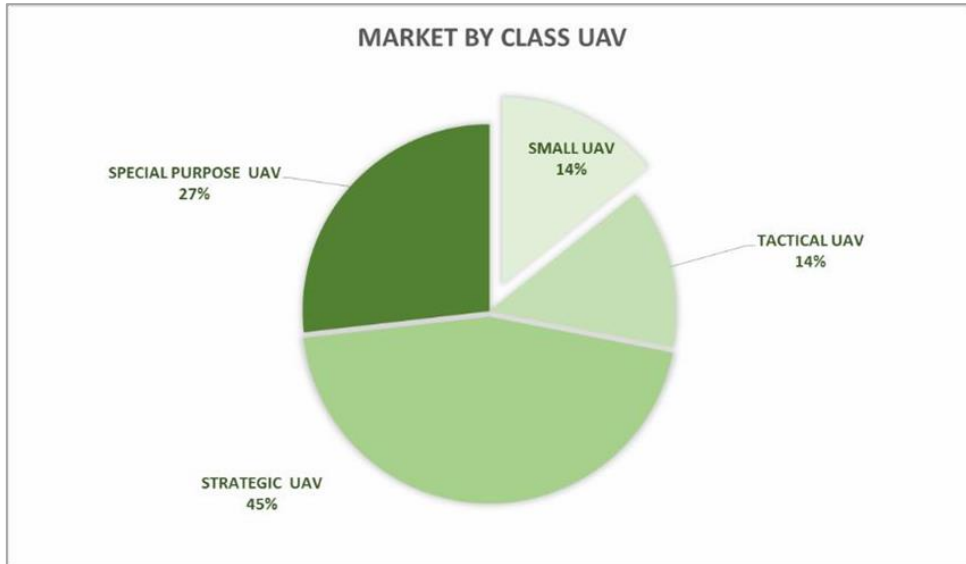
h.3 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά τύπο UAV σε εκατ.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται το μέγεθος και η τάση της αγοράς ανα τύπο UAV σε εκατ. \$

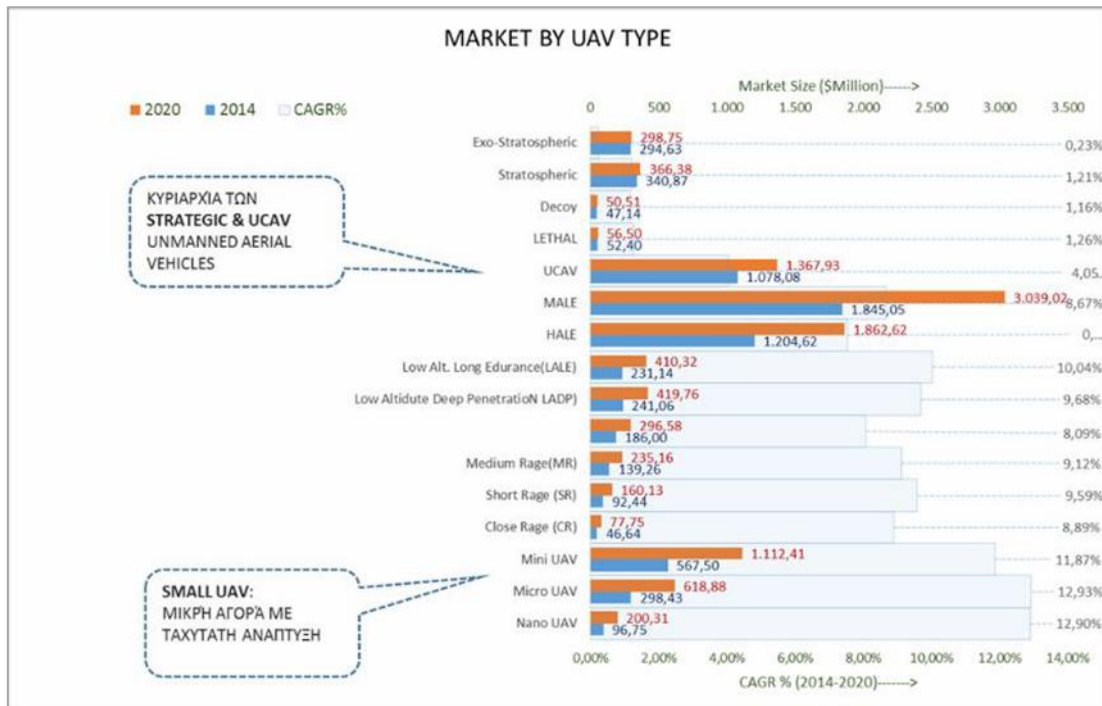
Πίνακας 6 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά τύπο UAV σε εκατ.\$ Πηγή : Press Releases, Investor Presentations, Euro UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036), Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

ΤΥΠΟΣ	2012	2013	2014	2020	CAGR% 2014-2020
Nano UAV	78,23	87,86	96,75	200,31	12,90%
Micro UAV	234,70	263,59	298,43	618,88	12,93%
Mini UAV	469,40	527,17	567,50	1112,41	11,87%
ΣΥΝΟΛΟ	782,33	878,62	962,68	1931,60	12,31%
ΕΥΡΩΠΗ	62,59	70,29	77,5	174,22	14,48%
Close Range	43,29	44,00	46,64	77,75	8,89%
Short Range	86,59	88,01	92,44	160,13	9,59%
Medium Range	129,88	132,01	139,26	235,16	9,12%
Medium Range Endurance	173,18	176,02	186,00	296,58	8,09%
Low Altitude Deep Penetration	216,47	220,02	241,06	419,76	9,68%
Low Altitude Deep Endurance	216,47	220,02	231,14	410,32	10,04%
ΣΥΝΟΛΟ	865,88	880,08	936,54	1599,70	9,33%
ΕΥΡΩΠΗ	69,27	70,41	75,39	144,45	11,45%
HALE	1107,12	1179,79	1204,62	1862,62	7,53%
MALE	1660,68	1799,47	1845,05	3039,02	8,67%
ΣΥΝΟΛΟ	2767,80	2979,26	3049,67	4901,64	8,23
ΕΥΡΩΠΗ	221,42	238,34	245,50	442,62	10,32
UCAV	945,07	1008,04	1078,08	1367,93	4,05%
LETHAL	48,54	51,57	52,40	56,60	1,26%
Decoy	43,69	46,41	47,14	50,51	1,16%
Stratospheric	311,30	332,46	340,87	366,38	1,21%
Exo-Stratospheric	269,33	280,55	294,63	298,75	0,23%
ΣΥΝΟΛΟ	1617,99	1719,03	1813,12	2140,07	2,80%
ΕΥΡΩΠΗ	129,44	137,52	145,96	193,25	4,79%

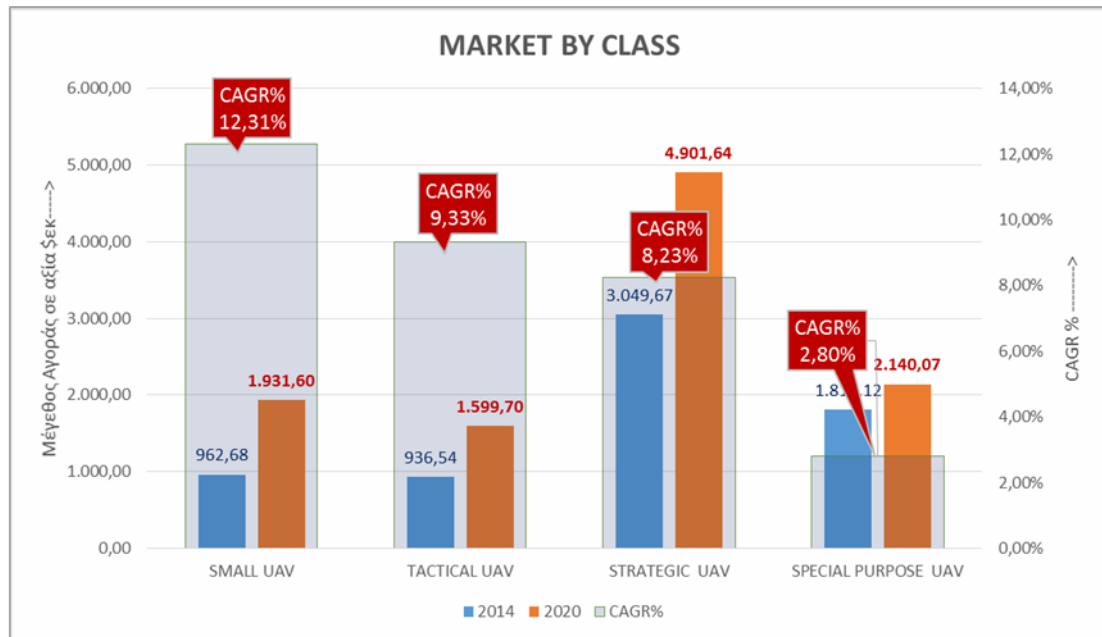
Στα παρακάτω διαγράμματα έχουμε τα μερίδια αγοράς ανά κατηγορία UAV για το 2014, και την εξέλιξη ανά τύπο και κατηγορία UAV για την περίοδο 2014-2020 .



Διάγραμμα 2 Μεριδια αγοράς ανά κατηγορία UAV για το έτος 2014.



Διάγραμμα 3 Εξέλιξη αγοράς ανά τύπο UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης



Διάγραμμα 4 Εξέλιξη αγοράς ανά κατηγορία UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης

Η Αγορά ανά κατηγορία και τύπο UAV – Σημαντικά Σημεία:

- Τα Small & Tactical UAV Types ισομοιράζονται το 28% της αγοράς
- Τα Strategic (MALE & HALE) με 45% της αγοράς, καθώς και τα μαχητικά Unmanned Combat Aerial Vehicles – UCAV (τα οποία κατέχουν τη μερίδα του λέοντος στα Special Purpose UAVs, που σαν κατηγορία κατέχουν το 27%), κυριαρχούν σε αυτή την αγορά.
- Ειδικά τα UCAV προβλέπεται να έχουν ένα ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 4,05%, φτάνοντας ένα μέγεθος αγοράς \$1.368 εκ. ως το 2020.
- Τα Small UAVs κατέχουν ένα εξαιρετικά μεγάλο μερίδιο σε όγκο, αλλά ένα μόνο 3% της παγκόσμιας αγοράς σε αξία. Θα παρουσιάσουν όμως το μεγαλύτερο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 12,3% έως το 2020 (\$1.931 εκ) και μεγάλη διεύρυνση σε περιοχές που η αγορά βρίσκεται σε φάση εισόδου.

2.5.1.i Αγορά ανά εφαρμογή UAV

Η κατηγοριοποίηση της αγοράς ανά εφαρμογή UAV περιλαμβάνει τις στρατιωτικές εφαρμογές, τις εμπορικές εφαρμογές και αυτές που αφορούν την εσωτερική ασφάλεια και την πολιτική προστασία.

Στους πίνακες αναφέρονται το μέγεθος και η τάση της αγοράς UAV ανά κατηγορία και τύπο εφαρμογής UAV.

Πίνακας 7 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά κατηγορία εφαρμογής UAV σε εκατ. \$

ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ UAV	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
MILITARY	4103,12	4284,87	4511,20	7155,81	7,99%
CIVIL & COMMERCIAL	796,49	851,03	903,40	1742,43	11,57%
HOMELAND SECURITY	1134,39	1312,10	1347,40	1674,76	3,69%
ΣΥΝΟΛΟ	6034,00	6457,00	6762,00	10573,00	7,73%
ΕΥΡΩΠΗ	482,72	516,56	544,34	954,74	9,82%

Πίνακας 8 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά Τύπο εφαρμογής UAV σε εκατ. \$ (Στρατιωτικές)

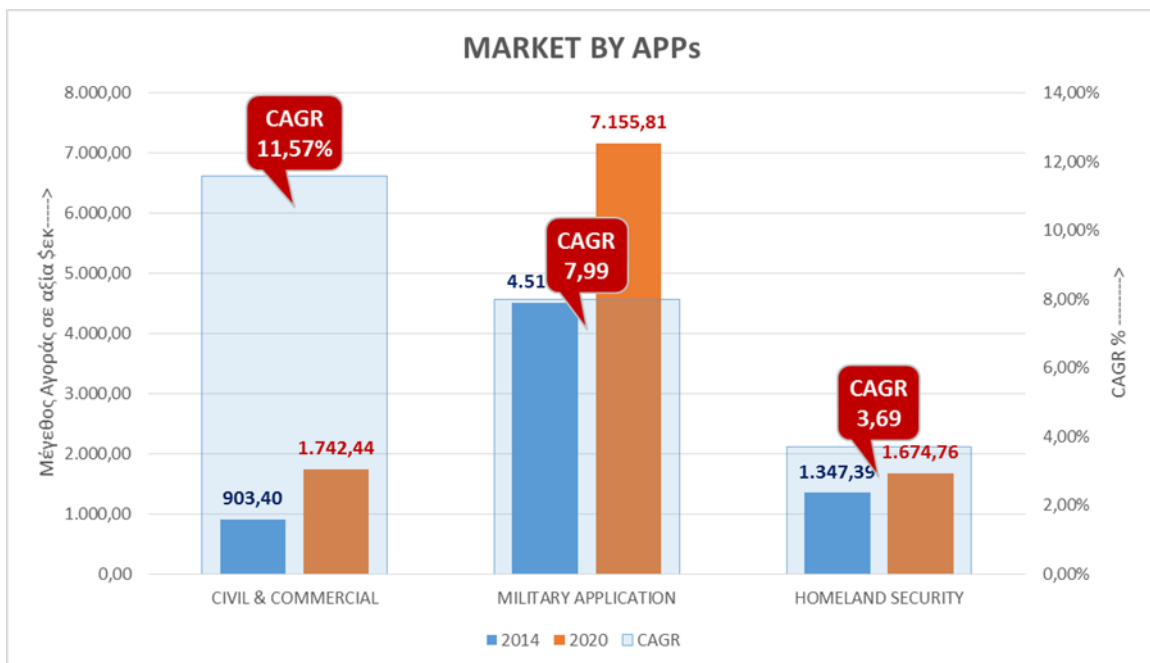
ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ UAV	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
MILITARY					
ISR	2543,93	2670,09	2825,38	4619,79	8,54%
Combat Operations	943,72	981,33	1028,78	1590,74	7,53%
Battle Damage Assessments & Target Designation Mission	615,47	633,45	657,04	945,28	6,25%
ΣΥΝΟΛΟ	4103,12	4284,87	4511,20	7155,81	7,99%
ΕΥΡΩΠΗ	328,25	342,79	363,15	646,17	10,08%

Πίνακας 9 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά τύπο εφαρμογών UAV σε εκατ. \$ (Εμπορικές)

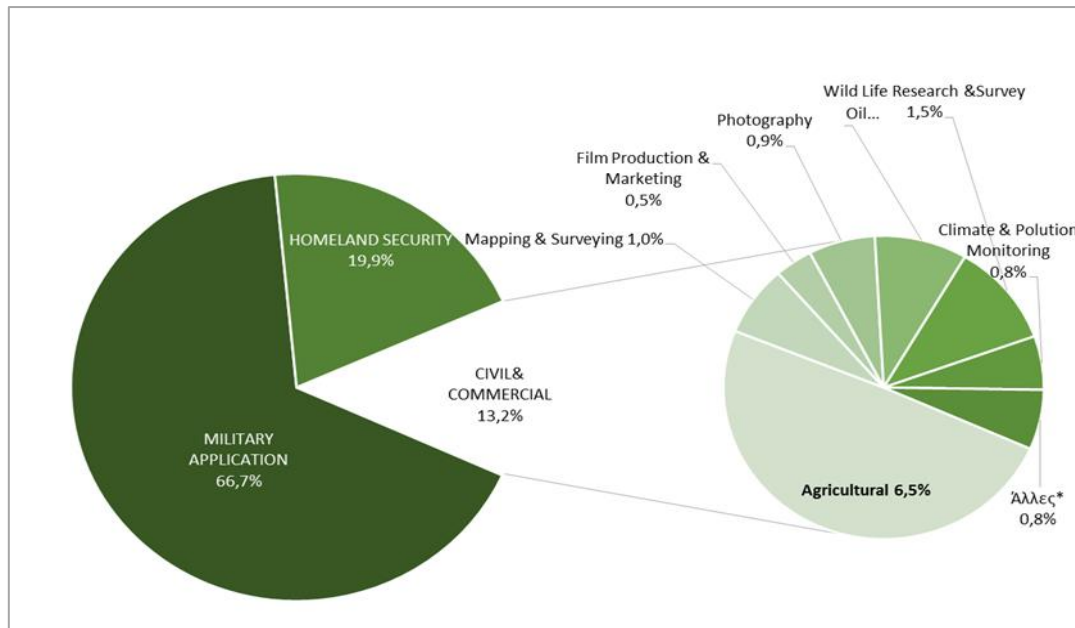
ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ UAV	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
CIVIL & COMMERCIAL					
Agricultural	391,23	417,39	442,39	845,43	11,40%
Mapping & Surveying	60,06	63,6	66,91	122,32	10,58%
Film Production & Marketing	30,11	32,22	34,26	66,74	11,75%
Photography	52,97	56,64	60,17	116,57	11,65%
Oil & Gas	73,68	78,78	83,70	162,22	11,66%
Product Delivery	8,12	8,6	9,05	16,55	10,58%
Wild Life Research & Survey	86,74	92,87	98,78	192,89	11,80%
Climate & Pollution Monitoring	42,05	46,56	51,22	122,32	15,61%
Other	51,53	54,37	56,92	97,40	9,37%
ΣΥΝΟΛΟ	796,49	851,03	903,40	1742,44	11,57%
ΕΥΡΩΠΗ	63,72	68,08	72,72	157,34	13,73%

Πίνακας 10 Μέγεθος και τάση αγοράς ανά τύπο εφαρμογών UAV σε εκατ. \$ (Εσωτερικής ασφαλείας & πολιτικής προστασίας)

ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ UAV	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
HOMELAND SECURITY					
Border Security	682,00	794,21	809,99	1006,533	3,69%
Traffic Monitoring	35,39	41,19	41,97	51,92	3,61%
Fire Fighting & Disaster	171,52	200,85	205,98	264,61	4,26%
Search & Rescue	102,66	119,53	121,87	151,23	3,66%
Police Operations	79,63	92,68	94,45	116,90	3,62%
Maritime Security	63,19	72,65	73,13	83,57	2,25%
ΣΥΝΟΛΟ	1134,39	1321,11	1347,39	1674,76	3,69%
ΕΥΡΩΠΗ	90,75	105,69	108,47	151,23	5,70%



Διάγραμμα 5 Εξέλιξη αγοράς ανά κατηγορία εφαρμογής UAV 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης



Διάγραμμα 6 Μεριδία αγοράς ανά κατηγορία εφαρμογής UAV για το έτος 2014. (Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020, 2014)

Η Αγορά ανά εφαρμογή UAV - Σημαντικά σημεία

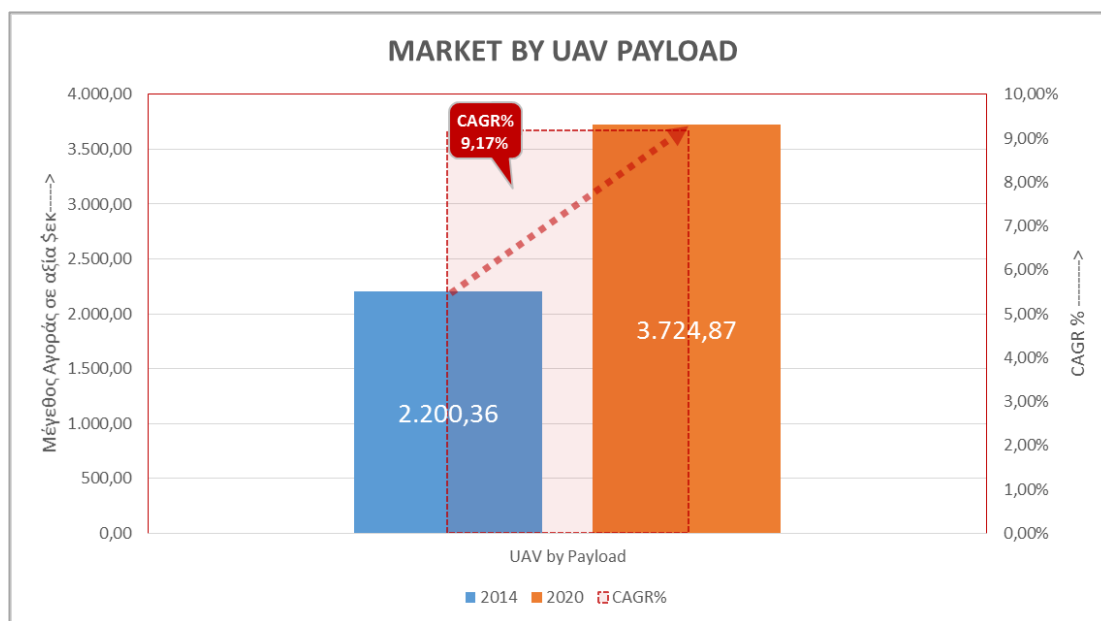
- Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση UAVs σε αναπτυσσόμενες και ανεπτυγμένες χώρες για εμπορικές εφαρμογές οδηγούν την παγκόσμια αγορά UAV.
- Το συγκεκριμένο τμήμα αγοράς εμπορικών εφαρμογών εμφανίζει τους υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης (11,57% CAGR) τα επόμενα χρόνια
- Τα UAVs που χρησιμοποιούνται για Πληροφορίες, Παρακολούθηση & Αναγνώριση - Επιτήρηση (ISR Apps), προβλέπεται να κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην UAV αγορά τα επόμενα χρόνια, με μια ετήσια ανάπτυξη 8,54%, που ενδέχεται να αυξηθεί περισσότερο μετά από απελευθέρωση περιορισμών της FAA σχετικά με χρήση UAVs στον πολιτικό εναέριο χώρο.
- Η χρήση UAVs για παρακολούθηση κλιματικών αλλαγών και ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Climate & Pollution Monitoring) προβλέπεται να αυξηθεί θεαματικά. Έτσι η αγορά αυτών των εφαρμογών θα εμφανίσει τους ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης ,15,61% από το 2014 έως το 2020
- Οι εφαρμογές στην γεωργία (Agricultural) οδηγούν την αγορά έχοντας μερίδιο 48% και μια αναμενόμενη ετήσια ανάπτυξη 11,75%, που είναι ανάμεσα στις δυο μεγαλύτερες (μετά τις Climate & Pollution Monitoring)

2.5.1.j Αγορά UAV ανά φέροντα εξοπλισμό (PAYLOADS)

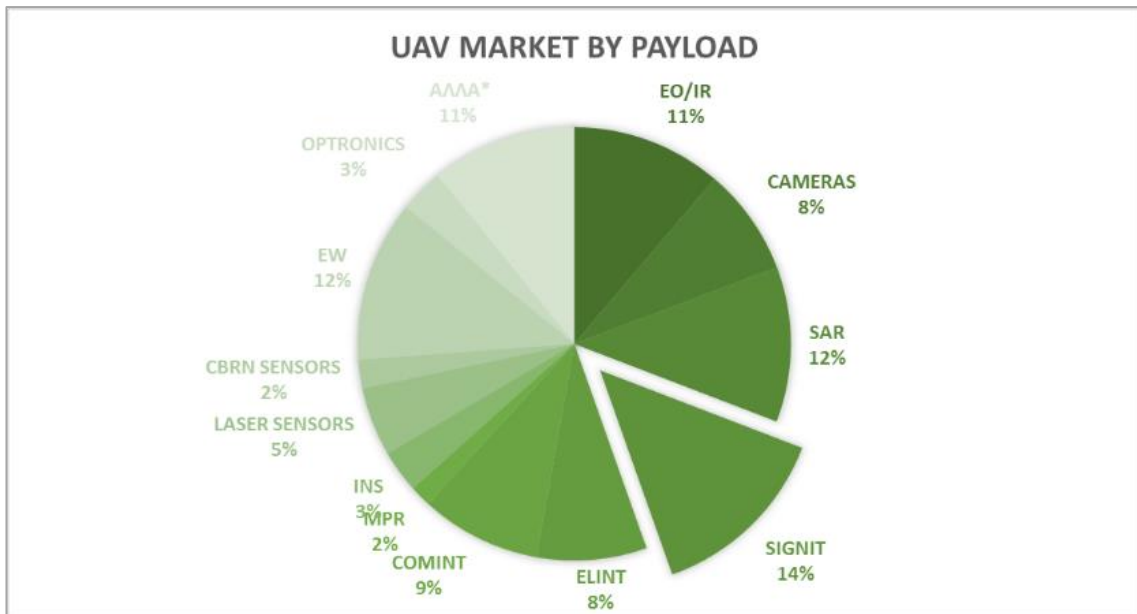
Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται το μέγεθος και η τάση της αγοράς UAV ανά φέροντα εξοπλισμό (PAYLOADS)

Πίνακας 11 Μέγεθος και τάση αγοράς UAV ανά φέροντα εξοπλισμό (payloads) σε εκατ. \$.

PAYLOAD	2012	2013	2014	2020	CAGR % 2014-2020
EO/IR	196,59	223,47	246,88	389,62	7,90%
CAMERAS	144,82	162,82	176,91	299,85	9,19%
SAR	199,12	226,52	254,58	400,8	7,86%
SIGNIT	235,33	269,47	302,55	463,75	7,38%
ELINT	144,82	165,87	180,65	292,77	8,38%
COMINT	170,16	171,98	198,25	318,10	8,20%
MRP	32,58	33,58	34,77	69,28	12,18%
INS	54,31	63,70	69,97	156,82	14,40%
LASER SENSORS	88,70	102,37	113,10	176,93	7,74%
CBRN SENSORS	36,20	41,72	46,87	102,06	13,85%
EW	213,60	243,62	264,26	499,88	11,21%
OPTRONICS	56,12	65,33	72,17	181,03	16,56%
OTHER	237,86	264,79	239,40	373,98	7,72%
ΣΥΝΟΛΟ	1810,20	2035,25	2200,35	3724,87	9,17



Διάγραμμα 7 Εξέλιξη αγοράς ανά φέροντα εξοπλισμό (Payloads) 2014-2020. Εκτίμηση ρυθμού ανάπτυξης



Διάγραμμα 8 Τα μερίδια αγοράς UAV ανά φέροντα εξοπλισμό για το έτος 2014

Η Αγορά ανά UAV Payloads – Σημαντικά σημεία:

- Η αγορά των Payloads για UAV αναμένεται να έχει ραγδαία άνοδο τα επόμενα χρόνια εξ αιτίας αυξημένων προμηθειών UAVs για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών κυρίως στην αμυντική βιομηχανία , αλλά και στον εμπορικό τομέα.
- Τα SIGINT (Signal Intelligence) Payloads φαίνεται να οδηγούν τη συγκεκριμένη αγορά.
- Optronic και INS (Inertial Navigation Systems) αναμένεται να έχουν την ταχύτερη ετήσια ανάπτυξη 16,5% και 14,4% αντίστοιχα.
- Η αύξηση των αποστολών παρακολούθησης και αναγνώρισης - επιτήρησης (ISR missions), θα οδηγήσει σε μια ανάπτυξη UAV Payloads όπως τα Ραντάρ Συνθετικού Διαφράγματος SAR (Synthetic Aperture Radars), Optronic, EO/IR Sensors και Laser Sensors
- Αυξημένη επίσης ζήτηση αναμένεται τα επόμενα χρόνια σε κάμερες ελαφριές, υψηλών επιδόσεων και χαμηλού κόστους

2.5.1.k Αγορά UAV ανά Γεωγραφική Περιοχή.

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται το μέγεθος και η τάση της αγοράς UAV ανά γεωγραφική περιοχή

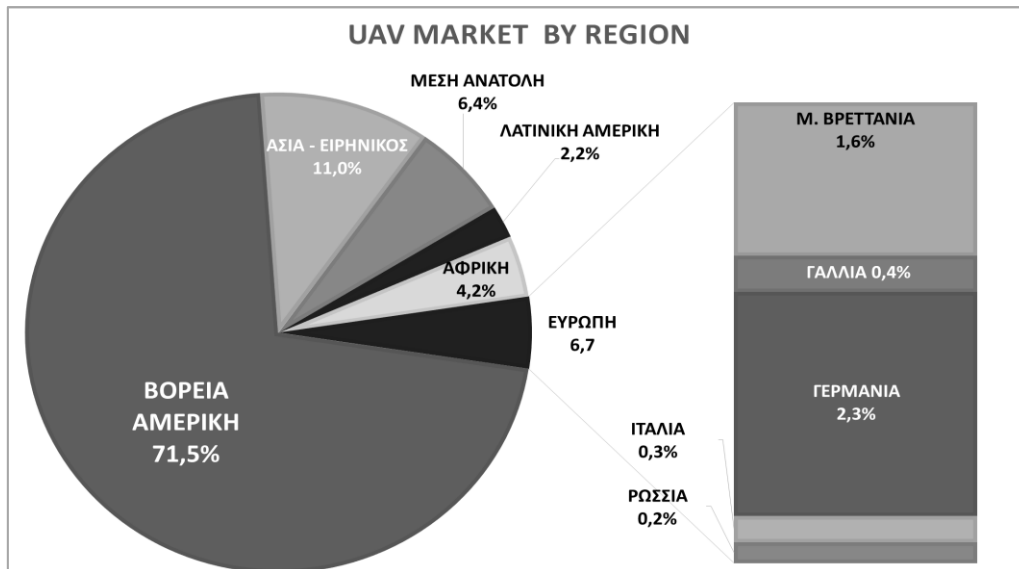
Πίνακας 12 Μέγεθος και τάση αγοράς UAV ανά γεωγραφική περιοχή. Πηγή Press Releases, Expert Interviews and MarketsandMarkets Analysis.

ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	2012	2013	2014	2020	CAGR% 2014-2020
ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ	4163,46	4455,33	4667,13	7267,88	7,66%
ΕΥΡΩΠΗ	482,72	516,66	544,34	954,74	9,82%
ΑΣΙΑ-ΕΙΡΗΝΙΚΟΣ	663,74	710,27	716,10	1040,38	6,42%
ΜΕΣΗ ΑΝΑΤΟΛΗ	362,04	387,42	419,92	609,00	6,39%
ΛΑΤΙΝΙΚΗ ΑΜΕΡΙΚΗ	120,68	129,14	142,68	329,88	14,90%
ΑΦΡΙΚΗ	241,36	258,28	271,83	371,11	5,33%
ΣΥΝΟΛΟ	6034,00	6457,00	6762,00	10572,99	7,73%

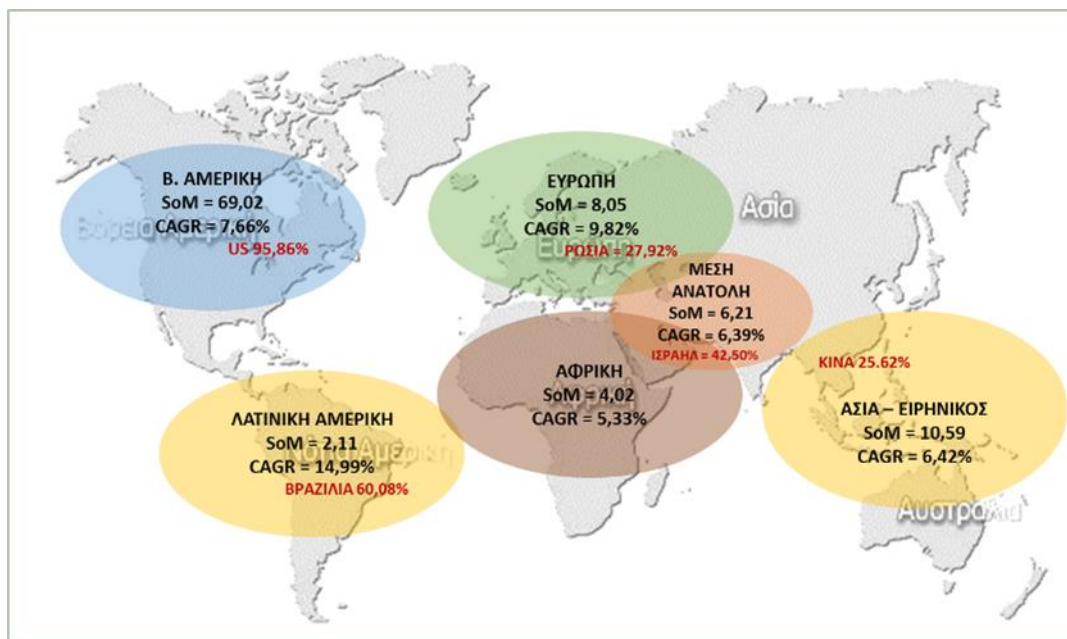
Πίνακας 13 Μέγεθος και τάση ευρωπαϊκής αγοράς UAV σε εκατ.\$. Πηγή Press Releases, Expert Interviews and MarketsandMarkets Analysis.

ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΧΩΡΑ	2012	2013	2014	2020	CAGR% 2014-2020
Μ.ΒΡΕΤΑΝΙΑ	118,27	126,22	132,65	228,95	9,52%
ΓΑΛΛΙΑ	87,90	94,06	99,11	173,76	9,81%
ΓΕΡΜΑΝΙΑ	92,30	98,75	104,05	182,36	9,80%
ΙΤΑΛΙΑ	22,01	23,45	24,66	43,63	9,98%
ΡΩΣΙΑ	133,28	143,43	152,00	275,82	10,44%
ΣΟΥΗΔΙΑ	15,78	16,96	17,95	32,27	10,27%
ΑΛΛΕΣ*	13,18	13,68	13,92	17,95	4,33%
ΣΥΝΟΛΟ	482,72	516,55	544,34	954,74	9,82%

* Περιλαμβάνονται χώρες όπως Ελλάδα, Ισπανία, Πολωνία κλπ.



Διάγραμμα 9 Μερίδια αγοράς UAV ανά γεωγραφική περιοχή για το έτος 2014. Πηγή Press Releases, Investor Presentations, EURO UVS, Unmanned Systems Integration Roadmap (FY2011-2036)

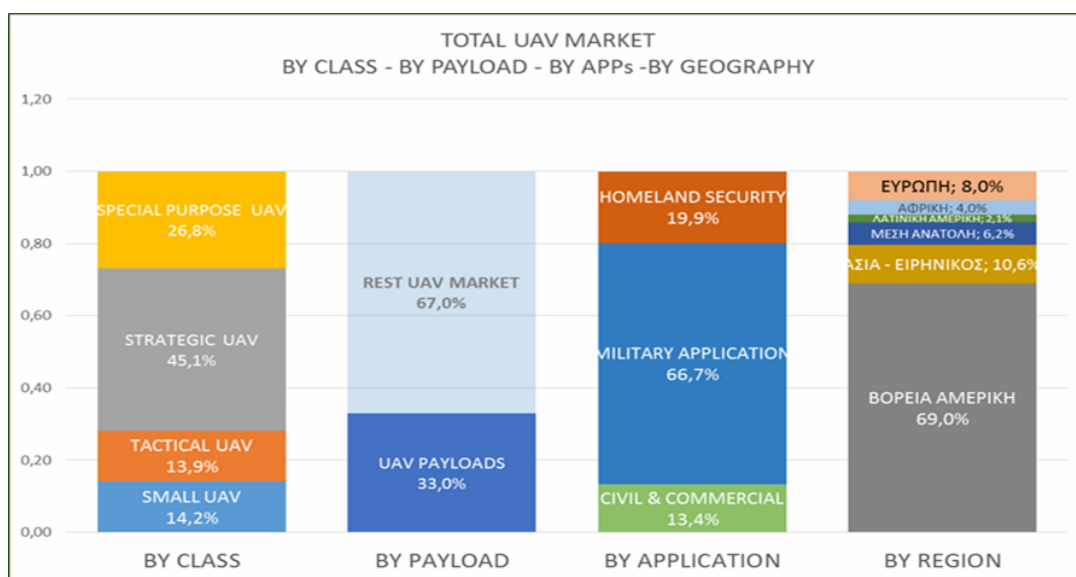


Σχήμα 2 Παγκόσμια αγορά UAV . μέγεθος και αναμενόμενοι ρυθμοί ανάπτυξης ανά γεωγραφική περιοχή

Η Αγορά ανά Γεωγραφική Περιοχή – Σημαντικά σημεία:

- US συνεχίζουν να οδηγούν την αγορά κατέχοντας > από 69% (2014) έστω και με χαμηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης τα επόμενα χρόνια
- Οι APAC (Asia-Pacific) χώρες [Ινδία, Κίνα, Αυστραλία, Ν. Κορέα], οι χώρες της Μέσης Ανατολής [Ισραήλ, ΗΑΕ, Ιράκ], η Λατινική Αμερική [Βραζιλία, Μεξικό, Αργεντινή] και η Ν. Αφρική, αναμένεται να προσφέρουν υψηλότερες ευκαιρίες ανάπτυξης στα επόμενα χρόνια

- Η Αφρική (κυρίως Ν. Αφρική) μόλις εισέρχεται στην αγορά εμφανίζοντας πολύ χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης 3,8%
- Η Λατινική Αμερική παρουσιάζει την ταχύτερη ανάπτυξη (27,4%) και ακολουθεί η Μέση Ανατολή (16,3%)
- Η Ευρώπη εμφανίζει μια ανάπτυξη 2 εκ μονάδες πάνω από την συνολική αγορά (9,8%)
- Η Ελλάδα ανήκει στο τμήμα που εμφανίζεται ως «Άλλα» στο Region Ευρώπη και το οποίο εμφανίζει πολύ χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης για τα επόμενα χρόνια σε σύγκριση πάντα με την υπόλοιπη αγορά (4,3% στο σύνολό του)



Διάγραμμα 10 Συνολική εικόνα αγοράς UAV για το έτος 2014

2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ, ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ & ΣμηΕΑ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

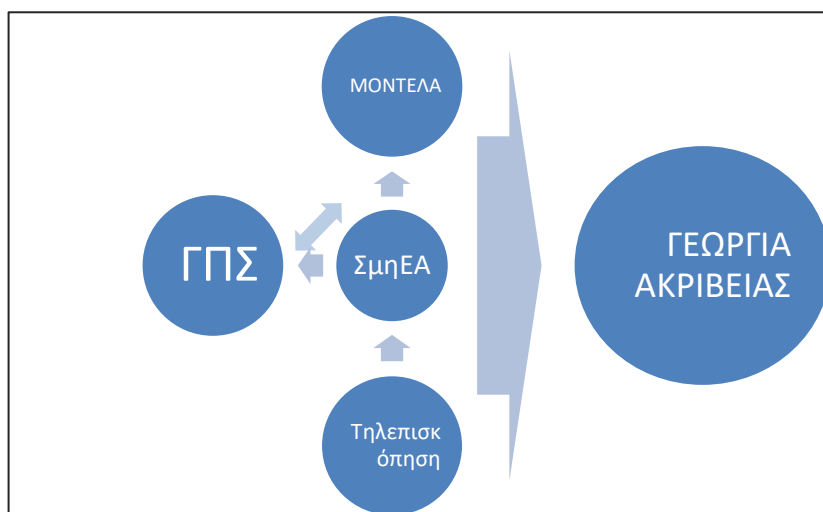
Η τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με τα ΓΠΣ προσφέρουν μια μέθοδο αποτίμησης μετρητικής πληροφορίας συνυφασμένη με την έννοια του χώρου. Σε συνδυασμό με τα ΣμηΕΑ η πληροφορία μας δίνεται σε πολύ σύντομο ή ακόμη και πραγματικό χρόνο.

Η εφαρμοσμένη φυσιολογία και τα μαθηματικά μοντέλα δίνουν την δυνατότητα πρόβλεψης ποσοτικής θεώρησης μεταβλητών σε σημειακό επίπεδο. Ωστόσο, με την χρήση της τηλεπισκόπησης, της διευρυμένης διασύνδεσης συστημάτων και της ανάπτυξης υπολογιστών, δύναται να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία εισαγωγής τιμών παραγόντων.

Τέλος, τα ΣμηΕΑ όπως διαφαίνεται από την οικονομική ανάλυση της παγκόσμιας αγοράς, αποτελούν έναν ικανό πυρήνα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων & διεργασιών που μπορεί να συνδέσει τις ανωτέρω εφαρμογές

Στην παρούσα διατριβή θα μελετηθεί η δημιουργία μιας αυτόνομης εναέριας πλατφόρμας τηλεπισκόπησης, για την παραγωγή χαρτών δεικτών βλάστησης & προσδιορισμό δυναμικών παράγωγης με χωρική αποτύπωση.

Επιπρόσθετα θα γίνει η προσπάθεια να μεταφρασθεί η υπάρχουσα βιβλιογραφία για την χρήση και δημιουργία προτύπων-μοντέλων σε μοντέλα ΓΠΣ και έπειτα να μελετηθεί η αυτονομία της εναέριας πλατφόρμας στην ελληνική γεωργική ύπαιθρο.



Σχήμα 3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Το πείραμα της παρούσας διατριβής χωρίζεται ουσιαστικά σε 4 στάδια:

- Στο πρώτο στάδιο αναλύεται η μετατροπή των μαθηματικών μοντέλων σε υπολογιστικές ρουτίνες Γ.Σ.Π.
- Στο δεύτερο στάδιο, διακρίνουμε ποια είναι τα απαραίτητα τηλεπισκοπικά δεδομένα που πρέπει να συλλέγει η εναέρια πλατφόρμα.
- Στο τρίτο στάδιο, θα δούμε αναλυτικά τα μέρη που αποτελείται η εναέρια πλατφόρμα και την ανάπτυξη λογισμικού που απαιτείται για την πλήρη αυτονομία της και σύνδεση της με τα συστήματα Γ.Σ.Π.
- Στο τελευταίο στάδιο, θα αναπτυχθεί η πειραματική διαδικασία με την οποία θα επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα που παράγει ολοκληρωμένα το σύστημα μας, με μετρήσεις πεδίου και έπειτα την αξιολόγηση τους.

Συγκεντρωτικά, τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της διατριβής, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 14 Συγκεντρωτικός πίνακας απαιτούμενων λογισμικών

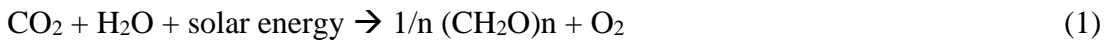
Λογισμικό	Περιγραφή	Τύπος
Microsoft Excel	Υπολογιστικό φύλλα	Εμπορικό
ESRI ArcGIS, ArcMap 10.1	Πλατφόρμα Γ.Σ.Π.	Εμπορικό
QGIS 2.18	Πλατφόρμα Γ.Σ.Π.	Ανοικτό Λογισμικό
R Studio 1.1	Περιβάλλον Γλώσσας Προγραμματισμού R	Ανοικτό Λογισμικό
Agisoft Metashape 1.5.1	Λογισμικό επεξεργασίας Τηλ/κων δεδομένων ΣμηΕΑ	Εμπορικό
Mission Planner 1.3.59	Λογισμικό Σταθμού Εδάφους	Ανοικτό Λογισμικό
Notepad, Notepad++	Λογισμικό επεξεργασίας text, csv	Freeware
Autodesk AutoCAD	Περιβάλλον σχεδίασης CAD	Εμπορικό
Cloud Compare	Λογισμικό επεξεργασίας Νεφών σημείων	Ανοικτό Λογισμικό

3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

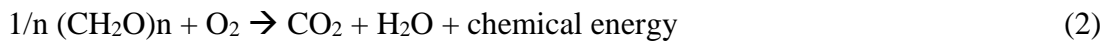
Το πρώτο στάδιο του πειράματος είναι η μετατροπή των κυριότερων μοντέλων-προτύπων υπολογισμού σε γλώσσα python, κατανοητή για την επίλυση τους από τα Γ.Σ.Π.. Τα μοντέλα που θα μεταφραστούν είναι τα εξής:

3.1.1 Ρυθμός αύξησης ξηρής μάζας (DWI)

Η Ηλιακή ακτινοβολία, κατά την φωτοσύνθεση, μετατρέπεται σε βιομάζα. Στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης, το ατμοσφαιρικό CO₂ μετατρέπεται σε υδατάνθρακες (CH₂O)_n σύμφωνα με την αντίδραση (1):



Ένα μέρος των παραγόμενων υδατανθράκων χρησιμοποιείται σαν δομικό υλικό (Λιγνίνη, πρωτεΐνες, λίπη) των φυτών και ένα μέρος χρησιμοποιείται ως ενέργεια για την εκτέλεση διαφόρων διεργασιών του φυτού σύμφωνα με την αντίδραση (2).



Ο ρυθμός αφομοίωσης CO₂ από κλειστή φυλλοστοιβάδα μιας καλλιέργειας σε μια μερικώς νεφοσκεπή ημέρα, υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών ρυθμού αφομοίωσης CO₂ σε μια ανέφελη ημέρα και σε μια ημέρα με εντελώς νεφοσκεπή ουρανό σε συνδυασμό με το γεωγραφικό πλάτος της καλλιέργειας και την ημέρα του έτους και μπορεί να υπολογισθεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{FGC} = \text{FO} * \text{FOV} + (1 - \text{FO}) * \text{FCL} \quad (3)$$

Όπου,

FGC είναι ο ολικός ρυθμός αφομοίωσης CO₂ της φυλλοστοιβάδας (kg ha⁻¹ d⁻¹),

FO είναι το ποσοστό της νεφοσκεπής (FO = 0 για πλήρως ανέφελη ημέρα, FO = 1 για πλήρως νεφοσκεπής ημέρα).

FOV ολικός ρυθμός αφομοίωσης CO₂ της φυλλοστοιβάδας σε μια πλήρως νεφοσκεπή ημέρα (kg ha⁻¹ d⁻¹), και

FCL ολικός ρυθμός αφομοίωσης CO₂ της φυλλοστοιβάδας σε μια πλήρως ανέφελη ημέρα (kg ha⁻¹ d⁻¹), (Πίνακες 15,16)

Στους παρακάτω πίνακες αναφέρονται υπολογισμένες τιμές ρυθμού αφομοίωσης CO₂ για κλειστή φυλλοστοιβάδα με σφαιρική κόμη, για ανέφελη (FCL) και πλήρως νεφοσκεπή ημέρα (FOV) και μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης AMAX 40 και 70 kg ha⁻¹ d⁻¹, αντίστοιχα

Πίνακας 15 Υπολογισμένες τιμές ρυθμού αφομοίωσης CO₂ (kg ha⁻¹ d⁻¹) για κλειστή φυλλοστοιβάδα με σφαιρική κόμη, για ανέφελη (FCL) και πλήρως νεφοσκεπής (FOV) ημέρες και μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης, AMAX=40 Kg ha⁻¹ d⁻¹

Date		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
N. Hemisphere		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
S. Hemisphere		Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
Latitude													
0°	Fcl	728	753	768	761	737	720	727	752	768	760	736	720
	Fov	306	320	328	324	311	302	306	319	328	324	311	302
10°	Fcl	652	701	748	779	786	784	785	784	765	720	667	638
	Fov	270	295	319	334	336	333	335	336	327	305	277	262
20°	Fcl	562	634	713	783	820	834	829	802	745	665	583	542
	Fov	226	261	300	334	351	356	355	343	316	276	236	216
30°	Fcl	454	549	659	768	839	869	858	804	708	591	481	429
	Fov	175	219	271	324	357	371	366	341	295	239	187	163
40°	Fcl	333	445	586	737	843	892	873	788	652	497	364	304
	Fov	120	169	233	304	354	377	368	329	264	193	133	107
50°	Fcl	202	324	491	686	833	904	877	757	574	384	234	172
	Fov	63	114	187	275	343	375	363	307	224	140	77	52
60°	Fcl	68	191	375	615	813	915	875	708	474	255	102	39
	Fov	15	57	132	236	323	368	351	277	175	83	25	8
70°	Fcl	0	46	240	527	798	967	896	649	353	114	0	0
	Fov	0	10	73	189	302	369	341	240	118	27	0	0

(Source: Goudriaan & Van Laar, 1978)

Πίνακας 16 Υπολογισμένες τιμές ρυθμού αφομοίωσης CO₂ (kg ha⁻¹ d⁻¹) για κλειστή φυλλοστοιβάδα με σφαιρική κόμη, για ανέφελη (FCL) και πλήρως νεφοσκεπής (FOV) ημέρες και μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης, AMAX=70 Kg ha⁻¹ d⁻¹

Date		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
N. Hemisphere		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
S. Hemisphere		Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
Latitude													
0°	Fcl	959	995	1017	1007	973	947	958	993	1018	1007	971	947
	Fov	326	341	350	346	331	321	325	340	351	346	331	321
10°	Fcl	852	922	989	1032	1039	1035	1037	1038	1012	949	873	832
	Fov	285	313	340	357	358	356	357	359	349	324	294	277
20°	Fcl	726	827	937	1035	1086	1103	1097	1062	983	870	755	698
	Fov	237	276	319	356	375	381	379	366	336	292	248	226
30°	Fcl	577	707	860	1011	1109	1149	1134	1060	927	765	613	542
	Fov	182	229	287	345	381	396	391	363	313	251	195	170
40°	Fcl	410	562	755	962	1108	1175	1150	1033	845	633	452	372
	Fov	123	176	245	322	377	402	392	349	278	201	138	110
50°	Fcl	236	397	620	885	1086	1183	1145	982	733	477	278	198
	Fov	65	117	194	289	362	398	384	324	234	145	78	53
60°	Fcl	71	220	460	779	1046	1182	1129	905	591	301	109	40
	Fov	15	58	136	246	340	388	369	290	181	85	25	8
70°	Fcl	0	47	277	649	1006	1222	1132	810	421	121	0	0
	Fov	0	10	74	195	314	385	356	249	120	28	0	0

(Source: Goudriaan & Van Laar, 1978)

Πίνακας 17 (Α) Ολικής Ακτινοβολίας, TOTRAD ($10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) για τυπική ανέφελη ημέρα και (β) μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας (h) σε συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και μήνας του έτους

Date	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
N. Hemisphere	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
S. Hemisphere	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
(a) TOTRAD ($10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)												
atitude												
0°	28.00	29.44	30.32	29.90	28.52	27.54	27.94	29.36	30.34	29.88	28.46	27.54
10°	24.34	26.88	29.34	30.86	30.96	30.68	30.82	31.02	30.18	27.90	25.10	23.60
20°	20.00	22.46	27.36	30.76	32.44	32.92	32.76	31.68	28.96	24.98	21.00	19.06
30°	15.18	19.30	24.42	29.62	32.90	34.24	33.74	31.28	26.74	21.34	16.34	14.10
40°	10.12	14.60	20.64	27.48	32.36	34.58	33.72	29.86	23.60	16.80	11.34	9.00
50°	5.22	9.60	16.14	24.40	30.88	34.02	32.82	27.50	19.60	11.92	6.38	4.22
60°	1.22	4.68	11.16	20.50	28.62	32.86	31.20	24.30	14.94	6.84	2.00	0.64
(b) maximum sunshine duration (h)												
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
10°	11.7	11.8	12.0	12.4	12.5	12.7	12.7	12.5	12.2	11.9	11.7	11.5
20°	11.1	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.9	12.3	11.7	11.3	11.0
30°	10.4	11.2	11.9	12.9	13.6	14.0	13.9	13.3	12.4	11.5	10.8	10.3
40°	9.9	10.7	11.8	13.3	14.3	14.9	14.7	13.9	12.5	11.2	10.1	9.5
50°	9.2	10.2	11.6	13.8	15.3	16.2	15.9	14.6	12.6	10.9	9.3	8.3
60°	7.5	9.2	11.4	14.6	17.0	18.5	18.0	15.9	12.9	10.3	7.2	6.4

Το ποσοστό των νεφοσκεπών ημερών, μπορεί να υπολογισθεί με την βοήθεια του πίνακα 17, αντιστοιχίζοντας τις τιμές ολικής ακτινοβολίας τυπικής ανέφελης ημέρας

Η ημερήσια ολική ακτινοβολία σε ημέρα με πλήρη νεφοσκεπή μπορεί να προσδιορισθεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή για μια πλήρως ανέφελη ημέρα επί 0.2.

Έτσι:

$$FO = (\text{TOTRAD} - \text{AVRAD}) / (\text{TOTRAD} - 0.2 * \text{TOTRAD}) \quad (4)$$

Όπου,

TOTRAD είναι η ολική ακτινοβολία μιας τυπικής ανέφελης ημέρας ($\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

AVRAD είναι η πραγματική προσπίπτουσα ακτινοβολία ($\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Αν η φυλλοστοιβάδα είναι ανοιχτή, τότε δεν απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία και έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη αφομοίωση CO_2 σε σχέση με μια περιορισμένη φυλλοστοιβάδα. Αυτή η μείωση προσδιορίζεται από το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από την καλλιέργεια με την παρακάτω σχέση:

$$\text{CFL} = 1 - \text{EXP}(\text{KE} * \text{LAI}) \quad (5)$$

Όπου,

CFL είναι το ποσοστό της θεωρητικής ακτινοβολίας που απορροφάται (0-1), και
KE είναι ο συντελεστής διάχυσης του ορατού φάσματος όπου οι τιμές κυμαίνονται από 0.5 έως 0.9 και εξαρτώνται από την γεωμετρία του φύλλου, όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα

LAI είναι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας

Πίνακας 18 Φωτοσυνθετικός μηχανισμός (C3/C4), ειδική φυλλική επιφάνεια (SLA, m² / kg) συντελεστής διεισδυτικότητας για ορατό φάσμα (KE), σχετικός ρυθμός αναπνοής διατήρησης (RMorg, kg kg⁻¹d⁻¹), και συντελεστής μετατροπής ξηρής ουσίας, EC (kg kg⁻¹)

Καλλιέργεια	C3 / C4	SLA (εύρος)	KE	RM (org)*				EC (org)*			
				RML	RMR	RMS	RMSO	ECL	ECR	ECS	ECSO
αραχίδα	C3	18	0.6	0.030	0.010	0.015	0.012	0.72	0.72	0.69	0.50
βαμβάκι	C3	16-24	0.6	0.010	0.010	0.015	0.010	0.72	0.72	0.69	0.61
γλυκοπατάτα	C3	14-20	0.45	0.028	0.025	0.020	0.005	0.72	0.72	0.69	0.80
δόλιχος	C3	32-40	0.5	0.030	0.010	0.015	0.011	0.72	0.72	0.69	0.81
ηλίανθος	C3	25-30	0.8	0.015	0.010	0.0075	0.023	0.59	0.71	0.73	0.71
καλαμπόκι	C4	12-32	0.6	0.013	0.010	0.010	0.010	0.72	0.72	0.69	0.72
καπνός	C3	10-31	0.5	0.015	0.010	0.015	--	0.72	0.72	0.69	--
κριθάρι	C3	18-27	0.44	0.015	0.010	0.015	0.007	0.72	0.72	0.69	0.74
κεχρί	C4	18-23	0.5	0.020	0.007	0.010	0.007	0.72	0.72	0.69	0.74
μπιζέλι	C3	20-28	0.5	0.030	0.010	0.015	0.010	0.72	0.72	0.69	0.78
πατάτα	C3	25-32	0.5	0.010	0.010	0.015	0.007	0.72	0.72	0.69	0.85
ρεβίθι	C3	15-20	0.5	0.030	0.010	0.015	0.009	0.72	0.72	0.69	0.77
Ρύζι	C3	18-27	0.4	0.015	0.010	0.015	0.0035	0.72	0.72	0.69	0.74
Σιτάρι	C3	16-24	0.5	0.017	0.010	0.015	0.010	0.72	0.72	0.69	0.79
σόγια	C3	15-23	0.4	0.015	0.010	0.015	0.017	0.72	0.72	0.69	0.68
σόργο	C4	11-21	0.5	0.015	0.010	0.010	0.010	0.72	0.72	0.69	0.74
σουσάμι	C3	21-30	0.5	0.015	0.010	0.015	0.012	0.72	0.72	0.69	0.62
φακή	C3	32-37	0.5	0.015	0.010	0.015	0.013	0.72	0.72	0.69	0.71

* org = L (φύλλα), R (ρίζα), S (βλαστός), SO =όργανα καρποφορίας. (Πηγή: Driessen & Konijn, 1992)

Ο ρυθμός αφομοίωσης του CO₂ εκφράζεται σε kg CO₂ ha⁻¹ d⁻¹. Το CO₂ που έχει αφομοιωθεί, μειώνεται περαιτέρω στην καλλιέργεια με την μορφή υδατανθράκων και σακχάρων (CH₂O)_n. Για να υπολογίσουμε τον ρυθμό αφομοίωσης εκφραζόμενο σε υδατάνθρακες, FGASS (kg (CH₂O)_n ha⁻¹ d⁻¹), ο ρυθμός αφομοίωσης CO₂ (FGC) πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την αναλογία του μοριακού βάρους υδατανθράκων και διοξειδίου του άνθρακα (= 30/44) και να σταθμιστεί με την θερμοκρασία, την διαχυτικότητα της επιφάνειας της φυλλικής επιφάνειας και την διαθεσιμότητα σε υγρασία:

$$FGASS = 30/44 * FGC * CFL * CFT * CFW \quad (6)$$

Όπου,

FGASS είναι ο ολικός ρυθμός αφομοίωσης (kg (CH₂O)_n ha⁻¹ d⁻¹),

FGC είναι ο ολικός ρυθμός αφομοίωσης (kg (CO₂) ha⁻¹ d⁻¹),

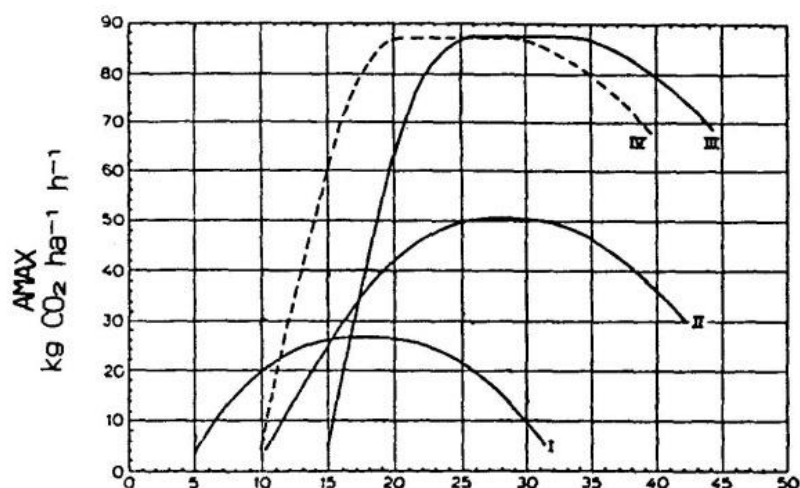
CFL είναι ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας (εξίσωση 5)

CFW είναι ο συντελεστής διαθεσιμότητας νερού (=1 στην περίπτωση υπολογισμού δυναμικού παραγωγής)

CFT είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας (0-1) και προσδιορίζεται από πειραματικές παρατηρήσεις ή βιβλιογραφικά δεδομένα (Driessen & Konijn, 1992, Van Heemst, 1988).

Ο συντελεστής CFT υπολογίζεται, από την σχετική πτώση της AMAX στο παρακάτω διάγραμμα θεωρώντας μέγιστες τιμές AMAX=86 kg ha⁻¹ h⁻¹ για φυτά τύπου C4 και AMAX=50 kg ha⁻¹ h⁻¹ για φυτά τύπου C3.

AMAX είναι ο μέγιστος ρυθμός καθαρής αφομοίωσης CO₂ σε μεγάλη έντασης φωτισμό (κορεσμού).



Διάγραμμα 11 Γενικές καμπύλες αντίδρασης AMAX σε θερμοκρασίες για διαφορετικές ομάδες καλλιιεργειών (Versteeg & van Keulen, 1986). I = C3 plants in cold and temperate climates, II = C3 plants in hot climates, III = C4 plants in warm climates, IV = C4 plants in cold climates

Όπως προαναφέραμε, τα φυτά χρειάζονται ενέργεια για την διατήρηση των ιονικών συγκεντρώσεων και την επανασύνθεση των πρωτεϊνών που αποδομούνται (αναπνοή διατήρησης). Ενέργεια χρειάζεται επίσης για την μετατροπή των πρωτογενών φωτοσυνθετικών παραγώγων σε δομικά υλικά (αναπνοή αύξησης)

Σε πολύπλοκα μοντέλα προσομοίωσης λαμβάνεται υπόψη η προσαρμοστικότητα των φυτών στο θερμοκρασιακό τους περιβάλλον, και αναφέρονται διάφοροι τρόποι προσδιορισμού της θερμοκρασίας αναφοράς από τις θερμοκρασίες των προηγούμενων 24ώρων. Έτσι ο ρυθμός αναπνοής διατήρησης μπορεί να προσδιοριστεί με τους τύπους:

$$\text{MRREF}(\text{org}) = (\text{RM}(\text{org}) * \text{S}(\text{org})) \quad (7)$$

$$\text{MRR}(\text{org}) = \text{MRREF}(\text{org}) * \text{CFTR}, \text{ όπου} \quad (8)$$

$$\text{MRR} = \Sigma \text{MRR}(\text{org}) \quad (9)$$

Όπου:

MRREF είναι ο ρυθμός αναπνοής στη θερμοκρασία αναφοράς ($\text{kg ha}^{-1}\text{d}^{-1}$)

MRR είναι ο σχετικός ρυθμός αναπνοής διατήρησης (σύνολο για όλα τα φυτικά όργανα) ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$),

RM είναι ο σχετικός ρυθμός αναπνοής ($\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)

CFTR είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τις επικρατούσες θερμοκρασίες (0 – 1).

(org) είναι δείκτης που χαρακτηρίζει τα διάφορα φυτικά όργανα

S(org) είναι το ξηρό βάρος του φυτικού οργάνου της καλλιέργειας (kg ha^{-1}).

Ο διορθωτικός συντελεστής CFTR υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\text{CFTR} = Q_{10} * ((T - \text{TREF}) / 10), \quad (10)$$

Όπου:

Q_{10} είναι παράγοντας που καθορίζει το μέγεθος της αύξησης με αύξηση θερμοκρασίας κατά 10°C .

T είναι η μέση θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$)

TREF είναι η θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}\text{C}$)

Περαιτέρω, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 18, μπορούμε να προβλέψουμε τον ολικό ρυθμό ανάπτυξης ξηράς ουσίας της καλλιέργειας (DWI) ή μεμονωμένα για τους βλαστούς, τα φύλλα, τις ρίζες και τα αναπαραγωγικά όργανα, συνδυάζοντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$DWI = EC * (FGASS - MRR * TLDW) \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \quad (11)$$

Όπου,

DWI είναι ο ρυθμός αύξησης μάζας ξηράς ουσίας της καλλιέργειας (kg ha^{-1}),
EC(org) είναι ο συντελεστής μετατροπής των υδατανθράκων σε δομική ξηρή ουσία του φυτικού οργάνου (kg kg^{-1}),
FGASS είναι ο συνολικός ρυθμός αφομοίωσης της καλλιέργειας εκφραζόμενη σε υδατάνθρακες ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$),
MRR(org) είναι ο σχετικός ρυθμός αναπνοής διατήρησης του φυτικού οργάνου της καλλιέργειας ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$),
TLDW είναι η συνολική ξηρή ουσία της καλλιέργειας (kg ha^{-1})

$$\text{Έτσι: } DWI = FGC * (30/44) * CFT * CFW * 0.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \quad (12)$$

Όπου,

0.6 είναι η διορθωμένη τιμή της αναπνοής αύξησης και αναπνοής συντήρησης

Συλλέγοντας τους αγνώστους των προηγούμενων εξισώσεων, με σκοπό να επιλυθούν χωρικά, πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε μοντέλα επιφανείας και έπειτα να τροφοδοτήσουν μια υπολογιστική ρουτίνα Γ.Σ.Π., Βασισμένη σε πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών αρχείων (Raster Calculator), για περαιτέρω ανάλυση. Για την επίλυση των πράξεων μεταξύ ψηφιδωτών, πρέπει να μετατρέψουμε με την χρήση γεωστατιστικής όλες τις σημειακές μετρήσεις των αγνώστων αυτών σε χωρικές αποδόσεις όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Συγκεντρωτικά, οι άγνωστοι των εξισώσεων (3) έως (12) καθώς και οι πηγές προέλευσής τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 19 Αγνώστων τιμών, πηγών και μεταφραστικής διαδικασίας Μοντέλου πρόβλεψης σε Μοντέλο Γ.Σ.Π.

Αγνώστος	Μονάδα μέτρησης	Πηγή	Νέα Πηγή	Μεταβλητή	Τύπος σχήματος	Μετάφραση	Χωρικό αποτέλεσμα
Είδος καλλιέργειας							
T_{base}	C°/Day	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
T_{Sum1}	C°/Day	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
T_{Sum2}	C°/Day	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
T_{ref}	C°	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
SLA	m ² / kg	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
KE	Συντελεστής	Βιβλιογραφία-εργαστήριο		Model Parameter			
EC	kg kg ⁻¹						
LAI	m ² /m ²	Εμπειρικά/Μέτρηση	Τηλεπισκόπηση	Model Equation		Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
CFL	%	Υπολογισμός	LAI - Τηλεπισκόπησης	Model Equation		Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
Κλιματικά δεδομένα							
Day T_{max}	C°	Κλιματολογία	Κλιματικός Άτλαντας	Model Parameter	Σημείο		
Day T_{min}	C°	Κλιματολογία	Κλιματικός Άτλαντας	Model Parameter	Σημείο		
Day T_a (Μέση)	C°	Υπολογισμός	Υπολογισμός & Υψομετρική διόρθωση	Model Equation	Σημείο	Εξίσωση & Χωρική παρεμβολή	Μοντέλο Επιφάνειας
Day length N	Ώρες	Βιβλιογραφία-Πίνακες	Γ.Σ.Π. Προσπ. Ακτινοβολία & διορθ. Αναγλύφου	Model Equation	Σημείο	εργαλείο Γ.Σ.Π.	Μοντέλο Επιφάνειας
Day length n	Ώρες	Βιβλιογραφία-Πίνακες	Προσπ. Ακτινοβολία & διορθ. Αναγλύφου	Model Equation	Σημείο	εργαλείο Γ.Σ.Π.	Μοντέλο Επιφάνειας
Day length N/n	Συντελεστής	Υπολογισμός	Υπολογισμός μεταξύ ψηφιδωτών	Model Equation		Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
FCL	CO ₂ (Kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Βιβλιογραφία-Πίνακες		Model Parameter			
FOV	CO ₂ (Kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Βιβλιογραφία-Πίνακες		Model Parameter			
CFW	%	Μέθοδο άρδευσης- Παρατήρηση	Μέθοδο άρδευσης-Τηλεπισκόπηση -διορθ. Αναγλύφου	Model Parameter		Χωρική παρεμβολή	Μοντέλο Επιφάνειας
MRR & MRR(org)	kg ha ⁻¹ d ⁻¹	Βιβλιογραφία-Πίνακες		Model Parameter/equation			
Παράγωγα Αποτελέσματα							
CFTR	Συντελεστής	Σημειακός Υπολογισμός	Υπολογισμός μεταξύ ψηφιδωτών			Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
FGC	Kg ha ⁻¹ d ⁻¹	Σημειακός Υπολογισμός	Υπολογισμός μεταξύ ψηφιδωτών			Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
FGASS	kg (CH ₂ O) ha ⁻¹ d ⁻¹	Σημειακός Υπολογισμός	Υπολογισμός μεταξύ ψηφιδωτών			Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας
DWI	Kg ha ⁻¹ d ⁻¹	Σημειακός Υπολογισμός	Υπολογισμός μεταξύ ψηφιδωτών			Εξίσωση	Μοντέλο Επιφάνειας

3.1.2 Μετάφραση Χωρικού υπολογιστικού μοντέλου και δημιουργία επιφανειών με την μέθοδο ordinary kriging

Μία επιφάνεια στο γεωγραφικό χώρο είναι ένα συνεχές πεδίο από τιμές, οι οποίες διαφέρουν ως προς τη χωρική τους θέση (τοποθεσία) και καλούνται χωρομεταβλητές, αφού οι τιμές τους μεταβάλλονται στο γεωγραφικό χώρο. Για παράδειγμα, σημεία μίας περιοχής στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαφέρουν στο υψόμετρο, στη θερμοκρασία εδάφους, ή στη συγκέντρωση κάποιου χημικού στοιχείου ή ένωσης.

Οποιοσδήποτε από αυτές τις χωρικές τιμές, ή χωρομεταβλητές, μπορεί να παρουσιασθούν σε ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα (X, Y, Z) , όπου X και Y είναι αντίστοιχα η ανατολική και η βόρεια συντεταγμένη και Z είναι η τιμή της υπό μελέτης χωρομεταβλητής. Επειδή μία φυσική επιφάνεια περιέχει ένα τεράστιο αριθμό σημείων, είναι αδύνατο να μετρήσει κάποιος τις τιμές Z σε κάθε σημείο. Για το λόγο αυτό γίνονται πραγματικές μετρήσεις σε ένα αντιπροσωπευτικό και ταυτόχρονα ικανοποιητικό αριθμό θέσεων, οι οποίες περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της τρισδιάστατης επιφάνειας.

Τα μοντέλα επιφανειών μας επιτρέπουν να αποθηκεύσουμε πληροφορίες για μία επιφάνεια σε ένα Γ.Σ.Π.. Ένα μοντέλο επιφανείας, προσεγγίζει μία επιφάνεια, παίρνοντας ένα δείγμα τιμών από διάφορα σημεία και στη συνέχεια με χωρική παρεμβολή υπολογίζει τις τιμές μεταξύ των σημείων αυτών.

Ένα Γ.Σ.Π. χρησιμοποιεί δύο ειδών μοντέλα επιφανειών:

Τριγωνικά (TINs) και τα Ψηφιδωτά (rasters).

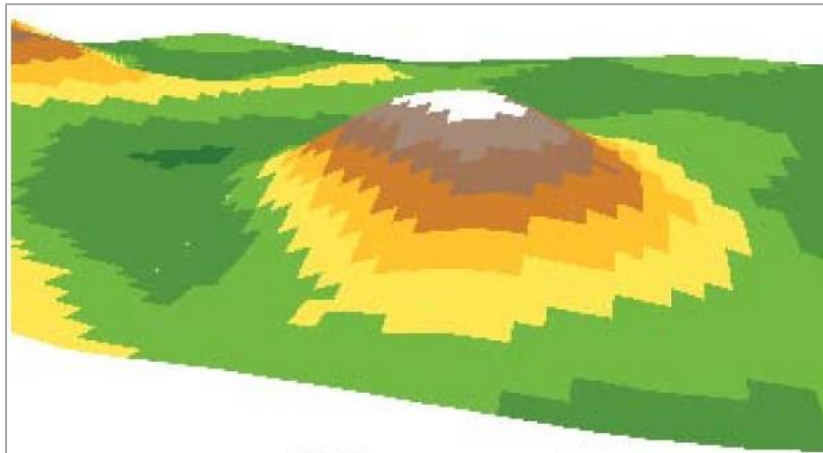
Τα τριγωνικά μοντέλα αναπαριστούν μία επιφάνεια με μία ομάδα ακανόνιστων θέσεων με τιμές, οι οποίες συνδέονται για να σχηματίσουν ένα δίκτυο τριγώνων με τις τιμές Z αποθηκευμένες στους κόμβους κάθε τριγώνου.

Τα ψηφιδωτά αναπαριστούν μία επιφάνεια με ένα κανονικό πλέγμα (grid) θέσεων με δείγματα, πραγματικών τιμών της υπό μελέτης χωρομεταβλητής και θέσεις με ενδιάμεσες τιμές υπολογισμένες με κάποια μέθοδο παρεμβολής.

Οι ψηφιδωτές επιφάνειες αποθηκεύονται σε μορφή πλέγματος. Κάθε πλέγμα αποτελείται από ένα ορθογώνιο πίνακα από ομοιόμορφα κατανομημένα στον χώρο φατνία (pixels) ιδίου

μεγέθους στα οποία αποθηκεύονται οι τιμές Z . Όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος του φατνίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η χωρική διακριτικότητα του ψηφιδωτού.

Δεν μπορούμε να αναπαραστήσουμε μεμονωμένα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως η κορυφογραμμή της παρακάτω εικόνας με μεγαλύτερη ακρίβεια χωρίς την χρησιμοποίηση των φατνίων ψηφιδωτών επιφανειών



Εικόνα 1 Ψηφιδωτή επιφάνεια ισοϋψών σε μορφή πλέγματος.

Τα ψηφιδωτά χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση εικόνων και θεματικών δικτύων δεδομένων και υπολογίζονται κατά Kriging με την παρακάτω σχέση:

$$z^*(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (13)$$

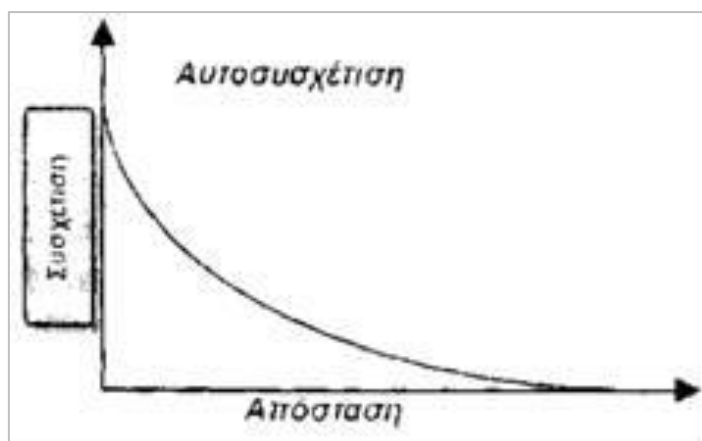
Όπου

$Z^*(s_0)$ είναι η προβλεπόμενη τιμή

$Z(s_i)$ είναι οι τιμές των πραγματικών δεδομένων

λ_i είναι ο συντελεστής βάρους Kriging

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι βασίζονται σε στατιστικά μοντέλα, τα οποία περιλαμβάνουν αυτοσυσχέτιση. Η συσχέτιση (correlation) είναι η τάση δύο μεταβλητών να συσχετίζονται μεταξύ τους. Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται η αυτοσυσχέτιση ως συνάρτηση της συσχέτισης και της απόστασης. Παρατηρούμε ότι όσο η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων είναι μικρή, η αυτοσυσχέτιση των μετρήσεων είναι μεγάλη, ενώ αντίθετα όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ τους η αυτοσυσχέτιση μειώνεται.



Διάγραμμα 12 Η αυτοσυσχέτιση ως συνάρτηση της συσχέτισης και της απόστασης κατά Kriging

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι, εκτός του ότι προβλέπουν τις τιμές για τη δημιουργία μίας επιφάνειας, έχουν επιπλέον τη δυνατότητα να παρέχουν στοιχεία για την ακρίβεια της πρόβλεψης (Cressie, 1988).

Οι μέθοδοι αυτές είναι συνυφασμένες με τη μέθοδο Kriging και τις παραλλαγές της. Η μέθοδος Kriging ομοιάζει με την αιτιοκρατική μέθοδο IDW στο γεγονός ότι δίνει βάρη και αυτή στις μετρήσεις των σημείων δειγματοληψίας, από τις οποίες θα προβλεφθεί μία τιμή (Gong et al., 2014). Τα βάρη δεν βασίζονται μόνο από την απόσταση των σημείων, αλλά και από τη συσχέτιση μεταξύ τους. Επειδή, οι γεωστατιστικές μέθοδοι εξάγουν τις παραμέτρους που χρησιμοποιούν για την πρόβλεψη τιμών από πραγματικές μετρήσεις, θεωρούνται ότι είναι οι πλέον ακριβείς μέθοδοι παρεμβολής. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι προϋποθέτουν όμως να υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός πρωτογενών πληροφοριών για τον υπολογισμό των απαιτούμενων γεωστατιστικών παραμέτρων, που απαιτούνται για την πρόβλεψη τιμών με το μικρότερο δυνατό σφάλμα. Για να δημιουργηθεί μία επιφάνεια με το Kriging, απαιτούνται μία σειρά βημάτων, τα οποία περιγράφονται ως «δομική γεωστατική ανάλυση των δεδομένων».

Η γεωστατιστική αναπτύχθηκε αρχικά στη μεταλλευτική έρευνα και στη συνέχεια επεκτάθηκε σχεδόν σε όλο το φάσμα των γεωεπιστημών (Pawlowsky-Glahn and Egozcue, 2016). Εκτός της εφαρμογής της γεωστατιστικής στον υπολογισμό των αποθεμάτων, χρησιμοποιείται και στην εκτίμηση των τιμών παρεμβολής για τη γεωγραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων στην εφαρμοσμένη γεωχημική έρευνα πετρώματος, εδάφους, ιζήματος ρέματος, επιφανειακού και υπόγειου νερού και λοιπών περιβαλλοντικών μετρήσεων (Dafonte et al., 2010).

Εφ' όσον υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός δειγμάτων, που να καλύπτει την περιοχή μελέτης, η παρεμβολή των τιμών, μέσω της γεωστατιστικής, θεωρείται ότι είναι ο βέλτιστος τρόπος γεωγραφικής απεικόνισης των δεδομένων αυτών.

Το βασικό εργαλείο της γεωστατιστικής είναι το βαριόγραμμα ή ημιβαριόγραμμα, το οποίο βασίζεται στον χαρακτηρισμό της μεταβολής της συνδιασποράς (covariance) των τιμών των συγκεντρώσεων μίας μεταβλητής ανά ζεύγη των θέσεων δειγματοληψίας, με σταδιακή αύξηση της μεταξύ τους απόστασης, δηλ. ο άξονας-Υ αντιπροσωπεύει τη συνδιασπορά και ο άξονας-Χ την απόσταση μεταξύ των δειγμάτων.

Τα γεωχημικά δεδομένα συνήθως ακολουθούν το σφαιρικό πρότυπο (βλέπε παρακάτω). Ένα από τα χαρακτηριστικά των βαριογραμμάτων των γεωχημικών δεδομένων είναι ότι η διασπορά μπορεί να μην είναι μηδέν στη μηδενική απόσταση, γεγονός που οφείλεται στα συνιστώμενα τυχαία σφάλματα των μετρήσεων, όπως δειγματοληψίας, προπαρασκευής και ανάλυσης των δειγμάτων, δηλ. αναφέρεται στις τυχαίες συνιστώσες των μετρήσεων της αβεβαιότητας. Η απόσταση αυτή της τομής στον άξονα-Υ της καμπύλης του βαριογράμματος καλείται «επίδραση του κόκκου» (nugget effect) ή «διασπορά του κόκκου» (nugget variance).

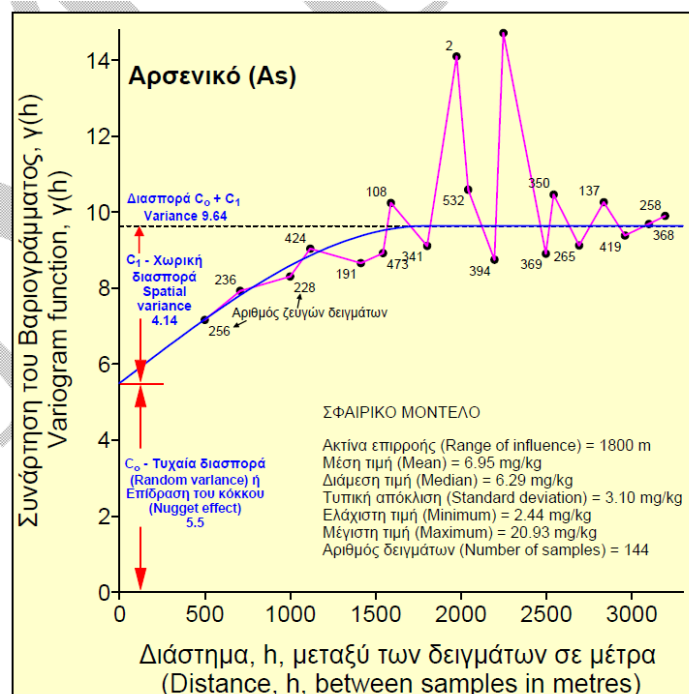
Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κατασκευή αξιόπιστου βαριογράμματος απαιτεί τη συλλογή ενός μεγάλου σχετικά αριθμού δειγμάτων, τα οποία να καλύπτουν ικανοποιητικά όλο το χώρο της υπό μελέτης περιοχής (Oliver and Webster, 2014). Αυτός ο βασικός όρος δημιουργεί ουσιαστικό πρόβλημα στην έρευνα μικρής έκτασης περιοχών της τάξεως του ενός εκταρίου (10.000 m²). Ωστόσο, η γεωστατική μέθοδος Kriging δύναται να χρησιμοποιηθεί, εφόσον συλλεχθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός δειγμάτων, ώστε να γίνει μία αξιόπιστη γεωστατιστική δομική ανάλυση χρησιμοποιώντας βαριογράμματα σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Η μέθοδος Kriging μπορεί συνεπώς να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό, όχι μόνο των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων σε ενδιάμεσες θέσεις μέσα στην περιοχή έρευνας, αλλά επίσης και του τυπικού σφάλματος εκτίμησης Kriging, το οποίο είναι μία εκτίμηση

της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Έτσι, το τυπικό σφάλμα εκτίμησης Kriging μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της κάθε υπολογισμένης τιμής Kriging, η οποία δημιουργείται με σημειακό ή μπλοκ Kriging.

Η μέθοδος παρεμβολής Kriging, όπως και όλες οι άλλες μέθοδοι, στηρίζεται στη βασική αρχή, ότι τα κοντινότερα σημεία μοιάζουν πολύ περισσότερο από αυτά που είναι μακρύτερα. Το εμπειρικό ημιβαριόγραμμα εξακριβώνει ακριβώς αυτή τη σχέση. Τα ζεύγη των σημείων τα οποία βρίσκονται σε κοντινή απόσταση θα πρέπει να έχουν μικρότερη διαφορά στις τιμές τους, από ότι αυτά που βρίσκονται μακριά. Αυτή η σχέση φαίνεται στο ημιβαριόγραμμα.

Η προσαρμογή μοντέλου στο ημιβαριόγραμμα επιτυγχάνεται με την προσαρμογή μίας γραμμής η οποία προσαρμόζεται καλύτερα μεταξύ των σημείων του εμπειρικού ημιβαριογράμματος, όπως παρατηρούμε στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 13 Παράδειγμα προσαρμογής μοντέλου ημιβαριογράμματος

Η γραμμή αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η διαφορά της απόστασης κάθε σημείου από την ευθεία εις το τετράγωνο, να είναι η χαμηλότερη δυνατή (Oliver and Webster, 2014). Η γραμμή αυτή θεωρείται ως ένα μοντέλο το οποίο ποσοτικοποιεί τη χωρική αυτοσυσχέτιση των δεδομένων μας. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η αυτόματη μοντελοποίηση του ημιβαριογράμματος, δεδομένου ότι η προσαρμογή χειρωνακτικά είναι μία χρονοβόρος και επίπονη διαδικασία και η οποία απαιτεί εμπειρία.

Για τον υπολογισμό των μοντέλων της παρούσας διατριβής, απαραίτητα πρέπει να μετατρέψουμε τα κλιματικά δεδομένα σε μοντέλα επιφάνειας με την μέθοδο που παρουσιάστηκε. Στην συνέχεια θα δούμε πως εφαρμόζεται στα συστήματα Γ.Σ.Π..

3.1.2 α Εισαγωγή δεδομένων και εφαρμογή χωρικής παρεμβολής

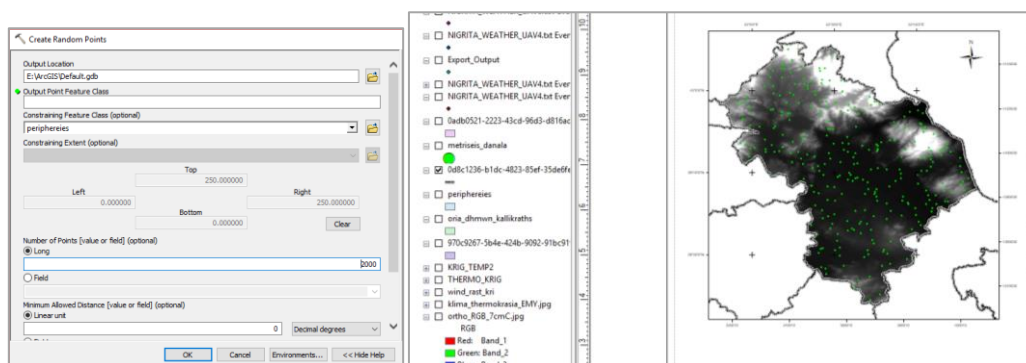
Για να κατανοήσουμε την μέθοδο, καθώς και το πλήθος των δεδομένων που θα επεξεργαστούμε, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση της μεθόδου εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων που πρέπει να μετατρέψουμε σε μοντέλα επιφανειών σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., με πρότυπο το λογισμικό ArcGIS / ArcMap 10.1.

α.1 Εισαγωγή δεδομένων Μετεωρολογικών Σταθμών

Η εισαγωγή δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς, μπορεί να μας δίδει μικρότερο αριθμό δεδομένων προς επεξεργασία, απαιτεί όμως μεγαλύτερο φόρτο χειρωνακτικής εργασίας και μετατροπών, ώστε τα τελικά δεδομένα μας να έχουν την απαιτούμενη χωρική διακριτικότητα.

Για το λόγο αυτό, εισάγουμε τα ψηφιοποιημένα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών όπως προκύπτει από την διαδικασία του κεφ. 3.2.3, στο λογισμικό ArcMap.

Άμεσα παρατηρούμε ότι η διασπορά και το πλήθος των υφιστάμενων μετ. σταθμών, δεν είναι ικανός ώστε να παραχθεί το ζητούμενο μοντέλο επιφανείας. Έτσι δημιουργούμε ένα νέο αρχείο με σημεία από την εργαλειοθήκη Data Management Tools, Feature class, create random points.

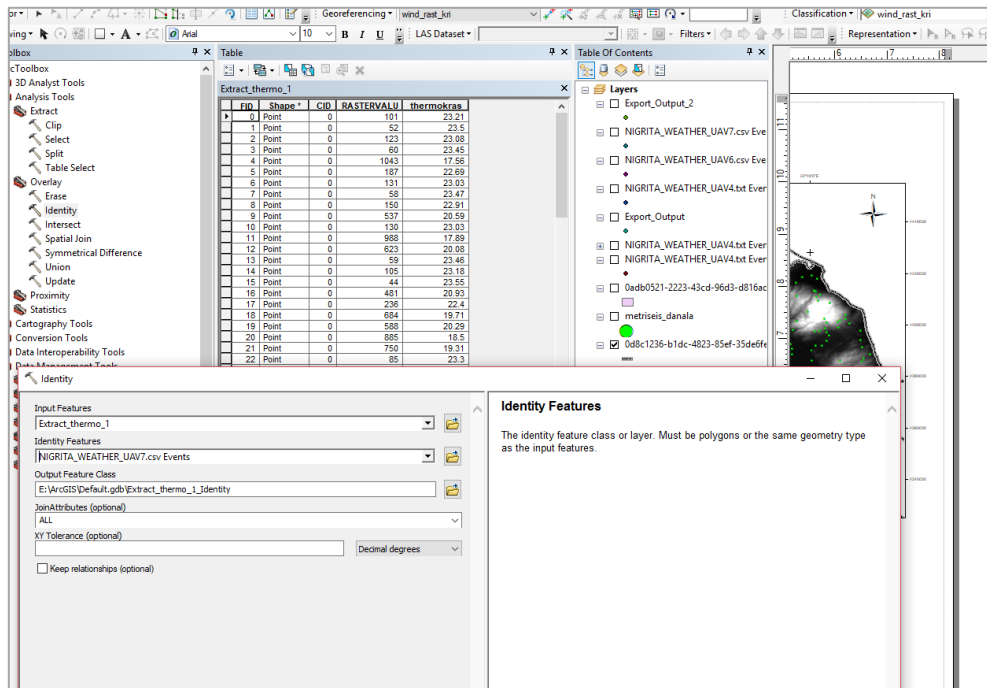


Εικόνα 2 Δημιουργία νέου σημειακού επίπεδου σε περιβάλλον ArcMap 10.1

Παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα, ότι πλέον έχουμε ικανό αριθμό για της ανάγκες της χωρικής παρεμβολής. Επίσης παρατηρούμε ότι έχουμε εισάγει το μοντέλο επιφανείας ώστε να προβούμε σε διόρθωση της θερμοκρασίας με βάση το υψόμετρο.

Στην συνέχεια έπρεπε να προβούμε σε δύο ακόμα μετατροπές.

1. Με την εντολή Identity της εργαλειοθήκης Overlay, ώστε να κάνουμε επίθεση του σημειακού επιπέδου, ώστε το αποτέλεσμα της ταυτότητας να είναι το σημειακό μας επίπεδο να συμπεριλάβει στα περιγραφικά δεδομένα το υψόμετρο από το μοντέλο επιφάνειας.
2. Με την εντολή nearest, το σημειακό μας επίπεδο να λάβει την τιμή θερμοκρασίας του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού ή της επιτόπιας μέτρησης.



Εικόνα 3 Χρήση της εντολής Identity και συμπλήρωση των περιγραφικών δεδομένων του σημειακού επιπέδου (ArcMap 10.1)

Τέλος στα περιγραφικά δεδομένα του σημειακού επιπέδου να δημιουργήσουμε ένα νέο πεδίο ώστε να υπολογίσουμε την διόρθωση της θερμοκρασίας. Για την διόρθωση της θερμοκρασίας κατά την αλλαγή υψόμετρου χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$T_i = T_0 + 1 + (H_0 - H_1) \times 0,006 \quad (14)$$

Όπου

T_i είναι η θερμοκρασία του τυχαίου σημείου

T_0 είναι η θερμοκρασία του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού

H_0 είναι το υψόμετρο του τυχαίου σημείου

H_1 είναι το υψόμετρο του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού

Μετά τις απαραίτητες μετατροπές, μπορούμε να προβούμε σε χωρική παρεμβολή από την εργαλειοθήκη Geostatistical Analysis, Ordinary Kriging, για να μετατρέψουμε τις τιμές του σημειακού επιπέδου, σε μοντέλο επιφάνειας.

α.2 Εισαγωγή δεδομένων από την μονάδα αυτόματου πιλότου.

Όπως θα δούμε και στην συνέχεια αναλυτικά (κεφ.3.2.2&3), οι σύγχρονες μονάδες αυτόματου πιλότου αποθηκεύουν με πολύ υψηλή ταχύτητα δειγματοληψίας (100~1000Hz), τις τιμές όλων των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα και μπορούν να ανακτηθούν για μετεπεξεργασία.

Εμείς θα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι, τα δεδομένα αυτά περιέχουν και πληροφορία θέσεως, καθώς επίσης και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η δυσκολία της παρούσας φάσης, έγκειται στο γεγονός, ότι έχουμε να διαχειριστούμε πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων και ταυτόχρονα, να διορθώσουμε τυχόν διαφορές στα φορμά κωδικοποίησης αποθήκευσης κειμένου με τα οποία λειτουργεί το κάθε λογισμικό με το οποίο θα εργαστούμε.

Η πληροφορία, αποθηκεύεται σε μηνύματα, τα οποία έχουν ένα συγκεκριμένο τίτλο (header), τον οποίο πρέπει να γνωρίζουμε, ώστε να εξάγουμε την επιθυμητή πληροφορία. Τα μηνύματα τα οποία θα αξιοποιήσουμε για επεξεργασία από την μονάδα αυτόματου πιλότου είναι τα εξής:

- POS: Πληροφορία θέσης σε Latitude, Longitude, Mean sea level Altitude EG90, με συνυπολογισμό αισθητήρων αδρανειακής μονάδας μέτρησης (LAT, LONG, ALT).
- BARO: Πληροφορία βαρομετρικής πίεσης σε millibar (PRESS) και Θερμοκρασίας εντός του αεροχήματος σε βαθμούς κελσίου (TEMP_IN)
- ARSPD: Πληροφορίες του αισθητήρα αέρα και συγκεκριμένα την θερμοκρασία αέρα(TEMP_AIR) σε βαθμούς κελσίου και την υπολογισμένη ταχύτητα ανέμου σε μέτρα/δευτερόλεπτο(WIND_Sp)

3.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Στο δεύτερο στάδιο του πειράματος θα μετατρέψουμε τα τηλεπισκοπικά δεδομένα που συλλέγονται από την εναέρια πλατφόρμα σε δείκτες βλάστησης (indices) με τους οποίους θα ποσοτικοποιήσουμε την οπτική πληροφορία και θα συσχετίσουμε τα αποτελέσματα με τα ανωτέρω μαθηματικά μοντέλα.

Επίσης τα δεδομένα που συλλέγονται από τους λοιπούς αισθητήρες του αεροσκάφους θα τροποποιηθούν σε πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας (MAVLink) για την τροφοδότηση των Γ.Σ.Π. με απαραίτητα δεδομένα όπως: βαρομετρική πίεση, θερμοκρασία αέρος, ύψος πτήσης, κλίση κάμερας, διαφοράς πίεσης υδρατμών, μαγνητικού βορρά, ταχύτητα αέρος και εδάφους, σχετικής υγρασίας και τηλεμετρίας.

Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης θα προσομοιωθούν για τις απαιτήσεις του πειράματος με δεδομένα από :

- Δορυφορικές εικόνες Landsat TM5
- Ορθογεωαναφερμένα υπόβαθρα της Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Τοπογραφικά διαγράμματα Γ.Υ.Σ, κλίμακας 1:5000
- Δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών (EMY)

Επίσης θα αναλυθεί η διαδικασία της φωτογραμμετρικής απόδοσης των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες χαρτογράφησης και θα δοθεί έμφαση στην σύνδεση τους με τα δεδομένα της αδρανειακής μονάδας μέτρησης, του δέκτη GPS, καθώς και των φωτοσταθερών σημείων για την ορθή γεωαναφορά τους (Hatzopoulos et al., 2006).

3.2.1 Αισθητήρες Χαρτογράφησης

Όλα τα δεδομένα των αισθητήρων χαρτογράφησης, πρωτογενώς επεξεργάστηκαν με την ίδια μέθοδο. Τα δεδομένα εισήχθησαν σε λογισμικό επεξεργασίας εικόνων SFM (Structure from motion) και συγκεκριμένα το Agisoft Metashape 1.5.1. Στο περιβάλλον του λογισμικού, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

A. Το πρώτο βήμα, αφορά την αρχική ευθυγράμμιση των εικόνων (alignment), όπου το λογισμικό βρίσκει και ταυτίζει, όμοια σημεία με την βοήθεια του χρήστη και ταυτόχρονα, υπολογίζεται η θέση κάθε φωτοληψίας και βαθμονομούνται τα σφάλματα της επίλυσης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σημείο είναι οι εξής:

A.1 Για αισθητήρες χαρτογράφησης τύπου Frame:

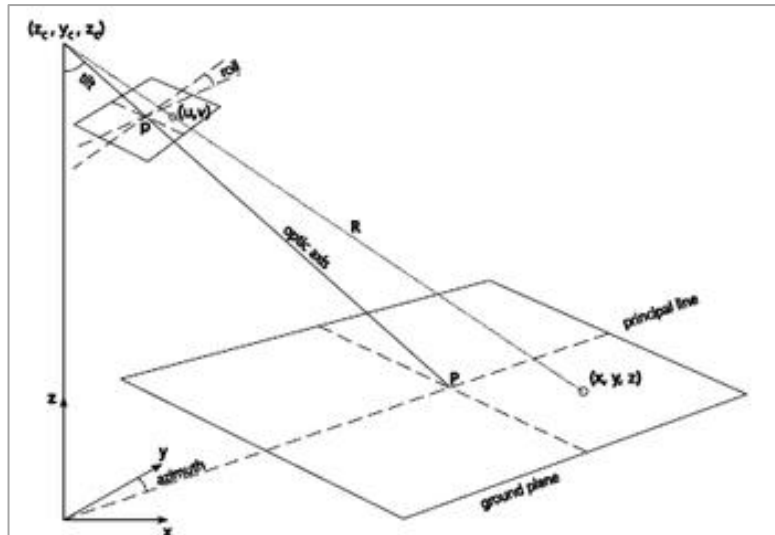
- $x = X / Z$
- $y = Y / Z$
- $r = \text{sqrt}(x^2 + y^2)$
- $x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$
- $y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$
- $u = w * 0.5 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2$
- $v = h * 0.5 + c_y + y'f$

A.2 Για αισθητήρες χαρτογράφησης τύπου Fisheye (Parrot SEQUOIA):

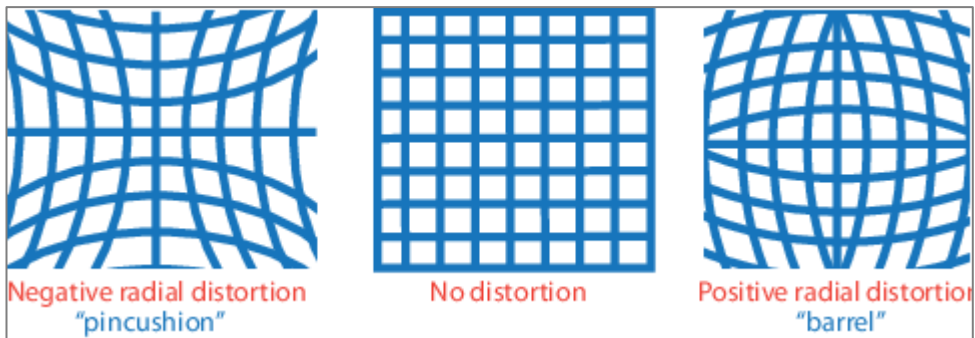
- $x_0 = X / Z$
- $y_0 = Y / Z$
- $r_0 = \text{sqrt}(x_0^2 + y_0^2)$
- $x = x_0 * \tan^{-1}r_0 / r_0$
- $y = y_0 * \tan^{-1}r_0 / r_0$
- $r = \text{sqrt}(x^2 + y^2)$
- $x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$
- $y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy)(1 + P_3r^2 + P_4r^4)$
- $u = w * 0.5 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2$
- $v = h * 0.5 + c_y + y'f$

Όπου:

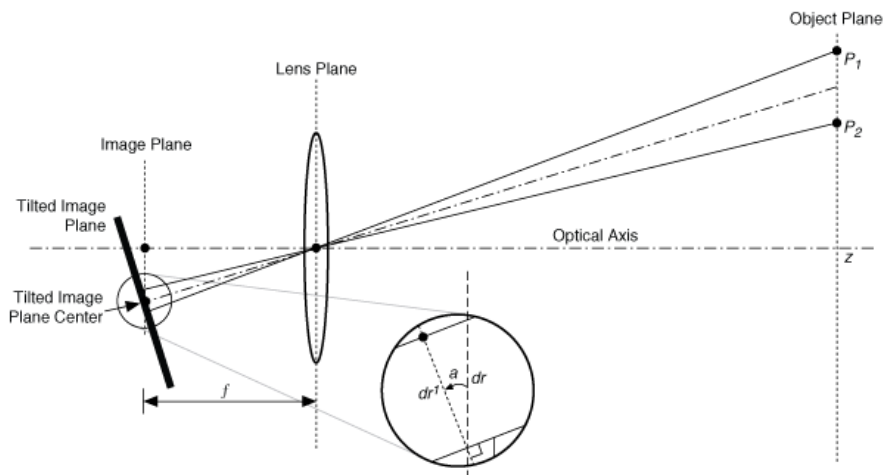
- (X, Y, Z) – Συντεταγμένες των σημείων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα
- (u, v) – Οι συντεταγμένες των προβαλλόμενων σημείων στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (σε pixels)
- f - focal length,
- C_x, C_y – Θέση κεντρικού σημείου (principal point offset),
- B_1, B_2 – Συντελεστές ανισοτροπικής κλίμακας (affinity) και μη ορθογωνικότητας αξόνων (non-orthogonality (skew)),
- K_1, K_2, K_3, K_4 – Συντελεστές Ακτινική Συμμετρικής διαστροφής (radial distortion coefficients),
- P_1, P_2, P_3, P_4 – Συντελεστές Εφαπτομενικής διαστροφής (tangential distortion coefficients)
- w, h - Το πλάτος και ύψος της εικόνας σε pixels



Συντεταγμένες αισθητήρα, εικόνας και κεντρικού σημείου



Ακτινική διαστροφή



Εφαπτομενική διαστροφή

Με το πέρας των παραπάνω υπολογισμών, παράγεται το αραιό νέφος σημείων, το οποίο χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς στην διαδικασία του αεροτριγωνισμού.

Β. Το επόμενο βήμα είναι η παραγωγή του πυκνού νέφους σημείων, με βάση τις φωτοληψίες και τον υπολογισμό των θέσεων τους και τους συντελεστές που εξήχθησαν στο προηγούμενο στάδιο. Το πυκνό νέφος μπορεί να επεξεργασθεί περαιτέρω (καθάρισμα, συμπύκνωση, ταξινόμηση κτλ.) και αποτελεί τη βάση για όλα τα παράγωγα προϊόντα που θα δούμε στην συνέχεια.

Γ. Με το πέρας του υπολογισμού του πυκνού νέφους μπορούμε να προβούμε σε 2.5D ή 3D ανακατασκευή της περιοχής μελέτης, υπολογίζοντας μέσω του λογισμικού αντίστοιχα τα:

- Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους (DEM) (2.5D)
- Ψηφιακό Μοντέλο επιφανείας (DSM) (2.5D)
- Δίκτυο Τριγώνων Επιφανείας (Mesh) (3D)

Δ. Τέλος, μπορούμε να συνδέσουμε τα παραγόμενα υποπροϊόντα και να προβούμε στον υπολογισμό και εξαγωγή:

- Ορθοφωτοχάρτη (συνδυασμός DEM και φωτοληψιών)
- Απόδοση υψής και χρώματος στο τρισδιάστατο μοντέλο (συνδυασμός Mesh και φωτομωσαϊκού)

Για την εξαγωγή δεικτών βλάστησης, καθώς και δεδομένων χαρτογράφησης, επιλέχθηκαν οι παρακάτω αισθητήρες:

3.2.1 α Αισθητήρες ορατού φάσματος υψηλής ανάλυσης

α1. Canon IXUS 160

Η φωτογραφική κάμερα Canon ixus 160, ήταν η πρώτη κάμερα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, χάριν του μικρού κόστους απόκτησης, της μεγάλης διακριτικής ικανότητας και της εκτενούς χρήσης της από τις κοινότητες ανοιχτού κώδικα για Αεροφωτογράφιση με μικρά μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ardupilot.org) και της χαρτογράφησης με την μέθοδο χαρταετού (chdk/Kite aerial photography).



Εικόνα 4 Η κάμερα Canon Ixus 160

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που συνέβαλαν στην επιλογή της είναι, η δυνατότητα σύνδεσης μέσω καλωδίου με την μονάδα αυτόματου πιλότου και την δυνατότητα ρυθμίσεων όλων των παραμέτρων φωτοληψίας με την χρήση προσαρμοσμένου firmware. Τα χαρακτηριστικά της αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

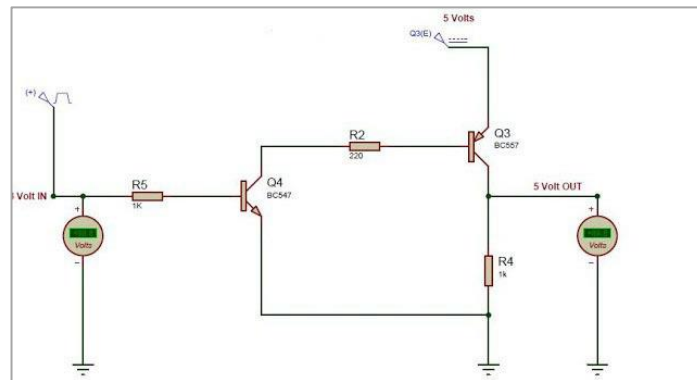
Πίνακας 20 Χαρακτηριστικών κάμερας Canon Ixus 160

Focal length 35mm equiv.	28 mm
Αριθμός οριζόντιων εικονοστοιχείων	5152
Αριθμός Κάθετων εικονοστοιχείων	3864
Πλάτος αισθητήρα	6,16 mm
Ύψος αισθητήρα	4,62 mm
Τύπος αισθητήρα	CCD
Ground Sample Distance @ 100m Alt	2.39 cm
Αποτύπωμα @ 100m Alt	123,2 x 92,4 m
Μέγιστος ρυθμός φωτοληψίας @ 100m Alt & 14m/s A/S	3 sec ή 54%Overlap
Τιμές ISO	100-1600
Διάφραγμα	f3.2
Βάρος	127 γρ.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε, ότι η σχετικά οικονομική κάμερα canon ixus 160 (~100€), μας παρέχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά για τις ανάγκες του πειράματος. Παρουσιάζει όμως τους παρακάτω περιορισμούς: Το μικρό μέγεθος αισθητήρα που σε συνδυασμό με τις τιμές διαφράγματος μειώνουν την ικανότητα απορρόφησης

ακτινοβολίας σε μη ιδανικές συνθήκες, και ο μικρός ρυθμός συνεχόμενων φωτοληγιών που δεν επιτρέπει μεγάλη αλληλεπικάλυψη επί των γραμμών πτήσης.

Για τον έλεγχο της κάμερας Canon IXUS 160, κατασκευάστηκε ένα καλώδιο ελέγχου, που μετατρέπει τις εντολές εξόδου της μονάδας αυτόματου πιλότου από σήμα PWM 3,3v (Pulse width modulation), σε σήμα PWM 5v και βύσμα USB mini type B που υποστηρίζει η κάμερα κατά το σχήμα:



Εικόνα 5 Ηλεκτρονική διάταξη καλωδίου ελέγχου camera canon ixus 160

Η τελική μορφή του καλωδίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για τον έλεγχο της κάμερας χρησιμοποιήθηκε το firmware CHDK (canon hack development kit) 1.4.1 1.00B (ixus160_elph160-100b-1.4.1-5146-full_ALPHA.zip) από την κοινότητα προγραμματιστών ανάπτυξης ελεύθερου λογισμικού CHDK.



Εικόνα 6 Το καλώδιο και η διασύνδεση της μονάδας αυτόματου πιλότου με την κάμερα canon ixus 160

2. Modified Sony A6000. Μαρ,

Η ραγδαία εξέλιξη της αγοράς στο τομέα των αισθητήρων για φωτογραφικές κάμερες και η συρρίκνωση των μεγεθών των υποσυστημάτων τους, οδήγησε στην εξάπλωση των συστημάτων mirrorless. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που παρατηρήσαμε στην κάμερα canon ixus 160, θεωρήσαμε σκόπιμο την απόκτηση και ένταξη στα πειράματά μας μιας κάμερας τύπου mirrorless με αυξημένες δυνατότητες ελέγχου και χαρακτηριστικών φωτοληψίας.



Εικόνα 7 Η κάμερα Modified Sony A6000

Με τις πειραματικές δοκιμές με κάμερα τύπου mirrorless είχαμε τον έλεγχο της διαστροφής του φακού, μας δόθηκε η δυνατότητα δοκιμών διαφόρων φακών για την εύρεση των βέλτιστων τιμών για τηλεπισκόπηση χαμηλού υψομέτρου, καθώς και η ανατροφοδότηση του αυτόματου πιλότου με την χρονική στιγμή της φωτοληψίας που συνέβαλε στην ορθότερη γεωαναφορά. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

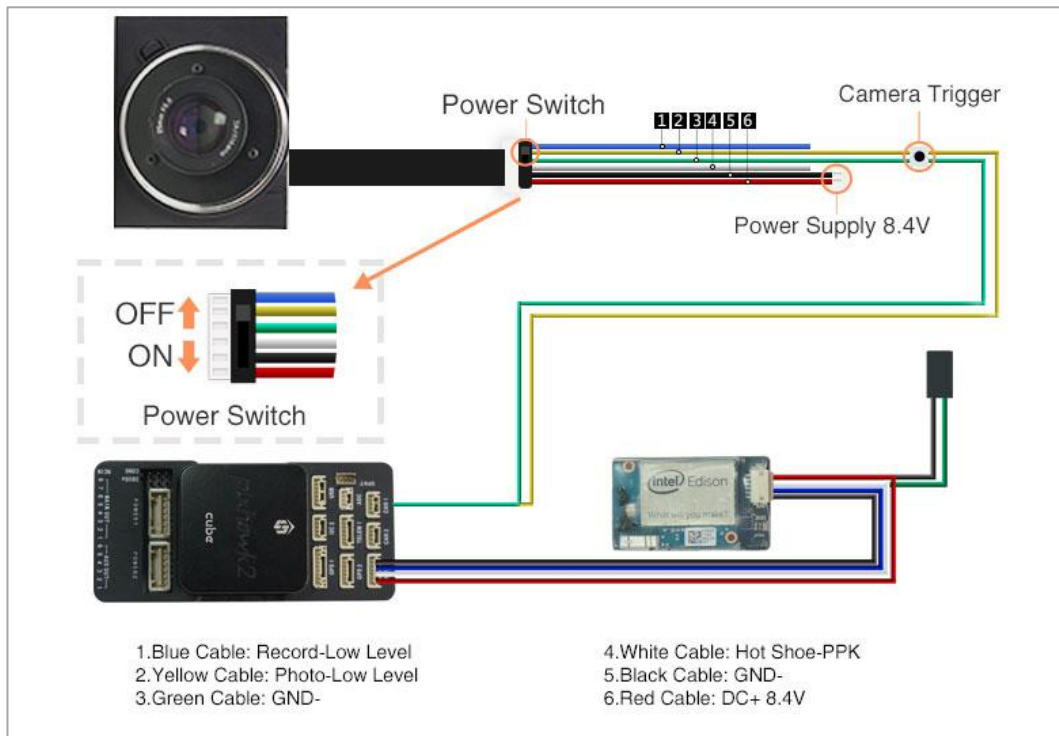
Πίνακας 21 Χαρακτηριστικών κάμερας Modified Sony A6000

Focal length 35mm equiv.	28 mm
Αριθμός οριζόντιων εικονοστοιχείων	6000
Αριθμός Κάθετων εικονοστοιχείων	4000
Πλάτος αισθητήρα	23,5 mm
Ύψος αισθητήρα	15,6 mm
Τύπος αισθητήρα	APS-C
Ground Sample Distance @ 100m Alt	1.95 cm
Αποτύπωμα @ 100m Alt	117,5 x 78 m
Μέγιστος ρυθμός φωτοληψίας @ 100m Alt & 14m/s A/S	6 FPS ή 96% Overlap
Τιμές ISO	100-25600
Φακός Sony 20mm f2.8 APS-C E mount	Σταθερός 20mm
Διάφραγμα	f2.8
Βάρος (με τον αποσπώμενο φακό)	170 γρ.

Η αναβάθμιση του συστήματος κάμερας ορατού φάσματος μας παρέχει μεγάλη ευελιξία και αρκετά ισχυρά χαρακτηριστικά για μελλοντικά πειράματα.

Οι διαφορές που μας γίνονται άμεσα ορατές από την σύγκριση των πινάκων χαρακτηριστικών, είναι η επαυξημένη χωρική διακριτικότητα, η φωτοευαισθησία και φυσικά ο ταχύτερος ρυθμός φωτοληψίας. Το κόστος παραμένει ο μόνος αποτρεπτικός παράγοντας αφού αγγίζει το δεκαπλάσιο από τις απλές κάμερες τύπου Point & Shoot. Επίσης προσδίδει ένα βαθμό δυσκολίας στην πειραματική διαδικασία αφού προσφέρει μεγαλύτερο αριθμό ρυθμίσεων.

Για τον έλεγχο της κάμερας Modified Sony A6000, δεν χρειάστηκε να προβούμε σε κάποια κατασκευή ή ειδική παραμετροποίηση, αφού παρέχεται με ενσωματωμένο καλώδιο ελέγχου από το εργοστάσιο κατασκευής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8 Το καλώδιο και η διασύνδεση της μονάδας αυτόματου πιλότου με την κάμερα Modified Sony A6000

Η ενσωματωμένη καλωδίωση επιτρέπει την απευθείας τροφοδότηση της κάμερας από την κύρια πηγή ενέργειας του αεροχήματος. Επίσης δίνει τη δυνατότητα για ανατροφοδότηση του συστήματος αυτόματου πιλότου ή εξωτερικού αισθητήρα GPS τύπου RTK (Real time kinematics), με την ακριβή χρονική στιγμή της λήψης.

3.2.1 b Πολυφασματικοί αισθητήρες ή Αισθητήρες υπέρυθρου φάσματος.

Την περίοδο έναρξης των πειραμάτων της παρούσας διατριβής (2010-2011), οι επιλογές σε αισθητήρες COTS (Commercial of the self) για καταγραφή υπέρυθρου φάσματος ήταν πολύ περιορισμένες. Αυτές περιορίζονταν ανάμεσα σε:

- Τροποποίηση αισθητήρων COTS με μεθόδους DIY (Do it Yourself)
- Προμήθεια τροποποιημένου αισθητήρα από εξειδικευμένο προσωπικό
- Έτοιμες λύσεις υψηλού κόστους

Για την αρχική διερεύνηση και απόδειξη της εφικτότητας, τροποποιήσαμε αρκετές κάμερες τύπου Point & Shoot, αντίστοιχες με την κάμερα ορατού φάσματος αφαιρώντας το φίλτρο υπέρυθρης ακτινοβολίας εμπρός από τον αισθητήρα και προσθέτοντας στην θέση του ένα φίλτρο από αρνητικό film που ουσιαστικά εμποδίζει το ορατό φάσμα.



Εικόνα 9 Αποσυναρμολόγηση φωτογραφικής μηχανής Point & Shoot και αλλαγή του φίλτρου φάσματος

Τα αποτελέσματα ήταν δεσμευτικά και το κόστος σε βάθος χρόνου δοκιμών υψηλό, αφού καμία κάμερα που είχε υποβληθεί σε μετατροπή, δεν άντεχε συνεχόμενες χρήσεις. Ο λόγος ήταν η αυξημένη δυσκολία με περιορισμένο εργαστηριακή υποδομή, να αποσυναρμολογηθεί ένας τόσο πολύπλοκος μηχανισμός και να επανασυναρμολογηθεί με ελάχιστη μόλυνση του αισθητήρα, του φακού και του φίλτρου.

Τα δεδομένα μας έδειξαν ότι η πλειονότητά των αισθητήρων τύπου CCD, που περιέχονται στις φωτογραφικές μηχανές τύπου Point & Shoot, είναι ευαίσθητες στο υπέρυθρο φάσμα και ως εκ τούτου δύναται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή δεικτών βλάστησης, χωρίς όμως να δίνουν τιμές απορρόφησης και μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε κάθε μάντα καταγραφής.



Εικόνα 10 Φωτογραφία από τον τροποποιημένο αισθητήρα κάμερας Canon ixus 160, φαίνεται η έντονη απορρόφηση του υπέρυθρου φάσματος από τα φύλλα των δένδρων στο κανάλι του μέχρι πρώτινος κόκκινου.

Στην συνέχεια των πειραμάτων και έπειτα από την επιβεβαίωση από τις δοκιμές με τις τροποποιημένες φωτογραφικές μηχανές, επιλέξαμε να προμηθευτούμε μια φωτογραφική μηχανή τροποποιημένη από επώνυμο οίκο μετατροπών (MAXMAX Ltd.) με βαθμονομημένα αποτελέσματα απορρόφησης. Η εταιρεία μετατροπής προσφέρει και βαθμονομημένους στόχους ανάκλασης για ορθή αναγωγή των αποτελεσμάτων.

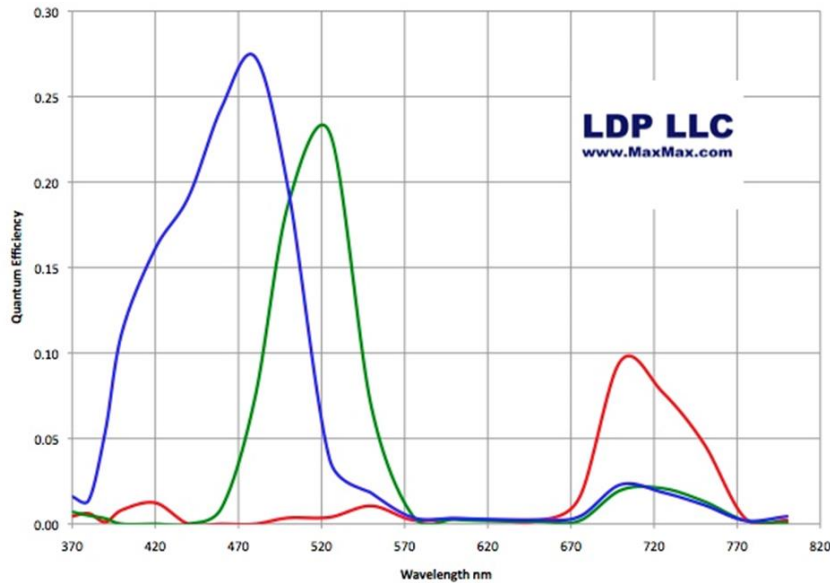
Στα τελευταία έτη της διατριβής, η εξέλιξη των πολυφασματικών αισθητήρων ειδικά κατασκευασμένων για χρήση από ΣμηΕΑ σε εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στην γεωργία ακριβείας ήταν ραγδαία. Επιλέξαμε την πολυφασματική κάμερα Parrot SEQUOIA για τη συνέχεια των πειραμάτων μας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αναλυτικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που επιλέξαμε.

b1 MAXMAX Modified Canon Elph 120 NIR G B

Όπως αναφέρθηκε, η MaxMax Ltd, προσέφερε παραπλήσιο μοντέλο φωτογραφικής μηχανής Canon με εκείνο που είχαμε επιλέξει για το ορατό φάσμα. Ως εκ τούτου διατηρήσαμε μια συνέχεια στο γεωμετρικό μέρος των μετρήσεων μας. Επίσης η ομοιότητα των αισθητήρων μας έδωσε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε την ίδια μέθοδο διασύνδεσης και ελέγχου με υφιστάμενο εξοπλισμό. Τα χαρακτηριστικά της Canon Elph 120 NIR G B είναι όμοια με τα χαρακτηριστικά της Canon ixus 160.

Οι ραδιομετρικές ικανότητες του αισθητήρα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 14 Αποδοτικότητα απορρόφησης φάσματος της MAXMAX Canon Elph 120

Από το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε οριακά επαρκή αποδοτικότητα στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου και περισσότερη απορρόφηση από την περιοχή του άκρου κόκκινου (Red edge). Στον αντίποδα παρατηρούμε ελάχιστη μόλυνση της «μπάντας» από την περιοχή του πράσινου και μπλε. Ωστόσο, ο στόχος ανάκλασης που παρέχεται από την εταιρεία, μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο σύνολο των τριών καναλιών που αποθηκεύει η φωτογραφική μηχανή, χωρίς να γνωρίζουμε τα μήκη κύματος αυτής.

b2 Parrot SEQUOIA

Η έτοιμη πολυφασματική κάμερα, parrot SEQUOIA, μας έδωσε διακριτές περιοχές απορρόφησης σε γνωστά μήκη κύματος, δίνοντας μας την δυνατότητα να αντιστοιχίσουμε την καταγραφόμενη πληροφορία με περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές κατ' επέκταση και δείκτες βλάστησης. Ο αισθητήρας, όπως αναφέραμε και εισαγωγικά, ανήκει στην γενιά αισθητήρων που κατασκευάστηκαν για την χρήση του από ΣμηΕΑ, παρέχοντας πολλές επιλογές στον τρόπο διασύνδεσης και ελέγχου με το αερόχημα, μικρό βάρος και ανεξάρτητο σύστημα γεωαναφοράς.



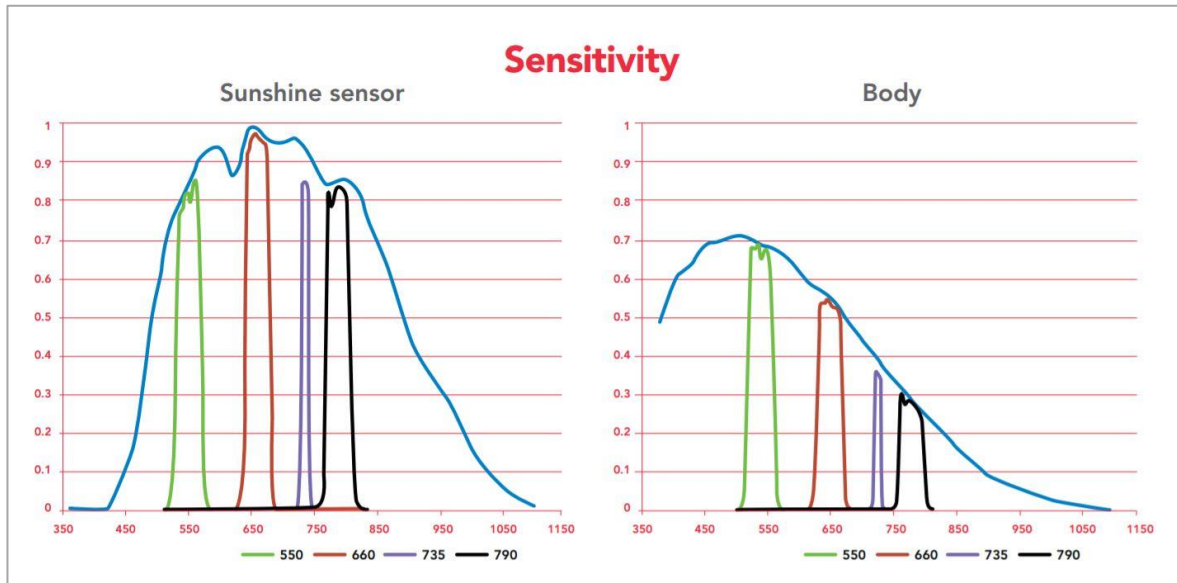
Εικόνα 11 Η πολυφασματική κάμερα Parrot SEQUOIA και ο αισθητήρας προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Τα χαρακτηριστικά της πολυφασματικής κάμερας αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 22 Χαρακτηριστικών πολυφασματικής κάμερας Parrot SEQUOIA

Focal length 35mm equiv.	4 mm
Αριθμός οριζόντιων εικονοστοιχείων	1280
Αριθμός Κάθετων εικονοστοιχείων	960
Πλάτος αισθητήρα	4,8 mm
Ύψος αισθητήρα	3,6 mm
Τύπος αισθητήρα	Global Shutter
Βάθος χρώματος αποθήκευσης	12bit
Ground Sample Distance @ 100m Alt	9.42 cm
Αποτύπωμα @ 100m Alt	120,6 x 90,5 m
Μέγιστος ρυθμός φωτοληψίας @ 100m Alt & 14m/s A/S	1 FPS ή 84% Overlap
Ενσωματωμένο GPS	NAI
Ενσωματωμένη αδρανειακή μονάδα μέτρησης	NAI
Διάφραγμα	f2.8
Βάρος	107 γρ.

Αντίστοιχα η ραδιομετρική ικανότητα του αισθητήρα φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 15 Αποδοτικότητα απορρόφησης φάσματος του αισθητήρα ακτινοβολίας και της πολυφασματικής κάμερας Parrot SEQUOIA αντίστοιχα

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα, οι κάμερες νέου τύπου μας προσφέρουν διακριτές μπάντες με μικρό εύρος και επαρκή απορρόφηση για αντιστοίχιση με δείκτες βλάστησης. Το γεγονός της ύπαρξης δέκτη ακτινοβολίας με γνωστά μήκη κύματος που διορθώνει αυτόματα τις τιμές που αποθηκεύονται στον αισθητήρα, μας δίνει την δυνατότητα να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ των πειραμάτων ακόμα και σε περιόδους με μεγάλες διαφορές ηλιοφάνειας. Επίσης μπορούμε να προβούμε σε συγκρίσεις με αποτελέσματα δεικτών από δορυφορικές εικόνες.

3.2.2 Δεδομένα θέσεως & Αδρανειακής μονάδας μέτρησης

3.2.2.a Δεδομένα θέσεως

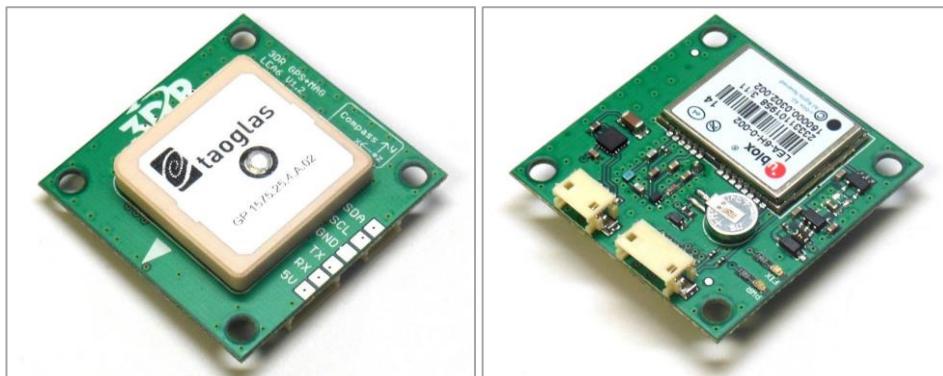
Όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια, η μόνη πηγή πληροφορίας θέσεως για τα δεδομένα που λαμβάνονται από το ΣμηΕΑ, καθώς και για τις ανάγκες πλοήγησης, προέρχονται από την μονάδα GPS (Global Positioning System) του συστήματος αυτόματου πιλότου.

Στην συνέχεια, μας έγινε ορατό ότι για να επαυξήσουμε την ακρίβεια και να μειώσουμε τα σφάλματα των γεωαναφορών έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε δέκτες GPS για την μέτρηση φωτοσταθερών σημείων επί του εδάφους.

Παρακάτω, θα δούμε τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πορεία της παρούσας διατριβής, τα χαρακτηριστικά τους και τους περιορισμούς τους στην μετρητική διαδικασία.

- Δέκτης GPS, Ublox LEA-6H, 3D Robotics

Περί το 2010, Ο μόνος διαθέσιμος δέκτης GPS συμβατός με τις μονάδες αυτόματου πιλότου βασισμένες σε Arduino και κώδικα Ardupilot, ήταν οι μονάδα Ublox LEA-6H GPS & Compass Kit, της 3DRobotics. Επρόκειτο για την πρώτη λύση δέκτη GPS, με εξωτερική κεραία υψηλής απολαβής και διέθετε εξωτερικό μαγνητόμετρο/πυξίδα που επέτρεπε στον χρήστη την τοποθέτηση μακριά από πηγές παρεμβολών, με αποτέλεσμα καλύτερες μετρήσεις θέσεως και προσανατολισμού.



Εικόνα 12 Ο δέκτης GPS Ublox LEA-6H, 3D Robotics, Αριστερά παρατηρούμε την κεραία τύπου Patch υψηλής απολαβής και τις ενδείξεις της πυξίδας, δεξιά το chipset της Ublox

Τα χαρακτηριστικά του δέκτη φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 23 Χαρακτηριστικά επιδόσεων GPS Ublox LEA-6H (Ublox, 2017a)

Parameter	Specification	
Receiver type	50 Channels GPS L1 frequency, C/A Code GALILEO Open Service capable ³ GLONASS FDMA ¹ SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS	
Time-To-First-Fix ²		LEA-6H/LEA-6S/ LEA-6T-0/LEA-6T-1
	Cold Start (without aiding)	26 s
	Warm Start (without aiding)	26 s
	Hot Start (without aiding)	1 s
	Aided Starts ³	1 s
Sensitivity ⁴		LEA-6H/LEA-6S/ LEA-6T-0/LEA-6T-1
	Tracking & Navigation	-162 dBm
	Reacquisition	-160 dBm
	Cold Start (without aiding)	-148 dBm
Max. Navigation update rate		LEA-6A/ LEA-6S/ LEA-6T-0
		5 Hz
Horizontal position accuracy ⁵	Without aiding	2.5 m
	SBAS	2.0 m
Configurable Timepulse frequency range		LEA-6H/ LEA-6S/ LEA-6A/ LEA-6R
		0.25 Hz to 1 kHz
Accuracy for Timepulse signal ⁶	RMS	30 ns
	99%	<60 ns
	Compensated ⁷	15 ns
Velocity accuracy ⁸		0.1 m/s
Heading accuracy ⁸		0.5 degrees
Operational Limits	Dynamics	≤ 4 g
	Altitude ⁸	50,000 m
	Velocity ⁸	500 m/s

1 Via FW update on LEA-6H

2 All satellites at -130 dBm

3 Dependent on aiding data connection speed and latency

4 Demonstrated with a good active antenna

5 CEP, 50%, 24 hours static, -130 dBm, SEP: < 3.5 m

6 Under good GPS signal conditions

7 Quantization error information can be used with LEA-6T to compensate the granularity related error of the time pulse signal

8 Assuming Airborne < 4g platform

- Δέκτης GPS HERE+ RTK / Ublox M8P

Φυσικό επόμενο της ταχύτατης ανάπτυξης της τεχνολογίας, ήταν η πρόσβαση σε χαμηλού κόστους δέκτες GPS με τεχνολογία RTK (Real Time Kinematics). Στις αρχές του 2015, το κόστος των δεκτών αυτών πέρασε το «κατώφλι» των χιλίων δολαρίων, με

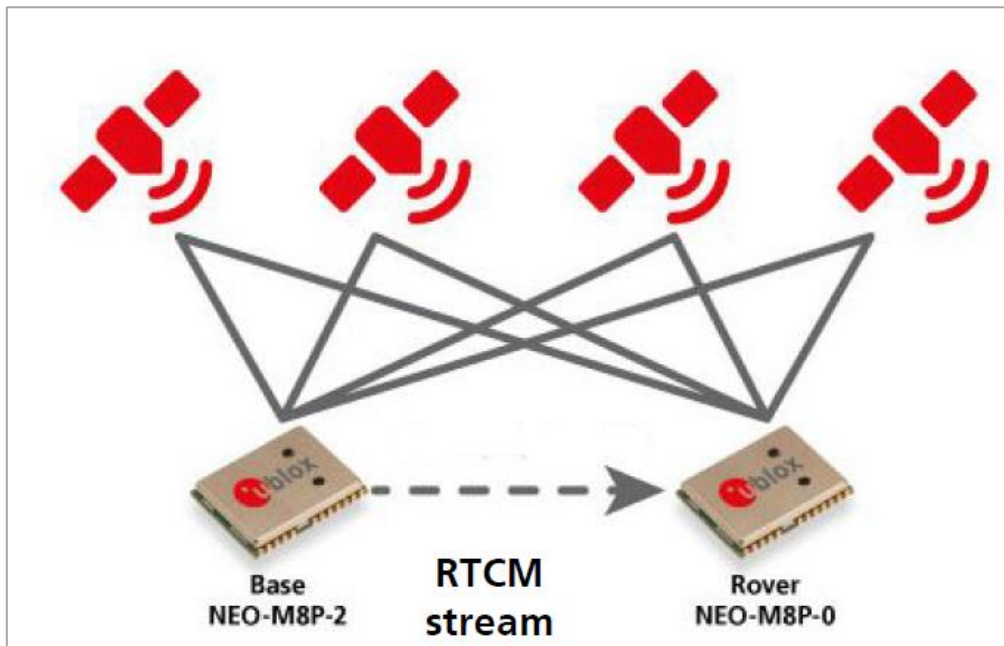
αποτέλεσμα οι ερευνητές, οι χομπίστες και κοινότητες ανάπτυξης ανοιχτού λογισμικού να έχουν πρόσβαση σε αυτούς και κατ' επέκταση να γίνεται διαθέσιμο στο ευρύ κοινό ένα ολοκληρωμένο υλικό-λογισμικό έτοιμο για χρήση.

Σε αυτά τα πλαίσια, η πρώτη ολοκληρωμένη υλοποίηση κατά την διάρκεια της διατριβής ήταν ο Δέκτης της Ublox M8P, σε ολοκληρωμένο κύκλωμα από την HEX Ltd/ProfiCNC και υποστήριξη σε κώδικα Ardupilot.



Εικόνα 13 Του ζεύγους δεκτών GPS Here+, αριστερά ο δέκτης εδάφους(base), στο κέντρο ο δέκτης του αεροσκάφους με την ενσωματωμένη κεραία(Rover) και δεξιά η εξωτερική κεραία του Δέκτη βάσης

Οι δέκτες RTK λειτουργούν σε τυπολογία ζευγών που αποτελούνται από την βάση(base) και το κινούμενο δέκτη(Rover). Με αυτόν τον τρόπο ο Σταθερός (άρα λιγότερο επιρρεπής σε σφάλματα) δέκτης αποστέλλει μηνύματα διορθώσεων σε πρωτόκολλο RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) (Kälber, 2008) στον κινούμενο δέκτη και εκείνος με την σειρά του υπολογίζει την θέση του σχετικά με την βάση. Υπάρχουν διαφορές μέθοδοι επαύξησης της απόλυτης ακρίβειας μετρήσεων θέσης, αλλά εμείς επιλέξαμε για λόγους ευκολίας να χρησιμοποιήσουμε την στατική μέθοδο(Static), γνωστού σημείου δέκτη βάσης, επί τριγωνομετρικών σημείων της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού.



Σχήμα 4 Η τυπολογία λειτουργίας των δεκτών GPS RTK σε ζεύγη, όπου ο δέκτης αποστέλλει μηνύματα διορθώσεων στον κινούμενο δέκτη

Η αυξημένες δυνατότητες και ακρίβεια θέσεως που μπορούσε να προσδώσει αυτή η διάταξη, αποτέλεσε μονόδρομο στην αναβάθμιση του συστήματος μας. Ωστόσο διατηρήσαμε την μονάδα Ublox LEA-6H ως δευτερεύων δέκτη GPS, για να αυξήσουμε την ασφάλεια του συστήματος και να προβούμε σε συγκρίσεις. Επίσης το ίδιο ζεύγος δεκτών σε διάταξη εκτός του αεροχήματος, μας χρησίμευσε και στην σήμανση των φωτοσταθερών σημείων, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος του εξοπλισμού.

Τέλος, ο δέκτης προσφέρει και δύο εξωτερικές μαγνητικές πυξίδες που προστίθενται στις μετρήσεις της αδρανειακής μονάδας μέτρησης όπως θα δούμε στο επόμενο μέρος του κεφαλαίου, που συμβάλουν στη μείωση του θορύβου από πηγές ενέργειας πλησίον της κεντρικής μονάδας.

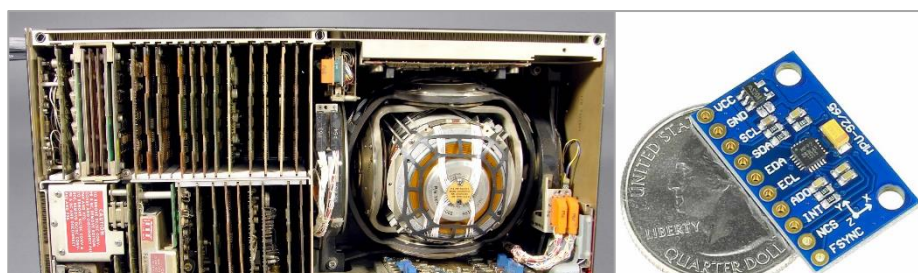
Τα χαρακτηριστικά του δέκτη φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 24 Χαρακτηριστικά επιδόσεων GPS Ublox NEO-M8P σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας (mode) GNSS (βασική: Σύγχρονη λήψη GPS & GLONASS)(Ublox, 2017b)

Parameter	Specification			
Receiver type	72 channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I			
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns		
	99%	60 ns		
Frequency of time pulse signal	0.25 Hz...10 MHz (configurable)			
Operational limits ¹	Dynamics	≤ 4 g		
	Altitude	50,000 m		
	Velocity	500 m/s		
Velocity accuracy	0.05m/s			
Dynamic heading accuracy	0.3° ^{2,3}			
Time-To-First-Fix ³		GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
	Cold start	26 s	28 s	29 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s
Aided starts ⁴		2 s	3 s	2 s
Sensitivity ⁵	Tracking & Navigation ⁶	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Cold start	-148 dBm	-148 dBm	-148 dBm
	Hot start	-157 dBm	-157 dBm	-157 dBm
Max navigation update rate	RTK	5 Hz	5 Hz	8 Hz
	Moving Baseline RTK	4Hz	4Hz	4Hz
	PVT	5 Hz	5 Hz	10 Hz
	RAW	10 Hz	10 Hz	10 Hz
Convergence time ⁷	RTK	<60s ⁸	<60s ⁹	3.5 min ⁹
Horizontal position accuracy	Standalone ⁹	2.5 m CEP		
	RTK ^{6,10}	0.025 m + 1 ppm CEP		

3.2.2 b δεδομένα Αδρανειακής μονάδας μέτρησης

Όπως είδαμε και στην ιστορική αναδρομή, κύριος μοχλός ανάπτυξης των μη επανδρωμένων συστημάτων, ήταν η ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αδρανειακών μονάδων μέτρησης με ελάχιστο βάρος και πολύ μικρό κόστος ώστε να ενσωματωθούν(ως επί το πλείστο) στα κινητά τηλέφωνα και smartphones τις αρχές του 2005. Οι μονάδες αυτές, περιλαμβάνουν συνήθως αισθητήρες γωνιακής επιτάχυνσης, γυροσκόπια και μαγνητική πυξίδα που μας παρέχουν με πολύτιμες πληροφορίες τόσο



Εικόνα 14 Αριστερά: Αδρανειακή μονάδα μέτρησης Carousel Navigation Unit, Α/φους εμπορικών αερογραμμών, δεξιά: Ολοκληρωμένο κύκλωμα 9 βαθμών ελευθερίας MPU9625 που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ρομποτικής (πηγή US National Air and Space Museum)

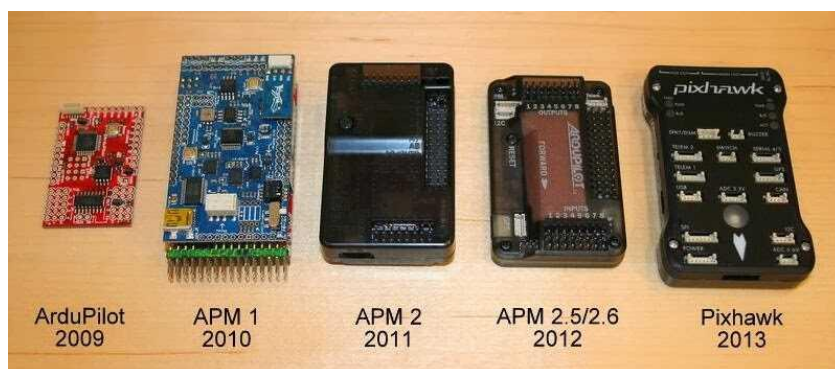
για τις ανάγκες της πλοήγησης όσο και για τις ανάγκες προσδιορισμού προσανατολισμού των δεδομένων τηλεπισκόπησης

Για τις ανάγκες της έρευνας της παρούσας διατριβής, επιλέξαμε την προμήθεια υποσυστημάτων αδρανειακών μονάδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτόματων πιλότων συμβατών με κώδικα Ardupilot, καθώς αποτελούσαν και αποτελούν την πολυπληθέστερη ομάδα σχεδίασης και ανάπτυξης ανοικτού υλικο-λογισμικού στον κόσμο (Lim et al., 2012). Το γεγονός αυτό συμβάλει στην εύκολη πρόσβαση πληροφοριών που αφορούν την παραμετροποίηση του συστήματος, την επάρκεια σε ανάπτυξη κώδικα και προγραμμάτων καθώς επίσης και στην πρόσβαση των υλικών σε πολύ χαμηλό κόστος.

Στην διάρκεια της διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν όλες οι γενιές συστημάτων αυτόματων πιλότων που βασίζονται σε κώδικα ardupilot (Ardupilot, 2019). Ωστόσο, χάριν συντομίας θα αναφερθούμε στην πρώτη έκδοση που βασίζεται σε πλακέτα ανάπτυξης arduino για ιστορικούς λόγους και στις δύο τελευταίες εκδόσεις με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα περισσότερα πειράματα και έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα.

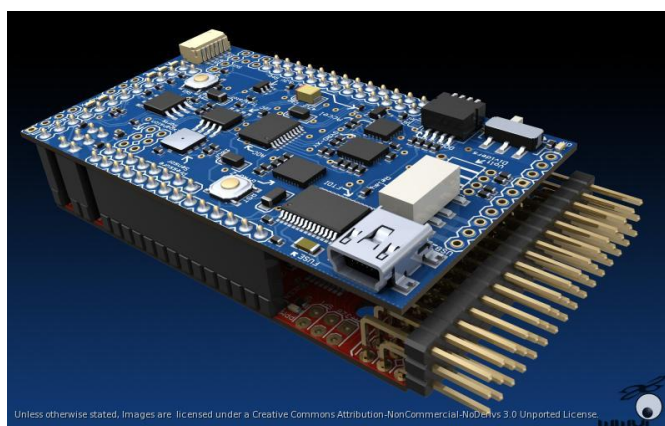
1. Μονάδα αυτόματου πιλότου Ardupilot Mega 2560

Η πρώτη μονάδα αυτόματου πιλότου που βασίστηκε αποκλειστικά από ομάδα ανοικτού υλικο-λογισμικού ήταν η μονάδα αυτόματου πιλότου Ardupilot Mega 2560, προδίδοντας από την ονομασία του, α. ότι βασίζεται στις πλακέτες ανάπτυξης Arduino, και τον επεξεργαστή ARM 2560. Χαρακτηριστικό της εποχής, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ήταν η χρήση ξεχωριστών μονάδων MEMs (Micro-Electro-Mechanical Systems) με τους απαραίτητους αισθητήρες που αναφέραμε και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα επεξεργαστή των δεδομένων και φυσικών εξόδων για την σύνδεση με τα κινητά μέρη του Αεροχήματος.



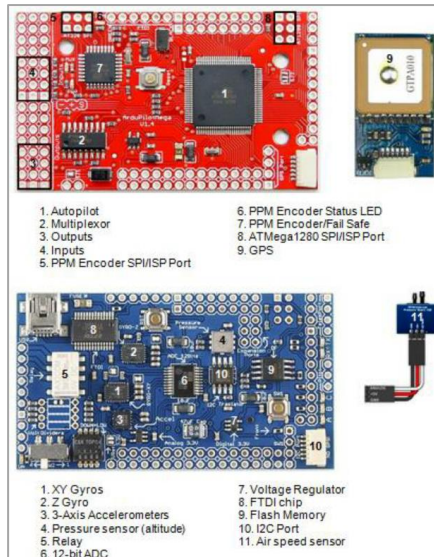
Εικόνα 15 Τα μοντέλα αυτόματων πιλότων βασισμένα σε Ardupilot και το έτος έκδοσης(Ardupilot, 2019)

Η υλοποίηση ήταν σχετικά «έξυπνη» για την εποχή, αφού προσέφερε διάταξη ραφιού (Stack), αξιοποιώντας την πιο διαδεδομένη πλατφόρμα ανάπτυξης ρομποτικής με ισχυρό επεξεργαστή (Arduino MEGA 2560) και παράλληλα εναλλάξιμες πλατφόρμες αισθητήρων οι οποίες είχαν σχεδιασθεί με την συνεισφορά ολόκληρης της κοινότητας ardupilot και είχαν υλοποιηθεί έναντι συμβολικού κόστους από μεγάλους προμηθευτές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Εικόνα 16 Μονάδα αυτόματου πιλότου Ardupilot Mega 2560 v1.4 (πηγή: diydrones.com)

Αναλυτικά, μπορούμε να δούμε τα μέρη του αυτόματου πιλότου στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 17 Οι δυο πλακέτες, επάνω Ardupilot και κάτω oibran, που απαρτίζουν το σύστημα αυτόματου πιλότου με τις σημάνσεις ανά στοιχείο (πηγή: diydrones.com)

Ο αυτόματος πιλότος Ardupilot Mega 2560 v1.4, αποτέλεσε την έναρξη της υλοποίησης του ΣμηΕΑ της παρούσας διατριβής καταδεικνύοντας την πολυπλοκότητα του εγχειρήματος και τις δυσκολίες στην διαδικασία της συναρμολόγησης και του προγραμματισμού, έννοιες άγνωστες μέχρι τότε. Έτσι αποτέλεσε ταυτόχρονα την πλατφόρμα εισαγωγής και εκμάθησης στις μονάδες και τον τρόπο λειτουργίας των μη Επανδρωμένων Συστημάτων.

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας αυτόματου πιλότου και των αισθητήρων του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 25 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Ardupilot MEGA 2560

Επεξεργαστής	ATmega2560 (8 bit)
Δευτερεύον επεξεργαστής	ATmega328
Μνήμη αποθήκευσης LOG	4MB
Σειριακή θύρες επικοινωνίας	4 (+1 μη αμφίδρομη για δέκτη GPS)
Αναλογικές εισοδοι	16
Είσοδοι ελέγχου	8(αναλογικοί)
Έξοδοι ελέγχου σερβομηχανισμών	8
Αισθητήρες	
Αισθητήρες γωνιακής επιτάχυνσης	ADX330 Analog Devices
Γυροσκόπιο	3 Άξονες- IDG 500 InvenSense
Αισθητήρας θερμοκρασίας	Bosch
Αισθητήρας Βαρομετρικής πίεσης	Bosch

Πηγή: Sparkfun.com

Όσον αφορά τα πειράματα της παρούσας διατριβής, παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, την χρήση επεξεργαστών 8bit, και ελάχιστη μνήμη του, καθιστά δυνατή την επεξεργασία μόνο ακέραιων αριθμών, γεγονός που αποτέλεσε και τον μεγαλύτερο περιοριστικό παράγοντα στην ακρίβεια και το πλήθος της καταγεγραμμένης πληροφορίας.

Θα παρατηρήσουμε στην συνέχεια, πως η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων βασίζετε σε δύο κύριους παράγοντες:

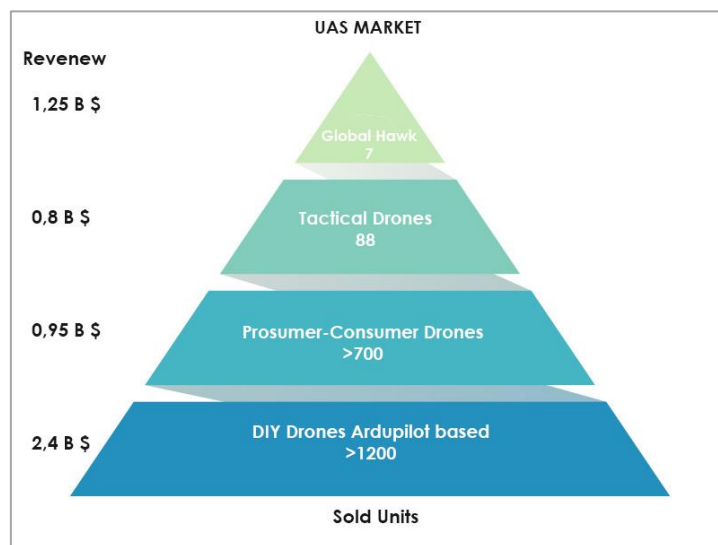
- Την απαίτηση των χρηστών σε μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, για ανάπτυξη περισσότερων εφαρμογών και
- Στην ραγδαία εξέλιξη των προσφερόμενων υποσυστημάτων και αισθητήρων από τους κατασκευαστές

Κατά το τέλος της «ζωής» του Ardupilot MEGA2560, είχαν γίνει πλέον σαφείς οι περιορισμοί κάθε υλοποίησης, με αποτέλεσμα να προκληθεί μια παγκόσμια άνθιση στην

παραγωγή νέων μονάδων με δεδομένη την παραγωγή μιας νέας μονάδας περίπου κάθε έξι μήνες.

Οι κατασκευαστές που αναλάμβαναν την ευθύνη υλοποίησης ενός σχεδίου ανοικτού υλικού, ήθελαν να συμπαράσφουρον όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες προς την δική τους υλοποίηση με αποτέλεσμα να κατασκευάζουν πιο ολοκληρωμένες λύσεις, προσθέτοντας και μηχανισμούς ασφαλείας που απουσίαζαν πλήρως μέχρι τότε ώστε να δώσουν την αίσθηση ασφάλειας στον νέο χρήστη και φυσικά τις αρχές που άρχισαν να παρατηρούν με σκεπτικισμό την ανερχόμενη αυτή βιομηχανία.

Ενδεικτικό των μεγεθών της βιομηχανίας αυτόματων πιλότων για χρήση «φτάξτο μόνος σου» (Do it yourself), ήταν οι κύκλοι εργασιών της εταιρείας 3DRobotics την περίοδο 2010-2013, όπου σαν κύριος εμπνευστής και προμηθευτής της κοινότητας Ardupilot, ξεκινώντας με εξοπλισμό λίγων χιλιάδων δολαρίων, έφτασε στο σημείο να λαμβάνει συνολικά κεφάλαια 200εκ δολαρίων. Χαρακτηριστικό, είναι το παρακάτω γράφημα που μας δείχνει την ποσόστωση, την οικονομική κλίμακα και τα μεγέθη των συστημάτων τέτοιου τύπου σε σχέση τα μέχρι τότε κυρίαρχα της αμυντικής βιομηχανίας.



Διάγραμμα 16 Αγορά UAS, Πωληθείσες μονάδες και Τζίρος ανά κατηγορία

2. Μονάδα αυτόματου Pixhawk 3D Robotics

Μια από τις ολοκληρωμένες μονάδες που αναφέραμε προηγουμένως, ήταν ο Pixhawk από την 3D Robotics. Η μονάδα παρουσιάστηκε στην αγορά το 2012, θέλοντας με το όνομα του να διαχωρισθεί από τις μέχρι τότε υλοποιήσεις βασισμένες σε Arduino,

γεγονός που καταδεικνυε την χρήση νέων πιο ισχυρών επεξεργαστών και περιφερειακών.

Ο Pixhawk ήταν αποτέλεσμα σχεδίασης και συγκερασμού πολλών ακαδημαϊκών και ερευνητικών ομάδων απ' όλο τον κόσμο βασισμένο στο FMUv2 Open Hardware design Project (pixhawk.org)



Εικόνα 18 Η μονάδα αυτόματου πιλότου Pixhawk της 3D Robotics

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας αυτόματου πιλότου και των αισθητήρων του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 26 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Pixhawk

Επεξεργαστής	32bit STM32F427 Cortex-M4F core with FPU
Δευτερεύον επεξεργαστής	32bit STM32F103 failsafe co-processor
Μνήμη αποθήκευσης LOG	8GB
Σειριακή θύρες επικοινωνίας	5
Θύρες επικοινωνίας CAN	2
Άλλες θύρες	I ² C, Spectrum, RSSI, SPI, USB, SD CARD
Αναλογικές εισοδοι	2
Είσοδοι ελέγχου	14 Ψηφιακοί
Έξοδοι ελέγχου σερβομηχανισμών	14
Αισθητήρες	
Αισθητήρες γωνιακής επιτάχυνσης	ST Micro LSM303D 14 bit accelerometer Invensense MPU 6000 3-axis accelerometer
Γυροσκόπιο	ST Micro L3GD20H 16 bit gyroscope Invensense MPU 6000 3-axis gyroscope
Μαγνητική Πυξίδα	ST Micro LSM303D 14 bit magnetometer
Αισθητήρας θερμοκρασίας	MEAS MS5611 barometer
Αισθητήρας Βαρομετρικής πίεσης	MEAS MS5611 barometer

Ο Pixhawk 2, προσέφερε σημαντικές αναβαθμίσεις σε σχέση με τον προκάτοχο του, ειδικά στον τομέα ενδιαφέροντος του παρόντος κεφαλαίου, που είναι η μετρήσεις αδρανειακής μονάδας μέτρησης. Πρώτη φορά παρατηρούμε τυπολογία αισθητήρων περιβαλλοντικά απομονωμένες με την χρήση σφραγισμένου κελύφους και ισοσταθμισμένες με την χρήση αντίστασης για θερμική σταθερότητα και αντικραδασμική προστασία.

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας αυτόματου πιλότου και των αισθητήρων του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 27 Χαρακτηριστικά Αυτόματου πιλότου Pixhawk 2

Επεξεργαστής	32bit STM32F427 Cortex-M4F core with FPU
Δευτερεύον επεξεργαστής	32bit STM32F100 failsafe co-processor
Μνήμη αποθήκευσης LOG	32GB
Σειριακή θύρες επικοινωνίας	5
Θύρες επικοινωνίας CAN	2
Άλλες θύρες	I ² C, Spectrum, RSSI, SPI, USB, SD CARD
Αναλογικές εισοδοί	3
Είσοδοί ελέγχου	16 Ψηφιακοί
Έξοδοί ελέγχου σερβομηχανισμών	14
Αισθητήρες	
Αισθητήρες επιτάχυνσης	γωνιακής ST Micro ICM 20xxx 6-axis accelerometer Invensense MPU9250 6-axis accelerometer
Γυροσκόπιο	ST Micro ICM 20xxx gyroscope Invensense MPU9250 6-axis gyroscope
Μαγνητική Πυξίδα	AK8963 Asahi Kasei Microdevices
Αισθητήρας θερμοκρασίας	MEAS MS5611 barometer
Αισθητήρας Βαρομετρικής πίεσης	MEAS MS5611 barometer
Αισθητήρες (Vibration & Thermal Isolated)	
Μαγνητική Πυξίδα	ST Micro LSM303D 14 bit magnetometer
Αισθητήρες επιτάχυνσης	γωνιακής LSM303D integrated accelerometer Invensense MPU9250 6-axis accelerometer
Γυροσκόπιο	L3GD20 gyro Invensense MPU9250 6-axis gyroscope

Από τον πίνακα χαρακτηριστικών παρατηρούμε την σαφή αναβάθμιση του συστήματος, προσαρμοσμένο κατάλληλα για εφαρμογές τηλεπισκόπησης αφού προσφέρει σε σχέση με τον προκάτοχο του:

- Τριπλή αδρανειακή μονάδα μέτρησης, εκ των οποίων η μία περιβαλλοντικά ισοσταθμισμένη και με μεγαλύτερες ακρίβειες
- Δύο εσωτερικές μαγνητικές πυξίδες εκ των οποίων η μία περιβαλλοντικά ισοσταθμισμένη
- Δύο αισθητήρες θερμοκρασίας και βαρομετρικής πίεσης
- Υποστήριξη έως και τριών δεκτών GPS, που θα μας επιτρέψει την ταυτόχρονη σύνδεση των δεκτών GPS, που αναφέρουμε παραπάνω.

Τέλος, η ανάπτυξη του κώδικα του μόνιμου προγράμματος λογισμικού της ROM (Firmware), μας επιτρέπει αυξημένους ρυθμούς δειγματοληψίας (Cavallo et al., 2014).

3.2.3 Δεδομένα περιβαλλοντικών αισθητήρων

Στο κεφάλαιο 3.1.1, παρατηρήσαμε την σημαντικότητα των επικρατουσών περιβαλλοντικών συνθηκών, στην ανάπτυξη των φυτών. Κατ' επέκταση η συλλογή δεδομένων όπως η βαρομετρική πίεση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα κ διεύθυνση του ανέμου, θεωρείται ζωτικής σημασίας για τις ανάγκες του πειράματος.

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.1.2, οι παραπάνω τιμές πρέπει να μετατραπούν σε μοντέλα επιφανείας ώστε να προβούμε στις αντίστοιχες χωρικές επιλύσεις και φυσικά να βελτιώσουμε τα αποτελέσματα στην αρχική θεώρηση. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να έχουμε επαρκή δεδομένα για την περιοχή μελέτης, για να εφαρμόσουμε την μέθοδο Kriging, γεγονός που καθιστά ανεπαρκή την μονομερή άντληση τιμών από διαθέσιμους, μοναδικούς πλησιέστερους μετεωρολογικούς σταθμούς.

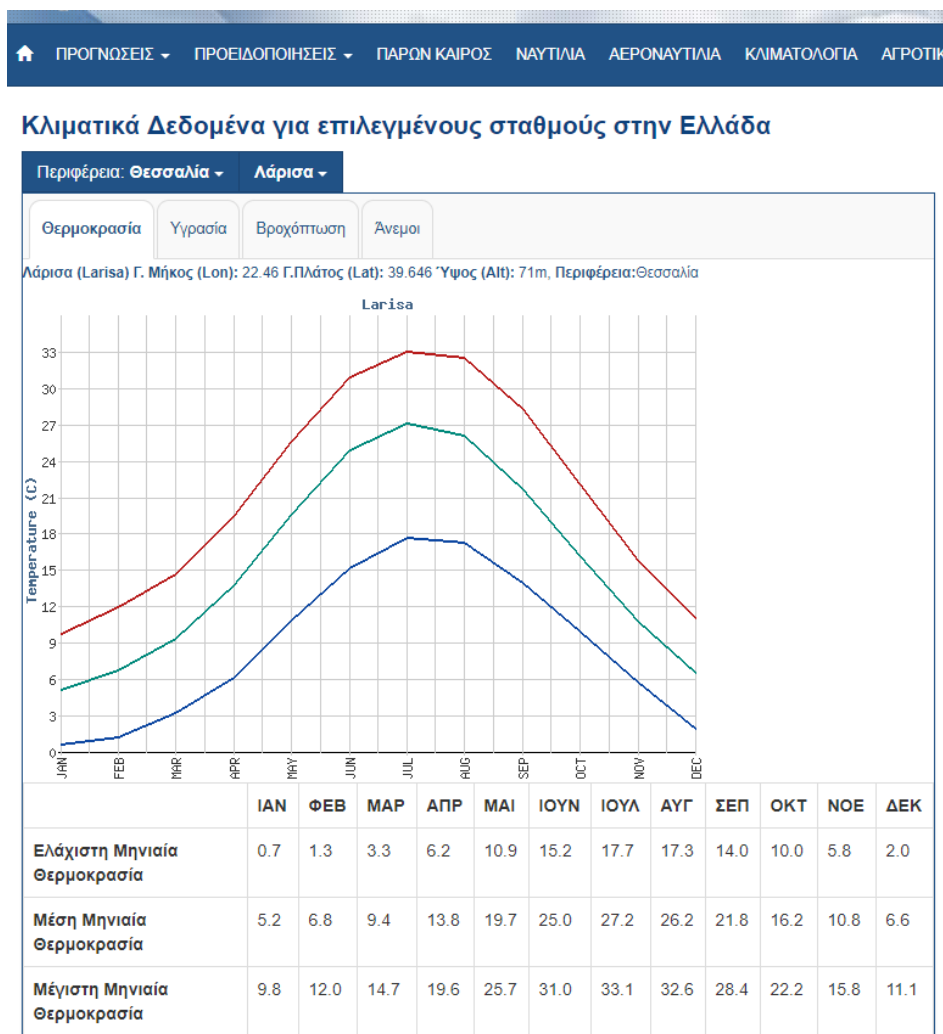
Έτσι, επιλέξαμε να αντλήσουμε δεδομένα από τους αισθητήρες του συστήματος αυτόματου πιλότου σε συνδυασμό με δεδομένα σταθμών και επιτόπιες μετρήσεις για τους παραπάνω υπολογισμούς. Οι σταθμοί, οι αισθητήρες και τα όργανα μέτρησης που θα δούμε στην συνέχεια είναι τα εξής:

- Μετεωρολογικοί Σταθμοί, συνδεδεμένοι στο σύστημα της EMY (Τιμές παρούσας κατάστασης και κλιματολογία)
- Αισθητήρας διαφορικής πίεσης αέρα και σωλήνας Pitot
- Αισθητήρας θερμοκρασίας και βαρομετρικής πίεσης
- Ψηφιακό περιβαλλοντικό πολύμετρο Mastech MS6300

3.2.3 α Μετεωρολογικοί σταθμοί ΕΜΥ

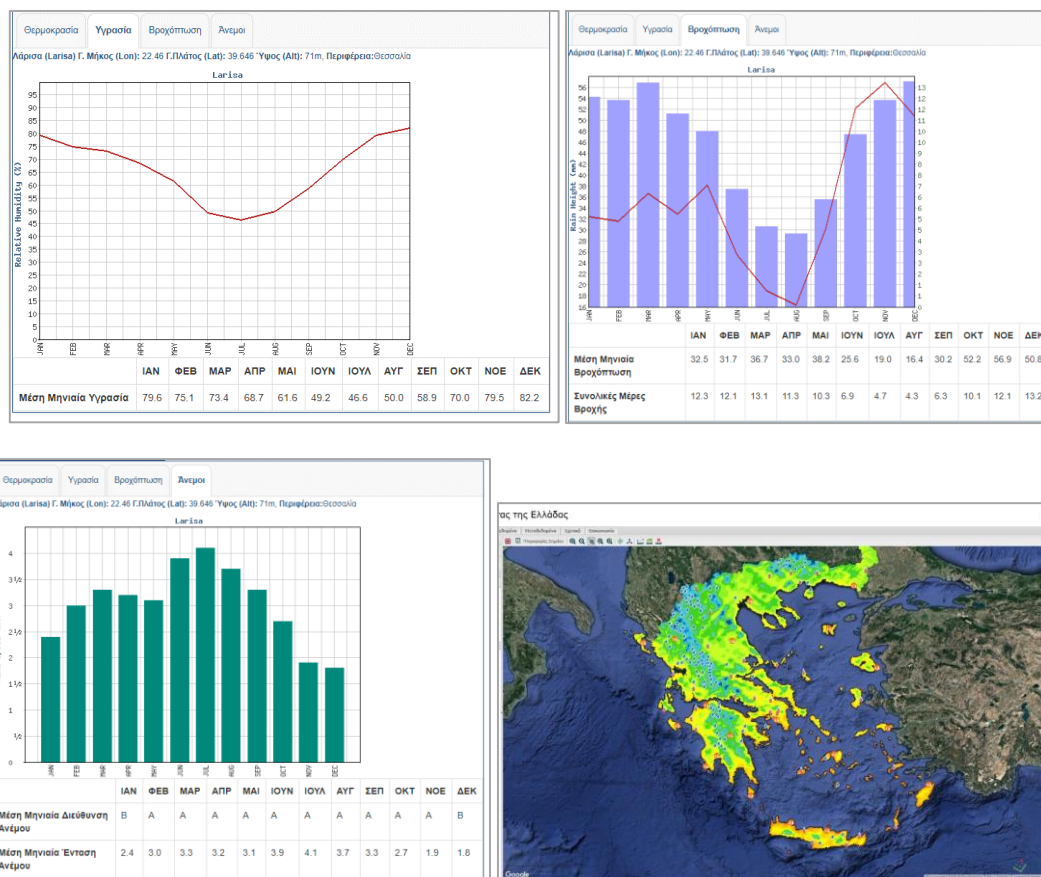
Οι μετεωρολογικοί σταθμοί αποτελούν την κύρια πηγή πληροφόρησης των περιβαλλοντικών συνθηκών τόσο στην αγροτική παραγωγή, όσο και στις μελέτες που εξετάσαμε βιβλιογραφικά. Άρα είναι η μόνη πηγή σύνδεσης με αυτές, κατ' επέκταση δεν μπορούσαν να απουσιάζουν από την παρούσα διατριβή. Επίσης λόγω της πολυετούς εγκατάστασης τους μας παρέχουν τα πιο αξιόπιστα κλιματολογικά δεδομένα (Κλιματικός Άτλαντας της Ελλάδας, ΕΜΥ, 1971-2000).

Στο σύνδεσμο του Online συστήματος κλιματικών δεδομένων της Εθνικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας μπορούμε να δούμε τα δεδομένα και την μορφή που μας παρέχονται, όπως φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5 Κλιματικά Δεδομένα επιλεγμένων σταθμών ΕΜΥ, καρτέλα Θερμοκρασία

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα, μας δίδεται η ακριβής θέση του σταθμού για να αποδώσουμε χωρικά τις μετρήσεις θερμοκρασίας που αναφέρονται στους πίνακες και τα γραφήματα της υπηρεσίας. Αντίστοιχα, αντλούμε τις υπόλοιπες τιμές από τις καρτέλες Υγρασίας, Βροχόπτωσης και ανέμων (βλ. σχήμα 6)

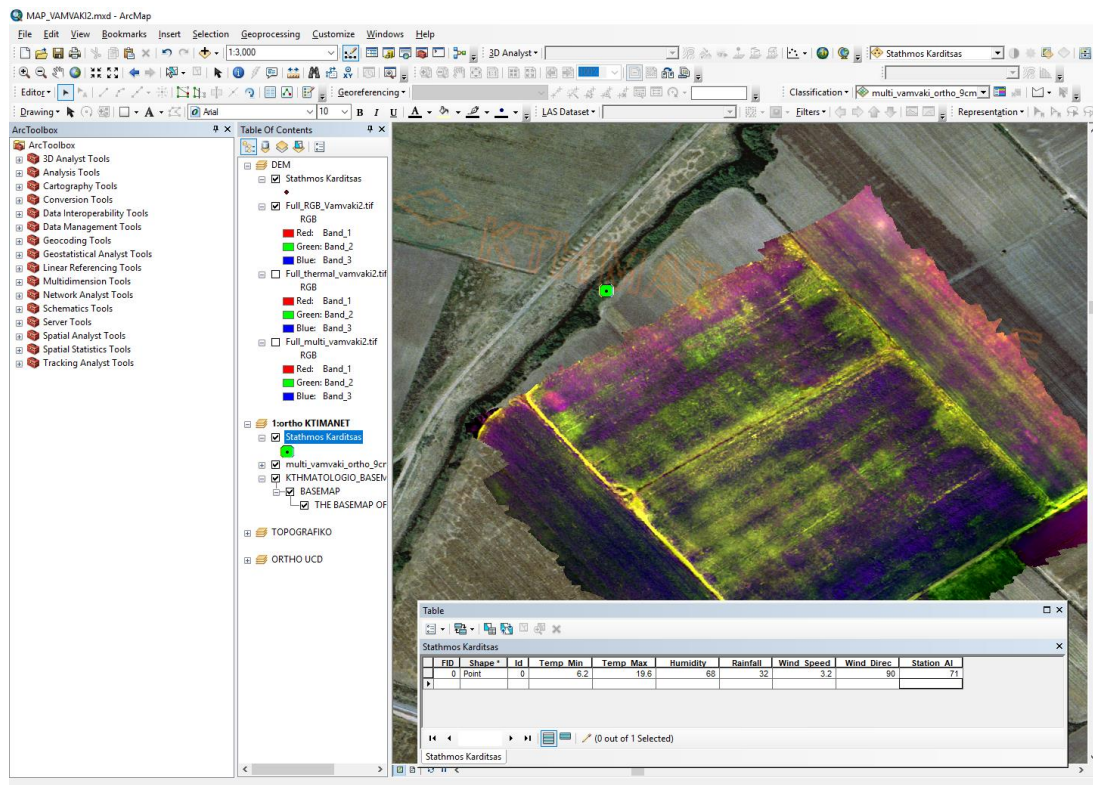


Σχήμα 6 Πληροφοριακό σύστημα EMY και Κλιματικός Ατλαντας της Ελλάδος

Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να διακρίνουμε την πληροφορία και τον τρόπο που μας δίδεται. Επίσης παρατηρούμε την νέα προσπάθεια της EMY, ώστε να προβάλει τα δεδομένα αυτά, αξιοποιώντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, γεγονός που συμβάλει στην ερμηνεία τους, καθώς και στον άμεσο προσδιορισμό της θέσης των Σταθμών μέτρησης.

Το επόμενο βήμα μας, ήταν να ψηφιοποιήσουμε την παραπάνω πληροφορία σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και να συμπληρώσουμε τις τιμές που μας δίδονται σε περιγραφικά δεδομένα (Attributes).

Η παραπάνω διαδικασία έγινε στο περιβάλλον Γ.Σ.Π., ArcMap 10.1



Εικόνα 20 Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων σε περιβάλλον Γ.Σ.Π.

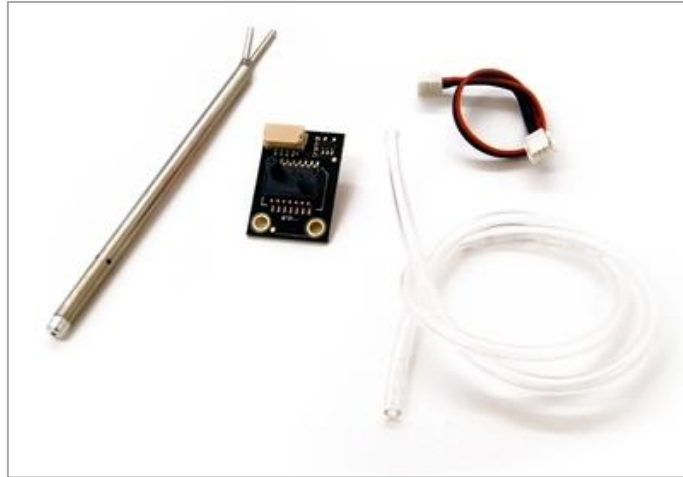
Από την παραπάνω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε, την μέθοδο εισαγωγής δεδομένων σε περιβάλλον ΓΠΣ. Το σημειακό αρχείο τοποθετείται στις γεωγραφικές συντεταγμένες που μας δίδονται από την υπηρεσία και έπειτα επεξεργαζόμενοι τον πίνακα περιγραφικών δεδομένων, δημιουργούμε και συμπληρώνουμε τα αντίστοιχα πεδία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μήνα δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί η προσθήκη κατάλληλου υποβάθρου, όπως της υπηρεσίας WMS, της Κτηματολόγιο Α.Ε, που παρέχεται δωρεάν και μας δίνει καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντα χώρου που βρίσκεται ο σταθμός. Επίσης μπορούμε άμεσα να δούμε την γεινίαση αυτού με την περιοχή μελέτης μας, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όπου παρατηρούμε το Layer του πολυφασματικού Ορθοφωτοχάρτη και τον μετεωρολογικό σταθμό.

3.2.3 b Αισθητήρας διαφορικής πίεσης αέρα και σωλήνας Pitot

Τα αεροχήματα σταθερής πτέρυγας επωφελούνται από την χρήση αισθητήρα διαφορικής πίεσης (Johansen et al., 2015), αφού για την εκτέλεση αεροδυναμικής πτήσης βασίζονται στην άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες τους και κατ' επέκταση την σχετική ταχύτητα τους στο ρευστό, δηλαδή τον αέρα.

Περαιτέρω, οι νέες εκδόσεις σταθερού λογισμικού ROM, Ardupilot, συνδυάζοντας τις τιμές από τις υπόλοιπους αισθητήρες κατά την πτήση, μπορούν να υπολογίζουν πέραν της ταχύτητας του αέρα με την οποία ταξιδεύει το αερόχημα, την επικρατούσα ταχύτητα αέρα, καθώς και την διεύθυνση του (Shesherao Biradar, 2014).



Εικόνα 21 MS5525 ψηφιακός αισθητήρας διαφορικής πίεσης και ο συνοδευτικός σωλήνας Pitot

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τον αισθητήρα που προμηθευτήκαμε για τις μετρήσεις ταχύτητα αέρα. Πολύ σημαντική επιλογή και παρελκόμενο, αποτελεί ο σωλήνας Pitot, όπου περνά την δυναμική πίεση αέρα από την κεντρική οπή και παράλληλα τις μικρότερες οπές τροφοδοτείται με τις τιμές στατικής πίεσης.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 28 Τεχνικών χαρακτηριστικών αισθητήρα MS5525

Πίεση λειτουργίας	1PSI (6.89kPa)
Ακρίβεια	±0,25%
Μέγιστη πίεση	20 PSI(137.9kPa)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C ~ 125°C
Βάρος	1,67γρ - Αισθητήρας
	4,12γρ - Εύκαμπτος Σωλήνας
	3,15γρ - Σωλήνας Pitot
Διόρθωση θερμοκρασίας	Ναι

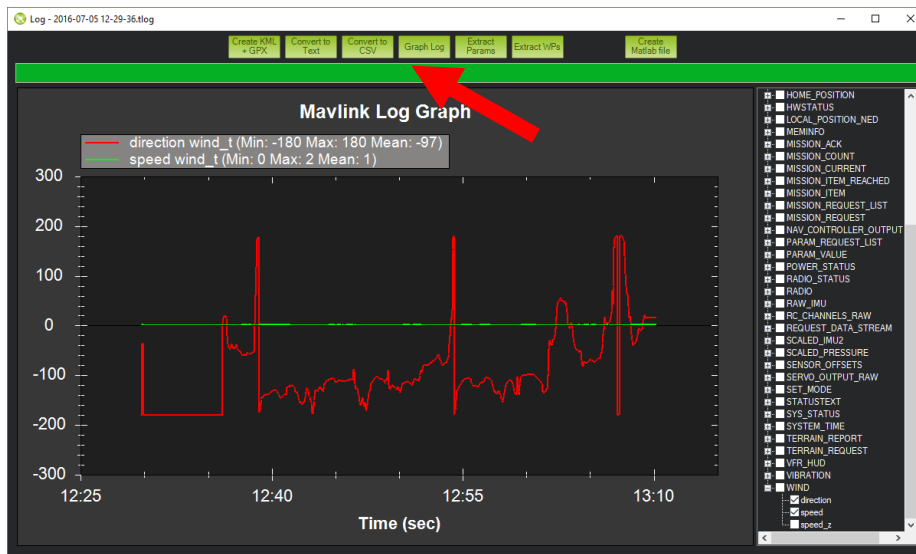
Βασιζόμενοι σε αυτά τα δεδομένα θα προβούμε στην αντίστοιχη εισαγωγή των δεδομένων που συλλέγονται κατά την πτήση σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. και την αντίστοιχη μετατροπή τους σε μοντέλα επιφάνειας.



Εικόνα 22 Τα σημεία συλλογής δεδομένων σε τρισδιάστατη προβολή

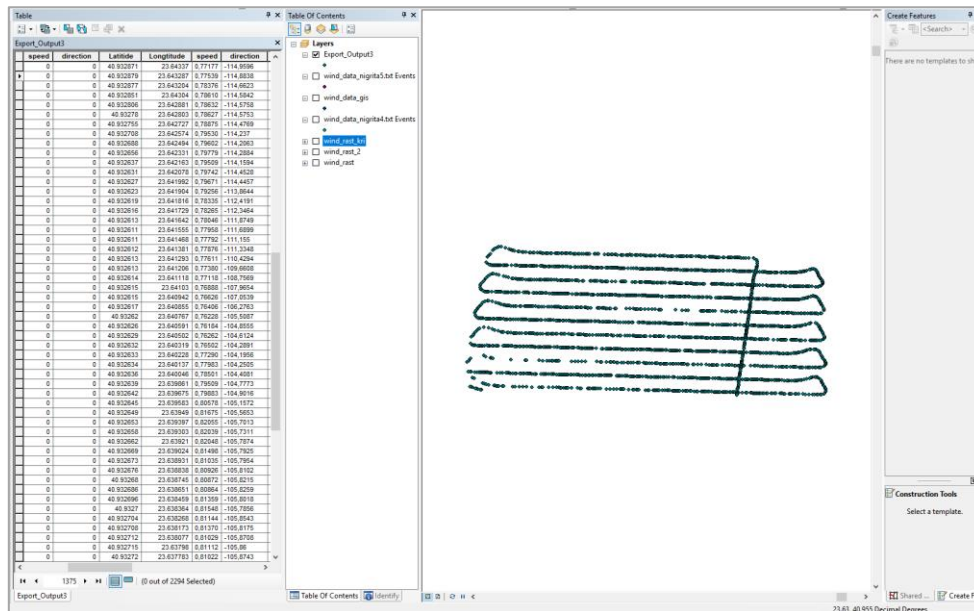
Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με ρυθμό δειγματοληψίας 100hz, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σαν συνεχείς γραμμές, που μας μαρτυρούν την πορεία της πτήσης.

Το λογισμικό Σταθμού Εδάφους, μας επιτρέπει να εξάγουμε τις παραπάνω τιμές σε ένα μεγάλο εύρος μορμά, διευκολύνοντας μας στην εισαγωγή τους στα ΓΣΠ.



Διάγραμμα 17 Ανάλυση τιμών ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στο λογισμικό του Σταθμού Εδάφους (Mission Planner)

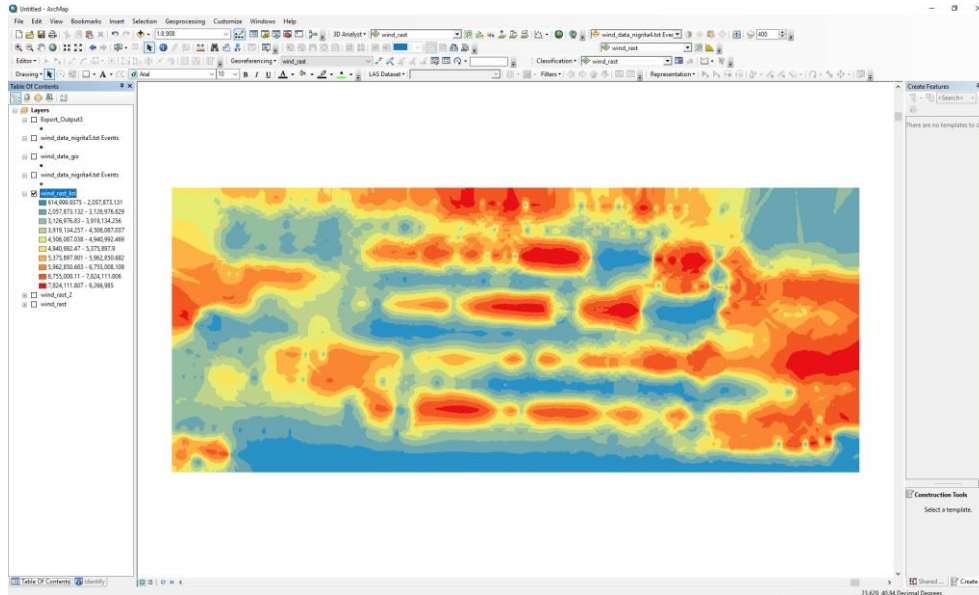
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την εντολή εξαγωγής από το αρχείο log της πτήσης καταγραφής, σε αρχείο CSV (Comma Separated Values), το οποίο εύκολα πλέον μπορεί να εισαχθεί σε υπολογιστικό φύλλο και κατ' επέκταση σε πίνακα περιγραφικών δεδομένων γραμμικού αρχείου Γ.Σ.Π. όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23 Εισαχθέντα σημειακά δεδομένα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου σε περιβάλλον Γ.Σ.Π.

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την θέση κάθε μέτρησης στον χώρο και ταυτόχρονα τον πίνακα περιγραφικών δεδομένων, που περιέχει τα πεδία ταχύτητας και

διεύθυνσης ανέμου, τα οποία θα αξιοποιήσουμε για να τα μετατρέψουμε σε μοντέλα επιφανείας εφαρμόζοντας χωρική παρεμβολή όπως στο παράδειγμα της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 24 Εφαρμογή χωρικής παρεμβολής Kriging, σε δεδομένα ταχύτητας αέρα

Ομοίως επαναλαμβάνουμε για τις τιμές των αισθητήρων βαρομετρικής πίεσης και θερμοκρασίας.

3.2.3 c Ψηφιακό περιβαλλοντικό πολύμετρο Mastech MS6300

Τα δεδομένα πτήσεως πολλές φορές δεν επαρκούν, όπως είδαμε και για τις τιμές θέσεως, όπου απαιτείται η συλλογή μετρήσεων αναφοράς. Επίσης σε περίπτωση μη επάρκειας μετεωρολογικών σταθμών για την μέτρηση τρεχουσών τιμών κλιματικών παραγόντων, για την εφαρμογή χωρικής παρεμβολής, τότε ένας φορητός αισθητήρας είναι η μοναδική πηγή δεδομένων.

Η επιλογή του περιβαλλοντικού πολύμετρου, έγινε με γνώμονα το πλήθος των τιμών που μπορεί να μετρήσει, την αξιοπιστία των μετρήσεων και φυσικά τη δυνατότητα αγοράς από τον συντάκτη.



Εικόνα 25 Ψηφιακό Περιβαλλοντικό πολύμετρο Mastech MS300

Οι μετρήσεις του πολύμετρου συνοδεύονται από τις μετρήσεις των φωτοσταθερών σημείων. Έτσι μπορούμε να δώσουμε χωρική πληροφορία στις μετρήσεις μας.

Στον παρακάτω πίνακα, μπορούμε να δούμε τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού πολύμετρου

Πίνακας 29 Τεχνικών προδιαγραφών Mastech Digital Environmental Multimeter

Επιλογή εύρους	αυτόματη
Θερμοκρασία	-10°C ÷ 60°C ± 1,0°C
Υγρασία	20% ÷ 80% relative humidity (RH) ± 3.0% RH
Φως	0÷50000 Lux ± 5.0%
Ήχος	30dB ÷ 130dB ± 1.5dB
Ανεμόμετρο	0.4÷20m/s ± 3.0%
Ροή αέρα (CMM)	0÷999900CMM ± 3.0%
Αποθήκευση δεδομένων	Ναι
Δυνατότητα σχετικής μέτρησης	Ναι
Δυνατότητα μέγιστης τιμής	Ναι

Τα δεδομένα του πολύμετρου, εξάγονται σε μορφή κειμένου .txt, προστίθενται οι τιμές θέσης και εφαρμόζονται όρια (delimiters) μορφής TAB, για να εισαχθούν σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. όπως είδαμε ανωτέρω.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διαθεσιμότητα του πολύμετρου μας επέτρεψε την δοκιμή βαθμονόμησης των δεδομένων προσπίπτουσας ακτινοβολίας όπως αυτά υπολογίζονται μέσω του εργαλείων ακτινοβολίας σε περιβάλλον Γ.Σ.Π., θέτοντας γνωστό σημείο για υπολογισμό της νεφοσκεπής με μη εμπειρικό τρόπο.

3.2.4 Δείκτες Βλάστησης

Στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου 3.2, εξετάσαμε την μεθοδολογία μέτρησης και μετατροπής των αγνώστων τιμών υπολογιστικών μοντέλων καθώς επίσης και την μέθοδο συλλογής δεδομένων με τηλεπισκόπηση.

Σε αυτή την παράγραφο θα εστιάσουμε στους δείκτες βλάστησης. Θα δούμε την μέθοδο εξαγωγής τους από τα πρωτογενή τηλεπισκοπικά δεδομένα, την σχέση τους με τα μοντέλα πρόβλεψης και τον τρόπο με τον οποίο ολοκληρώνουν την εικόνα μιας γεωργικής εκμετάλλευσης (Stefanakis et al., 2013).

Επιπλέον ο υπολογισμός δεικτών βλάστησης έχει συνδεθεί με τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας της καύσιμης ύλης (DFMC), ο οποίος θεωρείται βασική παράμετρος στην συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών (Zotmpas et al., 2017).

Ο κύριος στόχος της παραγράφου είναι να τροφοδοτήσουμε το μοντέλο πρόβλεψης ξηράς μάζας, με τον δείκτη LAI (Leaf area Index) (Asner et al., 2003), που μέχρι σήμερα υπολογίζονταν στην εξίσωση (5) με εμπειρικό τρόπο.

Στη συνέχεια, θα δούμε πώς μπορούμε να αυτοματοποιήσουμε την διαδικασία παραγωγής δεικτών βλάστησης από τα πρωτογενή δεδομένα, με έγκυρο τρόπο και σαφήνεια ως προς την επιλογή τους, ώστε να παρέχουμε στον εκμεταλλευόμενο μια ολοκληρωμένη πληροφόρηση για την παρούσα κατάσταση της καλλιέργειας του (Jackson and Huete, 1991).

3.2.4 α Υπολογισμός του δείκτη LAI

Όπως γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία ο υπολογισμός του LAI με μεθόδους τηλεπισκόπησης γνωρίζει ένα μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας προκαλώντας σύγχυση στους ερευνητές για την βέλτιστη μέθοδο υπολογισμού (Baret and Guyot, 1991).

Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγονται ως πηγή δεδομένων έτοιμες εφαρμογές μετατροπής δορυφορικών δεδομένων όπως ο MODIS LAI ή ο Landsat LAI, βασισμένοι στην παραδοχή της μοναδικής ανακλαστικότητας του φυλλώματος συγκρινόμενο με την ανακλαστικότητα των υπολοίπων στοιχείων του εδάφους. Η παραπάνω παραδοχή βασίζεται στην συσχέτιση με τον κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης (NDVI) ή τον πράσινο κανονικοποιημένο δείκτη βλάστησης (GNDVI) για τον υπολογισμό του LAI(Hunt et al., 2008) με την γραμμική συσχέτιση:

$$\text{LAI} = (\text{GNDVI} - 0.5) / 0.16 \text{ με συντελεστή προσδιορισμού } R^2 = 0.85. (\text{Lelong et al., 2008})$$

(15) ή

$$\text{LAI} = ((0.011 \times \text{Exp}(11.756 \times \text{NDVI}) + 0.827)) / 10 \text{ με συντελεστή προσδιορισμού } R^2 = 0.85 (\text{Arnó et al., 2012})$$

(16)

Στον αντίποδα παρατηρούμε να χρησιμοποιούνται πολλαπλοί μέθοδοι δειγματοληψίας εντός και εκτός της φυλλοστοιβάδας με εξειδικευμένο εργαστηριακό εξοπλισμό ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα(εικόνα 26). Επίσης για τον ίδιο λόγο παρατηρούμε και διαχωρισμό του LAI με διαφορετικούς ορισμούς για διαφορετικές εφαρμογές, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Zheng and Moskal, 2009).

Πίνακας 30 Σύγκριση ορισμών δείκτη LAI

Τύπος	Ορισμός	Εφαρμογή	Πηγή
Total Leaf Area Index (ToLAI)	Ολικός δείκτης μονόπλευρης επιφάνειας φωτοσυνθετικού ιστού ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους	Εφαρμόζεται σε όλα τα πλατύφυλλα φυτά	(WATSON, 1947)(Myneni et al., 2002; WATSON, 1947)
Projected Leaf Area Index (PLAI)	Η επιφάνεια της οριζόντιας σκιάς που διαμορφώνεται από ένα οριζόντιο φύλλο με μια πηγή φωτός σε άπειρη απόσταση ακριβώς από πάνω του	Όταν η μέγιστη επιφάνεια του φυλλώματος από την άνωθεν σφαιρική όψη, διαφέρει αναλόγως την τιμή του αισθητήρα μέτρησης στο ζενίθ της γωνίας μέτρησης	(Ross, 1981; WATSON, 1947)
Silhouette Leaf Area Index (SLAI)	Η επιφάνεια των φύλλων με κλίση ως προς την επιφάνεια εδάφους	Μελετά την ακτινοβολία που ανακόπτεται από διαφορετικά σχήματα φύλλων	(Smith et al., 1991)
Effective Leaf Area Index (ELAI)	Η Μισή ολική επιφάνεια του φωτός που ανακόπτεται από τα φύλλα ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους με την παραδοχή ότι η χωρική κατανομή του φυλλώματος είναι τυχαία	Ακριβής περιγραφή ανακοπής της ακτινοβολίας καθώς και του καθεστώτος της ακτινοβολίας έσω και κάτω της φυλλοστοιβάδας	(Black et al., 1991)
True Leaf Area Index (TLAI)	Η Μισή ολική επιφάνεια των πράσινων φύλλων ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους	Χαρακτηρίζει ποσοτικά το καθεστώς ακτινοβολίας έσω και κάτω της φυλλοστοιβάδας και προσομοιώνει διεργασίες που διέπονται από το φύλλωμα	(Lang, 1991)



Εικόνα 26 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA).

Συνοψίζοντας από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι υπολογισμού του LAI με την χρήση τηλεπισκόπησης, βασίζονται σε δεδομένα κυρίως δορυφορικών δεκτών που μας παρέχουν χωρική διακριτικότητα της τάξης των δεκάδων μέτρων. Στην παρούσα διατριβή, με γνώμονα την υψηλή χωρική διακριτικότητα που μας παρέχουν οι αισθητήρες τηλεπισκόπησης όπως είδαμε παραπάνω, θα υπολογίσουμε τον δείκτη LAI, αξιοποιώντας τόσο την γραμμική συσχέτιση με τον δείκτη GNDVI/NDVI, όσο και φωτογραμμετρικά, αναλύοντας την γεωμετρία της κόμης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι γύρω στο 2017, αρκετές ομάδες ανάπτυξης λογισμικού ανέπτυξαν εφαρμογές, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των σύγχρονων κινητών τηλεφώνων (Smartphone) για τον υπολογισμό του δείκτη LAI (Fang et al., 2017).



Εικόνα 27 Παράδειγμα εφαρμογής σε λειτουργικό σύστημα Android, για μέτρηση του δείκτη LAI

α1. Φωτογραμμετρικός υπολογισμός του δείκτη LAI

Όπως παρατηρήσαμε στο κεφάλαιο 3.2.1, οι αισθητήρες τηλεπισκόπησης μας παρέχουν χωρική διακριτικότητα 1-8εκ, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα λεπτομερές ψηφιακό μοντέλο επιφανείας, κατ' επέκταση και της κόμης των υπό μελέτη φυτών.



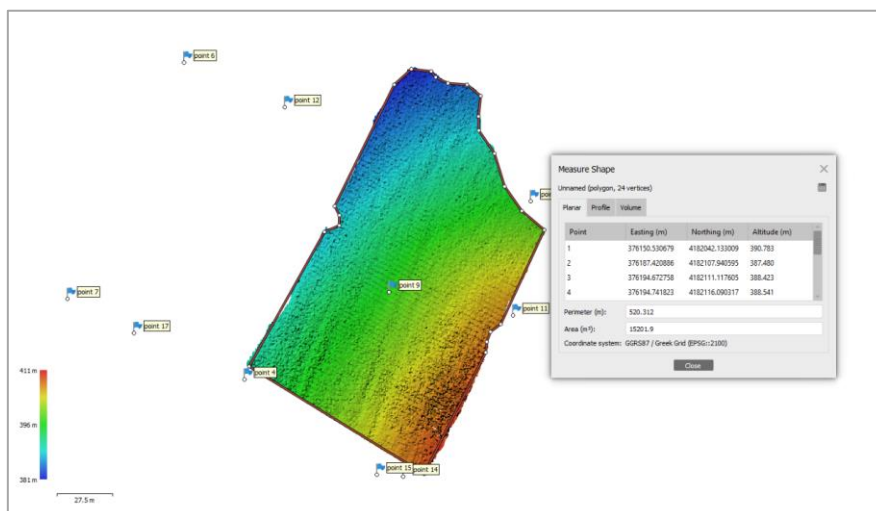
Εικόνα 28 Τρισδιάστατη απεικόνιση νέφους σημείων, καταγραφής σε καλλιέργεια αμπέλου(χωρική διακριτικότητα 3.4εκ)

Τα λογισμικά διαχείρισης δεδομένων ΣμηΕΑ, μας δίνουν την δυνατότητα να προβούμε σε μετρήσεις, καθώς επίσης και να επεξεργαστούμε τα πρωτογενή δεδομένα, όπως τα νέφη σημείων που παράγονται από την διαδικασία του αεροτριγωνισμού. Για τις ανάγκες των πειραμάτων θα υπολογίσαμε:

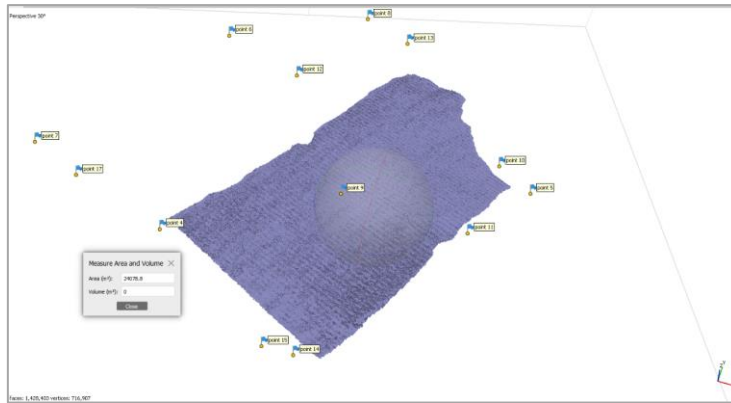
1. Την συνολική ορθή προβολή της επιφάνειας, της υπό μελέτης περιοχής.
2. Την συνολική επιφάνεια του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας (DSM)
3. Την ορθή προβολή της επιφάνειας που καλύπτεται αποκλειστικά από έδαφος

Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε:

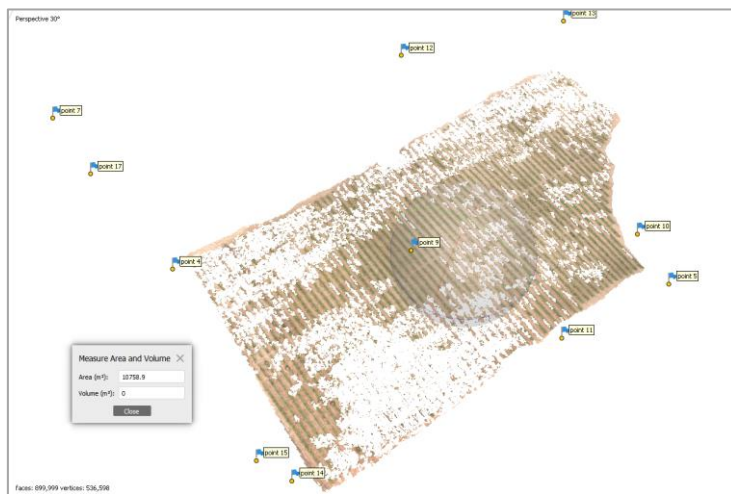
- a. Την επιφάνεια που καλύπτεται από τα φυτά
- b. Την επιφάνεια της κόμης των φυτών.
- c. Το κλάσμα S_c/S_g για τον προσδιορισμό του LAI (Όπου S_c , η φυλλική επιφάνεια και S_g , η επιφάνεια εδάφους)



Εικόνα 29 Μέτρηση επιφάνειας σε ορθή προβολή στο λογισμικό Agisoft Metashape



Εικόνα 30 Μέτρηση της συνολικής επιφάνειας του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας στο λογισμικό Agisoft Metashape



Εικόνα 31 Ταξινόμηση νέφους σημείων, εξαγωγή Μοντέλου επιφανείας από σημεία εδάφους και μέτρηση επιφάνειας σε ορθή προβολή, στο λογισμικό Agisoft Metashape

Τέλος ο δείκτης LAI, υπολογίζεται στην πλατφόρμα Python script που παρέχεται από το λογισμικό Agisoft Metashape από την σχέση:

$$LAI = (Surface_{DSM} - Surface_{Ground}) / (Surface_{DEM} - Surface_{Ground}) \quad (17)$$

α2. Υπολογισμός με συσχέτιση του δείκτη GNDVI/NDVI

Ο υπολογισμός του LAI, με την χρήση του δείκτη NDVI, μας δίνεται έπειτα από τις εξής μετατροπές/επεξεργασίες:

Ο πολυφασματικός ορθοφωτοχάρτης, εισάγεται σε περιβάλλον R και εφαρμόζεται ο τύπος υπολογισμού του δείκτη NDVI:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (18)$$

Έπειτα εφαρμόζεται η εξίσωση που προέρχεται από συσχέτιση τιμών(16):

$$LAI = ((0.011 \times \text{Exp}(11.756 \times \text{NDVI}) + 0.827)) / 10$$

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί αναλόγως του είδους του υπό μελέτη φυτού. Επίσης δίδεται βάρος και στον συντελεστή προσδιορισμού R^2 .

Τέλος πρέπει να διευκρινιστεί, ότι οι παραπάνω διεργασίες μπορούν να εκτελεστούν σε οποιοδήποτε περιβάλλον Γ.Σ.Π., που μας δίνει την δυνατότητα υπολογισμού μεταξύ ψηφιδωτών (Raster Calculator), ωστόσο επιλέχθηκε η R, εξ αιτίας των υπολογιστικών πόρων που καταναλώνει και η ευκολία ανάπτυξης αλγορίθμου (Script), που συμβάλει στην ταχύτητα και την επαναληψιμότητα των πειραμάτων.

3.2.4 b Υπολογισμός του δεικτών βλάστησης.

Οι δείκτες βλάστησης, χρησιμοποιούνται από τις επιστήμονες για να εξάγουν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που αφορούν την βλάστηση με μεθόδους τηλεπισκόπησης. Η φασματική απόκριση των περιοχών με βλάστηση όμως, περιλαμβάνουν ένα περίπλοκο και ποικιλόμορφο μίγμα από βλάστηση, φωτεινότητα εδάφους, κλιματικούς παράγοντες, σκιάσεις, χρώμα εδάφους και υγρασία (Bannari et al., 1995). Επίσης οι δείκτες βλάστησης επηρεάζονται από την ατμόσφαιρα.

Τα τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί άνω των 40 δεικτών με στόχο να βελτιώσουν την φυτική απόκριση και να μειώσουν τις επιπτώσεις των παραγόντων που αναφέραμε.

Όπως παρατηρήσαμε στο κεφάλαιο 3.2.4 b, οι δείκτες βλάστησης μας παρέχουν άμεση πληροφόρηση για την παρούσα κατάσταση της καλλιέργειας. Επίσης τα τελευταία έτη, έχει παρατηρηθεί στην βιβλιογραφία, ολοένα και περισσότερες μελέτες συσχέτισης των δεικτών βλάστησης με διεργασίες που άπτονται της φυσιολογίας του φυτού. Ουσιαστικά όμως πρόκειται για μια πηγή άμεσης πληροφόρησης και εντοπισμού ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων κατά την καλλιεργητική διαδικασία (Huete and Jackson, 1987).

Από του διαθέσιμους δείκτες που αναφερθήκαμε προηγουμένως, επιλέξαμε να υπολογίσουμε για κάθε υπό μελέτη καλλιέργεια εκείνους όπου:

- Οι απαιτήσεις του σε μόντες υπολογισμού είναι διαθέσιμες από τους αισθητήρες που έχουμε επιλέξει.
- Δίνουν σαφή και επαρκή συσχέτιση ώστε να τροφοδοτήσουμε μετέπειτα τα μοντέλα πρόβλεψης βιομάζας.
- Παρέχουν σφαιρική πληροφόρηση για την κατάσταση της καλλιέργειας
- Συνδέονται άμεσα με την εφαρμογή καλλιεργητικών πρακτικών

Συνδυάζοντας την βιβλιογραφία, τους παράγοντες που αναφέραμε και τα είδη των καλλιεργειών που δειγματίσαμε επιλέξαμε τον υπολογισμό των παρακάτω δεικτών και την μέθοδο υπολογισμού τους.

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

Ο κανονικοποιημένος Διαφορικός δείκτης βλάστησης NDVI. Έχει μια μεγάλη χρησιμότητα στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος και έχει χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης στο χρόνο, στην παραγωγή βιομάζας και στην εδαφική υγρασία (Wang et al., 2005). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (18)$$

NDRE - Normalized Difference Red Edge

Ο κανονικοποιημένος διαφορικός δείκτης βλάστησης στο άκρο του κόκκινου, αντιπροσωπεύει μέρος της φασματικής ανάκλασης όπου συμβαίνουν ταχείες αλλαγές στην ανακλαστικότητα της βλάστησης (Rodriguez et al., 2006). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$NDRE = ((NIR - R_{edge}) / (NIR + R_{edge})) \quad (19)$$

GNDVI - Green NDVI

Ο GNDVI, Έχει μεγαλύτερο δυναμικό εύρος σε σχέση με τον NDVI και είναι στις μέσες τιμές, έως και 5 φορές πιο ευαίσθητος, στις συγκεντρώσεις Chlorophyll-a. Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται για την μέτρηση συγκέντρωσης χλωροφύλλης και τον εντοπισμό του στρες (Candiago et al., 2015). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$GNDVI=(NIR-GREEN)/(NIR+GREEN) \quad (20)$$

GRVI – Green ratio Vegetation Index

Ο GRVI Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της ενεργής φωτοσυνθετικά βιομάζας στην φυλλοστοιβάδα (Bendig et al., 2015). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$GRVI=NIR/GREEN \quad (21)$$

SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index

Ο εδαφικά προσαρμοσμένος δείκτης βλάστησης SAVI, είναι ένας τροποποιημένος NDVI, ο οποίος διορθώνει την επίδραση της φωτεινότητας του εδάφους σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη βλάστησης. Αυτός ο δείκτης έχει καλύτερη χρήση σε περιοχές με αραιή βλάστηση, όπου το έδαφος είναι ορατό από την κόμη (Huete, 1988). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$SAVI=[(1+L)x(NIR-RED)]/(NIR+RED+L) \quad (22)$$

Όπου L ο παράγοντας διόρθωσης στο περιθώριο της κόμης (~L=0.5)

EVI - Enhanced Vegetation Index

Ο βελτιωμένος δείκτης βλάστησης EVI αναπτύχθηκε ως ένας εναλλακτικός δείκτης για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς του NDVI σε περιοχές με υψηλή βιομάζα. Ο

δείκτης EVI έχει βρεθεί να είναι περισσότερο ευαίσθητος σε αλλαγές της κόμης των φυτών (Jiang et al., 2008). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$EVI = G \times ((NIR-RED)/((NIR+C1) \times (RED-C2) \times (BLUE+L))) \quad (23)$$

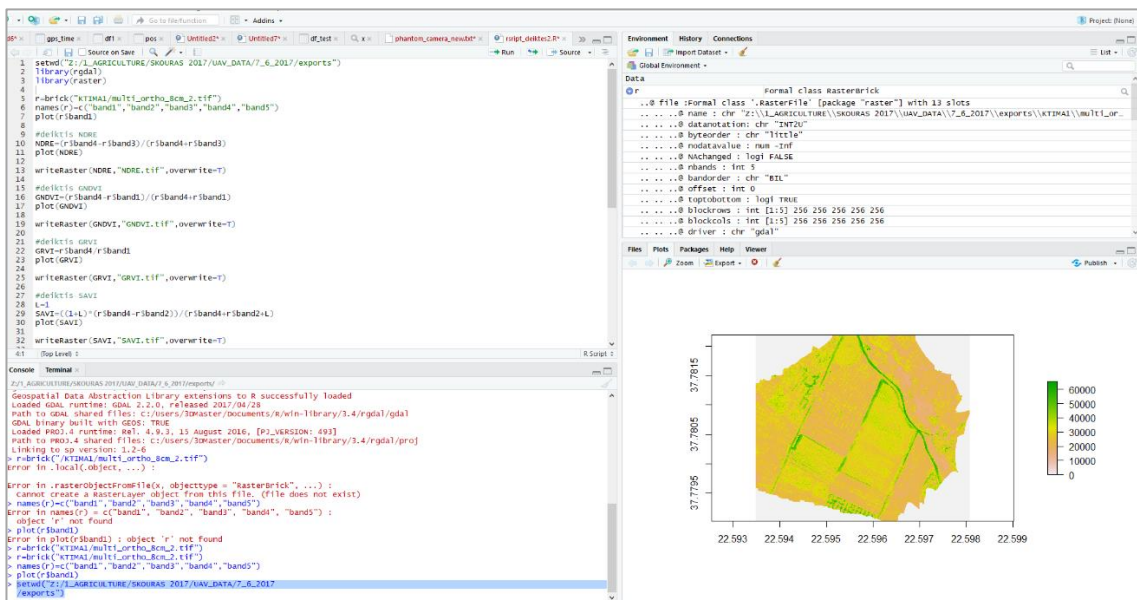
Όπου L=1, C1=6, C2=7.5 και G(πολλαπλασιαστικός παράγοντας)=2.5

Total Vegetation Index (VI)

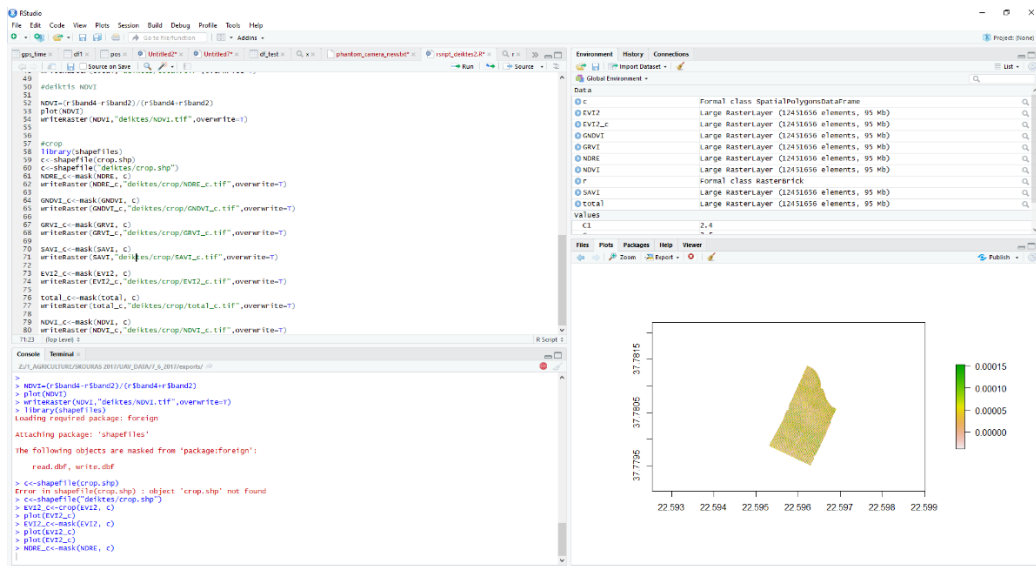
Ειδικά για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, όπου έπρεπε να διαχειριστούμε μεγάλο όγκο δεδομένων, έπρεπε με κάποια μέθοδο προεπισκόπησης να συνδυάζει και να επαυξάνει τα φαινόμενα που συμβαίνουν στην καλλιέργεια, συνδυάζοντας κάθε πληροφορία από τους υπόλοιπους δείκτες, καθιστώντας διακριτή και την παραμικρή διαφοροποίηση. Ο δείκτης Total Vi υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Total\ VI = (18) + (19) + (20) + (21) + (22) + (23) \quad (24)$$

Η εισαγωγή δεδομένων, αλληλουχία των εντολών καθώς και οι παραγόμενοι δείκτες σε περιβάλλον R, φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 32 Καθορισμός φακέλου εργασίας, εισαγόμενων δεδομένων και εξισώσεις ψηφιδωτών σε περιβάλλον R



Εικόνα 33 Αυτοματοποιημένη εκτέλεση εντολών. Προεπισκόπηση και εξαγωγή ψηφιδωτών αρχείων δεικτών βλάστησης

3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Το κατασκευαστικό και σχεδιαστικό μέρος της εναέριας πλατφόρμας δεν θα αναλυθούν σε βάθος στην παρούσα εργασία. Ωστόσο θα δοθούν αναλυτικά τα στοιχεία κατασκευής, χρήσης υλικών και τηλεμετρίας για να γίνουν κατανοητές οι δυνατότητες του σκάφους και να μπορεί να επαναληφθεί το πείραμα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε αναλυτικά τον εξοπλισμό τον οποίο αποτελεί την πλατφόρμα καθώς και την γλώσσα μηχανής που είναι απαραίτητη για το κάθε τμήμα ώστε να γίνει συγγραφή του αντίστοιχου κώδικα και να έχουμε ένα ολοκληρωμένο υλικό-λογισμικό. Επίσης, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να βαθμονομήσουμε το σύνολο των αισθητήρων καταγραφής ώστε το φάσμα φωτός που καταγράφει η κάθε μάντα-κανάλι χρώματος αντιστοιχεί στις μάντες TM₁₋₅ του δορυφορικού Δέκτη Landsat TM5 ή να βρεθεί η αντιστοιχία του Δορυφορικού Δέκτη Sentinel και να έχουμε άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα με την βιβλιογραφία.

3.3.1 Γενική ιδέα επιχειρησιακού σχεδιασμού

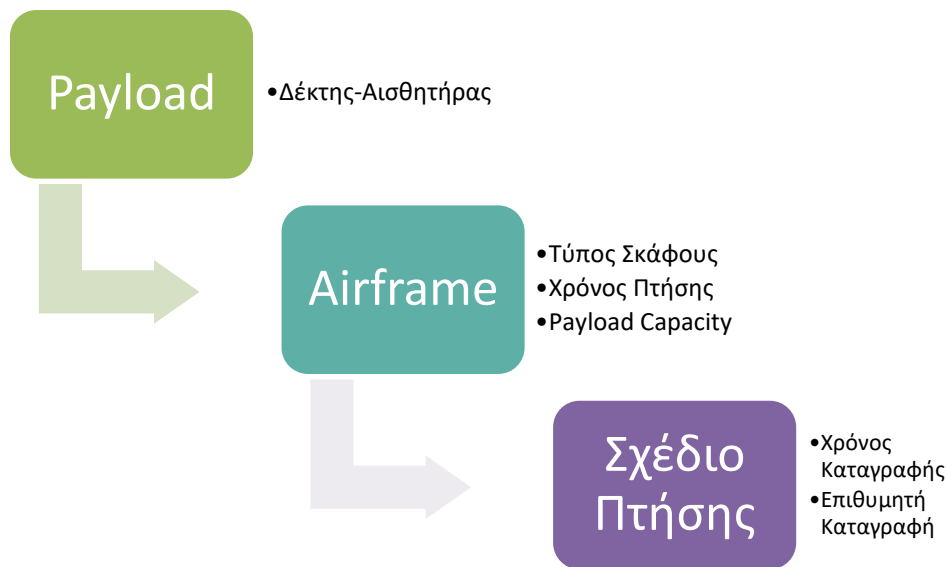
Στην διεθνή βιβλιογραφία, ο επιχειρησιακός σχεδιασμός αναφέρεται ως Concept of Operations (CONOPS) και μας δίνει τον τρόπο με τον οποίο συνθέτουμε το Μη Επανδρωμένο Εναέριο σύστημα μας ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή καταγραφή (Valavanis and Vachtsevanos, 2015).

Ουσιαστικά γνωρίζοντας τα παραδοτέα προϊόντα της καταγραφής μας και τα χαρακτηριστικά του κεφαλαίου 1, έγινε παραγωγή ενός πλήρους συστήματος που θα καλύπτει τις ανάγκες μας, στο βέλτιστο βαθμό με γνώμονα το χρόνο και τους διαθέσιμους πόρους.

Η διαδικασία του CONOPS συγκροτείται από τέσσερις (4) παράγοντες:

- Το σύνολο του έργου που το ΣμηΕΑ καλείται να φέρει εις πέρας
- Τα Παραδοτέα Προϊόντα
- Το Χρόνο διεξαγωγής και προετοιμασίας
- Τις επικρατούσες συνθήκες κατά την διεξαγωγή του Έργου

Γνωρίζοντας τις παραπάνω συνιστάμενες και το βαθμό επιρροής που έχει η κάθε μία, προχωρήσαμε εις βάθος στον επιχειρησιακό σχεδιασμό αναλύοντας την ανάστροφη διαδικασία που αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, κατά το σχήμα:



Σχήμα 7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ (CONOPS)

3.3.2 Εξοπλισμός ΣμηΕΑ

Το σύνολο του επιθυμητού εξοπλισμού διαμορφώνει το μέγεθος και το βάρος της εναέριας πλατφόρμας. Σε αυτό το κεφάλαιο, ενώσαμε τα χαρακτηριστικά που συγκεντρώσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια και στην συνέχεια προχωρήσαμε στην ανάλυση και κατασκευή κάθε υποσυστήματος.

Πίνακας 31 Εξοπλισμού υποσυστημάτων ΣμηΕΑ

Περιγραφή	Μήκος (mm)	Πλάτος(mm)	Ύψος(mm)	Βάρος(gr)
Avionics				
Μονάδα αυτόματου Πιλότου	80	60	30	60
Δέκτης GPS LEA-6H	38	38	8.5	16.8
Δέκτης GPS RTK	65	65	10	48
Companion Computer RPi3b+	85.6	56.5	12	31
RF Telemetry	50	30	9	15
Control RX	40	30	9	12
Battery eliminator Circuit	20	20	6	15
Power Module	15	15	5	6
Payloads				
Modified Sony APS-C	90	90	65	117
Parrot Sequoia	59	41	29.5	107
Power Setup				
Motor	50	28	28	136
Electronic Speed Controller	52	34	10	62
Servos (x6)	26	28	12	23
Battery	200	80	25	670
Σύνολο				1302

3.3.3 Σχεδίαση Εναέριας Πλατφόρμας

Η κάθε μελέτη και σχεδίαση μιας μη επανδρωμένης εναέριας πλατφόρμας πρέπει να έχει ως σημείο αφετηρίας τον προσδιορισμό του σκοπού για τον οποίο αυτή κατασκευάζεται. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν και αναλυθούν, οι τέσσερις βασικοί παράγοντες που παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην μελέτη και σχεδίαση του αεροσκάφους. Οι παράγοντες αυτοί είναι οι παρακάτω:

- Βάρος πλατφόρμας
- Χρόνος πτήσης
- Ωφέλιμο φορτίο
- Επιχειρησιακή εμβέλεια
- Διαστάσεις πλατφόρμας

Το στάδιο της μελέτης και του σχεδιασμού βελτιστοποιεί την σχέση των παραπάνω παραγόντων, οδηγώντας στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

3.3.3.a Προκαθορισμός βασικών παραγόντων

Το αρχικό στάδιο της μελέτης και σχεδίασης της εναέριας πλατφόρμας, όπως προαναφέραμε, είναι ο προκαθορισμός των βασικών παραγόντων με γνώμονα τις αποστολές για τις οποίες αυτή προορίζεται. Έτσι λοιπόν το αεροσκάφος «Φορέας» σχεδιάστηκε για :

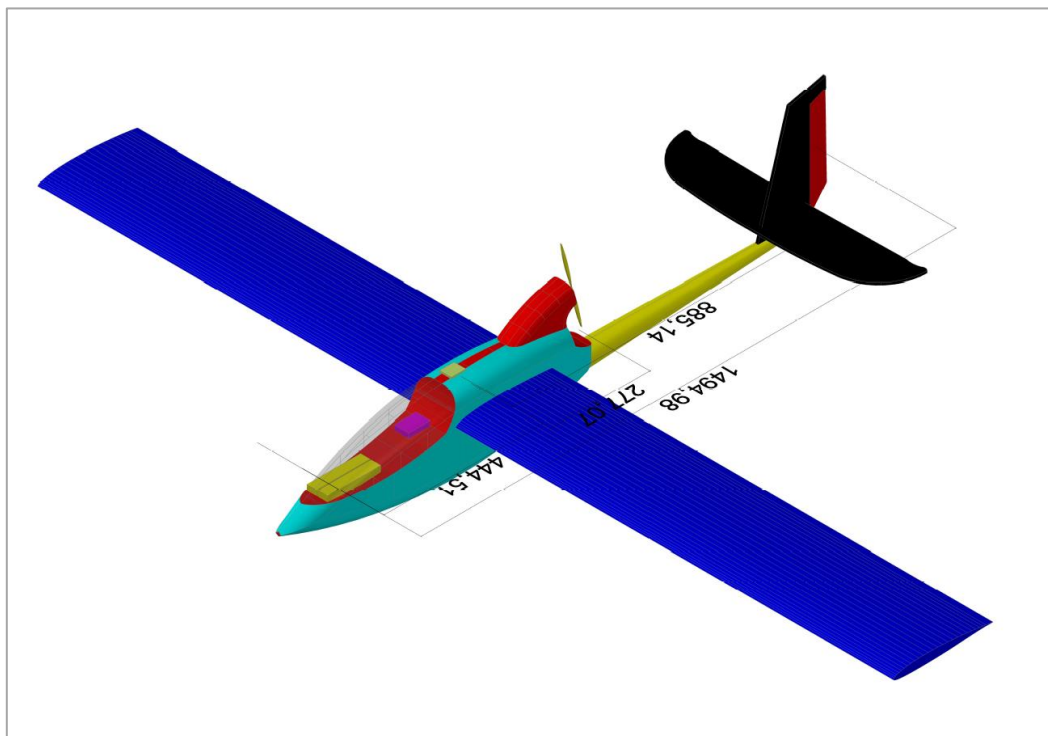
- Να έχει βάρος πλατφόρμας 3100gr. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η μεταφορά του από και προς το πεδίο, καθώς και απλοποιούνται οι πτητικές του δυνατότητες. Ουσιαστικά η μικρότερη μάζα μας επιτρέπει να παραμείνουμε στην κατηγορία ΣμηΕΑ Β, που απαιτεί λιγότερες διαδικασίες αδειοδότησης και παράλληλα απαιτεί μικρότερη επιφάνεια πτερύγων για να επιτύχουμε τον ζητούμενο πτερυγικό φόρτο
- Ο χρόνος πτήσης του να υπερβαίνει την μια ώρα. Οι αποστολές χαρτογράφησης που θα χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη πλατφόρμα, απαιτούν πτήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας.
- Η επιχειρησιακή του εμβέλεια να ξεπερνάει τα 20km. Ομοίως, η εμβέλεια στις αποστολές αποτύπωσης, παίζει σημαντικό ρόλο, γι' αυτό θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.
- Να έχει εκπέτασμα πτέρυγας 2400mm. Να είναι εύκολα διαχειρίσιμο τόσο στην μεταφορά όσο και στην κατασκευή / συναρμολόγηση αλλά και κατά την πτήση του.

3.3.3.b Γεωμετρικοί παράμετροι αεροσκάφους

Λαμβάνοντας υπόψη τους προηγούμενους παράγοντες που αναφέρθηκαν, μετά από την λεπτομερή μελέτη και σχεδίαση της πλατφόρμας, οι γεωμετρικοί παράμετροι που προέκυψαν είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 32 Γεωμετρικών παραμέτρων Αεροχήματος

Περιγραφή	Μέτρηση
Χορδή Ρίζας κύριας Πτέρυγας	28 cm
Χορδή άκρου κύριας Πτέρυγας	28 cm
Χορδή Ακροπτερυγίου	20 cm
Εκπέτασμα 1ου Τμήματος	67 cm
Εκπέτασμα 2ου Τμήματος	50 cm
Χορδή Ρίζας Οριζώντιου Σταθεροποιητή	12 cm
Χορδή άκρου Οριζώντιου Σταθεροποιητή	10 cm
Οπισθόκλιση Οριζώντιου Σταθεροποιητή	1 cm
Εκπέτασμα Οριζώντιου Σταθεροποιητή 2x	30 cm
Απόσταση Χειλών προσβολής	140 cm
Στατικό Εύρος κατά την πτήση (7-15%)	12.5%



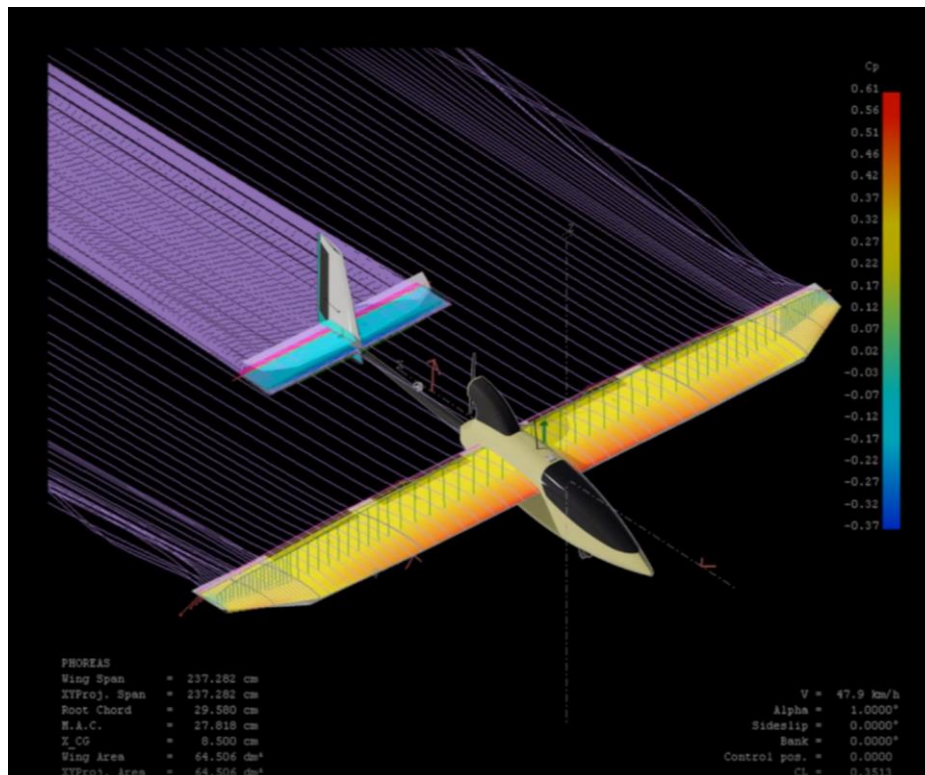
Εικόνα 34 Αποτέλεσμα εφαρμογής γεωμετρικών παραμέτρων σε περιβάλλον CAD

3.3.3 c Αεροδυναμική ανάλυση – σχεδίαση

Το στάδιο που ακολουθεί των γεωμετρικών παραμέτρων, είναι η αεροδυναμική ανάλυση του αεροσκάφους και η σχεδίασή του. Στο στάδιο αυτό σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Αεροδυναμικά
- Δομικά
- Χρηστικά

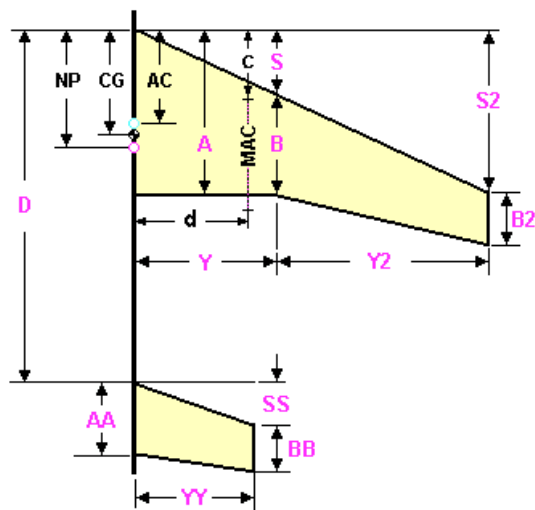
Από την αεροδυναμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω εξειδικευμένων λογισμικών πακέτων (π.χ. AutoCAD, XFLR5), εξετάστηκαν και εξομοιώθηκαν διάφορα πρότυπα πτήσης, τα οποία αφενός πληρούσαν τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί στην αρχή της συγκεκριμένης διαδικασίας, αφετέρου βάσει της διεθνής βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΜΕΑ) (Valavanis and Vachtsevanos, 2015). Αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής, ήταν η βελτιστοποίηση των επιφανειών ελέγχου, το μέγεθος της κύριας πτέρυγας και ο τύπος της αεροτομής που θα χρησιμοποιηθεί στο αεροσκάφος.



Εικόνα 35 Εισαγωγή γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης σε Λογισμικό Προσομοίωσης και Αεροδυναμικής ανάλυσης (XFLR5)

3.3.3 d Αναλυτικά χαρακτηριστικά περύγων

Από την διαδικασία της σχεδίασης και ανάλυσης μας έγιναν ορατά τα πιθανά σφάλματα ή οι παρεκκλίσεις των επιδόσεων του φακέλου πτήσης. Έτσι η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε, έως ότου επιτύχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα σε περιβάλλον προσομοίωσης, μειώνοντας τις πιθανότητες να διακινδυνεύσουμε τον εξοπλισμό μας στις δοκιμές πεδίου. Τα τελικά αποτελέσματα των κύριων χαρακτηριστικών των περύγων με τα οποία συνεχίσαμε στην κατασκευή, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα



Σχήμα 8 Αναφοράς Μετρήσεων

Περιγραφή	Μέτρηση
Χορδή Ρίζας κύριας Πτέρυγας A	29cm
Χορδή άκρου κύριας Πτέρυγας B	29cm
Χορδή Ακροπτερυγίου (B2)	21m
Οπισθόκλιση 1 ου Τμήματος (S)	0cm
Οπισθόκλιση 2 ου Τμήματος (S2)	8cm
Εκπέτασμα 1ου Τμήματος (Y)	67cm
Εκπέτασμα 2ου Τμήματος (Y2)	50cm
Χορδή Ρίζας Οριζόντιου Σταθεροποιητή (AA)	12cm
Χορδή άκρου Οριζόντιου Σταθεροποιητή (BB)	10cm
Οπισθόκλιση Οριζόντιου Σταθεροποιητή (YY)	1cm
Εκπέτασμα Οριζόντιου Σταθεροποιητή 2x	35cm

Απόσταση Χειλών προσβολής (D)	110cm
Στατικό Εύρος κατά την πτήση (7-15%)	12.8%

3.3.3 e Υπολογισμοί χαρακτηριστικών φακέλου πτήσης

Το περιβάλλον προσομοίωσης μας επέτρεψε να υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά των πτερύγων και κατ' επέκταση τον φάκελο πτήσης όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 33 Υπολογισμών χαρακτηριστικών Πτερύγων και φακέλου πτήσης

Μέση αεροδυναμική χορδή	26,2 cm
Επιφάνεια κύριας πτέρυγας	53,4 dm ²
Επιφάνεια Οριζόντιου σταθεροποιητή	7,35 dm ²
Βάρος αεροσκάφους	2900 gr
Πτερυγικός φόρτος	54,3 gr/dm ²
Αναλογία Εκπετάσματος/Ρίζας	8,51
Λόγος όγκου Οριζόντιου Σταθεροποιητή (Vbar)	0,702
Ταχύτητα αέρος απώλειας στήριξης	28 km/h
Αεροτομή	EPLER205 mod



Εικόνα 36 Εικονοποίηση τελικών αποτελεσμάτων σε περιβάλλον CAD

3.3.4 Κατασκευή του μη επανδρωμένου αεροσκάφους «Φορέας»

Μετά την μελέτη ,την σχεδίαση, και τις απαραίτητες προσομοιώσεις πτήσης σε λογισμικά πακέτα του μοντέλου, προχωρήσαμε στην κατασκευή του αεροσκάφους. Με την βοήθεια της τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε η ακριβής μεταφορά του σχεδίου στην πραγμάτωση του.

3.3.4 α Υλικά κατασκευής

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, κρούση και διάδοση ρωγμών ήταν οι παράγοντες που οδήγησαν στην επιλογή των σύνθετων υλικών (composites) για την κατασκευή του « Φορέα».

Τα σύνθετα υλικά προκύπτουν από την ανάμιξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών. Διαθέτουν τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα συνθέτουν και επιπλέον ιδιότητες που δεν διαθέτει κανένα από τα αρχικά υλικά (Γκουτζιώτης, 2011).

Η κατασκευή του «Φορέα» έγινε από στρωματικά σύνθετα υλικά, δομής τύπου σάντουιτς.

Τα σύνθετα στρωματοειδή τύπου σάντουιτς περιλαμβάνουν δύο ανθεκτικά εξωτερικά φύλλα, τα οποία διαχωρίζονται από μία στρώση ενός λιγότερο πυκνού υλικού ή πυρήνα (Zhang et al., 2017). Ο πυρήνας μπορεί να έχει γεωμετρία κυψελοειδούς ιστού – λεπτά ελάσματα μορφοποιημένων σε αλληλοσυνδεμένες εξαγωνικές κυψέλες ή να είναι ένα φύλλο διογκωμένης πολυστερίνης (φελιζόλ).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των σύνθετων υλικών, από τα οποία κατασκευάστηκε ο «Φορέας» είναι: ανθρακόνημα (τύπου Textreme Carbon), ύφασμα από ίνες αρωματικού πολυαμιδίου – aramid – (Kevlar), εξαγωνικός κυψελοειδής ιστός (Nomex Aramid Honeycomb cell), φύλλα εξήλασμένης πολυστερίνης (XPS Extruded Polystyrene) και εποξειδική ρητίνη.

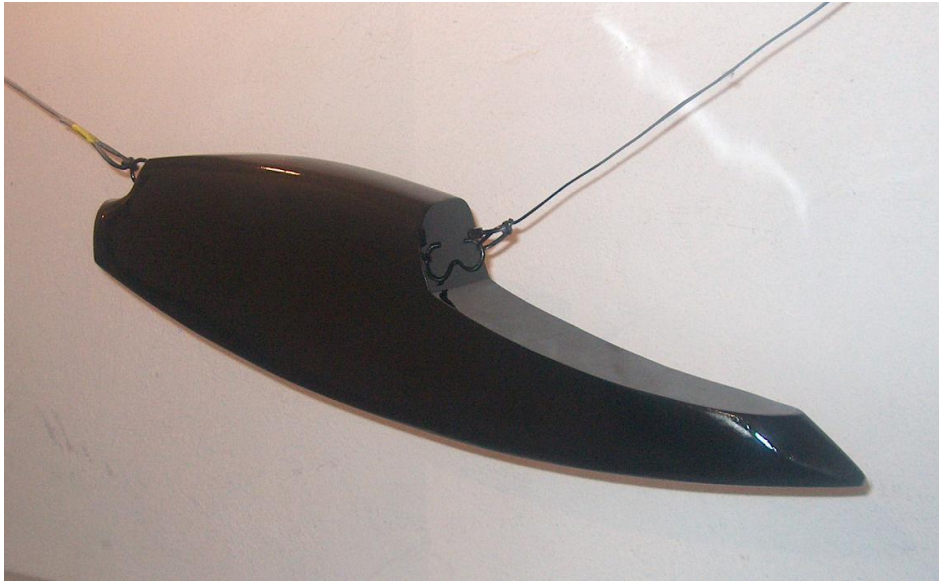
3.3.4 b Διαδικασία κατασκευής ατράκτου

Για να κατασκευαστεί η άτρακτος, χρειάστηκε αρχικά να δημιουργηθεί το καλούπι, το οποίο θα αποτέλεσε το τελικό σχήμα του αεροσκάφους. Αυτό έγινε, λαμβάνοντας τις τομές του σχήματος από το σχεδιαστικό λογισμικό πακέτο (AutoCad) και κόβοντας στο μηχανή CNC κομμάτια 6mm από φελιζόλ.

Έτσι ενώνοντας τις τομές αυτές προέκυψε το τελικό σχήμα του αεροσκάφους. Με συγκεκριμένες διαδικασίες στην συνέχεια τελειοποιήθηκε το καλούπι και ακολούθησε η κατασκευή της άτρακτου, με τα υλικά που προαναφέραμε.



Εικόνα 37 Συγκόλληση των τομών διογκωμένης πολυστερίνης και δημιουργία προτύπου της άτρακτου



Εικόνα 38 Ολοκλήρωση του πρωτότυπου μονέλου (Μήτρας)



Εικόνα 39 Αποτέλεσμα αρνητικού καλουπιού (μήτρας) της ατράκτου

Στη συνέχεια, μορφοποιήθηκε με την μέθοδο *infuse resin vacuum molding*. Οι μέθοδοι κατασκευής της ατράκτου αποτελούν την πιο σύγχρονη μέθοδο κατασκευής εποξειδικών μερών και στοιχείων στην αεροναυπηγική και αεροναυτική βιομηχανία.



Εικόνα 40 Επίστρωση των υλικών κατασκευής σε μορφή Sandwich (Carbon Fiber, Aramid Honeycomb, Carbon Fiber) στο καλούπι κατασκευής και εμποτισμός με εποξειδική ρητίνη



Εικόνα 41 Εφαρμογή πίεσης με την μέθοδο Vacuum

Στην συνέχεια, ανοίχθηκαν οπές για τον σωλήνα από ανθρακόνημα, στον οποίο θα προσαρμόστηκε ο σωλήνας σύνδεσης του σκάφους με τους σταθεροποιητές, τους σωλήνες όπου θα στερεώνονται οι πτέρυγες πάνω διαμέσου της ατράκτου, η κάμερα στο κάτω μέρος της ατράκτου καθώς και ο σωλήνας pitot. Τέλος προσαρμόστηκαν όλα τα ηλεκτρονικά και οι καλωδιώσεις.



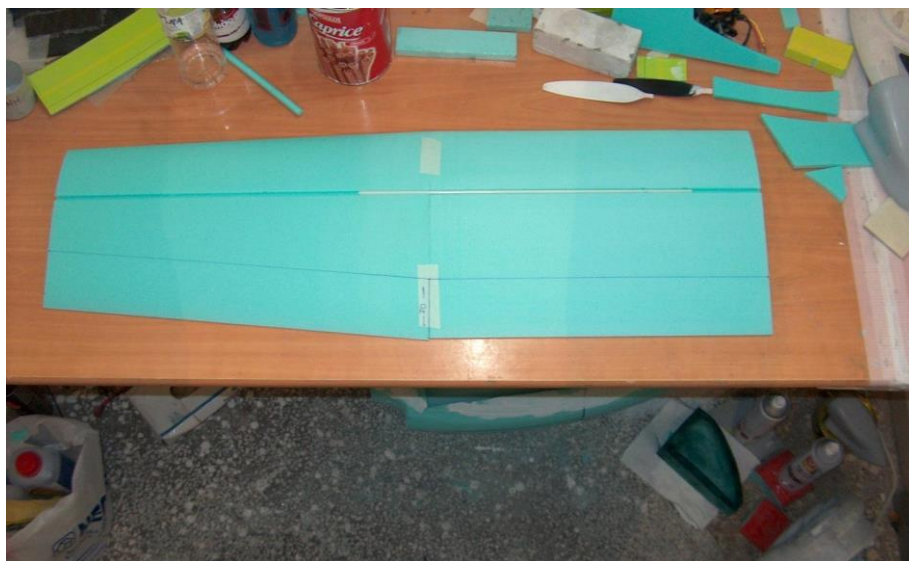
Εικόνα 42 Εξαγωγή της ατράκτου

3.3.4 c Διαδικασία κατασκευής πτέρυγας

Η πτέρυγα κατασκευάστηκε από πυρήνες φελιζόλ τύπου DOW που είχαν κοπεί με εργαλειομηχανή CNC κοπής θερμού νήματος χρωμιονικελίνης . Στη συνέχεια έγινε επικάλυψη με ύφασμα ανθρακονήματος τύπου Textreme Carbon και μορφοποίηση με την μέθοδο infuse resin vacuum bagging.

Στα κινούμενα μέρη της πτέρυγας (Aileron – Flaps) χρησιμοποιήθηκαν μεντεσέδες από ύφασμα αραμιδίου (Twill 2x2, 70gr/m²).

Στην συνέχεια ανοίχθηκαν οπές για την τοποθέτηση των σερβομηχανισμών, οι οποίοι κινούν τις επιφάνειες ελέγχου του αεροσκάφους.



Εικόνα 43 Πυρήνας κύριας πτέρυγας από διογκωμένη πολυστερίνη διαμορφωμένη σε CNC θερμού Νήματος



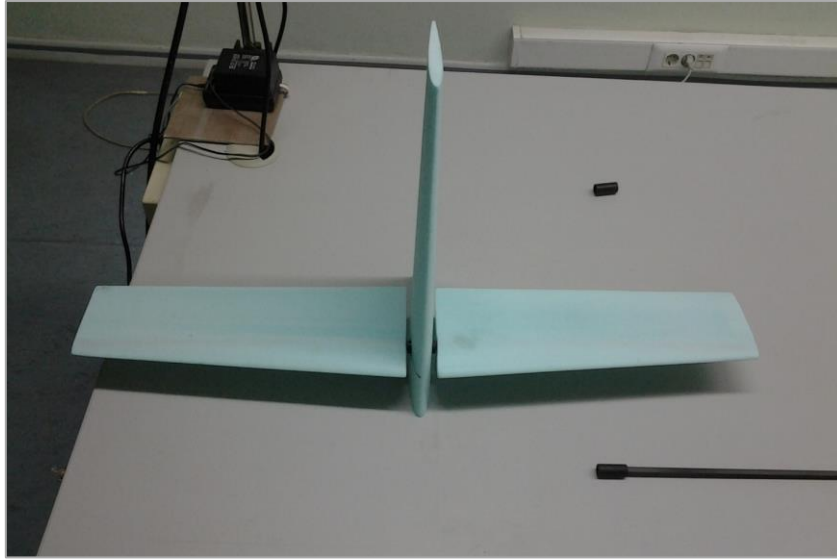
Εικόνα 44 Τελική πτέρυγα

3.3.4 d Διαδικασία κατασκευής ουράς

Η κατασκευής της ουράς είναι παρόμοια με αυτήν της πτέρυγας. Πιο συγκεκριμένα, κόπηκαν οι αντίστοιχοι πυρήνες, τόσο για το οριζόντιο σταθερό (Horizontal Stabilator) όσο και για το κάθετο σταθερό (Vertical Stabilizer). Στην συνέχεια έγινε επικάλυψη με ελαφρύτερα στρώματα υφάσματος ανθρακονήματος, για την αποφυγή πρόσθετου βάρους στην ουρά και μορφοποίηση με την μέθοδο layup resin vacuum bagging.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι σερβομηχανισμοί, οι οποίοι ελέγχουν τις επιφάνειες της ουράς, δηλαδή του Rudder και του Stabilator. Αξίζει να σημειωθεί πως στο συγκεκριμένο αεροσκάφος, το πηδάλιο κίνησης ύψους – βάθους (Elevator) είναι ολόκληρη η επιφάνειά του κινούμενη, προσδίδοντας στο σκάφος αυξημένες πτητικές επιδόσεις.

Ενώ για το πηδάλιο διεύθυνσεως χρησιμοποιήθηκε μεντεσές από ύφασμα αραμιδίου. Τέλος, προσαρμόστηκαν μεταξύ τους τα δυο σταθερά και στην συνέχεια στον σωλήνα (boom), ο οποίος συνδέεται στο αεροσκάφος.



Εικόνα 45 Οι πυρήνες σταθεροποιητικών επιφανειών πριν την διαδικασία εμποτισμού/ελασματοποίησης



Εικόνα 46 Το τελικό αποτέλεσμα του Ουραίου συστήματος



Εικόνα 47 Τελική συναρμολόγηση του αεροχήματος Φορέας

3.3.4 e Προγραμματισμός συστημάτων

Το στάδιο που ακολουθεί της κατασκευής, είναι ο προγραμματισμός και η παραμετροποίηση των συστημάτων του αεροσκάφους. Μετά την φόρτωση το κατάλληλου σταθερού λογισμικού (Firmware) στο σύστημα αυτόματου πιλότου, γίνεται παραμετροποίηση και βαθμονόμηση κάθε συστήματος ξεχωριστά. Στον προγραμματισμό περιλαμβάνονται συνοπτικά οι παρακάτω διαδικασίες:

1. Βαθμονόμηση των Αδρανειακών μονάδων μέτρησης
2. Βαθμονόμηση των μαγνητικών πυξίδων
3. Βαθμονόμηση χειριστηρίου ελέγχου και ορισμός πηδαλίων ελέγχου
4. Ορισμός παραμέτρων τροφοδοσίας
5. Ορισμός δεδομένων τηλεμετρίας
6. Ορισμός Failsafes
7. Ορισμός ελέγχου και ανατροφοδότησης ωφέλιμων φορτίων
8. Ορισμός των δεδομένων αποθήκευσης και ταχύτητας δειγματοληψίας
9. Ορισμός βασικών παραμέτρων για τις δοκιμαστικές πτήσεις



Εικόνα 48 Παραμετροποίηση συστημάτων του αεροχήματος στο λογισμικό σταθμού εδάφους (Mission Planner)

3.3.4 f Επικοινωνία Συστημάτων

Η συνεχής και ορθή επικοινωνία μεταξύ σταθμού εδάφους και αεροσκάφους, τόσο σε αστικό όσο και σε αγροτικό/δασικό περιβάλλον, σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την διάρκεια των πτήσεων καταγραφής. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται με το πρωτόκολλο Mavlink και modem υψηλής ισχύος (RFD900 RFdesign) με εμβέλεια έως και 50χλμ.

Με το σύστημα της τηλεμετρίας πραγματοποιούνται:

- Πλήρης έλεγχος, τηλεμετρία και παραμετροποίηση πτήσης με ασύρματη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεγάλης εμβέλειας σε δασικό ή αστικό περιβάλλον,
- Απευθείας αναλογική μετάδοση εικόνας και ήχου από την εμπρόσθια κάμερα με ασύρματη εκπομπή και λήψη στα 5.8 Ghz.

Ένα από τα πλεονεκτήματα που παρέχει το συγκεκριμένο σύστημα τηλεμετρίας, είναι ή παρακολούθηση όλων των παραμέτρων της πτήσης από τα αρχεία που καταγράφονται στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, μετά από την κάθε πτήση, ο χειριστής μπορεί να ανατρέξει στον υπολογιστή του Σταθμού εδάφους και να παρακολουθήσει όλα τα στοιχεία της πτήσης που πραγματοποίησε, ακόμη και να αναπαράγει την πτήση σε προσομοίωση στο λογισμικό του σταθμού εδάφους.

3.3.4 g Κατασκευή Σταθμού εδάφους (Ground Control Station)

Ο έλεγχος του αεροσκάφους κατά την διάρκεια της πτήσης καταγραφής, πραγματοποιείται όπως αναφέρθηκε μέσω του σταθμού εδάφους (Ground Control Station). Με τον σταθμό αυτό, ο χειριστής μπορεί να ελέγξει ανά πάσα στιγμή, όλα τα συστήματα του αεροσκάφους, την πορεία της πτήσης και την εξέλιξη της καταγραφής, ακόμα και να παρέμβει εάν το κρίνει σκόπιμο στο σχέδιο πτήσης της αποστολής.

Ελέγχονται επίσης ανά πάσα στιγμή, τα δεδομένα των συστημάτων συλλογής πληροφοριών που φέρει το αεροσκάφος. Ο σταθμός εδάφους περιλαμβάνει τα παρακάτω υπο-συστήματα:

- Φορητό υπολογιστή ή Υπολογιστή Tablet
- Ψηφιακό πομποδέκτη μεταγωγής 56 kbps RFD900 1W Telemetry module
- Αναλογικό Δέκτη και μετατροπέα A/V στα 5.8 Ghz
- Ψηφιακό πομπό ελέγχου με 14 κανάλια τεχνολογίας FASST στα 2.4 Ghz
- Αδιάβροχη θήκη
- Σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας ρεύματος όλων των υπό-συστημάτων.



Εικόνα 49 Φορητός Σταθμός Εδάφους

3.3.5 Πτητικές δοκιμές

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και της κατασκευής του τελικού μοντέλου, σειρά είχαν οι πτητικές δοκιμές. Στάδιο ιδιαίτερα δύσκολο και σημαντικό, καθώς θα έπρεπε μέσα από την διαδικασία της πτήσης να εντοπιστούν, αναγνωριστούν και διορθωθούν στην συνέχεια, τυχόν ατέλειες ή ιδιαιτερότητες που θα εμφάνιζε ολόκληρη η κατασκευή. Ο χειριστής θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα έμπειρος καθώς η πρώτη πτήση είναι εντελώς απρόσμενη, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να βρίσκεται σε εγρήγορση καθ' όλη την διάρκεια και να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει όλα τα ενδεχόμενα.

Παρόλα αυτά, το αεροσκάφος «Φορέας» τόσο κατά την διάρκεια των πτητικών δοκιμών όσο και μέχρι σήμερα παρουσιάζει ήπια πτητική συμπεριφορά, καθιστώντας τον ιδιαίτερα φιλικό προς τον χειριστή του, χωρίς όμως να απουσιάζουν οι προηγμένες δυνατότητες πτήσης, όταν αυτές ζητηθούν.

Η απώλεια στήριξης επιτυγχάνεται στα 28 km/h χωρίς την χρήση πτερυγίων καμπυλότητας (FLAPS). Η απογείωσή του γίνεται με το χέρι (κατά την 'χωρίς σύστημα προσγείωσης' διαμόρφωση) και ο διάδρομος που χρειάζεται για την προσγείωση είναι λιγότερος από 30 μέτρα. Χρησιμοποιώντας δε, τα πτερύγια καμπυλότητας (FLAPS), απλοποιούνται ιδιαίτερα οι διαδικασίες απογείωσης και προσγείωσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά το μήκος του διαδρόμου προσγείωσης, ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα, αν αναλογιστεί κανείς το ορεινό ανάγλυφο του Ελλαδικού χώρου.

Η μέγιστη ταχύτητα επιχείρησης του αεροσκάφους «Φορέας» υπολογίζεται στα 120 km/h, το οποίο υπερκαλύπτει τις ανάγκες των πτήσεων επιχείρησης για τις οποίες σχεδιάστηκε δηλαδή της χαρτογράφησης.

Οι πτητικές δοκιμές αυτές επιλέχθηκαν να γίνουν σε ανοιχτό χώρο με ευνοϊκό ανάγλυφο και με καλές καιρικές συνθήκες. Στην πτήση αυτή, πραγματοποιήθηκαν οι τελικές μικροδιορθώσεις στις επιφάνειες ελέγχου, ελέγχθηκε η απόδοση του ηλεκτρικού κινητήρα καθώς και η κατανάλωσή του, ώστε να μπορεί στη συνέχεια να επαληθευθεί η επιθυμητή διάρκεια πτήσης. Επίσης, ελέγχθηκε η σύνδεση με τον σταθμό εδάφους και δοκιμάστηκαν οι διάφορες επιλογές πτήσης (Flight Modes) αν ανταποκρίνονται στα προβλεπόμενα.



Εικόνα 50 Διαδικασία απογείωσης (Hand Launch) του αεροχήματος Φορέας

3.3.6 Δοκιμαστική Καταγραφή δεδομένων με την Αυτόνομη Εναέρια πλατφόρμα

Οι δοκιμαστικές καταγραφές πρέπει να επιβεβαιώσουν τον επιχειρησιακό σχεδιασμό και να ρυθμιστεί το σύστημα ώστε ο φάκελος πτήσης, να επιτρέπει αξιόπιστα και επαναλήψιμα δεδομένα.

Επίσης τα συνοδά στοιχεία των φωτοληψιών πρέπει να συνδυάζονται άρτια με τις φωτοληψίες και τα λοιπούς αισθητήρες ώστε να έχουμε ένα ενιαίο γεωαναφερμένο σύνολο πληροφοριών.

Σε αυτό το στάδιο του πειράματος πρέπει να επιλεγούν και να ρυθμιστούν κατάλληλα τα εξής:

1. Οι μέγιστες επιθυμητές αλληλεπικαλύψεις των φωτοληψιών
2. Το ελάχιστο και μέγιστο επιχειρησιακό υψόμετρο (AGL)
3. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γραμμών πτήσεως για ελιγμό

3.3.6 a Μέθοδος Camera Triggering

Ο έλεγχος του κλείστρου της κάμερας είναι ζωτικής σημασίας, αφού μας επιτρέπει να πραγματοποιούμε λήψη σε προκαθορισμένη θέση και όχι με την χρήση χρονικού διαστήματος, όπου σε συνθήκες αέρα προκαλεί αραίωση ή συμπίκνωση στις φωτοληψίες κατά μήκος των γραμμών πτήσεων.

Επίσης το ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου μας επιτρέπει να μετρήσουμε σχετικά εύκολα σε συνθήκες εργαστηρίου, την χρονική υστέρηση από την εντολή λήψης στην λήψη και έπειτα στον χρόνο αποθήκευσης της φωτοληψίας.

Να σημειωθεί ότι για τις φωτοληψίες ορατού φάσματος υψηλής ανάλυσης, η μέθοδος ελέγχου του κλείστρου μας δίνει την δυνατότητα ανατροφοδότησης της ακριβούς στιγμής της φωτοληψίας πίσω στο σύστημα αυτόματου πιλότου χωρίς χρονική υστέρηση, γεγονός που μας επιτρέπει την περαιτέρω εξακρίβωση και σύνδεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες,

3.3.6 b Επιδόσεις πλοήγησης και πτήσης της εναέριας πλατφόρμας σε κατάσταση αυτόνομης πτήσης

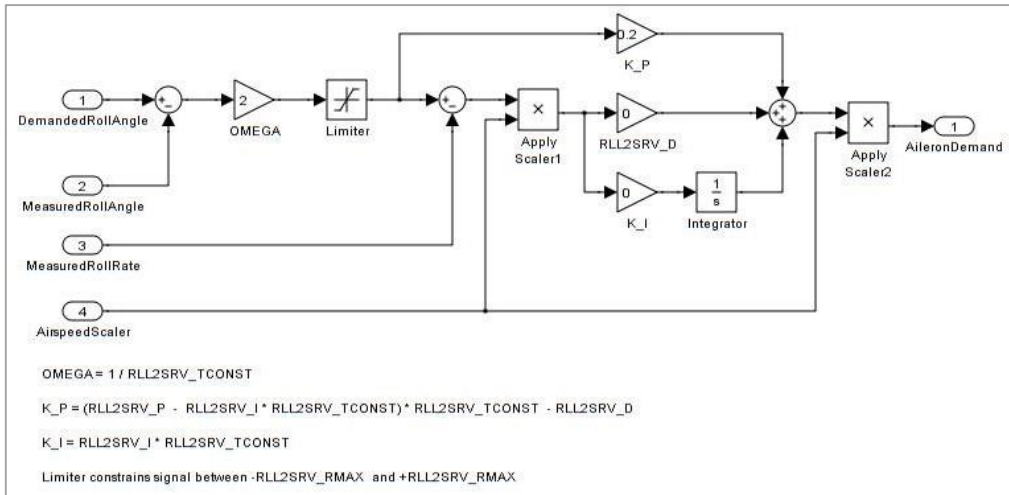
Τα δεδομένα μας γίνονται αξιοποιήσιμα και συγκρίσιμα σε συνάρτηση της επαναληψιμότητας που προσφέρει το ΣμηΕΑ που δημιουργήσαμε. Έτσι το τελευταίο στάδιο των δοκιμών καταγραφής, αφορούν και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων του πιλότου για αυτόνομη πτήση. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

1. Ρύθμιση ελεγκτή σταθεροποίησης Roll, Pitch, Yaw
2. Ρύθμιση συστήματος ελέγχου ολικής ενέργειας TECS (Total energy Control System)
3. Ρύθμιση των ελεγκτή πλοήγησης

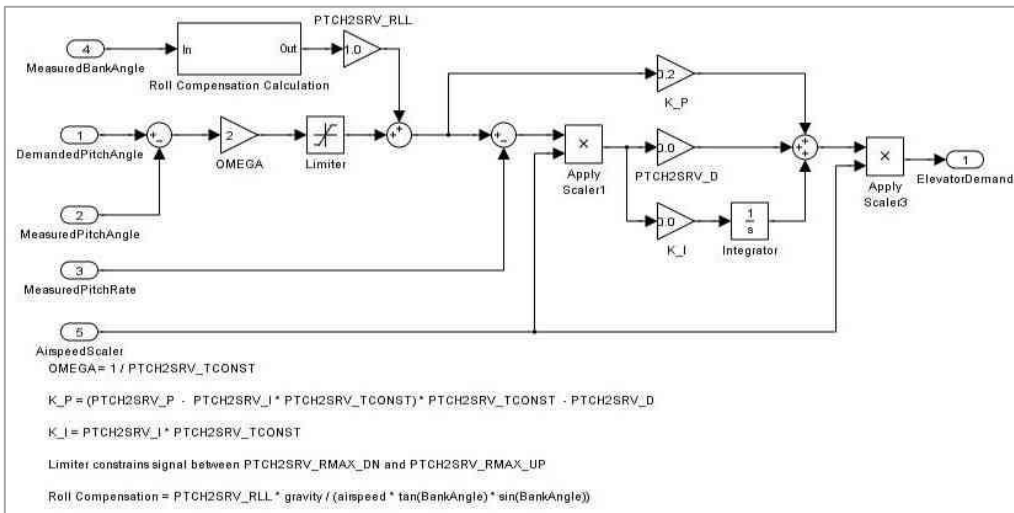
b1 ελεγκτής σταθεροποίησης Roll, Pitch, Yaw

Ο ελεγκτής σταθεροποίησης, ορίζει την ανταπόκριση των σερβομηχανισμών στις αλλαγές κλίσης του αεροχήματος, κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία μπορεί να πραγματοποιήσει ελιγμούς. Η βέλτιστη ρύθμιση επιτυγχάνεται όταν ο ελεγκτής ανταποκρίνεται άμεσα στις οδηγίες του χειριστή όπως στον χειροκίνητο έλεγχο και παράλληλα να διατηρεί την σταθερότητα του σκάφους χωρίς να καταπονεί την δομή του από απότομες εναλλαγές κινήσεων.

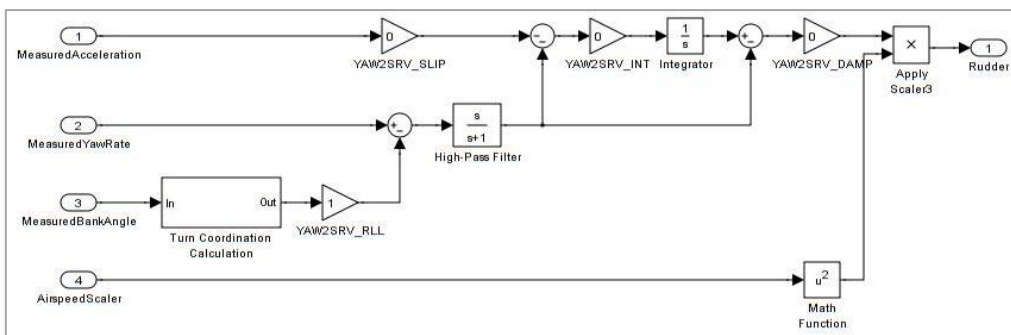
Η επισκόπηση του ελεγκτή Σταθεροποίησης μας δίδεται στα παρακάτω σχήματα



Σχήμα 9 Ελεγκτής σταθεροποίησης Roll



Σχήμα 10 Ελεγκτής σταθεροποίησης Pitch



Σχήμα 11 Ελεγκτής σταθεροποίησης Yaw

b2 Συστήμα ελέγχου ολικής ενέργειας TECS

Το σύστημα ελέγχου TECS ελέγχει διαρκώς το ύψος και την ταχύτητα πτήσης ορίζοντας τις τιμές του κινητήρα και του πηδαλίου βάθους για την βέλτιστη διαχείριση της μηχανικής ενέργειας η οποία περιλαμβάνει:

A. Βαρυτική δυναμική ενέργεια = Μάζα x Βαρύτητα x Ύψος (20)

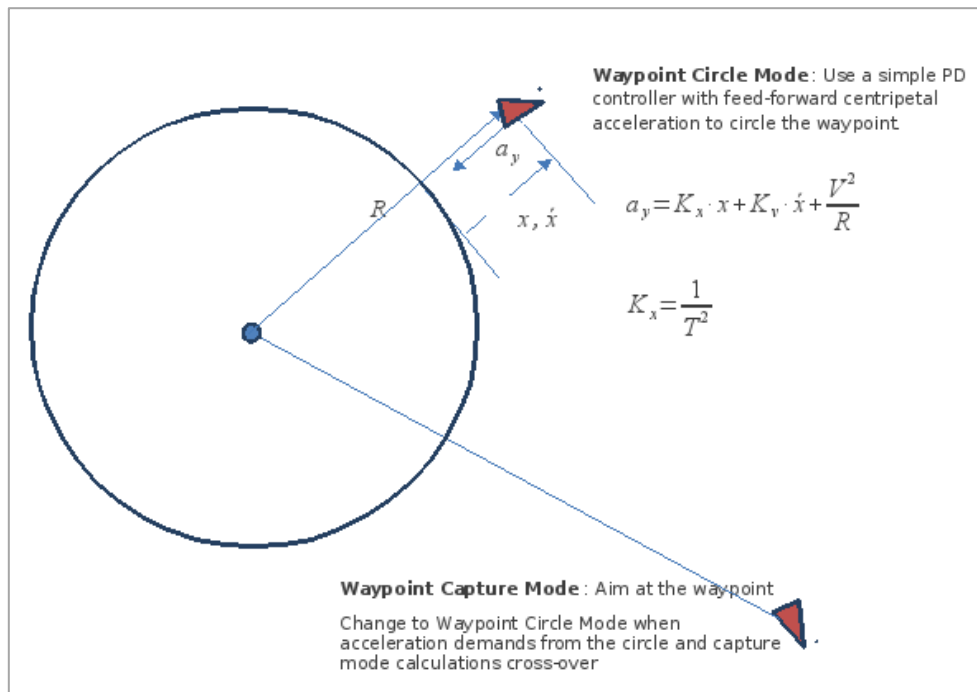
B. Κινητική ενέργεια = ½ x Μάζα x Ταχύτητα² (21)

Η ενεργοποίηση και σωστή ρύθμιση του συστήματος TECS έχει ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της διαχείρισης της ενέργειας από το σύστημα του αυτόματου πιλότου, την αύξηση της διάρκειας πτήσης και καλύτερη πτητική συμπεριφορά σε εναλλαγές των καιρικών συνθηκών.

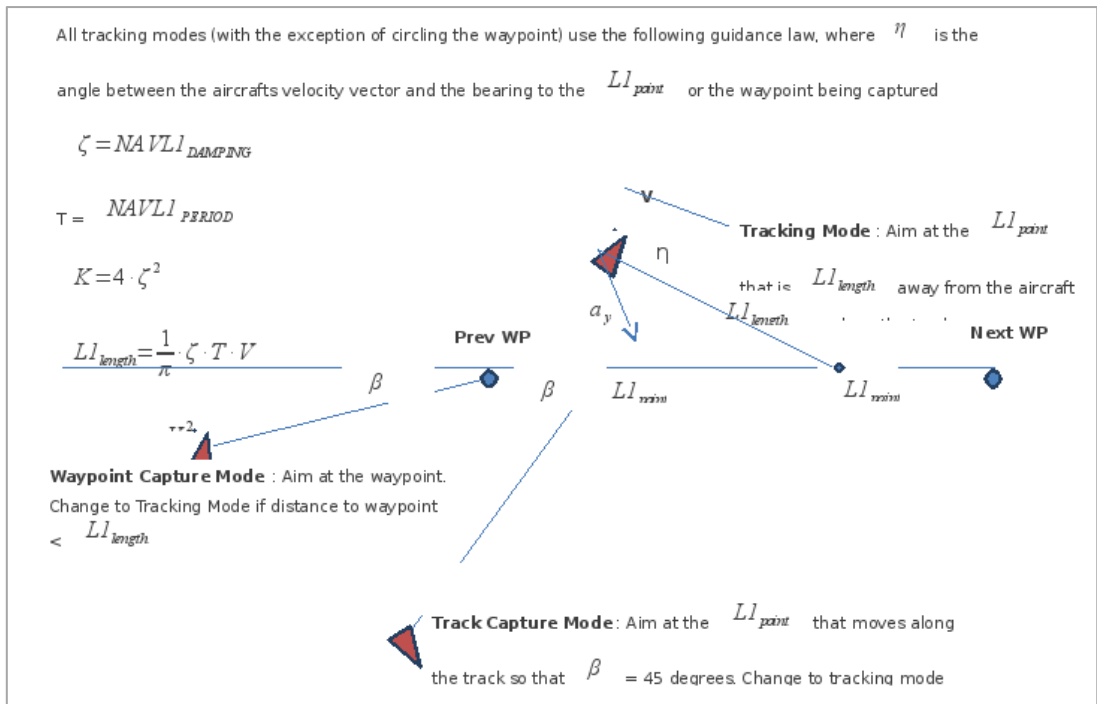
b3 Ελεγκτής πλοήγησης

Ο ελεγκτής πλοήγησης ρυθμίζει την ακρίβεια με την οποία το αερόχημα ακολουθεί τα προκαθορισμένα σημεία πτήσης (waypoints), καθώς και την συμπεριφορά του αεροχήματος κατά τις αλλαγές διεύθυνσης. Ο αλγόριθμος πλοήγησης βασίζεται εξολοκλήρου στην εργασία «A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking» (Park et al., 2004) και η υλοποίηση έγινε στα πλαίσια ανάπτυξης ανοικτού λογισμικού της κοινότητας ardupilot (Jones, 2013)

Η επισκόπηση του ελεγκτή Σταθεροποίησης μας δίδεται στο παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 12 Ελεγκτή πτήσης L1, σε κατάσταση εκτέλεσης κυκλικών ελιγμών



Σχήμα 13 Ελεγκτή πλοήγησης L1 σε κατάσταση πλοήγησης ακολουθίας σημείων



Σχήμα 14 Πεδίο δοκιμών πτήσεως με εγκατάσταση του σταθμού εδάφους και της τηλεμετρίας

3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Το τελευταίο στάδιο του πειράματος θα αφιερωθεί στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων που παράγονται από το σύστημα μας και παράλληλα θα γίνονται πτήσεις δοκιμής-καταγραφής καλλιεργειών. Αυτό το μέρος θα πραγματοποιηθεί και για τις δύο κύριες καλλιεργητικές περιόδους της Ελλάδας (χειμερινή, εαρινή) για διάφορα ήδη καλλιέργειας που έχουμε αποτελέσματα μοντέλων από την διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία καθώς και γνωστές απαιτήσεις (βλ. πίνακα 1,2).

Η συνεχής επαλήθευση των παραγόμενων δεδομένων με τις πραγματικές μετρήσεις θα μας δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα για την εφικτότητα, βιωσιμότητα και ακρίβεια του συστήματος, καθώς επίσης θα συμβάλει στην συγγραφή του κώδικα waffle- machine learning σε γλώσσα προγραμματισμού c++ και έπειτα σε Arduino based, ώστε να δώσουμε την δυνατότητα στο σύστημα μας να «αυτοκαλιμπράρεται» στις εκάστοτε συνθήκες.

3.4.1 Προκαθορισμός Ενεργειών Συλλογής

3.4.1 α Γεωαναφορά δεδομένων

Με τον όρο γεωμετρική διόρθωση (γεωαναφορά) μιας εικόνας εννοούμε την αναγωγή κάθε εικονοστοιχείου της, ώστε αυτό να αποκτήσει συγκεκριμένες συντεταγμένες που αντιστοιχούν σε κάποια χαρτογραφική προβολή.

Η παραπάνω διόρθωση πραγματοποιείται αναγνωρίζοντας συγκεκριμένα σημεία (φωτοσταθερά) μέσα από τις λήψεις, τα οποία έχουν γνωστές συντεταγμένες. Οι συντεταγμένες αυτές μπορούν να μετρηθούν με διάφορα γεωδαιτικά όργανα (GPS, ταχύμετρο).

Όπως αναφέραμε και στην επιλογή των αισθητήρων, η μέτρηση των φωτοσταθερών σημείων έγινε με δέκτη GPS RTK, ωστόσο τα δεδομένα μας λήφθηκαν με δύο μεθόδους γεωαναφοράς.

a 1 Μη επιβλεπόμενη γεωαναφορά δεδομένων

Η μη επιβλεπόμενη γεωαναφορά δεδομένων επαφίεται στα δεδομένα της αδρανειακής μονάδας μέτρησης, του δέκτη GPS και την σύνδεση τους με την κάθε φωτοληψία.

Ωστόσο στην μη επιβλεπόμενη γεωαναφορά δεδομένων υπάρχει αναντιστοιχία στην ταχύτητα λήψεων δεδομένων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται χωρικό σφάλμα. Εκτός αυτού, λόγω του σφάλματος του GPS Επίσης, υπάρχει αδυναμία συσχέτισης του ανάγλυφου, καθώς και περιορισμός συστημάτων γεωαναφοράς.

Στα πλεονεκτήματα της μη επιβλεπόμενης γεωαναφοράς δεδομένων, συγκαταλέγονται ο μικρότερος χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων, η μείωση του χρόνου της καταγραφής, καθώς και η αξιοποίηση του ενσωματωμένου εξοπλισμού.

a 2 Επιβλεπόμενη Γεωαναφορά δεδομένων

Στην επιβλεπόμενη γεωαναφορά δεδομένων, το κόστος της μελέτης είναι μεγαλύτερο, καθώς και ο χρόνος της καταγραφής. Ο χρόνος προκαθορισμού των ενεργειών είναι σαφώς μεγαλύτερος, όπως και ο χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων στο γραφείο.

Ως πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, λαμβάνονται η βελτιστοποίηση του χωρικού σφάλματος με καλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα. Υπάρχει η συσχέτιση ανάγλυφου και η ελευθερία της συσχέτισης των προβολικών συστημάτων. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της αξιολόγησης των δεδομένων, δηλαδή των παραγόμενων προϊόντων.

a 3 Στοιχεία δεδομένων

Τα στοιχεία που λαμβάνονται ως δεδομένα από μια φωτογραμμετρική πτήση, αφορούν τόσο την φωτοληψία όσο και την πλατφόρμα UAV. Για την φωτοληψία, ορίζεται ο χρόνος με βάση την ώρα λήψης της φωτογραφίας, η θέση X, Y, Z, σε μεταβλητές ω , ϕ , κ , οι οποίες αντιστοιχούν στην τρισδιάστατη θέση της κάμερας. Αξίζει να σημειωθεί, πως αν η κάμερα είναι τοποθετημένη σε ειδική βάση (camera gimbal) οι θέσεις αυτές αντιστοιχούν στις θέσεις της πλατφόρμας.

Για την πλατφόρμα UAV, ορίζεται επίσης ο χρόνος με βάση την ώρα προς την θέση X, Y, Z. Επιπροσθέτως, ορίζεται η τρισδιάστατη θέση της εναέριας πλατφόρμας Roll, Pitch, Yaw, με βάση τις συντεταγμένες όπως αυτές έχουν ληφθεί από το GPS του αυτόματου πιλότου.

3.4.2 Κατάρτιση Σχεδίου Πτήσης

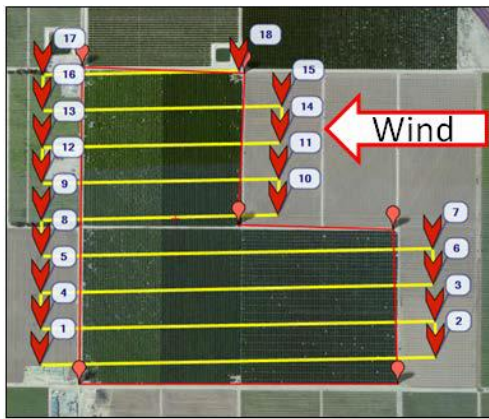
Το σχέδιο πτήσης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα όσον αφορά τον προκαθορισμό των ενεργειών συλλογής. Το σχέδιο πτήσης διαμορφώνεται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, την έκταση της υπό – μελέτης περιοχής, το ανάγλυφο, των καιρικών συνθηκών και των χαρακτηριστικών της πλατφόρμας.

Αρχικά, δημιουργείται το πολύγωνο, το οποίο περικλείει την περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται ο τύπος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στην καταγραφή. Η επιθυμητή επικάλυψη των εικόνων μεταξύ τους είναι 60 – 80 % (overlap, sidelap).

Στο σημείο αυτό, γίνεται βελτιστοποίηση του σχεδίου πτήσης, βάσει του ύψους πτήσης, επιθυμητής επικάλυψης και της γωνίας που σχηματίζουν οι γραμμές της πτήσης με τον βορρά. Πρέπει να βρεθεί η πιο αποδοτική σχέση όσον αφορά την έκταση της περιοχής που αποτυπώνεται προς την χρονική διάρκεια της πτήσης.

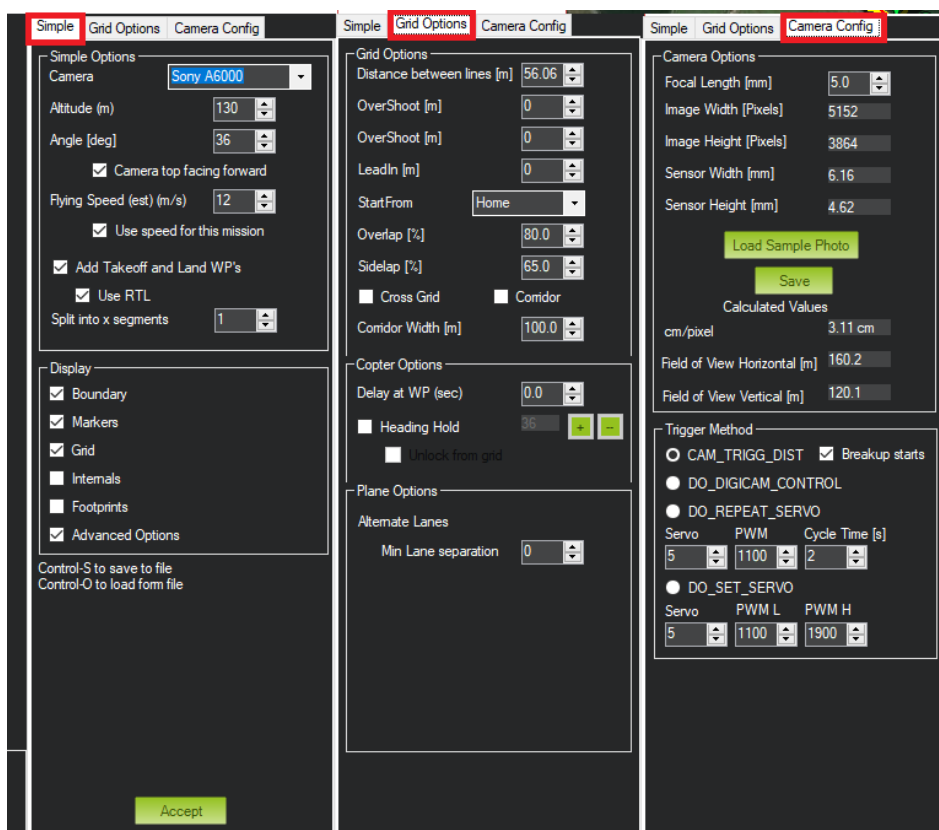
Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να υπολογιστούν:

- Ο αριθμός των φωτογραφιών που θα ληφθούν από την πλατφόρμα.
- Η χωρική διακριτική ικανότητα.
- Οι διαστάσεις των φωτογραφιών στο έδαφος (footprint).
- Ο χρόνος πτήσης.
- Το μήκος των γραμμών πτήσης και η μεταξύ τους απόσταση.



Εικόνα 51 Εσφαλμένος (αριστερά) και σωστός (δεξιά) προσανατολισμός διαδρομών πτήσεως σε σχέση με τον επικρατούντα άνεμο

Για την ευκολία του σχεδιασμού πτήσης, τα σύγχρονα λογισμικά σταθμού εδάφους μας επιτρέπουν την παραμετροποίηση των στοιχείων πτήσης και τον άμεσο υπολογισμό των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 52 Menu παραμετροποίησης ιδιοτήτων ωφέλιμου φορτίου καταγραφής στο λογισμικό σταθμού εδάφους(Mission Planner)



Εικόνα 53 Εικονοποίηση και υπολογισμός αποτελεσμάτων επιλογών παραμέτρων σχεδίου πτήσης (Mission Planner)

3.4.3 Προκαθορισμός Σημείων Ελέγχου

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατάρτισης του σχεδίου πτήσης, σειρά έχει ο προκαθορισμός των σημείων ελέγχου. Τα σημεία ελέγχου, όπως προαναφέραμε είναι σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες, που αυτές μπορεί να είναι είτε τοπικές είτε παγκόσμιες (Hatzoroulos, 2008).

Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι διακριτά σημεία στο έδαφος ή αντικείμενα που θα μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα από τις λαμβάνουσες φωτογραφίες. Όπως είναι κατανοητό, τα σημεία αυτά πρέπει να οριστούν με ιδιαίτερη προσοχή, αφενός γιατί πρέπει να εξασφαλιστεί ότι θα φαίνονται και δεν θα έχουν μετακινηθεί στην συνέχεια στην επεξεργασία των μετρήσεων, αφετέρου να οριστούν μέσα στην περιοχή μελέτης με τρόπο που να ευνοεί την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (James et al., 2017).

Το είδος των σημείων αυτών ποικίλει, ανάλογα με τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την καταγραφή (π.χ. ορατό φάσμα ή θερμικό φάσμα) (Turner et al., 2014).

Για τις ανάγκες της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν διάφορα είδη σήμανσης των φωτοσταθερών σημείων όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες



Εικόνα 54 Σήμανση φωτοσταθερού σημείου με χρήση μπογιάς (Spray)



Εικόνα 55 Χρήση εκτυπωμένων στόχων έντονης αντίθεσης και γνωστού μεγέθους

3.4.4 Διαδικασίες και κανονισμοί ασφαλείας κατά την πτήση

3.4.4 a Συμμόρφωση με την Νομοθεσία

Η ελληνική νομοθεσία δεν περιλάμβανε, κανονισμούς πτήσεων για τα ΣμηΕΑ την χρονική διάρκεια που συντάχθηκε το μεγαλύτερο μέρος της παρούσας διατριβής. Παρόλα αυτά έπρεπε να λαμβάνονται υπόψιν και να τηρούνται αυστηρά τα παρακάτω:

- Νόμος περί ιδιωτικής Αεροπορίας (Ν.1127/72)
- «Κώδικας Αεροπορικού Δικαίου» (Ν. 1815/88)
- Κανονισμός Πτήσεων Αερομοντέλων (ΦΕΚ β9, 13 Ιαν. 2010)

Από την 1 Ιανουαρίου 2018 τέθηκε σε ισχύ ο κανονισμός «Κανονισμός - γενικό πλαίσιο πτήσεων Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών- ΣμηΕΑ (Unmanned Aircraft Systems - UAS)» με την υπ' Αριθμ. Δ/ΥΠΙΑ/21860/1422. Και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ Β-3152/30-9-2016.

Οι κανονισμοί που ισχύουν παγκοσμίως για την χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων μέσων, οι οποίοι θα πρέπει να τηρούνται είναι:

- Απαγορεύονται οι πτήσεις σε ύψος μεγαλύτερο από 400ft ή 117μ χωρίς την άδεια από την αρμόδια αρχή (ΥΠΙΑ, CAA, FAA).
- Απαγορεύονται οι πτήσεις πάνω από ανθρώπους, ζώα ή κτήρια.
- Απαγορεύονται οι πτήσεις σε ακτίνα 3000μ από αεροδρόμια, πεδία προσγειώσεων και μοντελοδρόμια.
- Απαγορεύονται οι πτήσεις πάνω από προστατευμένες περιοχές.

3.4.4 b Έλεγχος καιρικών συνθηκών

Σημαντικός παράγοντας για μια επιτυχημένη πτήση είναι η σωστή μελέτη και πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την πρόγνωση του καιρού. Στην αεροπορία στοιχεία καιρού λαμβάνονται με τα METARS, TAFS για κάθε αεροδρόμιο και ανανεώνονται κάθε 30 λεπτά (Drury et al., 2006). Τα στοιχεία αυτά, έχουν την παρακάτω δομή:

```
LGAV 061350Z 07015KT 9999 FEW030 31/13 Q1016 NOSIG
```

```
TAF LGAV 061100Z 0612/0712 02015G25KT 9999 FEW030
```

Οποιαδήποτε, μορφή κι αν λάβουμε υπόψιν για μια ασφαλή και επιτυχημένη (φωτογραμμετρικά) πτήση θα πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω προδιαγραφές:

- Η μέγιστη ταχύτητα του αέρα να μην ξεπερνάει το Airspeed x 1.5.
- Να μην υπάρχει βροχόπτωση στην περιοχή.
- Στην ηλιοφάνεια να επιλέγεται η κατάλληλη ταχύτητα του κλείστρου (shutter speed) και φωτοευαισθησίας (ISO).
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος να είναι εντός των ορίων των αισθητήρων.
- Να ελέγχεται αν υπάρχει στην περιοχή Solar Radiation.
- Να μην υπάρχουν ανοδικά ρεύματα πάνω από 5 m/s.

3.4.4 c Έλεγχος πριν την έναρξη της πτήσης (Check list)

Κάθε μια πτήση που πραγματοποιείται από μη επανδρωμένο μέσο είναι διαφορετική. Συνεχώς, αλλάζουν οι περιοχές, ο σκοπός, ο εξοπλισμός κ.α. Αυτό που πρέπει **πάντα** να μένει σταθερό και να διατηρείται στο ύψιστο επίπεδο είναι η ασφάλεια της. Όλες οι πτήσεις πρέπει να αντιμετωπίζεται με απόλυτο επαγγελματισμό και σύνεση. Πριν από κάθε πτήση, πρέπει να γίνονται οι απαραίτητοι τεχνικοί έλεγχοι στην πλατφόρμα, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της (Gundlach and Foch, 2014; Valavanis and Vachtsevanos, 2015). Ένας συμβατικός τεχνικός έλεγχος περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- Έλεγχος της/των προπέλας/ων ότι είναι σωστά τοποθετημένη/ες.
- Έλεγχος της/των μπαταρίας/ων ότι είναι σωστά φορτισμένη/ες.
- Έλεγχος των κινούμενων μερών για την ελεύθερη κίνησή τους.
- Έλεγχος των κινήσεων (throttle/pitch, aileron, elevator, rudder).
- Περιμετρικός έλεγχος της πλατφόρμας ότι όλα τα εξαρτήματα είναι διασφαλισμένα πάνω στην πλατφόρμα.

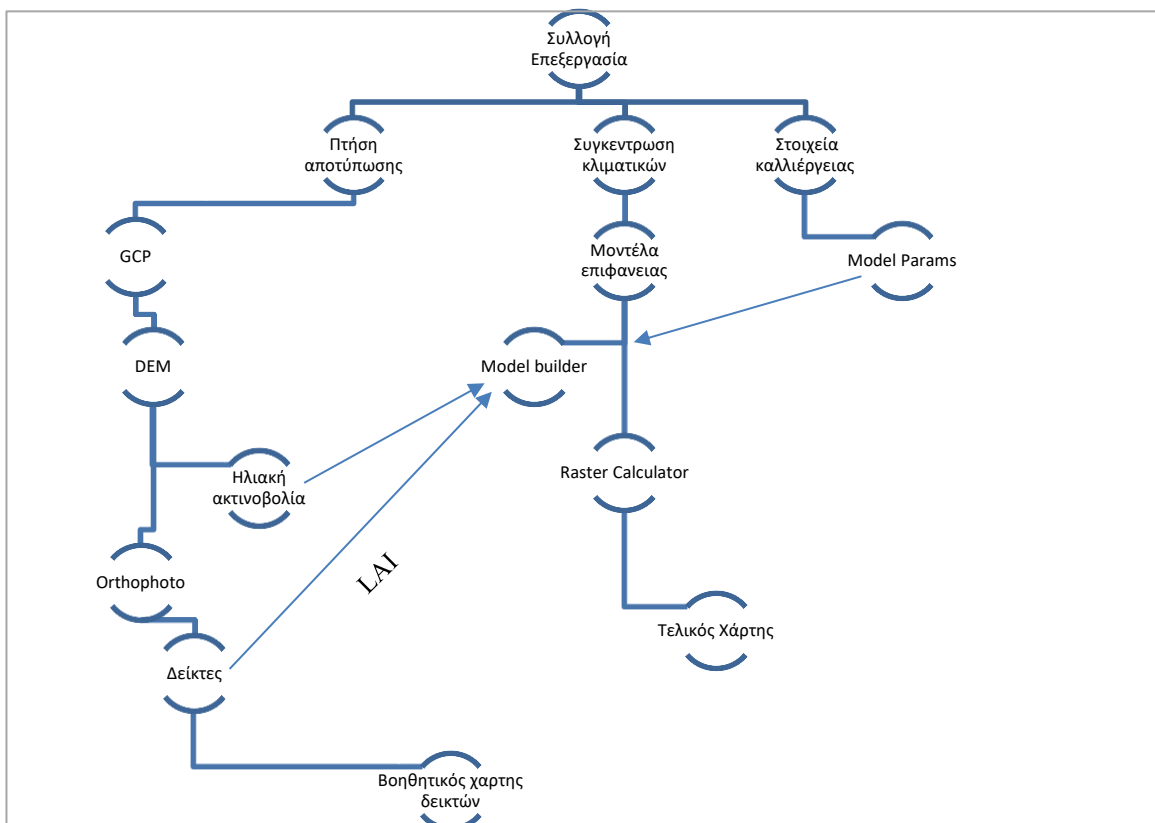
- Έλεγχος του αυτόματου πιλότου ότι είναι σωστά τοποθετημένος στην θέση του.
- Έλεγχος του πεδίου από/προσγειώσεως.

Η διαδικασία με την οποία ξεκινάει κάθε μια πτήση είναι συγκεκριμένη και θα πρέπει κάθε φορά να τηρείται προσεκτικά:

- Camera connected and On
- Power on Transmitter (if not 2.4ghz, check other frequencies on the field)
- Check Transmitter for throttle down, flight modes: manual or stabilized.
- Power on the UAV platform.
- Telemetry connection from ground station.
- Check the sensors for normal operation.
- GPS Satellites >8 and HDOP <1.8.
- Check flight plan and secure that have written on the autopilot.
- Secure the field.
- Arm the autopilot.

3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

το διάγραμμα ροής, διαδικασίας συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων μας είναι το παρακάτω:



Διάγραμμα 18 Ροής συλλογής και επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των μοντέλων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3, καθώς και αποτελέσματα από τις αντίστοιχες μεταφράσεις του σε σύστημα Γ.Σ.Π.. Επίσης θα δούμε συγκριτικά αποτελέσματα Τηλεπισκόπησης, χρησιμοποιώντας υπόβαθρα δορυφορικών εικόνων από δορυφορικούς δέκτες (Lansat TM5, Spot), Ορθομωσαϊκά Public Domain (ΓΥΣ, Κτηματολόγιο ΑΕ, ΥΠ. Γεωργίας και ορθομωσαϊκών που συλλέχτηκαν από την πλατφόρμα μας.

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στα αποτελέσματα των μαθηματικών μοντέλων, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα

4.1.1 Αποτελέσματα Σημειακών μοντέλων Ρυθμού αύξησης ξηράς μάζας

Για λόγους σύγκρισης παραθέτουμε αυτούσιο παράδειγμα αποτελέσματος της κλασικής μεθόδου υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης και πειραματικών μετρήσεων ελέγχου (Danalatos, 1993).

Πίνακας 34 Παράδειγμα υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης καλλιέργειας καλαμποκιού στη Λάρισα (ΒΓΠ=39°30') υποθέτοντας συνολική απώλεια αναπνοής ίση με 40%.

Μήνας	n/N	FCL	FOV	FGC	FGASS	DWI
Μάιος	0.611	843	354	652	445	266
Ιούνιος	0.656	892	388	712	485	291
Ιούλιος	0.744	873	368	744	507	304
Αύγουστος	0.760	788	329	678	462	277

n είναι ο πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας στην περιοχή της μελέτης

N είναι ο μέγιστος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας στην περιοχή της μελέτης

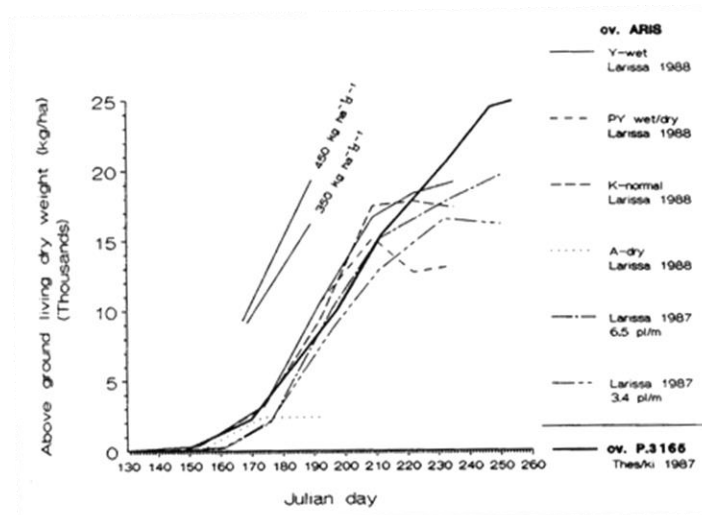
FCL είναι ο ρυθμός ολικής αφομοίωσης CO₂ σε πλήρως ανέφελη ημέρα (kg ha⁻¹ d⁻¹)

FOV είναι ο ρυθμός ολικής αφομοίωσης CO₂ σε πλήρως νεφοσκεπή ημέρα (kg ha⁻¹ d⁻¹)

FGC είναι ο ρυθμός ολικής αφομοίωσης CO₂ κατά τη συγκεκριμένη ημέρα (kg ha⁻¹ d⁻¹)

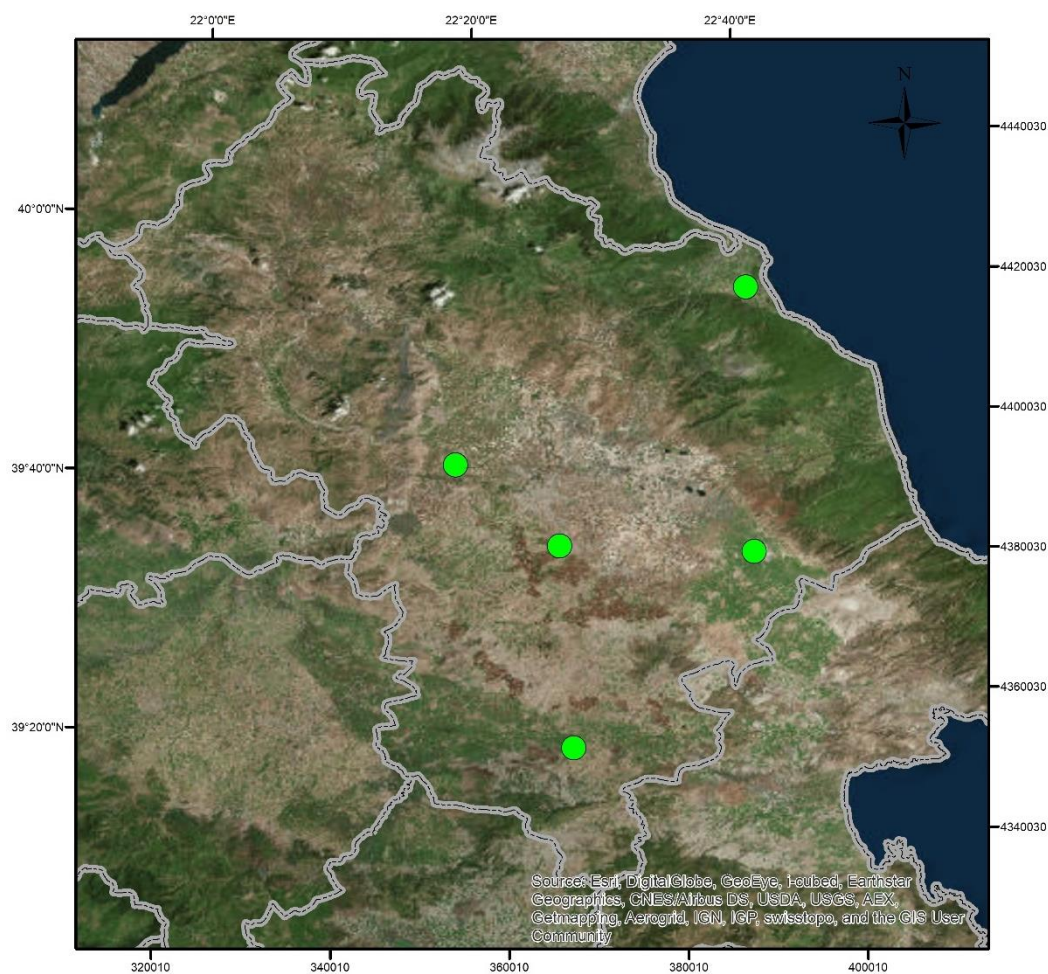
FGASS είναι ο ρυθμός ολικής αφομοίωσης (CH₂O)_n σε kg ha⁻¹ d⁻¹
(=FGC*30/44)

DWI είναι ο δυναμικός ρυθμός αύξησης σε kg ha⁻¹ d⁻¹ (=0.60*FGASS)



Διάγραμμα 19 Πραγματικών ρυθμών αύξησης καλαμποκιού, βαμβακιού και σιταριού στη Θεσσαλία κάτω από σχεδόν άριστες συνθήκες ανάπτυξης, συγκρινόμενοι με ρυθμούς αύξησης 450 και 350 kg ha⁻¹ d⁻¹

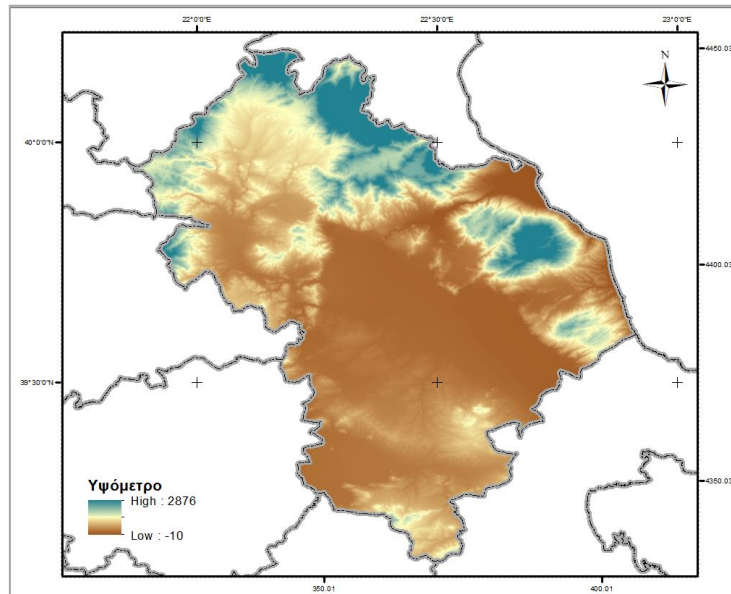
Ο χάρτης αναφοράς της περιοχής μελέτης των αποτελεσμάτων της κλασικής μεθόδου υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης:



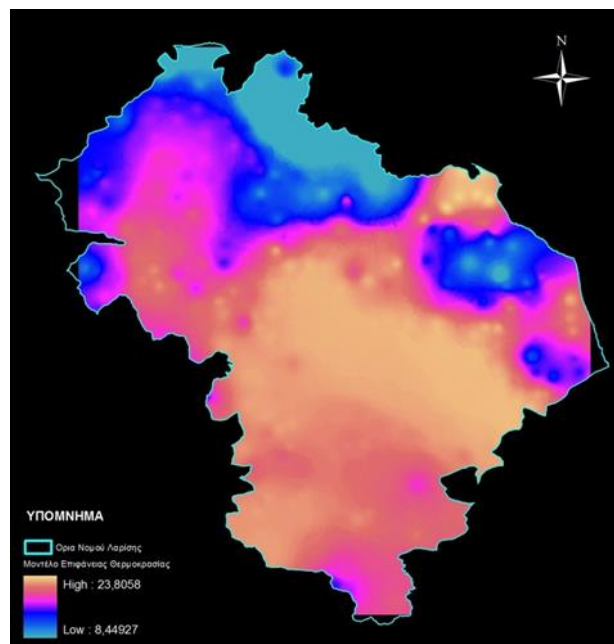
Εικόνα 56 Χάρτης αναφοράς μετρήσεων και υπολογισμών (Danalatos, 1993). Σύστ. αναφοράς WGS84 & ΕΓΣΑ87, υπόβαθρο Digital Globe USGS.

4.1.2 Αποτελέσματα χωρικών Μοντέλων

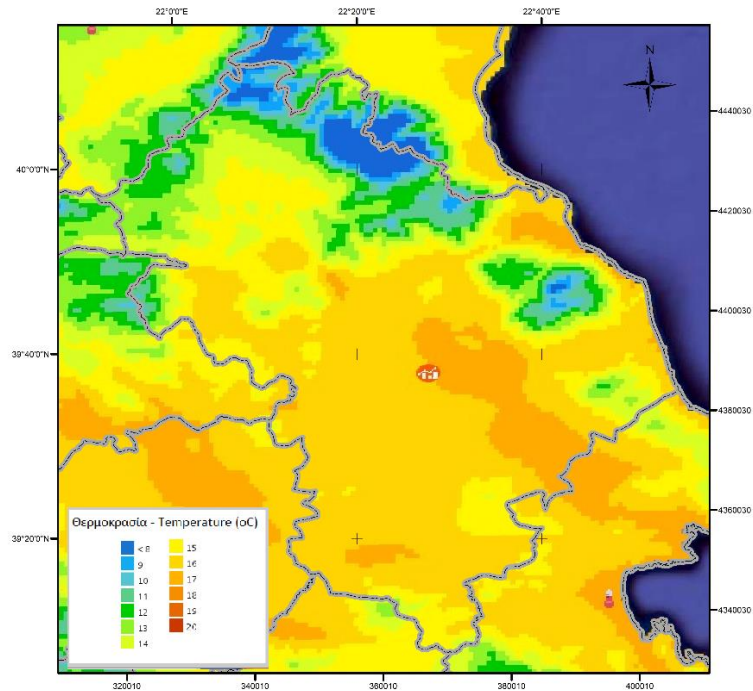
Παρακάτω δίδονται τα αποτελέσματα του μοντέλου δημιουργίας επιφανειών διαφόρων μεταβλητών με την Μέθοδο Kriging και με διόρθωση ανάγλυφου, αξιοποιώντας κλιματικά δεδομένα από τους εγγύτερους μετεωρολογικούς σταθμούς. Επίσης παρατίθενται οι αντίστοιχες πηγές όπως δίδονται από τον κλιματικό άτλαντα της.



Εικόνα 57 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης

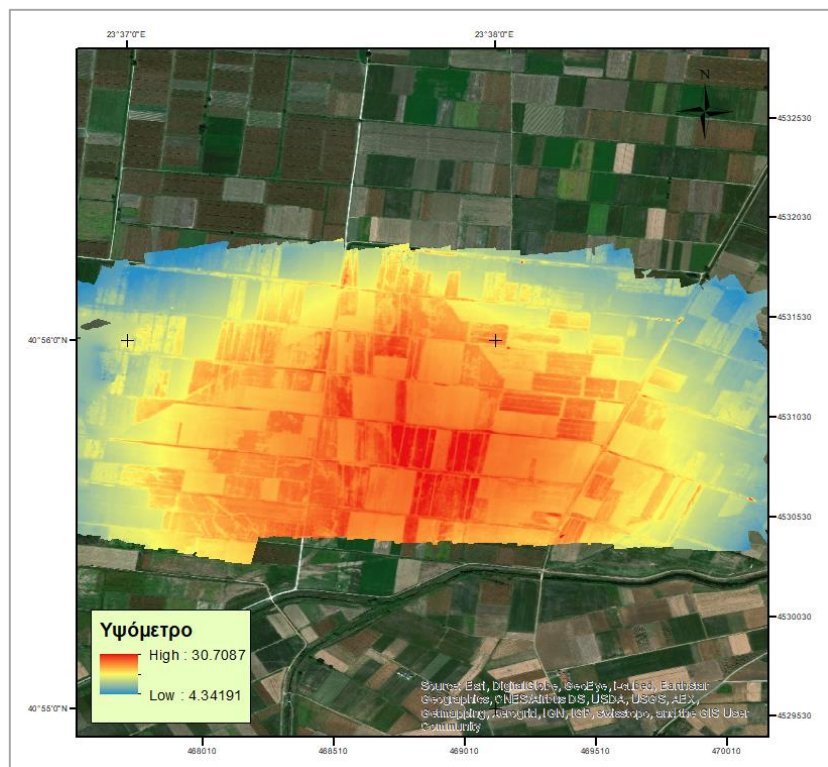


Εικόνα 58 Υπολογισμός Μοντέλου Επιφανείας μέσης Θερμοκρασίας με την μέθοδο Kriging και διόρθωση υψόμετρου



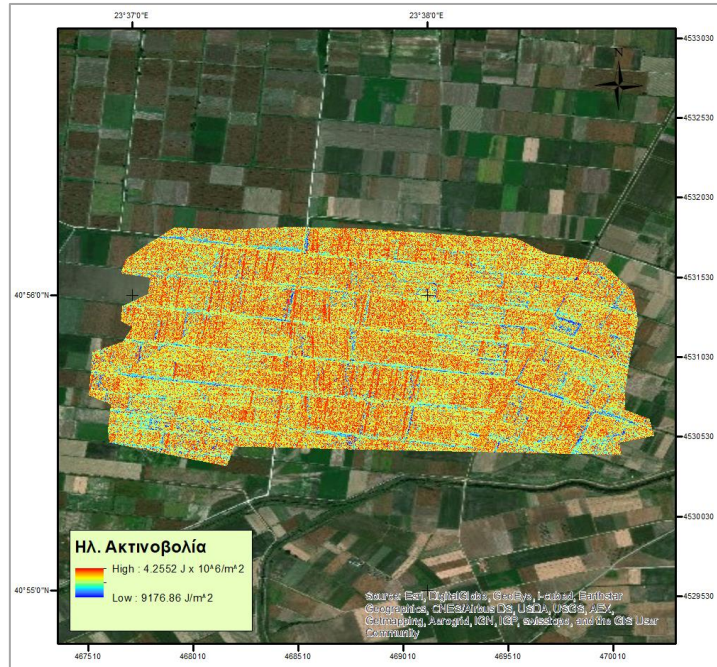
Εικόνα 59 Μοντέλο επιφανείας μέσης θερμοκρασίας (πηγή ΕΜΥ, Κλιματικός Ατλαντας)

Παρακάτω μας δίδονται παραδείγματα αποτελεσμάτων υπολογισμού προσπίπτουσας ακτινοβολίας μέσω Γ.Σ.Π., με δεδομένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους από ΣμηΕΑ.



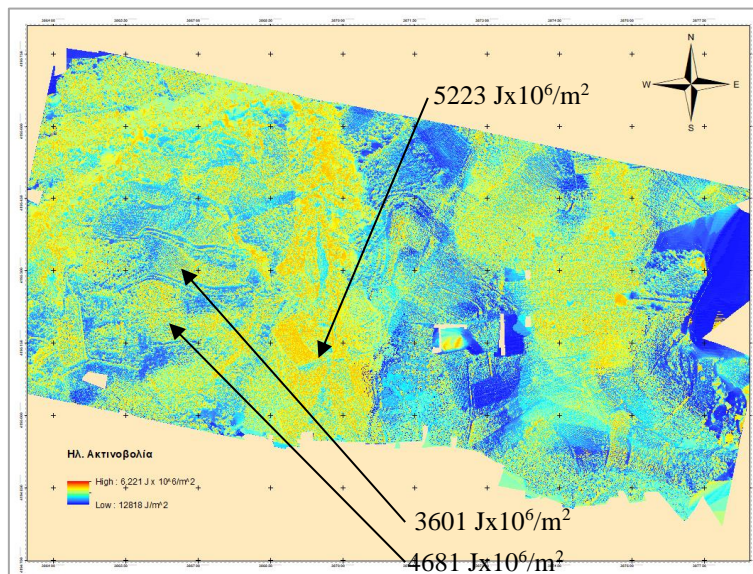
Εικόνα 60 Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους από δεδομένα ΣμηΕΑ. Νιγρίτα Σερρών (Lat 40°50') 7/5/2015, GSD 5cm, Αισθητήρας Canon Ixus 160.

Από τον πίνακα 18, Υπολογίζουμε για Lat 40°50' και καλλιεργητική περίοδο 01/05/2015 έως 15/8/2015, ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία: $3.534 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$. Με την χρήση των Γ.Σ.Π. και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους βλέπουμε τον αντίστοιχο υπολογισμό στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 61 Ολική Ακτινοβολία, TOTRAD (10^6 J/m^2) για τυπική ανέφελη ημέρα και περίοδο 01/05/2015 έως 15/8/2015. Καλλιέργειες: Καλαμπόκι, Σόργο

Ομοίως, υπολογίζουμε για Lat 37° και καλλιεργητική περίοδο 01/04/2015 έως 10/9/2015, ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία: $4.945 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$. Με την χρήση των Γ.Σ.Π. και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους βλέπουμε τον αντίστοιχο υπολογισμό στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 62 Ολική Ακτινοβολία, TOTRAD (10^6 J/m^2) για τυπική ανέφελη ημέρα και περίοδο 01/04/2015 έως 10/09/2015 σε παράδειγμα περιοχής με έντονο ανάγλυφο. Καλλιέργειες: Αμπέλου

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Στα αποτελέσματα των αισθητήρων τηλεπισκόπησης, θα παρατεθούν αποτελέσματα των αισθητήρων χαρτογράφησης, περιβαλλοντικών αισθητήρων και παραγόμενων δεικτών βλάστησης, συγκριτικά με αποτελέσματα από κοινές πηγές δεδομένων.

4.2.1 Αποτελέσματα αισθητήρων χαρτογράφησης

Στα αποτελέσματα αισθητήρων χαρτογράφησης, θα παρατηρήσουμε χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελεσμάτων από κάθε αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή καθώς και δεδομένα βαθμονόμησης/αξιολόγησης, σε αντιπαραβολή με δεδομένα αντίστοιχης περιόδου από δορυφορικούς δέκτες ή αισθητήρες επανδρωμένων αεροσκαφών.

Η σειρά των αποτελεσμάτων ακολουθεί την εξέλιξη των αισθητήρων και των λογισμικών όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφ. 3.2.1

4.2.1.a Αισθητήρας Canon Ixus 160 & Maxmax Ixus 160 NIR

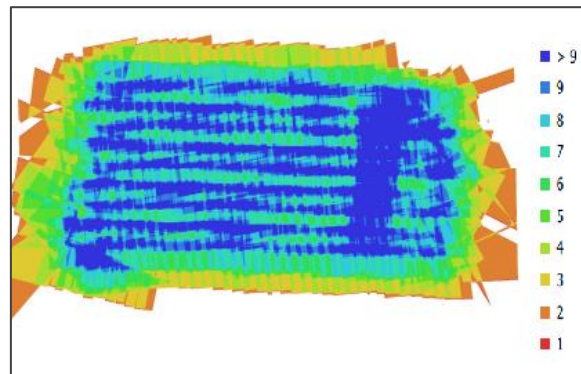


Εικόνα 63 Ορθομωσαϊκό από φωτοληψίες 05/07/2016 με δέκτη Canon ixus 160 και αλληλεπίθεση κοντινού υπέρυθρου φάσματος maxmax Canon ixus. (μέγεθος εικονοστοιχείου 5,69cm. /ύψος πτήσης 262μ),(περίγραμμα λεπτομέρειας)



Εικόνα 64 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Canon ixus 160, ύψος πτήσης 260m AGL

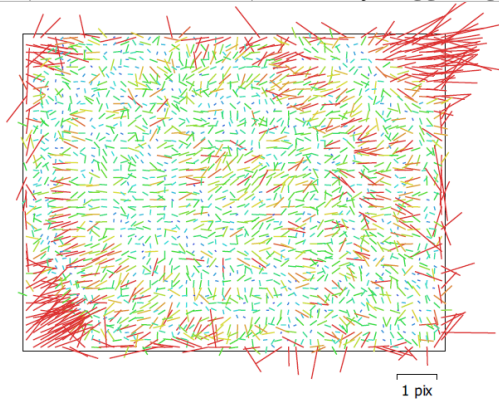
Αποτελέσματα καταγραφής:



Εικόνα 65 Θέσεις φωτοληψιών και αλληλεπικαλύψεις

Πίνακας 35 Στοιχείων αισθητήρα και έργου

Αριθμός φωτοληψιών	440	Tie points	190.979
Ύψος πτήσης	262 m	Προβολές	628.101
GSD	5,69 cm/pix	Σφάλμα προβολής	2,18 pix
Έκταση	4,17 km ²	Εστιακή απόσταση	5 mm
Αισθητήρας	Canon Ixus 160	Μέγεθος εικονοστοιχείου	1.2 x 1.2 μm
Αριθμός Pixel	5152 x 3864	Βαθμονόμηση	όχι
Μέθοδος γεωαναφοράς	Μη επιβλεπόμενη	Στοιχεία ελέγχου	Google Earth
Δέκτης GPS	Ublox LEA-6h	Μέθοδος Triggering	Time interval



Εικόνα 66 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα Canon IXUS 160 (5mm)

Πίνακας 36 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης φακού

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	4320.7	1.2	1.00	0.03	-0.45	0.22	0.04	-0.03	0.08	-0.07	0.05	-0.04	0.03
Cx	33.812	0.37		1.00	-0.01	0.08	0.54	-0.01	-0.00	0.00	-0.00	0.31	0.03
Cy	60.3149	0.4			1.00	-0.55	0.01	-0.06	-0.00	-0.00	0.01	-0.01	0.28
B1	-0.375387	0.074				1.00	0.09	0.03	-0.02	0.02	-0.02	0.05	-0.02
B2	0.149585	0.07					1.00	-0.01	0.00	-0.00	0.00	0.08	0.08
K1	-0.030786	0.00046						1.00	-0.95	0.91	-0.86	0.01	-0.09
K2	0.0392249	0.0034							1.00	-0.99	0.96	-0.01	0.00
K3	-0.0262843	0.0099								1.00	-0.99	0.01	-0.01
K4	-0.0121392	0.0099									1.00	-0.01	0.01
P1	-0.000977684	1.2e-005										1.00	-0.05
P2	0.00837449	1.4e-005											1.00

Όπου:

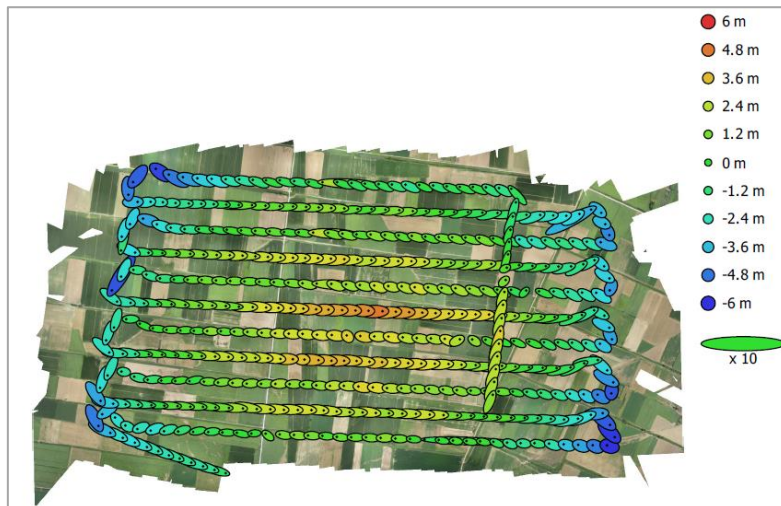
f - focal length,

Cx, Cy - principal point offset,

B1, B2 - affinity and non-orthogonality (skew) coefficients,

K1, K2, K3, K4 - radial distortion coefficients,

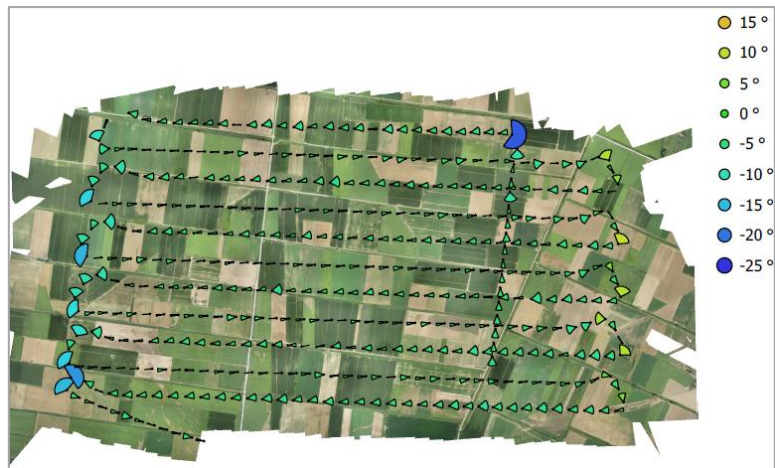
P1, P2, P3, P4 - tangential distortion coefficients



Εικόνα 67 θέσεις φωτοληψιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης.

Πίνακας 37 MO, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών

Σφάλμα X (m)	Σφάλμα Y (m)	Σφάλμα Z (m)	Σφάλμα XY (m)	Ολικό Σφάλμα (m)
6,69701	2,47419	2,21595	7,13944	7,47543



Εικόνα 68 Προσδιορισμού προσανατολισμού και σφαλμάτων. Τα τόξα παρουσιάζουν τον προσδιορισμό σφαλμάτων κατά Karra

Πίνακας 38 MO, σφαλμάτων περιστροφής φωτοληψιών

Σφάλμα Yaw (°)	Σφάλμα Pitch (°)	Σφάλμα Roll (°)	Ολικό Σφάλμα (°)
4,32732	1,12092	4,17542	6,11689

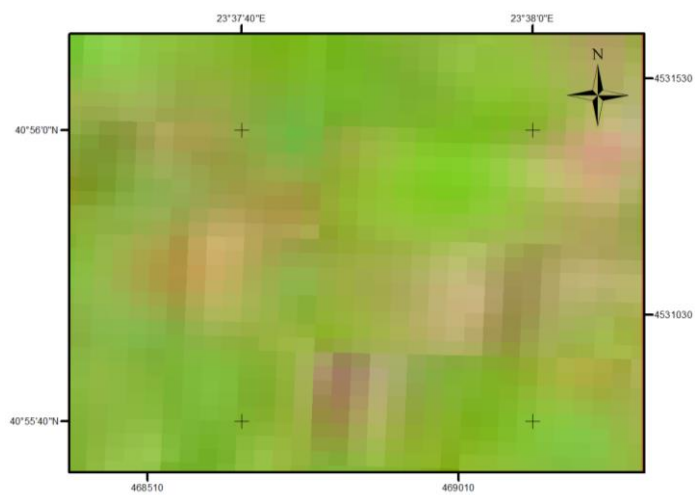


Εικόνα 69 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου

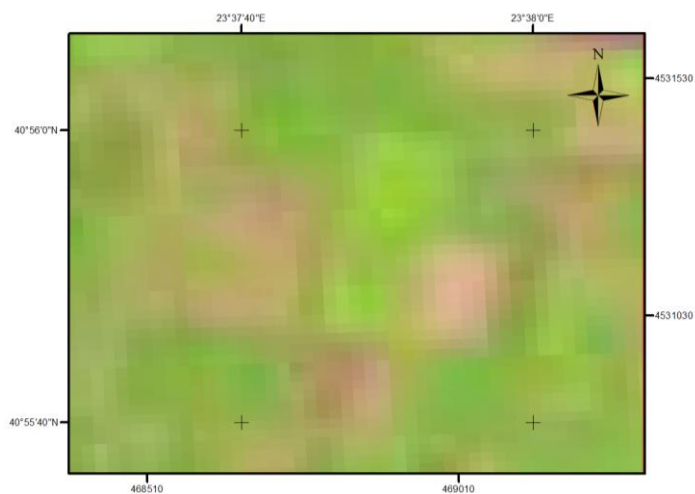
Πίνακας 39 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου

Όνομα	Σφάλμα X (m)	Σφάλμα Y (m)	Σφάλμα Z (m)	Ολικό Σφάλμα (m)	Pix
point 1	1.88908	-1.18105	-0.0286611	2.22807	0.221
point 3	-1.38259	0.875936	-0.0330661	1.63704	0.134
point 8	-2.86984	-1.3935	-0.0441855	3.19057	0.042
point 11	-1.08433	1.31464	-0.0223109	1.70428	0.029
point 15	1.26076	-0.233132	0.00976784	1.28217	0.082
point 17	-0.812377	1.25859	-0.0142069	1.49807	0.070
point 18	0.800102	0.115992	-0.00272887	0.80847	0.057
point 19	-0.282235	-0.577575	-0.0840634	0.648318	0.092
point 20	-1.93733	-1.48578	0.347373	2.46606	0.051
point 21	2.84254	0.142287	-0.0725224	2.84703	0.002
point 22	1.70408	0.127433	-0.0176033	1.70893	0.097
point 23	-0.525835	0.913221	-0.0842639	1.05715	0.008
Total	1.65517	0.952878	0.109952	1.91302	0.092

Συγκρινόμενες πηγές για την ίδια περιοχή μελέτης:



Εικόνα 70 Δορυφορική εικόνα, Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 (09/07/2015). LandsatLook. Μέγεθος εικονοστοιχείου: 30m

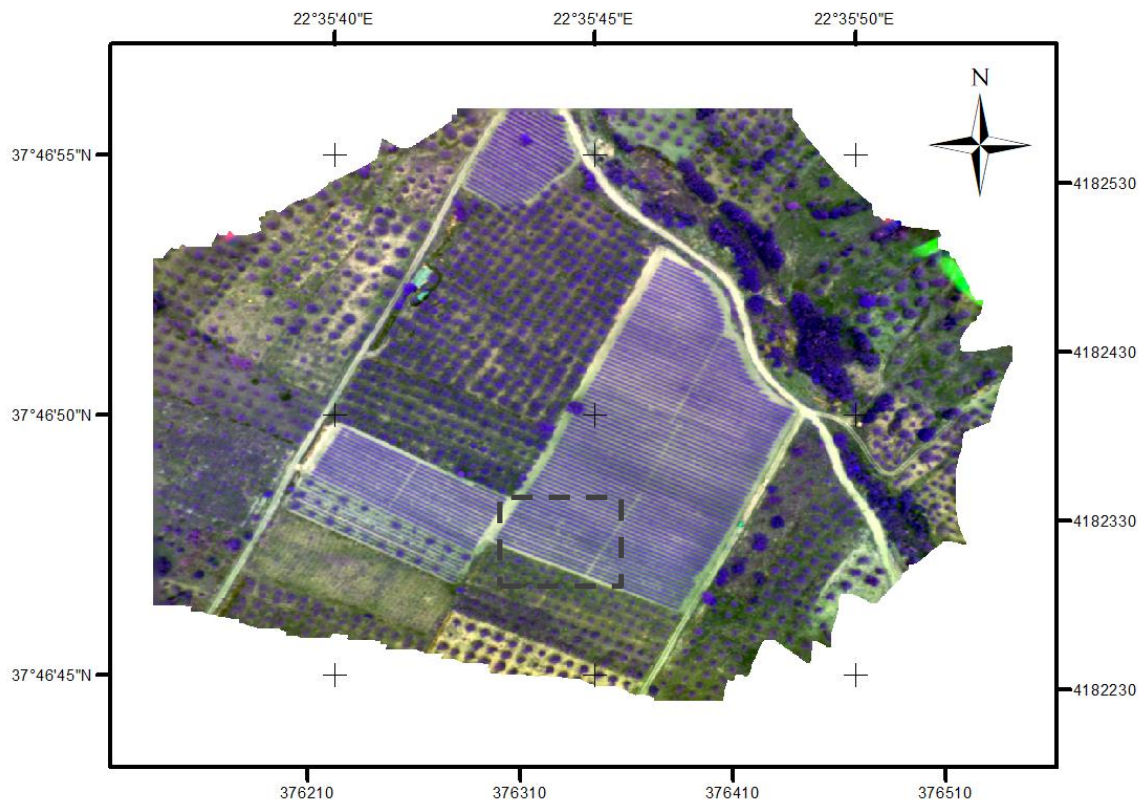


Εικόνα 71 Δορυφορική εικόνα, Sentinel-2a (29/07/2015). LandsatLook. Μέγεθος εικονοστοιχείου: 20m

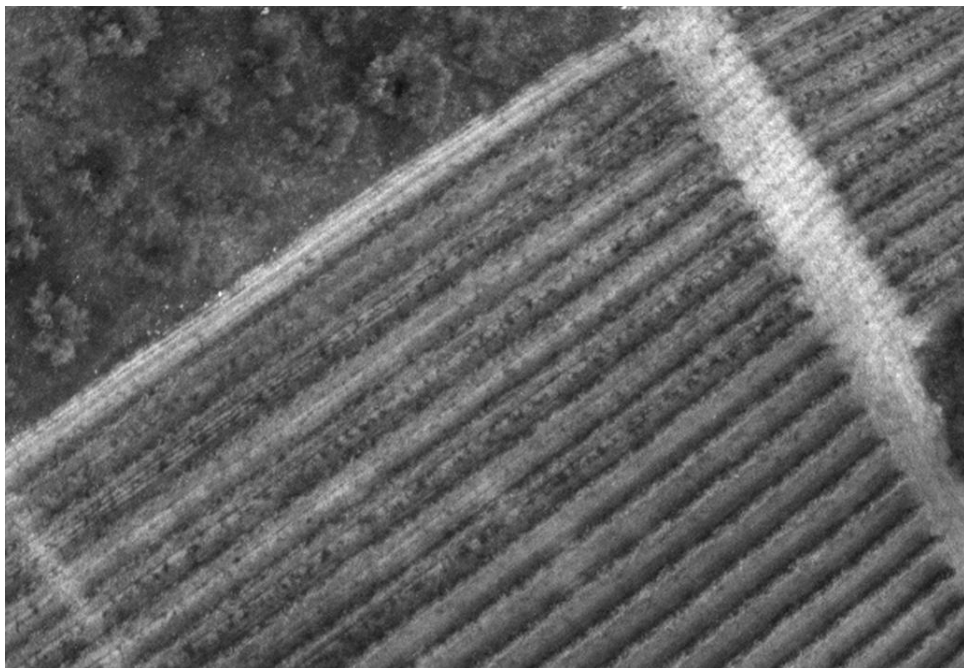


Εικόνα 72 Ορθοφωτοχάρτης, Κτηματολόγιο ΑΕ, (2009). Μέγεθος εικονοστοιχείου: 0,25m

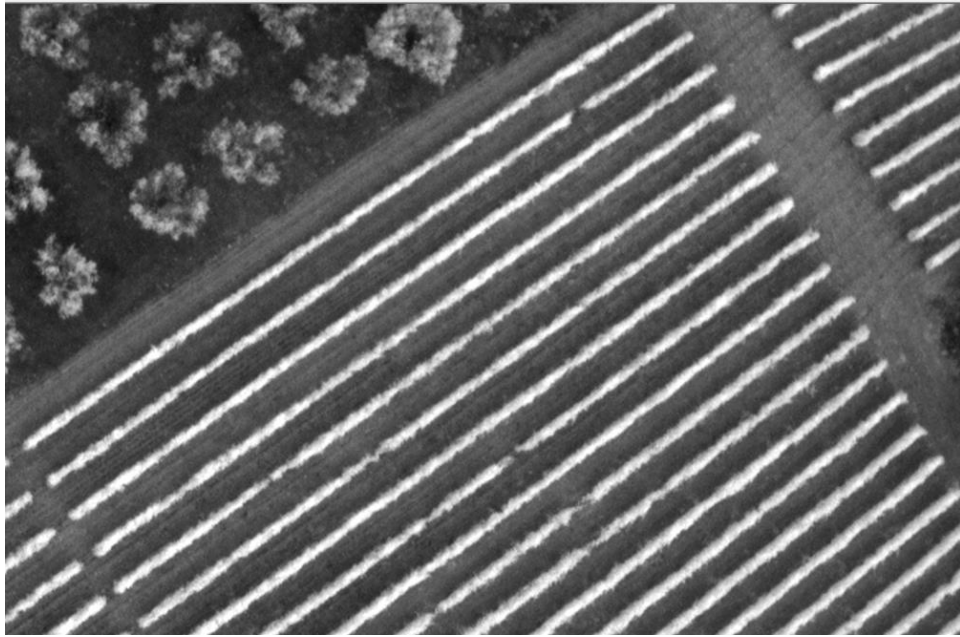
4.2.1.b Αισθητήρας Parrot Sequoia



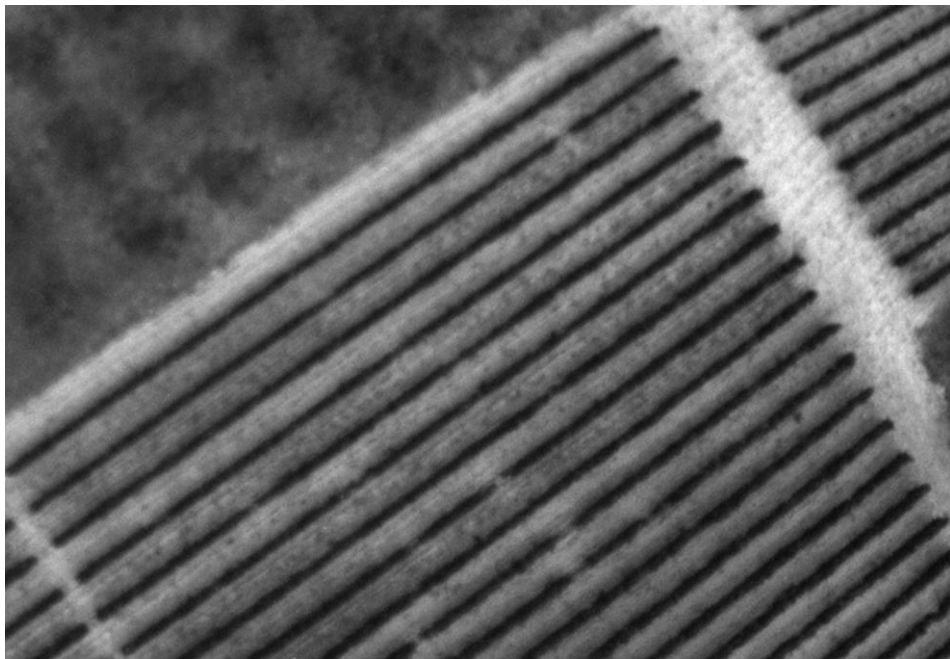
Εικόνα 73 Ορθομοσαϊκό από φωτοληψίες 06/06/2016 με δέκτη Parrot Sequoia. (μέγεθος εικονοστοιχείου 10,1cm. /ύψος πτήσης 111μ), (περίγραμμα λεπτομέρειας)



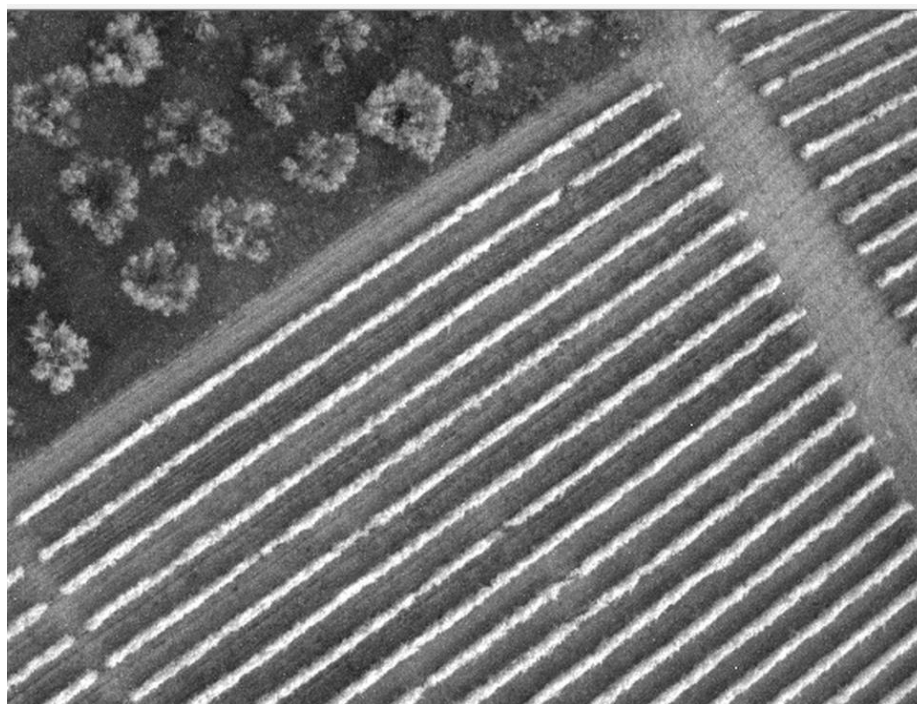
Εικόνα 74 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Green band, ύψος πτήσης 111m AGL



Εικόνα 75 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Near Infrared band, ύψος πτήσης 111m AGL

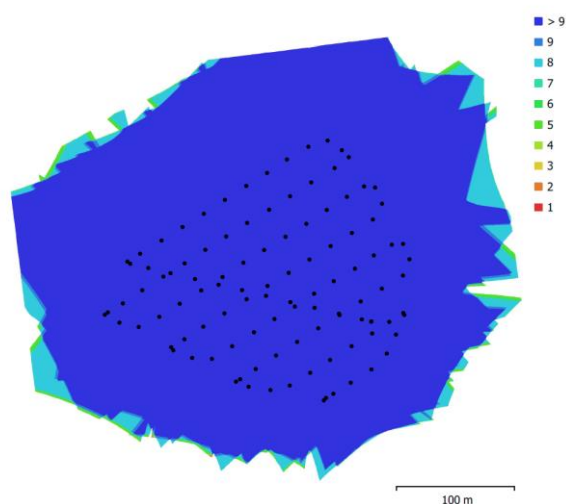


Εικόνα 76 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Red band, ύψος πτήσης 111m AGL



Εικόνα 77 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Parrot Sequoia, Red Edge band, ύψος πτήσης 111m AGL

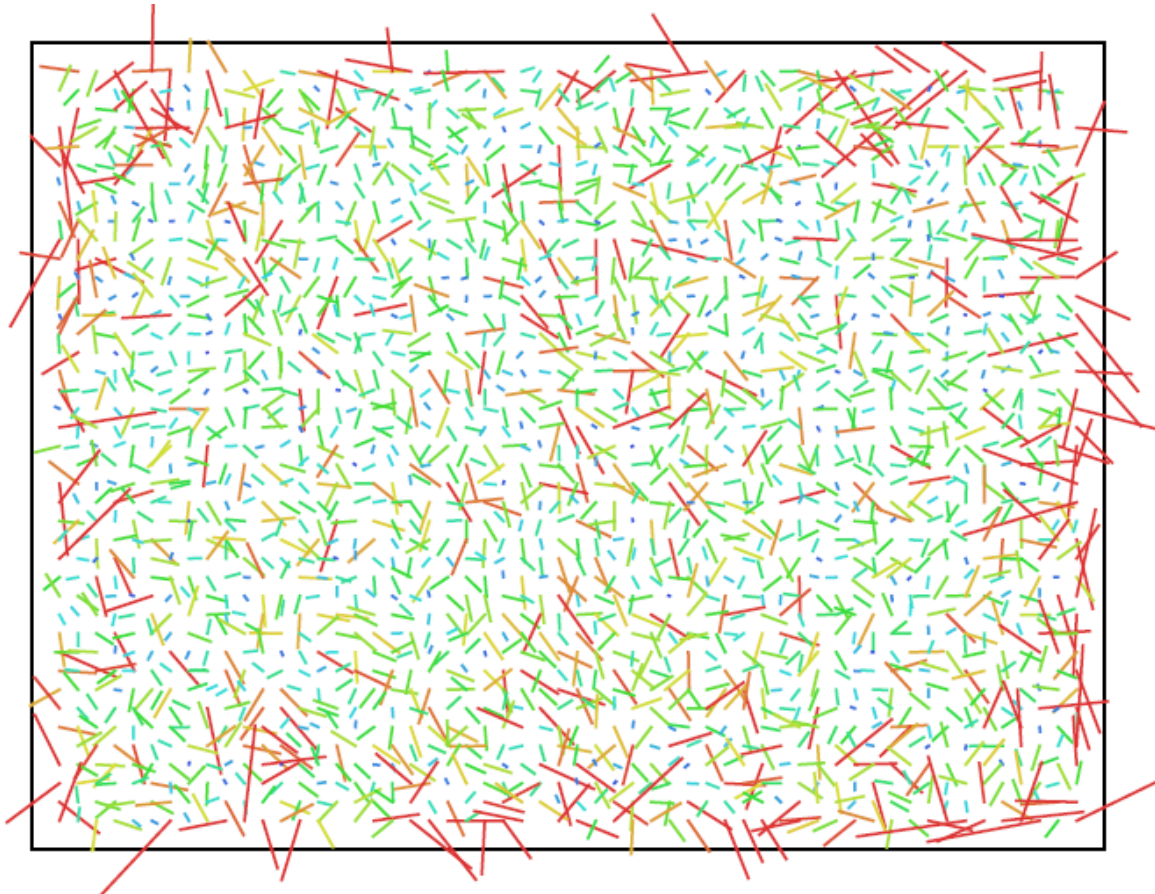
Αποτελέσματα καταγραφής:



Εικόνα 78 Θέσεις φωτοληψιών και αλληλεπικαλύψεις

Πίνακας 40 Στοιχείων αισθητήρα και έργου

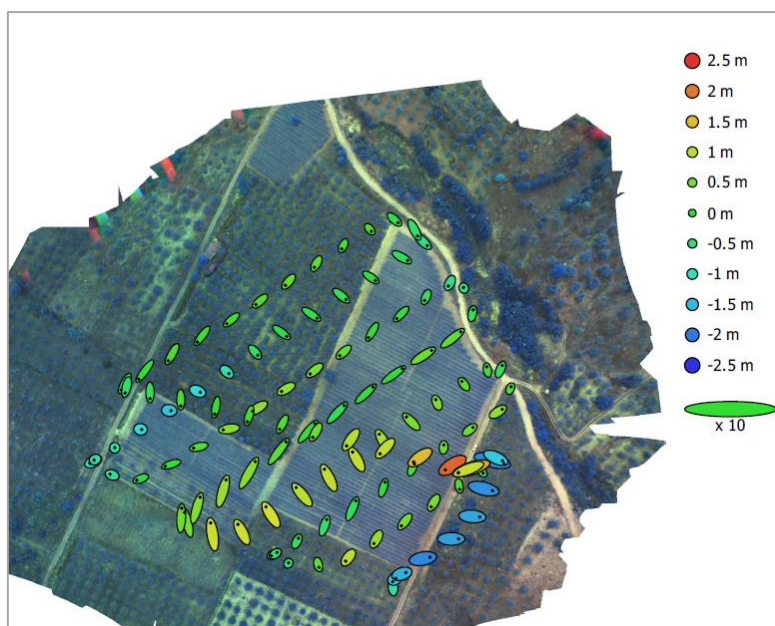
Αριθμός φωτοληψιών	424	Tie points	59.486
Ύψος πτήσης	111 m	Προβολές	251.450
GSD	10,1 cm/pix	Σφάλμα προβολής	1,17 pix
Έκταση	0,119 km ²	Εστιακή απόσταση	3.98 mm
Αισθητήρας	Parrot Sequoia	Μέγεθος εικονοστοιχείου	3.75 x 3.75 μm
Αριθμός Pixel	1280 x 960	Βαθμονόμηση	Ναι
Μέθοδος γεωαναφοράς	Επιβλεπόμενη	Στοιχεία ελέγχου	Here+ RTK
Δέκτης GPS	Here+ RTK/Parrot	Μέθοδος Triggering	Time interval



Εικόνα 79 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα Parrot Sequoia (3.98mm)

Πίνακας 41 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης

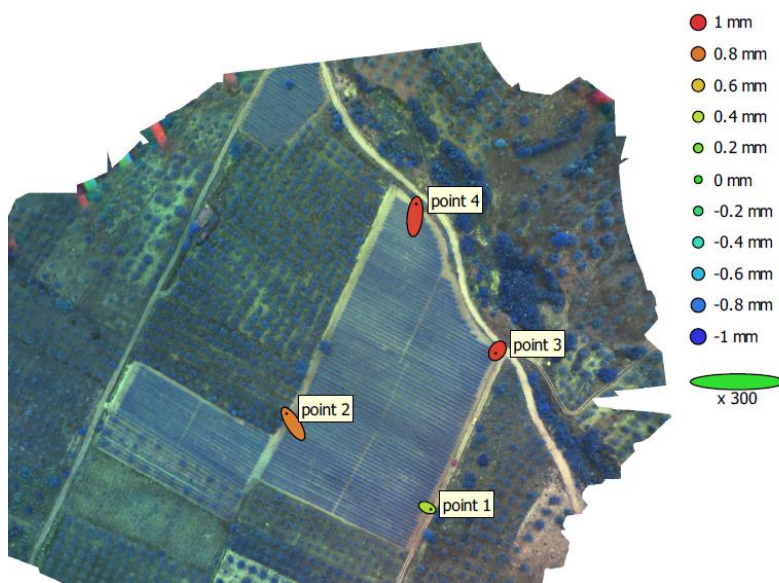
	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	1049.94	0.48	1.00	0.17	0.08	0.02	0.07	-0.37	0.12	-0.10	-0.20	-0.04
Cx	11.7111	0.11		1.00	-0.02	0.01	0.12	0.01	-0.04	0.03	-0.49	0.00
Cy	32.4263	0.084			1.00	-0.03	0.01	0.02	-0.05	0.06	0.01	-0.53
B1	0.0237634	0.028				1.00	0.02	-0.04	-0.02	0.03	-0.02	0.05
B2	-0.493243	0.028					1.00	-0.01	-0.02	0.02	-0.16	0.05
K1	-0.0507732	0.00078						1.00	-0.92	0.86	0.14	0.02
K2	0.00654759	0.0031							1.00	-0.98	-0.07	0.02
K3	-0.020164	0.0039								1.00	0.09	-0.04
P1	0.000328298	1.9e-005									1.00	-0.05
P2	0.000132704	2e-005										1.00



Εικόνα 80 θέσεις φωτοληψιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης.

Πίνακας 42 ΜΟ, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών

Σφάλμα X (m)	Σφάλμα Y (m)	Σφάλμα Z (m)	Σφάλμα XY (m)	Ολικό Σφάλμα (m)
0,559515	0,630193	0,777601	0,842734	1,14668



Εικόνα 81 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου

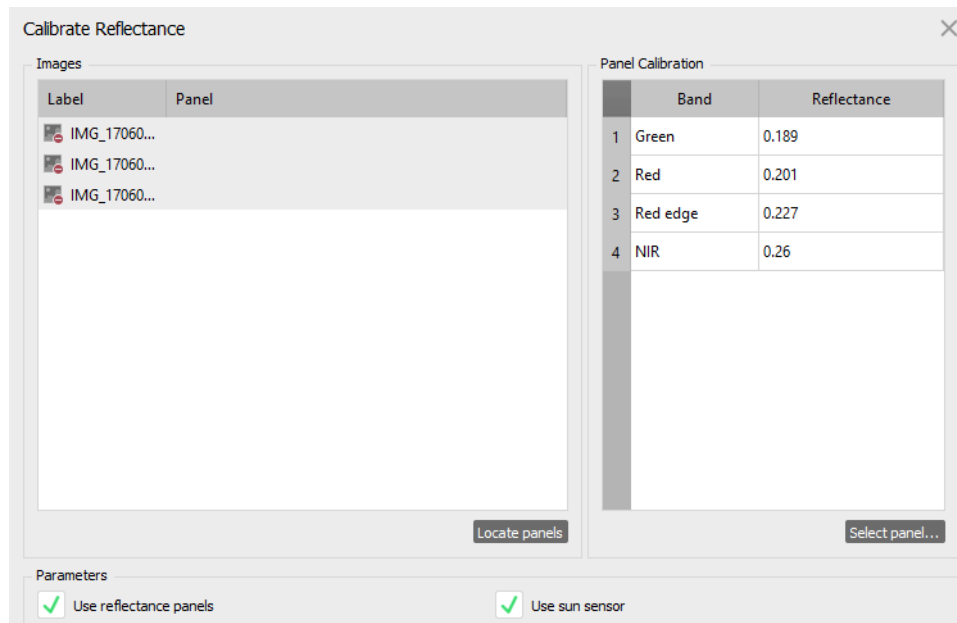
Πίνακας 43 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου

Όνομα	Σφάλμα X (cm)	Σφάλμα Y (cm)	Σφάλμα Z (cm)	Ολικό Σφάλμα (cm)	Pix
point 1	2.06255	-0.351355	0.679578	2.19986	0.075
point 2	-0.312767	1.75561	-0.851304	1.97603	0.085
point 3	-1.88645	-2.3921	0.874114	3.16937	0.110
point 4	-0.431952	0.715934	-0.315023	0.893522	0.065
Total	1.42278	1.53625	0.715866	2.21288	0.084

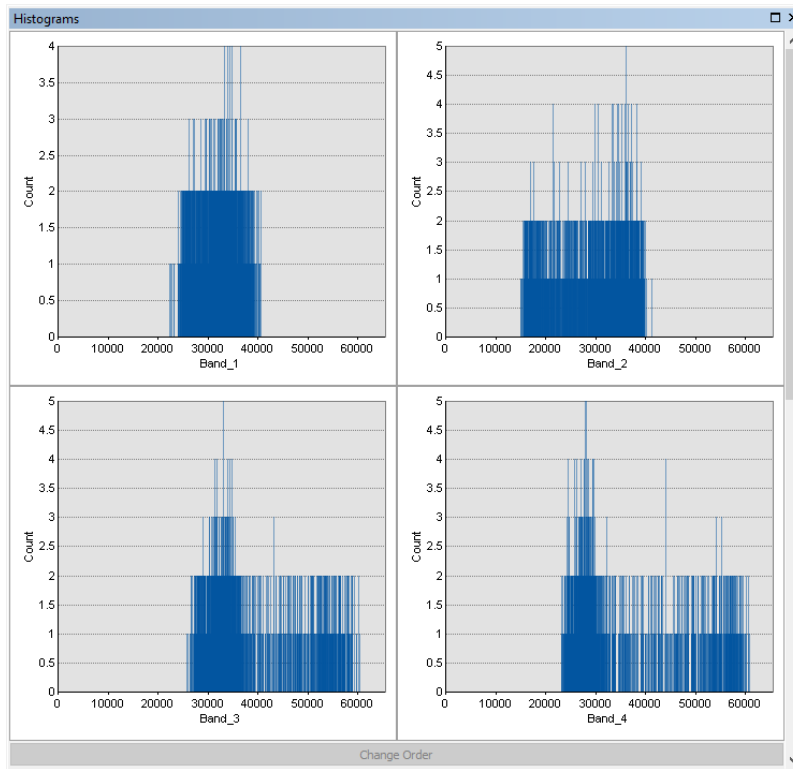
Εισαγωγή Βαθμονόμησης ανακλαστικότητας



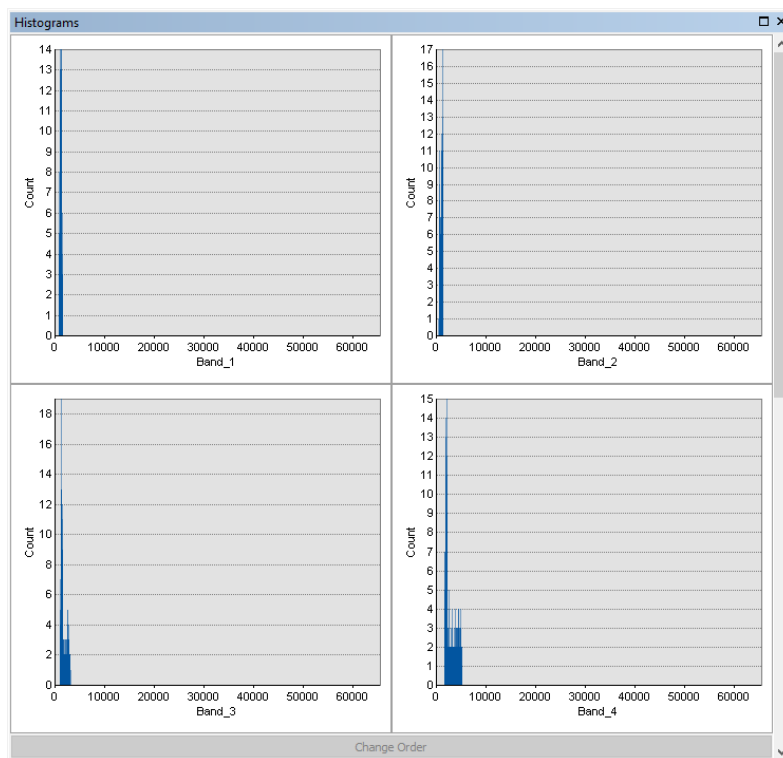
Εικόνα 82 Δείγμα στόχου Albedo, πριν την καταγραφή. Τιμές: Green: 18.9%, Red: 20.1%, Red Edge: 22.7%, NIR: 26%.



Εικόνα 83 Αποτελέσματα απορρόφησης/ανάκλασης αισθητήρα και εισαγωγή δεδομένων αισθητήρα ηλιοφάνειας(Agisoft Metashape, 1.5.0/ Calibrate Reflectance)

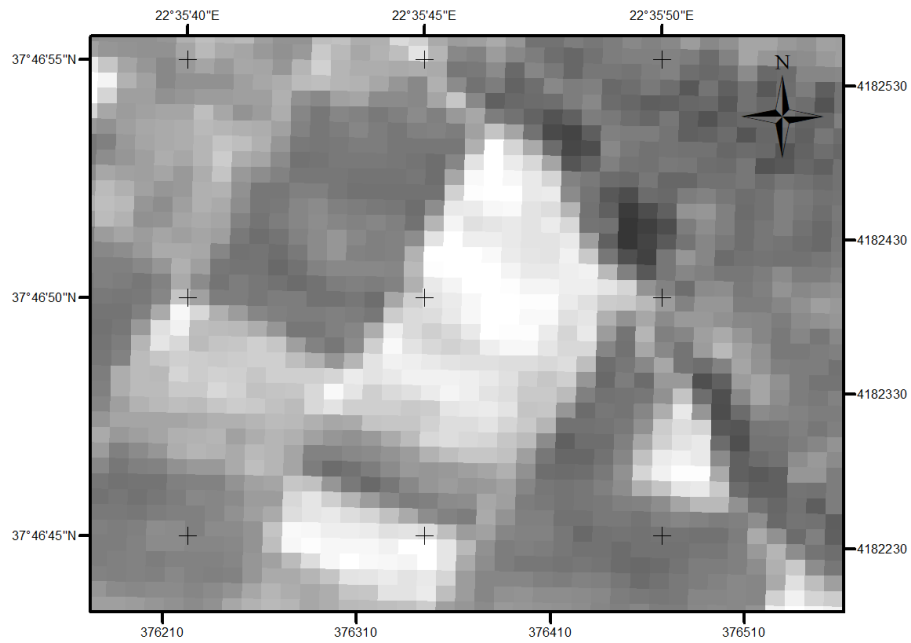


Εικόνα 84 Ιστόγραμμα δείγματος αμπέλου σε ορθομοσαϊκό χωρίς διόρθωση ανάκλασης(ESRI, ArcMap 10.1)



Εικόνα 85 Ιστόγραμμα δείγματος αμπέλου σε ορθομοσαϊκό με διόρθωση ανάκλασης(ESRI, ArcMap 10.1)

Συγκρινόμενες πηγές για την ίδια περιοχή μελέτης:



Εικόνα 86 Δορυφορική εικόνα, Sentinel-2 L1C (08/06/2017). LandsatLook. Μέγεθος εικονοστοιχείου: 10m

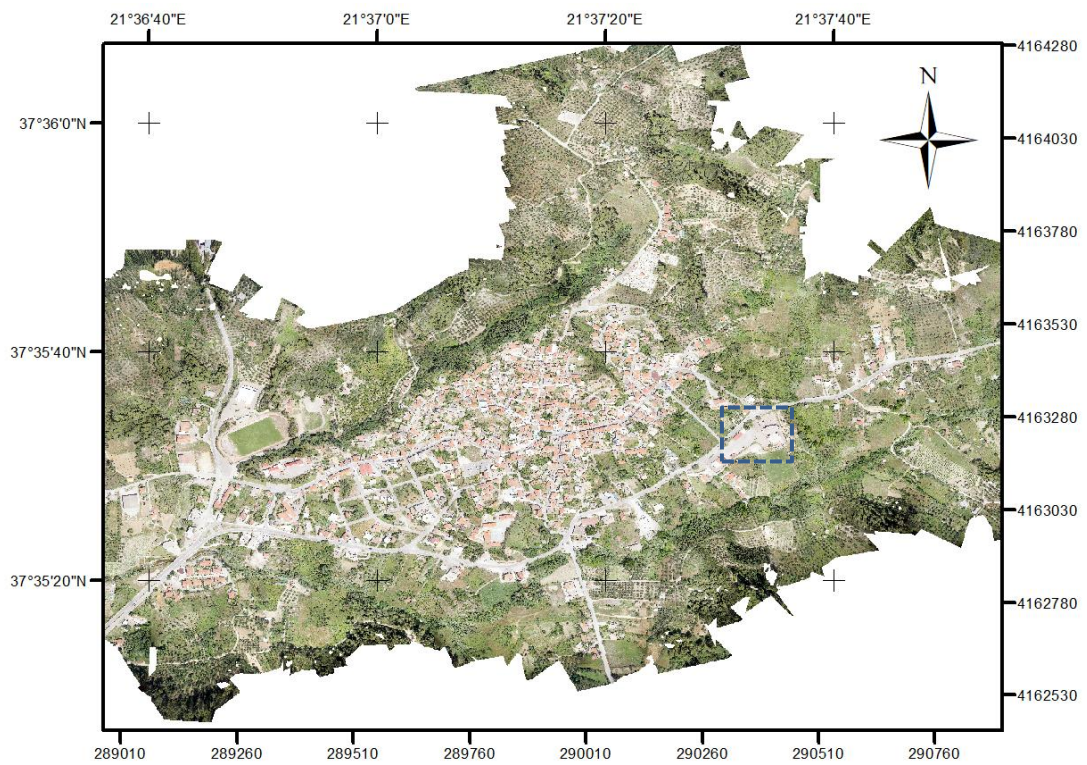


Εικόνα 87 Δορυφορική εικόνα, CNES/Airbus (/06/2017). Μέγεθος εικονοστοιχείου: 25cm



Εικόνα 88 Ορθοφωτοχάρτης, Κτηματολόγιο ΑΕ, (2009). Μέγεθος εικονοστοιχείου: 0,50m

4.2.1.c Αισθητήρας Modified Sony APS-C

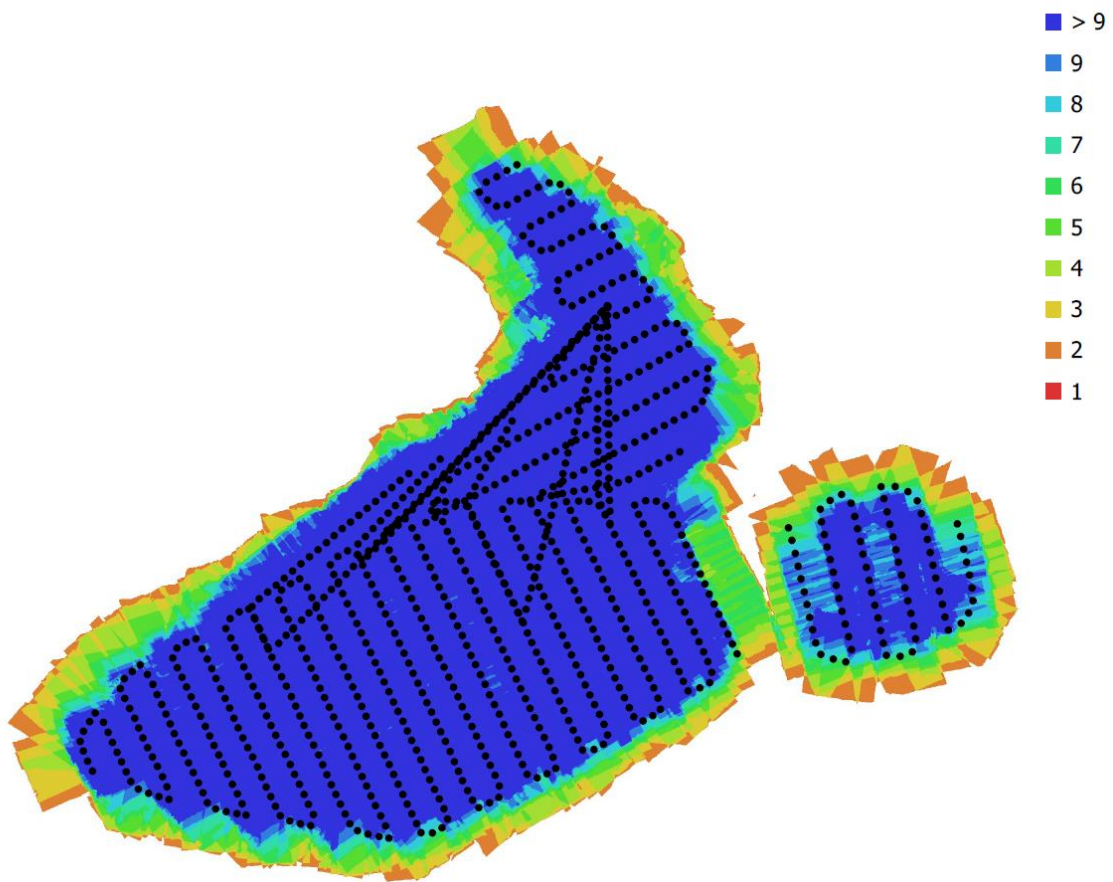


Εικόνα 89 Ορθομωσαϊκό από φωτοληψίες 08/09/2018 με δέκτη Modified Sony APS-C. (μέγεθος εικονοστοιχείου 2,01cm. /ύψος πτήσης 160μ),(περίγραμμα λεπτομέρειας)



Εικόνα 90 Λεπτομέρεια φωτοληψίας Modified Sony APS-C, ύψος πτήσης 160m AGL

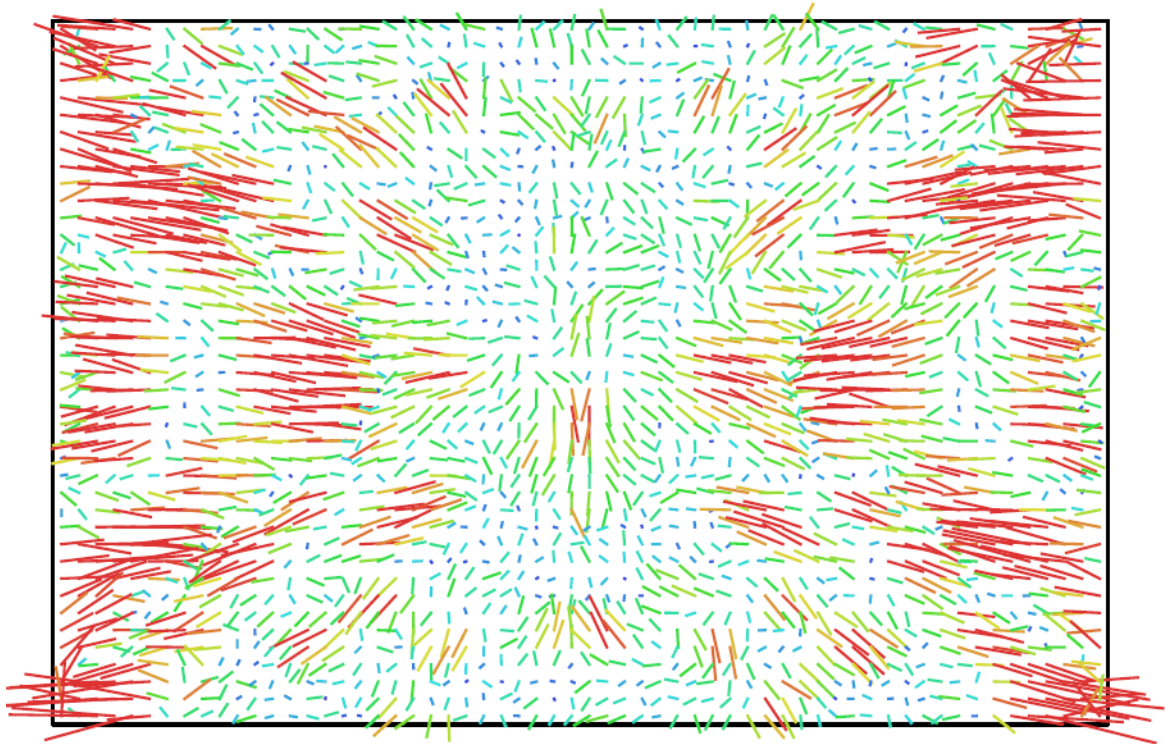
Αποτελέσματα καταγραφής:



Εικόνα 91 Θέσεις φωτοληψιών και αλληλεπικαλύψεις

Πίνακας 44 Στοιχείων αισθητήρα και έργου

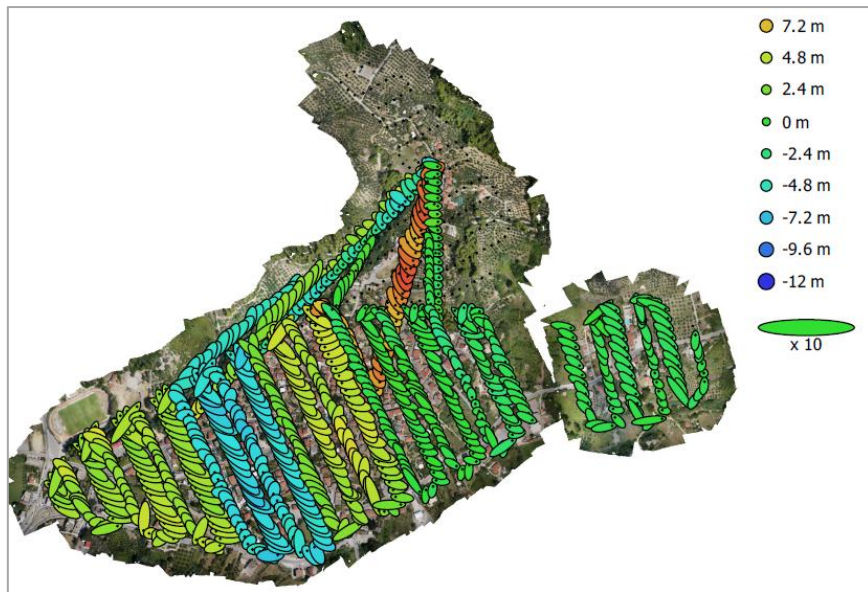
Αριθμός φωτοληψιών	940	Tie points	2.328.643
Ύψος πτήσης	160 m	Προβολές	7.215.148
GSD	2,01 cm/pix	Σφάλμα προβολής	0,779 pix
Έκταση	1,16 km ²	Εστιακή απόσταση	28 mm
Αισθητήρας	CMOS APSC	Μέγεθος εικονοστοιχείου	4.53 x 4.53 μm
Αριθμός Pixel	7952 x 5304	Βαθμονόμηση	Ναι
Μέθοδος γεωναφοράς	Επιβλεπόμενη	Στοιχεία ελέγχου	Here+ RTK
Δέκτης GPS	Here+ RTK	Μέθοδος Triggering	Trigger/hot shoe



Εικόνα 92 Κατάλοιπα φακού/εικόνας αισθητήρα modified Sony 28mm

Πίνακας 45 Συντελεστών προσαρμογής και συσχέτισης

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	6049.43	0.17	1.00	-0.35	0.06	-0.11	0.08	-0.07	0.04	-0.03
Cx	13.7268	0.047		1.00	0.01	-0.01	0.03	-0.03	0.59	0.02
Cy	-32.8412	0.036			1.00	0.01	-0.01	0.01	0.05	0.57
K1	-0.0285057	3e-005				1.00	-0.96	0.90	-0.03	0.02
K2	0.029111	0.00011					1.00	-0.98	0.01	-0.01
K3	-0.0158898	0.00013						1.00	-0.00	0.01
P1	0.000668014	1.8e-006							1.00	0.05
P2	-0.000717733	1.6e-006								1.00



Εικόνα 93 Θέσεις φωτοληψιών και προσδιορισμού σφαλμάτων. Όπου το σφάλμα ύψους παρουσιάζεται με το χρώμα της έλλειψης και τα οριζοντιογραφικά σφάλματα με το μέγεθος και σχήμα της έλλειψης

Πίνακας 46 ΜΟ, σφαλμάτων θέσεως φωτοληψιών

Σφάλμα X (m)	Σφάλμα Y (m)	Σφάλμα Z (m)	Σφάλμα XY (m)	Ολικό Σφάλμα (m)
2,57483	2,25095	4,12371	3,42002	5,35738



Εικόνα 94 Προσδιορισμού προσανατολισμού και σφαλμάτων. Τα τόξα παρουσιάζουν τον προσδιορισμό σφαλμάτων κατά Kappa

Πίνακας 47 ΜΟ, σφαλμάτων περιστροφής φωτοληψιών

Σφάλμα Yaw (°)	Σφάλμα Pitch (°)	Σφάλμα Roll (°)	Ολικό Σφάλμα (°)
4,44263	3,77942	2,87416	6,50244

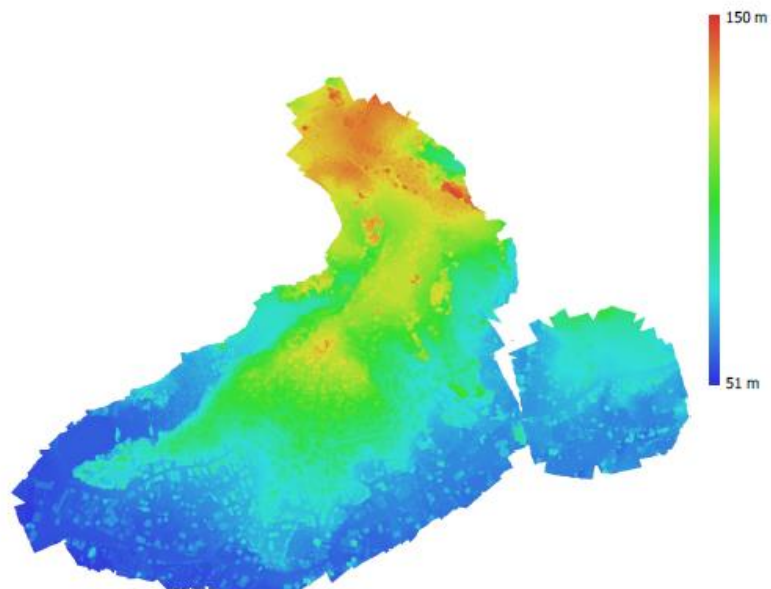


Εικόνα 95 θέσεως και σφαλμάτων σημείων ελέγχου

Πίνακας 48 Σφαλμάτων Σημείων ελέγχου

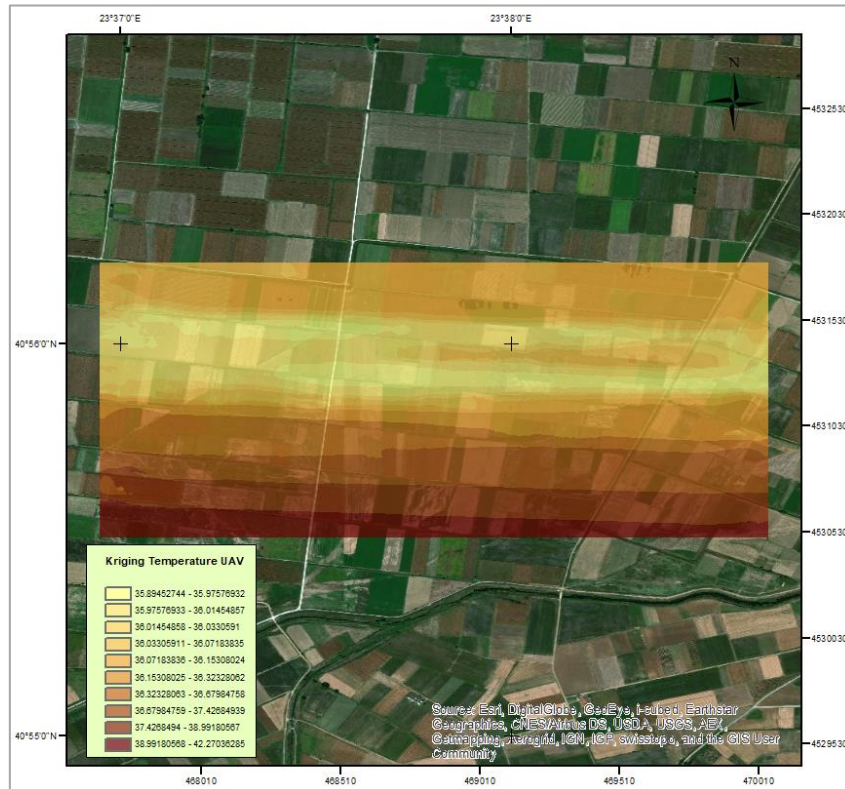
Όνομα	Σφάλμα X (cm)	Σφάλμα Y (cm)	Σφάλμα Z (cm)	Ολικό Σφάλμα (cm)	Pix
37	2.52586	-4.00023	-2.32975	5.27348	0.534 (17)
36	-3.00225	-0.179496	-0.308281	3.02337	0.218 (18)
34	0.398866	1.59641	-1.34306	2.12401	0.456 (15)
33	1.47198	-1.71592	-0.528452	2.32172	0.323 (21)
32	1.59864	-0.955503	-0.381513	1.90111	0.396 (29)
31	1.41864	1.06213	1.74899	2.4899	0.516 (17)
29	-0.149066	0.406574	0.173626	0.46655	0.269 (16)
28	0.235416	0.873596	0.130661	0.914146	0.297 (24)
27	0.88421	0.391309	-0.0547619	0.968478	0.222 (31)
26	0.476351	2.04611	-0.80267	2.24895	0.353 (31)
25	-2.49073	-0.959642	-0.806524	2.78839	0.344 (10)
24	-5.29611	-1.55379	0.260639	5.52548	0.431 (38)
23	3.2675	-0.239458	-0.0935767	3.2776	0.376 (13)
22	-0.806677	-3.32223	0.925136	3.54172	0.345 (20)

21	-0.188793	1.72876	-0.554398	1.82527	0.295 (19)
20	1.89749	1.38319	2.00659	3.0887	0.186 (11)
19	0.626383	-1.60059	1.74696	2.45073	0.223 (19)
18	0.379456	0.540516	-0.78772	1.02793	0.452 (15)
16	-1.15186	2.26665	0.0236677	2.54264	0.213 (12)
15	-0.283236	-0.601828	-0.0729542	0.669135	0.335 (9)
14	0.811491	-0.0921305	-0.074564	0.820101	0.821 (8)
13	-0.550043	0.695195	0.0544081	0.888146	0.253 (9)
12	-1.02672	1.31463	-0.317867	1.69807	0.192 (13)
11	0.064538	1.55714	0.895634	1.7975	0.265 (14)
9	-1.66968	3.05204	-0.97024	3.61167	0.917 (4)
7.1	-1.50933	-2.58474	0.200402	2.99985	0.592 (6)
6	1.03482	-0.10132	-0.224858	1.06381	0.442 (8)
4	-0.303035	-0.922424	-0.432016	1.0627	0.031 (2)
3	1.28124	-0.198957	0.934443	1.59823	0.250 (5)
Total	1.7062	1.64068	0.911678	2.53655	0.374

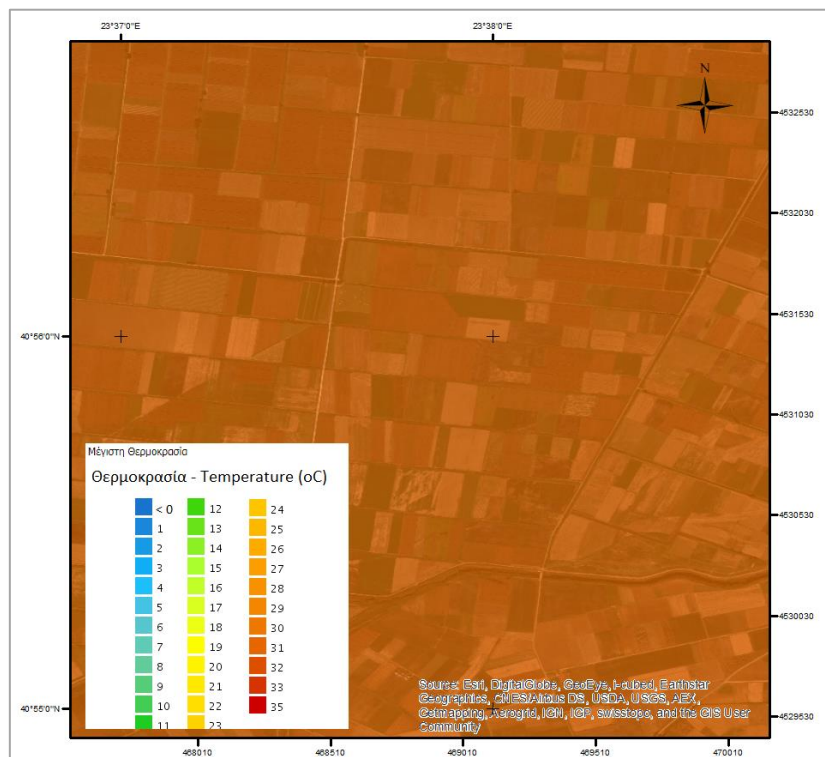


Εικόνα 96 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, χωρική διακριτικότητα 4,03cm. Πυκνότητα σημείων 617/m²

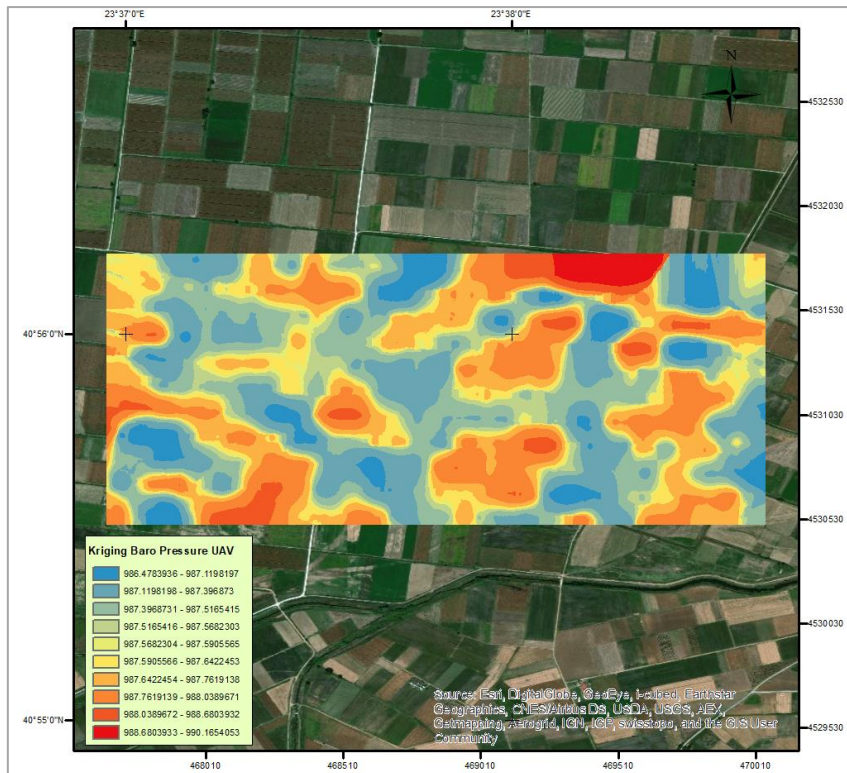
4.2.2 Αποτελέσματα περιβαλλοντικών αισθητήρων



Εικόνα 97 Μοντέλο επιφανείας θερμοκρασίας από δεδομένα αισθητήρα αέρα Pitot (TEMP), ΣμηΕΑ, Νιγρίτα Σερρών, 05/07/2015 14:00



Εικόνα 98 Μοντέλο επιφανείας μέγιστης θερμοκρασίας δεδομένων κλιματικού άτλαντα ΕΜΥ, Ιούλιος



Εικόνα 99 Μοντέλο επιφανείας Βαρομετρικής πίεσης σε millibar Hg, από δεδομένα αισθητήρα βαρόμετρου (BARO), ΣμηΕΑ, Νιγρίτα Σερρών, 05/07/2015 14:00, MSL Alt. 274m, Ground Alt. 6-10m(Βαθμονόμηση Mastech)

XARTHS Sx Ygr

Για τον υπολογισμό της Σχετικής υγρασίας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$RH=100 \times (e_a/e_s)$$

Όπου,

e_a , η βαρομετρική πίεση του αέρα και

e_s η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε δεδομένη θερμοκρασία σε mb και υπολογίζεται από:

$$e_s=6.11 \times \exp(17,2T_a/237,3+T_a)$$

Όπου,

T_a , η θερμοκρασία αέρα σε °C

4.2.3 Αποτελέσματα δεικτών βλάστησης

4.2.3α Αποτελέσματα δεικτών βλάστησης από αισθητήρα MaxMax Canon IXUS 160 & Canon IXUS 160

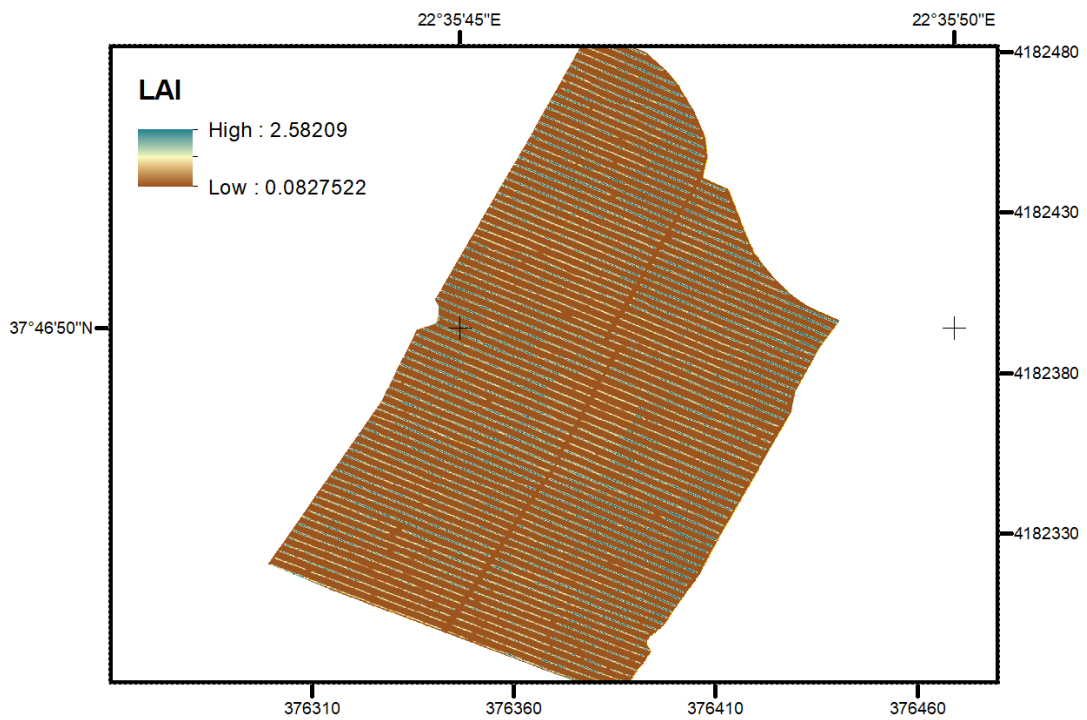


Εικόνα 100 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη βλάστησης από τις μάντες: Red, της Canon IXUS 160 και NIR της MaxMax Canon IXUS 160(καλλιέργειες Καλαμπόκι, Σόργο)

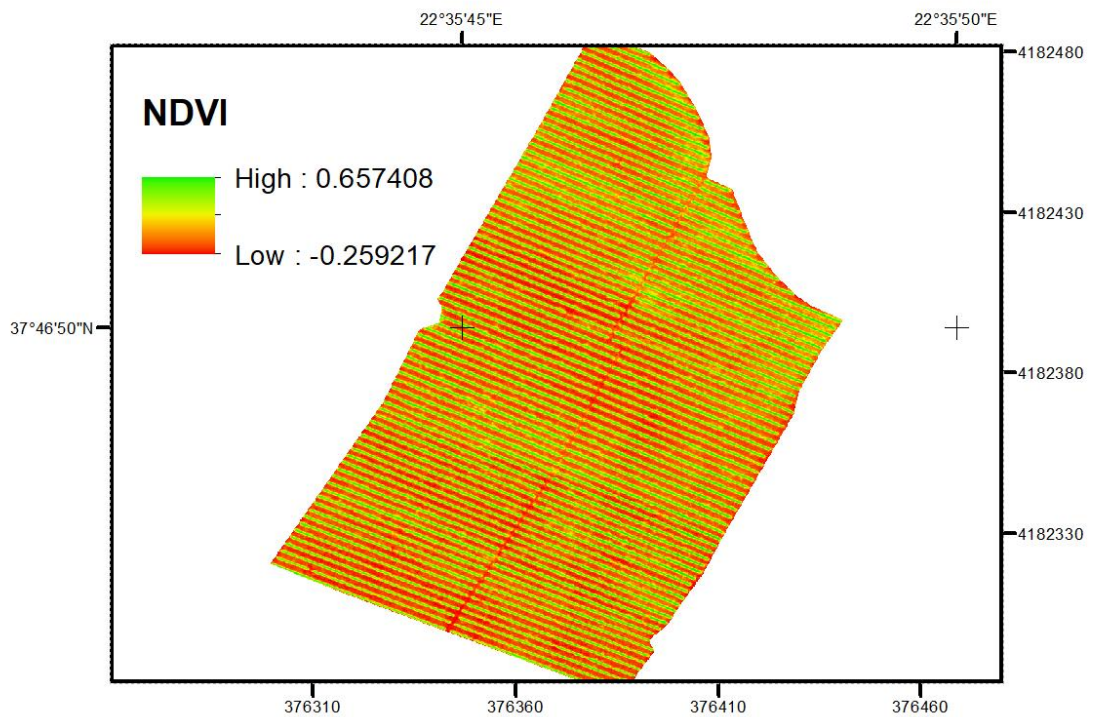
Φθορά επιφανείας εδάφους που έχει προκληθεί από απορρέοντα ύδατα

Αποτύπωμα άρδευσης υψηλής καταίονησης

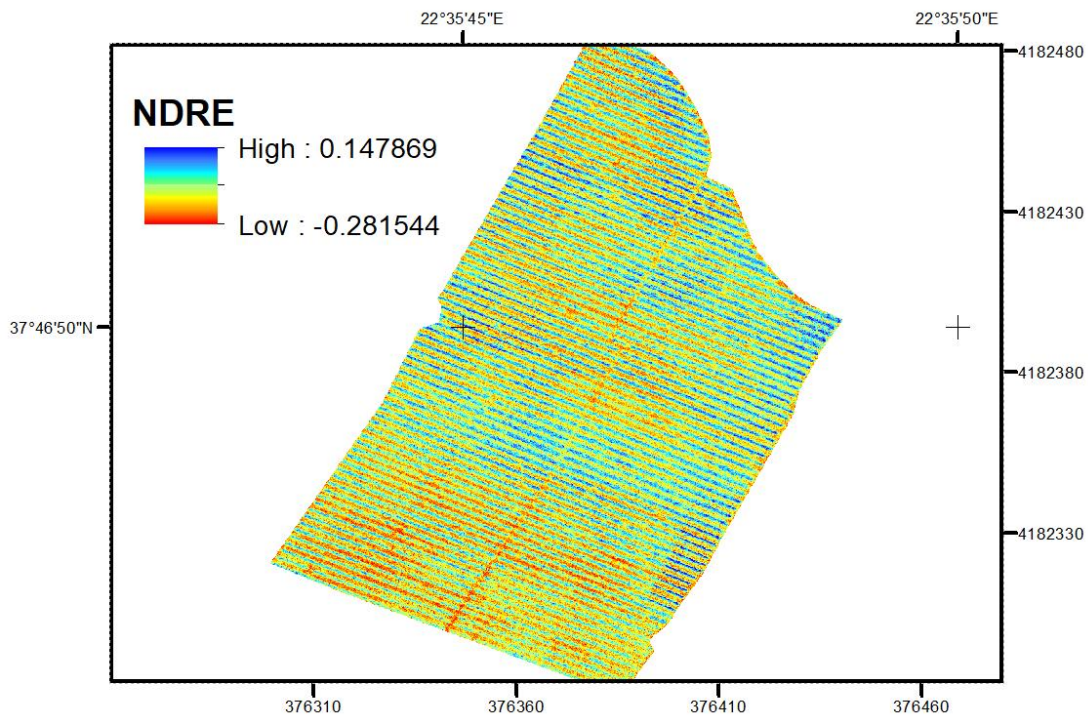
4.2.3b Αποτελέσματα δεικτών βλάστησης από αισθητήρα Parrot Sequoia



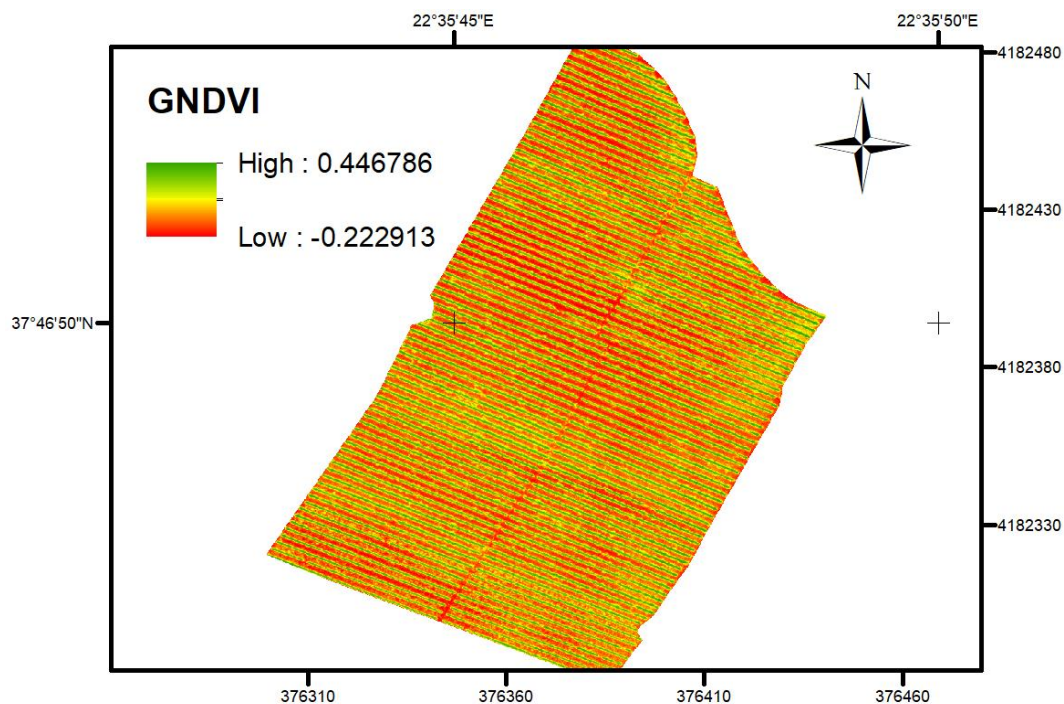
Εικόνα 101 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη LAI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)



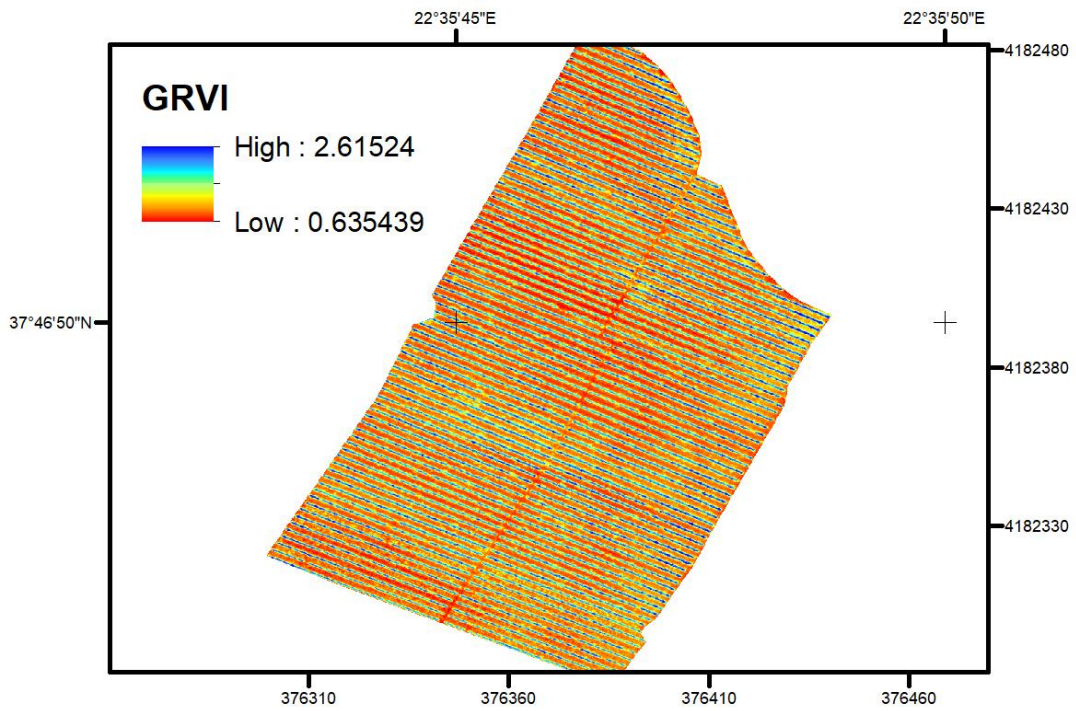
Εικόνα 102 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη NDVI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)



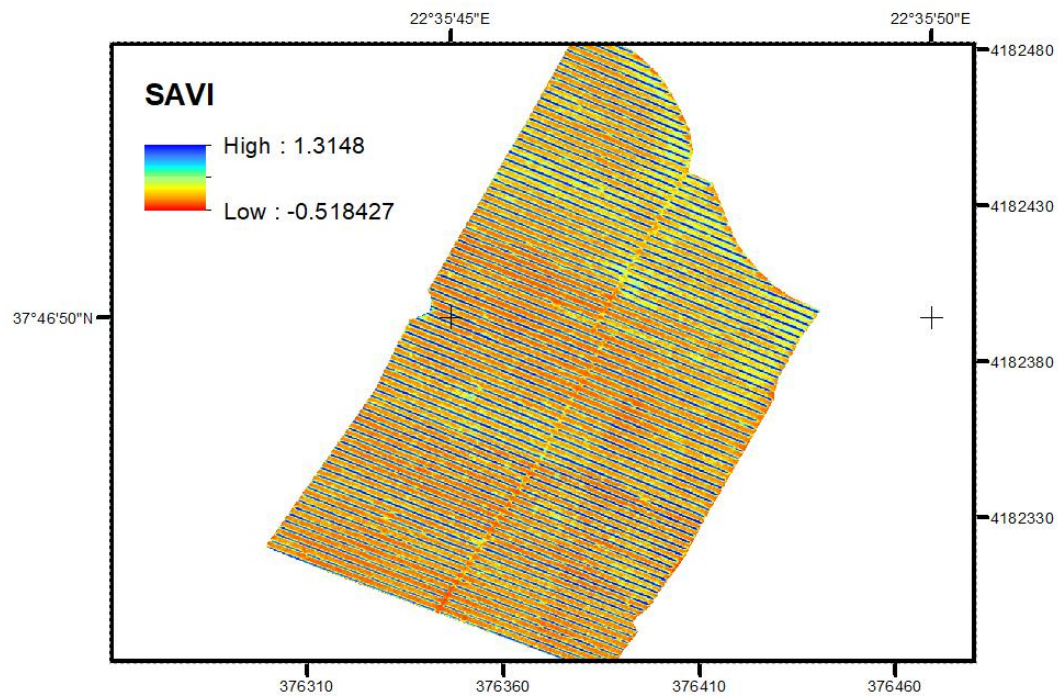
Εικόνα 103 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη NDRE, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)



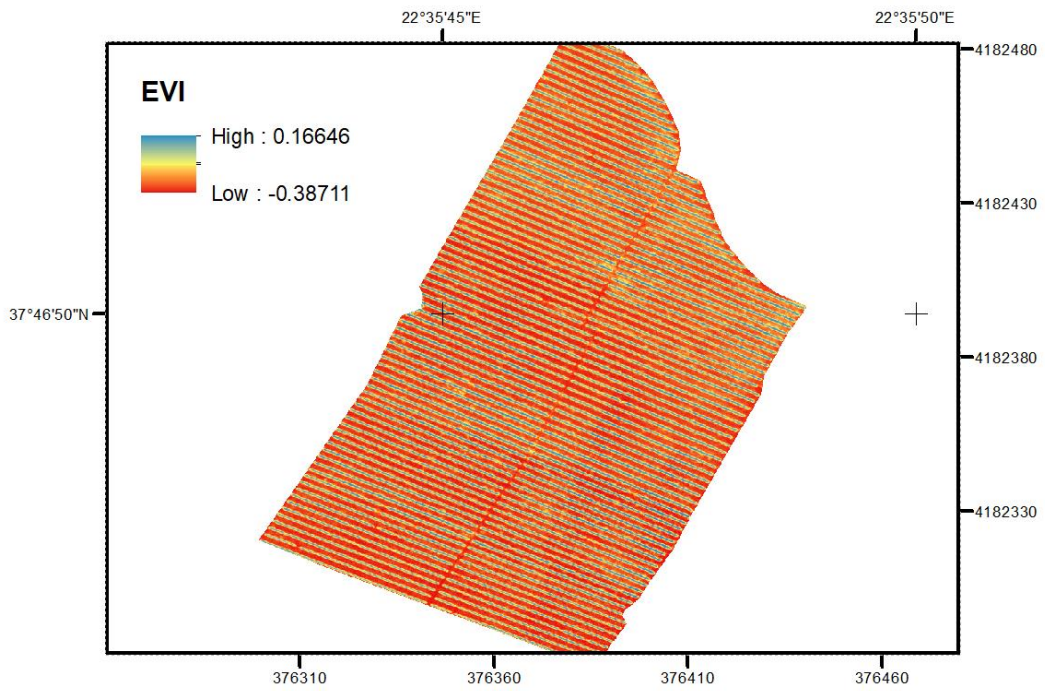
Εικόνα 104 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη GNDVI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)



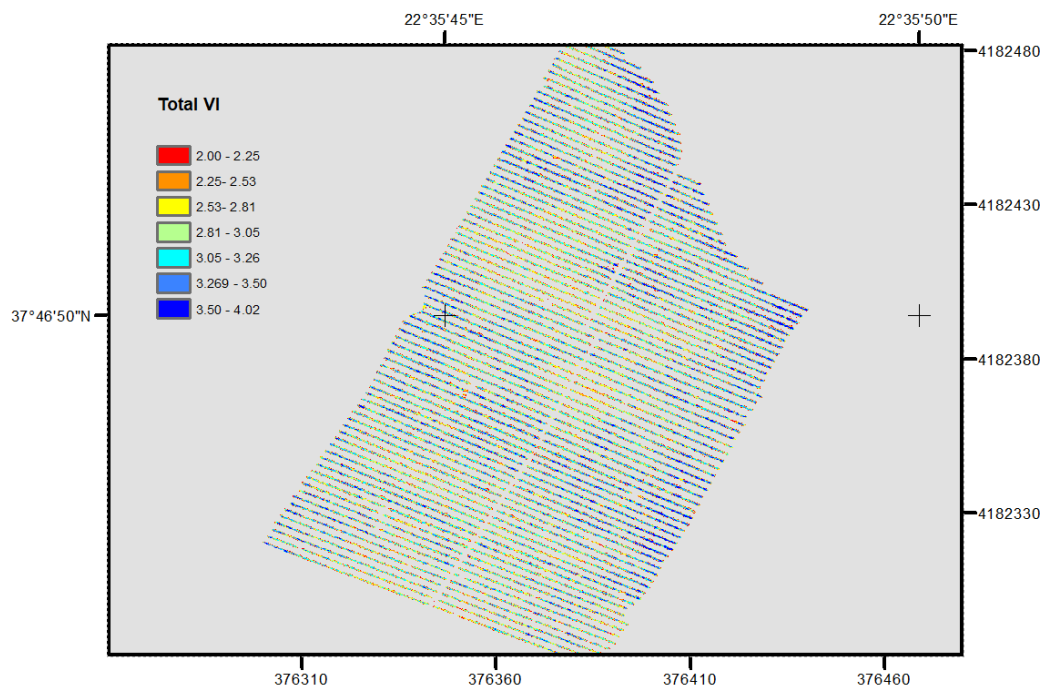
Εικόνα 105 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη GRVI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)



Εικόνα 106 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη SAVI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)

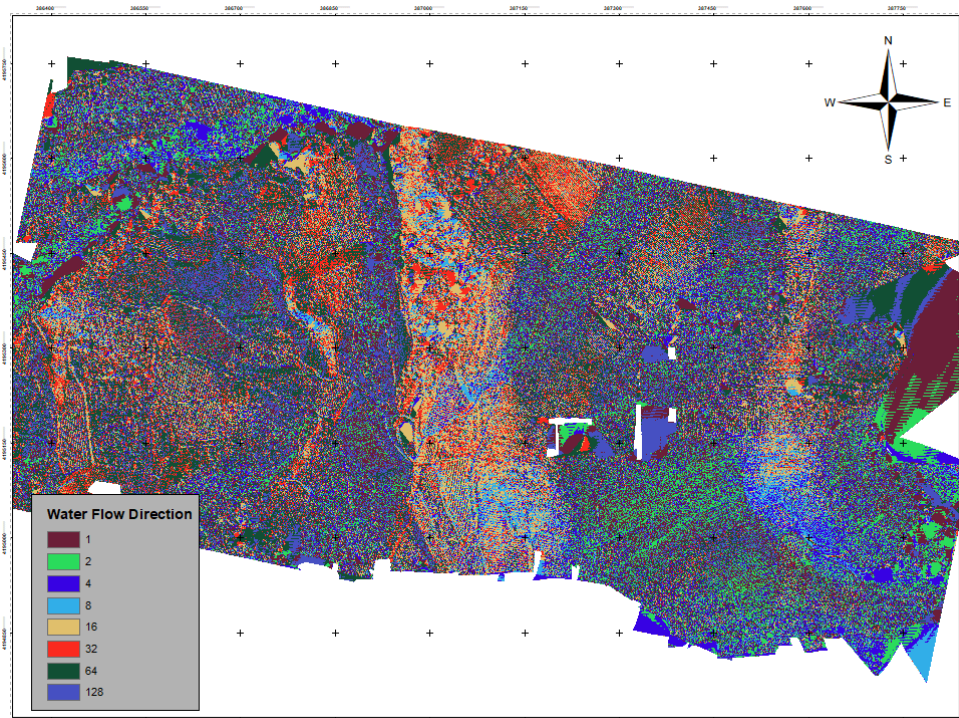


Εικόνα 107 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη EVI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)

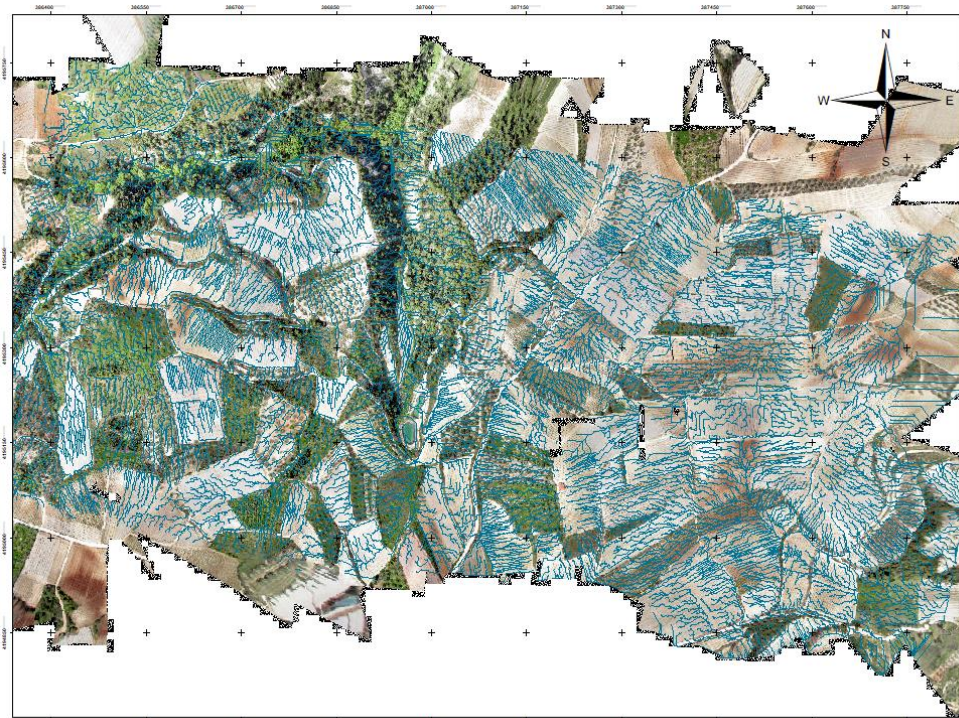


Εικόνα 108 Αποτέλεσμα υπολογισμού δείκτη Total VI, από αισθητήρα Parrot Sequoia (καλλιέργεια αμπέλου)

4.2.4 Αποτελέσματα Φωτογραμμετρικών υπολογισμών

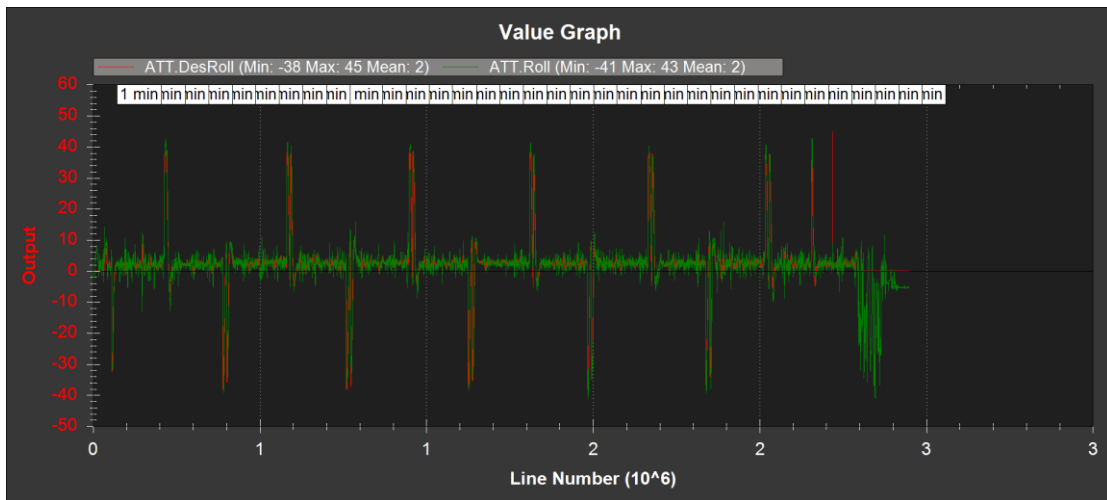


Εικόνα 109 Υπολογισμός ψηφιδωτού αρχείου(raster) διεύθυνσης ροής υδάτων, πηγή: ψηφιακό μοντέλο εδάφους, GSD:10cm, αισθητήρας Canon IXUS 160

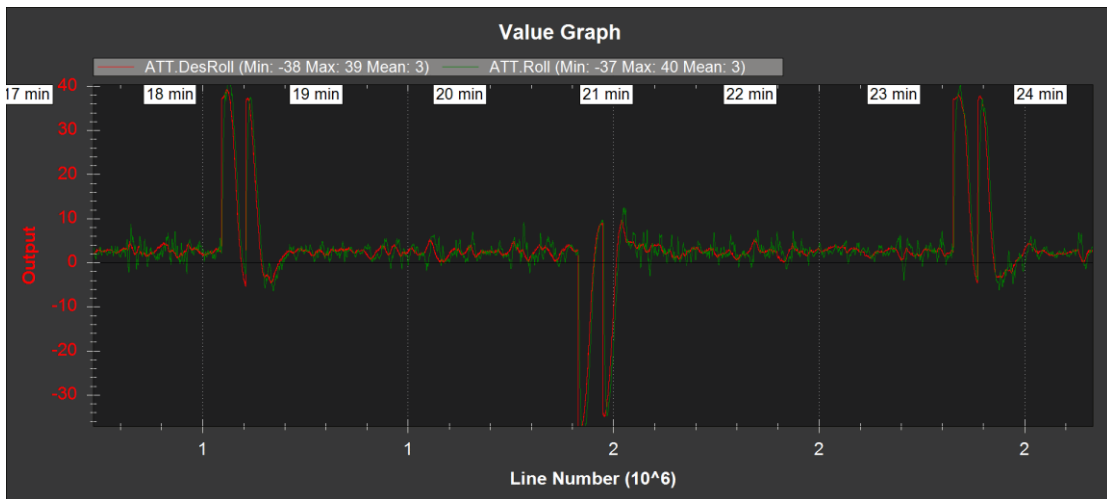


Εικόνα 110 Υπολογισμός διανυσματικών αρχείων, δικτύου ροής υδάτων.

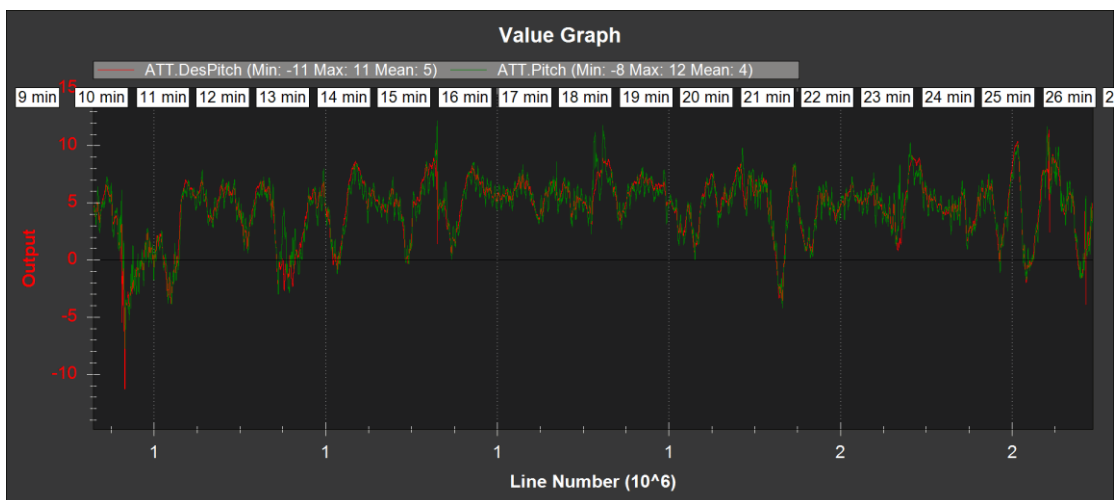
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ



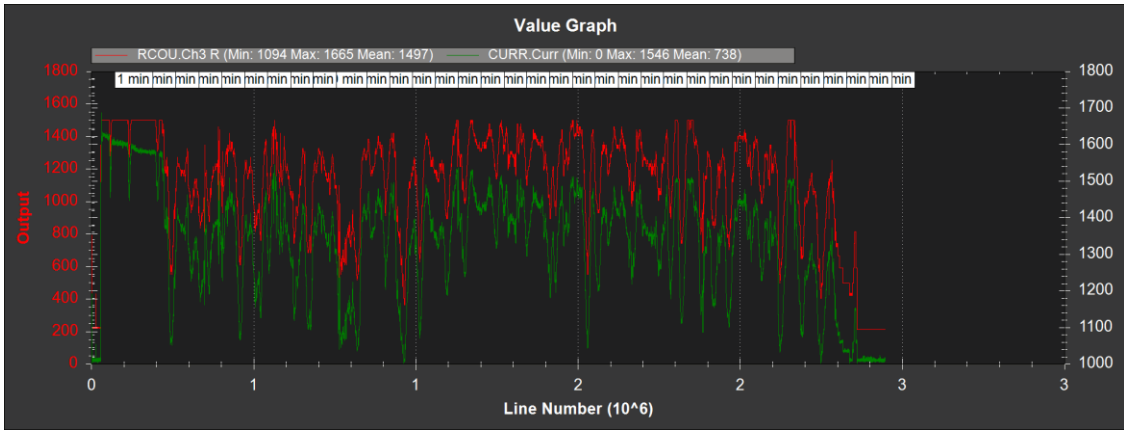
Διάγραμμα 20 Απόκριση πλοήγησης Roll



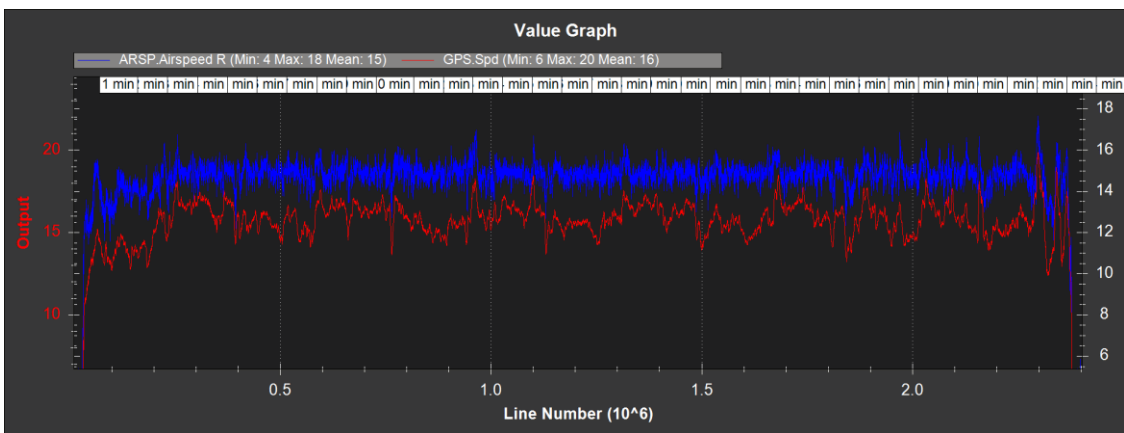
Διάγραμμα 21 Λεπτομέρεια απόκρισης Roll



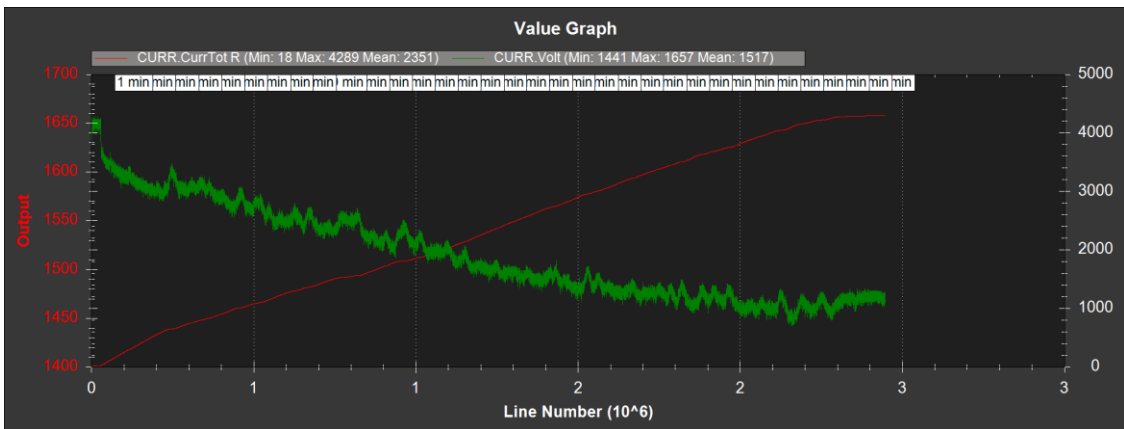
Διάγραμμα 22 Απόκριση πλοήγησης Pitch



Διάγραμμα 23 Ωσης και Κατανάλωσης

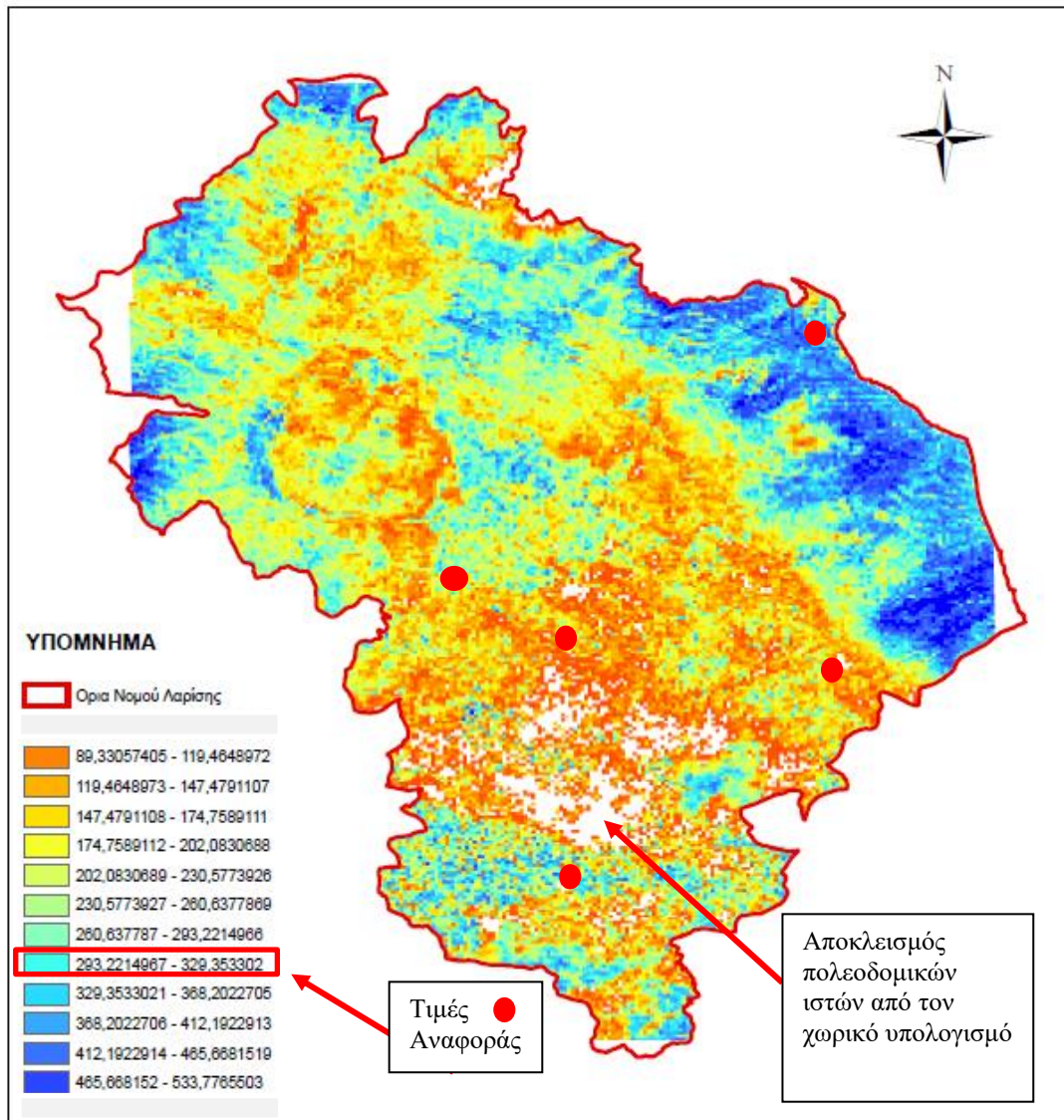


Διάγραμμα 24 Ταχύτητας αέρος και ταχύτητας εδάφους



Διάγραμμα 25 Συνολικής κατανάλωσης (mAh) και Volt στοιχείων συσσωρευτών Λιθίου Πολυμερούς(Li-po)

4.4 ΤΕΛΙΚΗ - ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Εικόνα 111 Παράδειγμα υπολογισμού του δυναμικού ρυθμού αύξησης ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) στη Λάρισα υποθέτοντας συνολική απώλεια αναπνοής ίση με 40%, με χωρική αποτύπωση (καλλιέργεια καλαμποκιού)(Ιούλιος 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.1.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων σημειακών μοντέλων

Για να κατανοήσουμε την υφιστάμενη μέθοδο προσομοίωσης δυναμικών παραγωγής, αντιπαραβάλαμε τιμές πρόβλεψης δυναμικών παραγωγής με συλλεχθείσες τιμές πεδίου κατά Danalatos 1993, παράδειγμα πίνακας 34, διάγραμμα 19. Επίσης, παρατίθενται οι θέσεις των παραπάνω πειραμάτων στο χάρτη αναφοράς μετρήσεων της εικόνας 52, ώστε να συγκριθούν με την προτεινόμενη μέθοδο.

Από τα αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι η υφιστάμενη μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή συσχέτιση μεταξύ των τιμών, ταχύτητα υπολογισμού και επαναληψιμότητα. Στον αντίποδα, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία, η υψηλή συσχέτιση απαιτεί εκτενή βαθμονόμηση για τον κάθε τύπο και σημείο καλλιέργειας. Επίσης, η πινακοποίηση των αποτελεσμάτων και η έλλειψη οπτικοποίησης του συνόλου της καλλιεργούμενης έκτασης δυσκολεύει την ερμηνεία τους. Δηλαδή, δεν μας γίνονται φανερές ιδιότητες όπως το ανάγλυφο, ο τύπος και το μέγεθος της συνολικής καλλιεργούμενης έκτασης, κατ' επέκταση πρόκειται για ιδιότητες που δεν χρησιμοποιούνται στην τελική αναγωγή των αποτελεσμάτων.

Συνοψίζοντας, τον πίνακα 19, την μέθοδο επίλυσης κεφ. 3.1.1 και τα αποτελέσματα κεφ. 4.1.1, παρατηρούμε, μια εξάρτηση από τις βιβλιογραφικές πηγές ώστε να μειωθεί το σφάλμα των παραγόμενων αποτελεσμάτων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την πηγή ολικής Ακτινοβολίας και μέγιστης διάρκειας ηλιοφάνειας, όπου οι τιμές μας δίδονται ανά 10° και απαιτούν παρεμβολή ανά 1° προκειμένου να γίνει ορθή τους χρήση. Ακόμη και έτσι το σφάλμα μέτρησης, αν αναχθεί χωρικά, ξεπερνά τα 100χλμ. (1° = 110.852χλμ), όπως θα δούμε και στην συνέχεια των αποτελεσμάτων.

5.1.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων χωρικών μοντέλων

Στη μεθοδολογία, αναλύθηκε η σημαντικότητα της μετατροπής των περιβαλλοντικών δεδομένων, σε μοντέλα επιφανείας. Το γεγονός επιβεβαιώνεται, από την ΕΜΥ, με την πρόσφατη δημιουργία Κλιματικού Άτλαντα, που αποδίδει, χωρικά τα κλιματικά δεδομένα βλ. εικόνα 59. Ωστόσο, μας γίνεται άμεσα ορατή, η διαφορά στην χωρική

διακριτικότητα του διδόμενου μοντέλου επιφανείας καθώς και την υψομετρική διόρθωση που προέρχονται από διαφορετικές πηγές ψηφιακού μοντέλου εδάφους βλ. εικόνα 57, 58. Οι διαφορές μας γίνονται ορατές στην εικόνα 60, όπου σε σχετικά επίπεδη περιοχή μελέτης με χαμηλό υψόμετρο (4 – 30μ), η υψηλή χωρική διακριτικότητα (GSD=5cm), μας καθιστά ορατές ελάχιστες υψομετρικές διαφορές όπως το ύψος των φυτών και τα σημάδια άροσης των καλλιεργητικών μηχανών.

Στο κεφ. 3.1.1, γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη μέθοδο προσομοίωσης δυναμικών παραγωγής. Επίσης στο κεφ. 5.1.1 τονίσθηκε η αδυναμία της υπάρχουσας μεθόδου να διακρίνει παράγοντες που επηρεάζουν τις παραπάνω μεταβλητές όπως το έντονο ανάγλυφο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εικόνες 61, 62 και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί ολικής ακτινοβολίας για την ίδια περίοδο σε σύγκριση με την μέθοδο κεφ. 4.1.1, Πίνακας 17, εξίσωση (4). Στην εικόνα 61, όπου η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ήπιο ανάγλυφο, παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ταυτίζονται με εκείνες του υπολογιστικού μοντέλου, ωστόσο ακόμη και σε αυτό το παράδειγμα παρατηρούνται περιοχές με διαφορές που αγγίζουν το 19% ($3,534 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$ έναντι $\text{max } 4,255 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$). Στο επόμενο παράδειγμα της εικόνας 62, όπου η περιοχή μελέτης έχει έντονο ανάγλυφο, παρατηρούμε ότι για το ίδιο γεωγραφικό πλάτος σε απόσταση μόλις 50 μέτρων, έχουμε αποκλίσεις της τάξης του 45%, ($5,223 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$ έναντι $3,601 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$), ενώ με το υπολογιστικό μοντέλο παρατηρούμε αποκλίσεις έως 37% ($4,945 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$ έναντι $3,601 \text{ J} \times 10^6/\text{m}^2$).

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του κεφ. 4.1 παρατηρούμε ότι μετατροπή των δεδομένων σε μοντέλα επιφανείας με την χρήση υποβάθρων υψηλής χωρικής διακριτικότητας, σε Γ.Σ.Π. υπερτερεί σημαντικά, αφού:

- Υπολογίζει με ακρίβεια την προσπίπτουσα και λανθάνουσα ακτινοβολία με μέγεθος εικονοστοιχείου την απαιτούμενη εξαγόμενη κλίμακα, καθώς επίσης υπολογίζει της κλίσεις του εδάφους της μελετώμενης περιοχής.
- Αποτυπώνει χωρικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα π.χ. σε μορφή χάρτη, φυτευτικού συνδέσμου, φατνία καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων κλπ. καθιστώντας ευκολότερη την ερμηνεία τους.
- Ο προσδιορισμός των τιμών των κλιματικών δεδομένων δεν έγινε με την χρήση στατιστικής, ούτε τροφοδότησαν αυτούσια το μοντέλο μας, σε αντίθεση με την

- υφιστάμενη μέθοδο, τα κλιματικά δεδομένα προσδιορίστηκαν ξεχωριστά για κάθε φαντίο με τη μέθοδο Kriging, ελαχιστοποιώντας την απόκλιση.
- Απέδωσε τα αποτελέσματα από σημειακό επίπεδο σε μοντέλο επιφανείας καθιστώντας ικανό να υπολογισθούν πολύ περισσότερες των μια περιοχών τη φορά.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

5.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων αισθητήρων χαρτογράφησης

5.2.1a Ανάλυση αποτελεσμάτων αισθητήρα Canon Ixus 160 & Maxmax Ixus 160 NIR

Οι αισθητήρες canon & Maxmax, Ixus 160, αποτέλεσαν την βάση της πειραματικής μας διαδικασίας για συλλογή τηλεπισκοπικών δεδομένων στο ορατό και κοντινό υπέρυθρο φάσμα.

Οι αισθητήρες όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα (βλ. πίνακα 35), για χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής μελέτης, μας παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε χωρική διακριτικότητα. Επίσης το αποτέλεσμα αλληλεπίθεσης των δύο αισθητήρων χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια και κρίνεται επαρκές για την παραγωγή βασικών δεικτών βλάστησης (εικόνα 63).

Συγκρινόμενοι με τις κύριες πηγές τηλεπισκοπικής πληροφορίας, μας παρέχει σαφέστατα καλύτερη πληροφορία (βλ. εικόνες 70-72)

Όπως παρατηρούμε από τους πίνακες και τα διαγράμματα του κεφ. 4.2.1a, ο συνδυασμός των αισθητήρων canon & Maxmax Ixus 160 με τον δέκτη GPS Ublox LEA-6h, καθώς και την χρήση time interval για την εντολή φωτοληψίας, παράγει σημαντικά σφάλματα στην γεωαναφορά. Συγκεκριμένα από την εικόνα 67 και τον πίνακα 37, παρατηρούμε μέσους όρους συνολικού σφάλματος θέσεως φωτοληψιών τα 7,47μ. το οποίο βρίσκεται εντός των ονομαστικών προδιαγραφών του αισθητήρα GPS όπως ήταν αναμενόμενο.

Η γεωαναφορά με χρήση φωτοσταθερών σημείων από υπόβαθρο ορθοφωτοχάρτη της υπηρεσίας Google Earth, μειώνει αισθητά τα παραπάνω σφάλματα (βλ. Πίνακα 39), ωστόσο η απόλυτη γεωαναφορά, είναι ανάλογη του σφάλματος και της χωρικής

διακριτικότητας που παρέχεται από την υπηρεσία. Ο τελικός μέσος όρος του συνολικού σφάλματος των 1,9μ, κρίνεται επαρκής για την χρήση των δεδομένων για φυτά μεγάλης καλλιέργειας, όπου η μέση καλλιεργούμενη έκταση είναι της τάξης του ενός τετρ. Χιλιομέτρου και οι καλλιεργητικές πρακτικές δεν απαιτούν μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια (Καλλιεργητικές μηχανές, άρδευση, άροση κτλ.).

Τέλος, παρατηρείται η απουσία ραδιομετρικής διόρθωσης όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 3.2.1, έχει ως συνέπεια την έλλειψη δυνατότητας συγκρίσιμων αποτελεσμάτων με την διεθνή βιβλιογραφία και τους δορυφορικούς δέκτες.

5.2.1b Ανάλυση αποτελεσμάτων αισθητήρα Parrot Sequoia

Ο πολυφασματικός αισθητήρας Parrot Sequoia, αποτέλεσε σημαντική αναβάθμιση στην ραδιομετρική ικανότητα συλλογής δεδομένων. Επίσης στην πειραματική διαδικασία προστίθενται η αναβάθμιση του δέκτη GPS, και η συλλογή των θέσεων φωτοσταθερών σημείων με δέκτη GPS RTK.

Από τον πίνακα 40 σε σχέση με τον πίνακα 35, παρατηρούμε άμεσα, την χαμηλότερη χωρική διακριτικότητα που προσφέρει ο αισθητήρας. Το γεγονός απαιτεί πτήσεις σε χαμηλότερο υψόμετρο, ωστόσο ο ευρυγώνιος φακός διατηρεί το αποτύπωμα καταγραφής, κατ' επέκταση την συνολική καταγραφόμενη έκταση/πτήση χωρίς να παρατηρούνται σφάλματα διαστροφής σε σχέση με τον αισθητήρα Canon Ixus 160 (βλ. εικόνες 66,79 και πίνακες 36,41).

Από τα αποτελέσματα των θέσεων των φωτοληψιών, παρατηρούμε την σημαντική μείωση των σφαλμάτων εξ αιτίας του νέου δέκτη GPS και της μεθόδου Triggering. Πιο συγκεκριμένα από την εικόνα 80 και τον πίνακα 42 εξάγουμε μέσους όρους συνολικού σφάλματος θέσεως φωτοληψιών τα 1,14μ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντική μείωση των σφαλμάτων είχε ως αποτέλεσμα την ταχύτερη επίλυση των δεδομένων στο στάδιο της αρχικής ευθυγράμμισης των φωτοληψιών (alignment) στο λογισμικό επεξεργασίας Agisoft Metashape.

Εξίσου σημαντική ήταν η αναβάθμιση της μεθόδου λήψης των θέσεων των φωτοσταθερών σημείων με την χρήση δέκτη RTK GPS. Αναλυτικά, από την εικόνα 81 και τον Πίνακα 43, παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος απόλυτου σφάλματος μειώθηκε εντυπωσιακά στα 2,21εκ. γεγονός που επιτρέπει υψηλή χωρική ακρίβεια σε καλλιέργειες

με απαιτήσεις υψηλής διαφοροποίησης και καλλιεργητικών πρακτικών όπως καλλιέργειες αμπέλου που φαίνονται στο παράδειγμα.

Η μεγάλη διαφορά του αισθητήρα, παρατηρείται στην ραδιομετρική του ικανότητα και την δυνατότητα βαθμονόμησης. Όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 3.2.1 πίνακας 22, η δειγματοληψία του αισθητήρα αποθηκεύεται με βάθος χρώματος σε δυαδικά ψηφία 12bit γεγονός που αυξάνει δραματικά την περιεχόμενη πληροφορία. Επίσης το γεγονός ύπαρξης αισθητήρα προσπίπτουσας ακτινοβολίας και στόχου βαθμονόμησης (εικ. 82) μειώνουν σημαντικά τον θόρυβο κατά την ανάλυση των συλλεχθέντων δεδομένων (βλ. εικόνες 84,85) και καθιστούν τα δεδομένα συγκρίσιμα.

5.2.1c Ανάλυση αποτελεσμάτων αισθητήρα Modified Sony APS-C

Από τα αποτελέσματα των πολυφασματικών αισθητήρων, μας έγινε κατανοητή η ανάγκη αναβάθμισης της χωρικής διακριτικότητας. Επίσης αναφέρθηκαν στο κεφ. 3.2.1 τα οφέλη των αισθητήρων τύπου mirrorless και η ευελιξία που προσφέρουν σε περιβάλλοντα με υψηλή ποικιλομορφία βλάστησης, ανάγλυφου κ.α.

Από τους πίνακες 46 και 48, παρατηρούμε ότι, διατηρούνται τα μειωμένα σφάλματα, και οι υψηλές χωρικές ακρίβειες που οφείλονται στον αναβαθμισμένο δέκτη GPS και μέθοδο συλλογής θέσεως των φωτοσταθερών σημείων με την μεγάλη διαφορά να εντοπίζεται στον πίνακα 44, όπου παρατηρούμε ότι η χωρική διακριτικότητα βελτιώθηκε σημαντικά (GSD=2.01cm) από ύψος πτήσης 160μ. Η υψηλή χωρική διακριτικότητα σε συνδυασμό με το αυξημένο αποτύπωμα μας επιτρέπουν μεγαλύτερη έκταση καταγραφής/πτήση.

Επίσης η φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων με διακριτική ικανότητα σε επίπεδο φύλλου, μας παρέχει την δυνατότητα να προβούμε σε περαιτέρω γεωμετρικές αναλύσεις όπως ο υπολογισμός του δείκτη LAI.

5.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων περιβαλλοντικών αισθητήρων

Στο κεφάλαιο 3.2.3, αναφερθήκαμε στην καταγραφή και αξιοποίηση των δεδομένων των αισθητήρων της μονάδας αυτόματου πιλότου, ώστε:

- Να συγκρίνουμε τις τιμές του κλιματικού άτλαντα
- Να κατανοήσουμε την επίδραση του μικροκλίματος στην καλλιέργεια.

Ακολουθώντας την ίδια μέθοδο χωρικής παρεμβολής, επεξεργασθήκαμε τα δεδομένα θερμοκρασίας, ταχύτητας αέρα και βαρομετρικής πίεσης που συλλέγονται από την εναέρια πλατφόρμα κατά την πτήση.

Όπως παρατηρούμε από τις εικόνες 97 και 98, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ταυτίζονται με τα δεδομένα του κλιματικού άτλαντα. Στην εικόνα 97, παρατηρούμε μια σημαντική διαφοροποίηση που οφείλεται στην κλήση της υπό μελέτης περιοχής ως προς τους επικρατείς ανέμους (βλ. εικ. 24) και γίνεται ορατή με αυτή την μέθοδο. Κατ' επέκταση μπορούμε να αξιοποιήσουμε την διαφορά των θερμοκρασιών για την εξαγωγή χαρτών αντιστάθμισης (offsets) για την διόρθωση των δεδομένων που παρέχονται από τον κλιματικό άτλαντα.

Μικρότερης σημασίας για τον προσδιορισμό των δυναμικών παραγωγής, ωστόσο εξίσου σημαντική για την κατανόηση του μικροκλίματος και των καλλιεργητικών πρακτικών, αποτελούν τα αποτελέσματα σχετικής υγρασίας (βλ. εικόνα 99), όπου παρατηρούμε υψηλές διαφοροποιήσεις, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην μέθοδο άρδευσης και την κάλυψη ή μη της έκτασης από βλάστηση, που δημιουργούν έντονες «νησίδες» εναλλαγών σχετικής υγρασίας σε μια περιοχή με σχετικά χαμηλό ανάγλυφο.

5.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων δεικτών βλάστησης

Στο κεφάλαιο 3.2.4, αναφέρθηκε η σημαντικότητα των δεικτών βλάστησης, αφενός για την χρήση τους στο υπολογισμό προσδιορισμού των δυναμικών παραγωγής, αφετέρου στην δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πληροφόρησης της υπό μελέτης περιοχής, με ευκολία ερμηνείας, λόγω της χωρικής και οπτικοποιημένης αναπαράστασης των δεδομένων με την μορφή χαρτών.

Από τα αποτελέσματα του κεφ. 4.2.3a παρατηρούμε, ότι ο δείκτης βλάστησης NDVI (βλ. εικόνα 100) που υπολογίστηκε με πρωτογενή δεδομένα των αισθητήρων Canon Ixus 160 (Red Band) και MaxMax Canon Ixus 160 (NIR Band), μας παρέχει επαρκή πληροφόρηση για την κατάσταση των καλλιεργειών και σε συνδυασμό με την υψηλή χωρική διακριτικότητα, μας γίνονται ορατά φαινόμενα όπως η φθορά επιφανείας εδάφους που έχει προκληθεί από απορρέοντα ύδατα, σε συνδυασμό με την συχνή βαθιά άρδευση που πραγματοποιούν οι αγρότες στην περιοχή. Οι παραπάνω φθορές, όπως και η άρδευση με υψηλή καταιόνηση (κανονάκι), μαρτυρούν την αλόγιστη χρήση πόρων όπως το νερό και προκαλούν αρνητικά αποτελέσματα στην παραγωγή.

Στα προηγούμενα κεφάλαια, αναφέρθηκαν οι περιορισμοί της έλλειψης ραδιομετρικής διόρθωσης των δεδομένων που λαμβάνονται με τους παραπάνω αισθητήρες. Έτσι, οι υπόλοιπες δειγματοληψίες και κατ' επέκταση ο υπολογισμός των δεικτών βλάστησης, έγινε με δεδομένα του αισθητήρα Parrot Sequoia (κεφ. 4.2.3b).

Όπως παρατηρούμε στις εικόνες 101-107, η υψηλή ραδιομετρική ικανότητα προσδίδει στα αποτελέσματα, ικανή διαφοροποίηση για τον εντοπισμό προβλημάτων και ταυτοποίηση του αντίκτυπου των καλλιεργητικών πρακτικών. Επίσης η ραδιομετρική διόρθωση, μας επιτρέπει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με βιβλιογραφικά στοιχεία και ταχύτερη ανάλυση τους.

Όσον αφορά τον δείκτη LAI, (βλ. εικόνα 101), παρατηρούμε την υψηλή σημειακή διαφοροποίηση και κατ' επέκταση την επιρροή της, στον υπολογισμό προσδιορισμού δυναμικών παραγωγής.

Τέλος, όσον αφορά τον συνολικό δείκτη βλάστησης, από την εικόνα 108, παρατηρούμε ότι ακόμη και σε καλλιέργειες εντατικής φροντίδας με χαμηλή παραλλακτικότητα, μας γίνονται ορατές ακόμη και οι παραμικρές διαφοροποιήσεις στις καλλιεργητικές πρακτικές όπως η άρδευση χωρίς παρατήρηση με όργανο (π.χ. τενσιόμετρο) και η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών σκευασμάτων χωρίς την χρήση καλλιεργητικών μηχανών, γεγονότα που χαρακτηρίζουν την καλλιέργεια αμπέλου στην περιοχή της Νεμέας.

5.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων φωτογραμμετρικών υπολογισμών

Στο κεφάλαιο 4.2.4, μας δίδονται παραδείγματα περαιτέρω αξιοποίησης των τηλεπισκοπικών δεδομένων, όπως ο υπολογισμός διεύθυνσης ροής υδάτων (εικ. 109) και ο υπολογισμός διανυσματικών αρχείων, δικτύου ροής υδάτων (εικ. 110), όπου μπορούν να μας βοηθήσουν στην ορθή εγκατάσταση του δικτύου άρδευσης (Hatzopoulos et al., 2017), για ελαχιστοποίηση των απωλειών ύδατος, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην σύγχρονη ΚΑΠ και την πιστοποίηση διασφάλισης ποιότητας τροφίμων (EU Water Framework Directive). Επίσης τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να συμβάλουν στην πρόληψη φαινομένων όπως η φθορά επιφανείας εδάφους που μπορεί να προκληθεί από απορρέοντα ύδατα (Tomanis et al., 2017) .

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Στα αποτελέσματα του κεφ. 4.3, αναφέρουμε τις επιδόσεις του συστήματος πλοήγησης, την ρύθμιση της μονάδας αυτόματου πιλότου και την επίτευξη των στόχων του φακέλου πτήσης, για την αδιάλειπτη και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων, που αποτελούν το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας.

Από τα διαγράμματα 20-22, παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής σταθεροποίησης (ATT.ROLL,PITCH), διατηρεί το αερόχημα εντός των προβλεπόμενων ορίων κλίσεως (Roll: °45, Pitch: ±°12) και παράλληλα, παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα ακόμη και σε κατάσταση έντονων εναλλαγών διεύθυνσης που απαιτούνται κατά την πτήση καταγραφής σε σχέδιο lawn mower pattern. Τα παραπάνω μας δείχνουν ότι έχουν ρυθμιστεί ορθά οι ελεγκτές σταθεροποίησης (βλ. σχήματα 9-11).

Επίσης, από τα παραπάνω διαγράμματα (20-22), παρατηρούμε ότι οι τιμές ATT.Des.ROLL,PITCH, δηλαδή οι επιθυμητές τιμές (desired) πλοήγησης ακολουθούνται χωρίς αποκλίσεις από τις τιμές (ATT.ROLL,PITCH) (Actual Attitude), που μας δείχνει ότι ο ελεγκτής πλοήγησης L1 (σχήμα 12-13), έχει ρυθμιστεί πολύ ικανοποιητικά.

Τέλος από τα διαγράμματα 23-25, παρατηρούμε ότι η διαχείριση ώσης από την μονάδα αυτόματου πιλότου (RCOU.ch3) διατηρεί την κατανάλωση σε πολύ χαμηλά επίπεδα (CURR.Curr) δηλαδή Current, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει πολύ υψηλή

αποδοτικότητας 38gr/Watt. Παράλληλα παρατηρούμε από τις τιμές ταχύτητας αέρος (ARSP.Airspeed) και ταχύτητα εδάφους (GPS.Speed), ότι η παραπάνω αποδοτικότητα συνοδεύεται από σταθερότητα στη διατήρηση ταχύτητας πτήσεως, όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 3.3.6.b2 στην ρύθμιση του ελεγκτή συστήματος ελέγχου ολικής ενέργειας TECS. Τα παραπάνω μας εξασφαλίζουν, ομοιογένεια στα συλλεχθέντα δεδομένα και τις συνθήκες φωτοληψίας καθώς επίσης, επίτευξη των στόχων του φακέλου και δειγματοληψία μεγάλων εκτάσεων. Όπως, παρατηρούμε από το διάγραμμα 25, η συνολική καταναλωθείσα ενέργεια (CURR.Current total) δεν ξεπέρασε τα 4300 mAh, επί συνόλου 8500 mAh, για πτήση διάρκειας 1ώρας. Πράγμα που σημαίνει ότι η πλατφόρμα μας είναι ικανή να χαρτογραφήσει εκτάσεις άνω των 10τετρ.χιλιομέτρων/πτήση, που μπορεί να αυξηθεί σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται υψηλή χωρική διακριτικότητα.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ-ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την εικόνα 111, παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός του προσδιορισμού δυναμικών παραγωγής, μέσω γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με τα δεδομένα του κεφ.4.1.1 και παράλληλα η χωρική απόδοση σε μορφή χάρτη μας επιτρέπει την ταχύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Μας γίνεται εμφανής η διαφοροποίηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων ίδιου γεωγραφικού πλάτους, που οφείλονται στις εναλλαγές των κλιματικών παραγόντων και του ανάγλυφου της περιοχής.

Παράλληλα η μέθοδος χωρικού υπολογισμού, παρέχει ταυτόχρονη και ταχύτατη επίλυση στο σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων έναντι τη σημειακής επίλυσης.

Τέλος, μας παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής ζωνών αποκλεισμού με βάση την χρήση της από την διαδικασία υπολογισμού, όπως ο αποκλεισμός των περιοχών με πολεοδομικό ιστό στο παράδειγμα της εικόνας 111.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρήσαμε ότι με τη χρήση της εναέριας πλατφόρμας, τα πρωτογενή δεδομένα και τα προϊόντα που παράγονται απευθύνονται και χρησιμοποιούνται στους τομείς της πρωτογενούς παραγωγής (γεωργία, δασοπονία), των υπηρεσιών (σύνθετα ψηφιακά δεδομένα τοπογραφίας, κτηματογράφησης, καταγραφής περιβαλλοντικών συνθηκών) και έρευνας (διαχείριση περιβάλλοντος, έλεγχος χλωρίδας και πανίδας). Λόγω των πολλαπλών εφαρμογών και της ευελιξίας ως πλατφόρμας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σε πολλούς τομείς με ελάχιστες αλλαγές και χαμηλό κόστος.

Στον αγροτικό τομέα η ανάγκη για καταγραφή και πιστοποίηση της παραγωγής γίνεται όλο και πιο επιτακτική, βάσει των επιταγών του FAO για τους στόχους της εκατονταετίας καθώς και της ευρωπαϊκής (και συνακολούθως της εθνικής) νομοθεσίας για την παραγωγή Επαρκών, Υγιεινών και Ασφαλών τροφίμων.

Με την συνεχή καταγραφή και μοντελοποίηση, δίνεται η δυνατότητα να αντιστρέψουμε την υπερλίπανση προς όφελος των υφιστάμενων καλλιεργειών τόσο σε ποιοτική αναβάθμιση των προϊόντων (αμπελουργία) όσο και σε ποσοτική (ΦΜΚ). Έτσι θα παρέχεται η δυνατότητα σε αγρότες να αξιοποιήσουν κάθε διαθέσιμο πόρο και να επανέλθουν στην ενεργό παραγωγή χωρίς την ανάγκη επιδοτήσεων και με αγροτικά προϊόντα σύμφωνα με τα τελευταία πρότυπα πιστοποίησης.

Τα δεδομένα που παράγει η πλατφόρμα αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, που η σημερινή τους απόκτηση, απαιτεί συνεργασία διαφορετικών επιστημονικών ή επαγγελματικών ειδικοτήτων. Έτσι η υψηλή διεπιστημονικότητα της, προσφέρει πληροφορίες όπως: τις ανάγκες της λίπανσης κάθε φυτού, την πρόοδο και την προσδοκώμενη ποιότητα της παραγωγής, προτάσεις για την επίτευξη πιστοποιημένης παραγωγής και ποιότητας στα πλαίσια της GAP, τοπογραφικό διάγραμμα με συντεταγμένες συμβατές με το Εθνικό Κτηματολόγιο και άλλες υπηρεσίες.

6.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ

6.2.1 Οικονομικά οφέλη και ο αντίκτυπος της διατριβής στην αγροτική παραγωγή

Όλο και συχνότερα βιώνουμε την ανάγκη για μικρότερο κόστος παραγόμενης πληροφορίας. Το κόστος πτήσης ενός ΣμηΕΑ είναι μηδαμινό και το μόνο που απαιτεί είναι την φυσική παρουσία του αεροσκάφους, σε αντίθεση με το κόστος αεροφωτογράφισης από επανδρωμένο αεροσκάφος. Συγκριτικά δε με τις δορυφορικές εικόνες, η παραγόμενη εικόνα είναι πολύ υψηλότερης ανάλυσης, δεν υπάρχει ο φόβος της νεφοκάλυψης και μπορεί να επαναληφθεί σε οποιαδήποτε στιγμή.

Η χρήση λογισμικού ανοιχτού κώδικα, υλικών και αισθητήρων COTS και η αποφυγή ακριβού λογισμικού σε όλα τα βήματα της καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων (αεροσκάφος, σταθμός εδάφους, post-processing) μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά κόστη.

6.2.2 Πρωτοτυπία της διατριβής

Η πρωτοτυπία της διατριβής έγκειται:

Α. Στο γεγονός ότι για πρώτη φορά, μετατρέπεται ο σημειακός προσδιορισμός αύξησης δυναμικών παραγωγής σε χωρικό. Συνεπώς διευκολύνεται η ερμηνεία, λόγω της χωρικής και οπτικοποιημένης αναπαράστασης των δεδομένων με την μορφή χαρτών. Επίσης συνδέεται και παρέχεται με μια ολοκληρωμένη πληροφόρηση δεικτών και άλλων παραγόντων που απαιτούνται στην εφαρμογή γεωργίας ακριβείας. Τέλος, είναι εφικτή η συσχέτιση της παρούσας κατάστασης της καλλιέργειας και η μοντελοποίηση της προσδοκώμενης παραγωγής.

Η αναγνώριση της πρωτοτυπίας αποδεικνύεται από την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας σε:

- Τέσσερα μνημόνια συνεργασίας (MoU) έρευνας, που συστήθηκαν με: α. με τους μεγαλύτερους αμπελοκαλλιεργητές της χώρας μας (Κτήμα Σκούρας, Κτήμα Άλφα) και β. την Ένωση καλλιεργητών καλαμποκιού Νιγρίτας Σερρών

- Δύο σφραγίδες αριστείας (Seal of Excellence) Έρευνας και Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στα πλαίσια του προγράμματος Horizon 2020 SME instrument phase 1 & 2, συνολικού προϋπολογισμού 4,5εκ €. (project proposal 806537).

B. Στη σχεδίαση και κατασκευή ενός Συστήματος μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους κατάλληλου για συλλογή τηλεπισκοπικών δεδομένων και με ικανό φάκελο πτήσης να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις καιρικών συνθηκών, ποικιλομορφία αναγλύφου-κατακερματισμού γης και έκτασης. Ως ολοκληρωμένο σύστημα παρέχει πληθώρα μεθόδων διασύνδεσης, και αποθήκευσης των δεδομένων. Τέλος, η υψηλή διασυστηματικότητα του, προσδίδει πολλούς βαθμούς αναλυτικής ελευθερίας. Αποδεδειγμένα (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1) το σύστημα, το οποίο ονομάσαμε «Phoreas», κατέχει τον μεγαλύτερο αριθμό καταγεγραμμένων εκτάσεων με ΣμηΕΑ Παγκοσμίως (>500τετρ.χλμ.) και το μεγαλύτερο αριθμό δειγματοληψίας (πτήσεις από Ν. Αφρική μέχρι τον Αρκτικό κύκλο) σε σύνολο 3000 ωρών πτήσης για καταγραφή αγροτικών εκτάσεων. Επίσης, το αερόχημα Phoreas UAS και η μεθοδολογία συλλογής δεδομένων, υποστηρίζει σήμερα 34 επιστημονικά ιδρύματα στην Ευρώπη. Τέλος, τα καινοτόμα πτητικά του χαρακτηριστικά και η μέθοδος κατασκευής, συνέβαλαν στην ανάπτυξη των ΣμηΕΑ, στην αμυντική βιομηχανία (ΚΕΤΕΣ 2011) και συμμετείχε σε εθνικές στρατιωτικές διακλαδικές ασκήσεις (Δικέφαλος Αετός 2012,2013, Παρμενίων 2013).

6.2.3 Συμβολή της διατριβής στην συνέχεια της έρευνας

Με την σύνδεση του υπολογισμού δυναμικών παραγωγής ξηράς ουσίας και την συσχέτιση των δεικτών βλάστησης με την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης, χωρίς τα σφάλματα και περιορισμούς που προέρχονται από τα δορυφορικά τηλεπισκοπικά δεδομένα, μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα ΣμηΕΑ για έγκαιρη πρόβλεψη εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Παρατηρήσαμε ότι τα δεδομένα που συλλέγονται και παράγονται καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες της διαχειριστικής περιόδου στο τομέα της πρόληψης. Όσον αφορά την καταστολή, η κατάρτιση νομοθετικού πλαισίου και η ένταξη των νέων τεχνολογιών στο επιχειρησιακό σχεδιασμό, θα επιτρέψουν την χρήση του ΣμηΕΑ ώστε να παρέχεται:

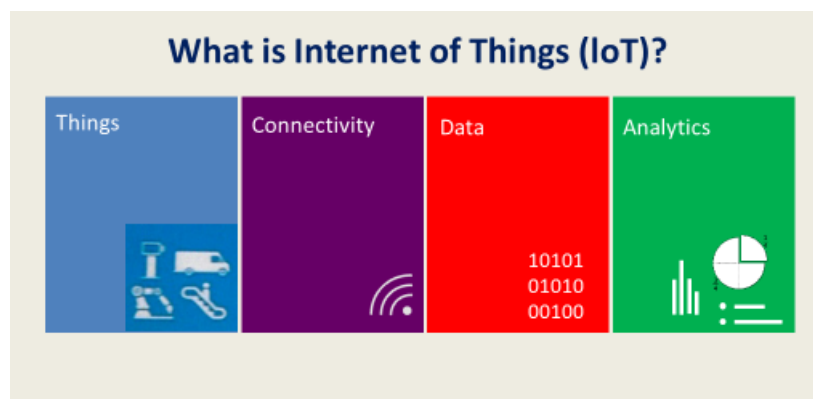
- Πραγματική εικόνα του μετώπου της πυρκαγιάς
- Ευχερέστερος συντονισμός των δυνάμεων επέμβασης
- Μειωμένο ρίσκο κατά τη λήψη απόφασης

- Δυνατότητα Επέμβασης κατά τη γένεση της πυρκαγιάς
- Έγκαιρος προσδιορισμός απαίτησης επαναδιάταξης ή και ενίσχυσης δυνάμεων
- Ασφάλεια προσωπικού και μέσων
- Ελάττωση του στρες των δυνάμεων κατάσβεσης

Επίσης, παρατηρούμε από την περαιτέρω αξιοποίηση των τηλεπισκοπικών δεδομένων, όπως ο υπολογισμός διεύθυνσης ροής υδάτων (εικ. 109) και ο υπολογισμός διανυσματικών αρχείων, δικτύου ροής υδάτων (εικ. 110), όπου μπορούν να μας βοηθήσουν στην ορθή εγκατάσταση του δικτύου άρδευσης, για ελαχιστοποίηση των απωλειών ύδατος, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην σύγχρονη ΚΑΠ και την πιστοποίηση διασφάλισης ποιότητας τροφίμων (EU Water Framework Directive). Επίσης τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να συμβάλουν στην πρόληψη φαινομένων όπως η φθορά επιφανείας εδάφους που μπορεί να προκληθεί από απορρέοντα ύδατα.

Η μηχανική μάθηση (machine learning), μπορεί να βελτιστοποιήσει την ταχύτητα βαθμονόμησης των γεωργικών παραμέτρων της καλλιέργειας που απαιτούνται για την επίλυση του προσδιορισμού δυναμικών παραγωγής και παράλληλα τον άμεσο υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Το σημαντικότερο εύρημα της διατριβής είναι, ότι μπορούμε να εισάγουμε όσες παραμέτρους απαιτούνται, χωρίς να προβούμε σε δραματική απλοποίηση μιας φυσικής λειτουργίας για την ανάλυση και μοντελοποίηση της. Η συνέχεια της έρευνας, καλείται να εμπλουτίσει τις πηγές δεδομένων και τις υπολογιστικές ρουτίνες.

Από την διδακτορική διατριβή παρατηρούμε ότι η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε ταυτίζεται με την δομή του Internet των πραγμάτων (Internet of Things).



Τα μη επανδρωμένα Συστήματα, αποτελούν τα πιο συνηθισμένα Things-«Πράγματα», αφού ως πλατφόρμες πολλαπλών και εναλλάξιμων αισθητήρων, έχουν την δυνατότητα

να βρεθούν σε οποιοδήποτε σημείο και χρονική στιγμή θέλουμε να πραγματοποιήσουμε μέτρηση. Ως ολοκληρωμένα συστήματα παρέχουν πληθώρα μεθόδων διασύνδεσης, και αποθήκευσης των δεδομένων. Τέλος, η υψηλή διασυστηματικότητα, τους προσδίδει πολλούς βαθμούς αναλυτικής ελευθερίας.

Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι ήδη συντελείται μία επανάσταση. Βρισκόμαστε στην αρχή της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης, της εποχής όπου ο ψηφιακός και ο υλικός κόσμος θα ενωθούν. Γνωρίζοντας ότι:

- οτιδήποτε μπορεί να μετρηθεί, να συνδεθεί και να ελεγχθεί θα γίνει μέσα στα επόμενα χρόνια,
- μια μηχανή δεν πρέπει να ρωτάει κάτι που δύναται να γνωρίζει μέσω αισθητήρων και
- ο άνθρωπος δεν θα πρέπει να εργάζεται σε κάτι το οποίο μπορεί να κάνει μια μηχανή

Τι σημαίνει αυτό για την σύγχρονη γεωργία και αμπελουργία;

Υπάρχουν στοιχεία που θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε ακόμα και σε ένα χώρο όπου η τέχνη και η παράδοση έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα από την τεχνολογία;

Ναι, σίγουρα ναι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Almhab, A., Busu, I., 2008. Estimation of Evapotranspiration with modified SEBAL model using Landsat-TM and NOAA-AVHRR images in arid mountains area. Proceedings - 2nd Asia International Conference on Modelling and Simulation, AMS 2008 350–355.
- Amekawa, Y., 2009. Reflections on the Growing Influence of Good Agricultural Practices in the Global South. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 22, 531–557.
- Ardupilot, 2019. Community: — ArduPilot documentation [WWW Document]. URL <http://ardupilot.org/ardupilot/> (accessed 1.19.19).
- Arnó, J., Del Moral, I., Escolà, A., Company, J., Masip, J., Sanz, R., Rosell, J.R., Martínez-Casasnovas, J.A., 2012. Mapping the Leaf Area Index In Vineyard Using a Ground-Based LIDAR Scanner. Proximal sensing in precision agriculture.
- Asner, G.P., Scurlock, J.M.O., A. Hicke, J., 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography* 12, 191–205.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13, 95–120.
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173.
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M.L., Bareth, G., 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39, 79–87.
- Black, T.A., Chen, J.-M., Lee, X., Sagar, R.M., 1991. Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand. *Canadian Journal of Forest Research* 21, 1020–1028.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., Gattelli, M., Candiago, S.,

- Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., Gattelli, M., 2015. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing* 7, 4026–4047.
- Cavallo, A., Cirillo, A., Cirillo, P., De Maria, G., Falco, P., Natale, C., Pirozzi, S., 2014. Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 19, 7585–7591.
- Cressie, N., 1988. Spatial prediction and ordinary kriging. *Mathematical Geology* 20, 405–421.
- Dafonte, J.D., Guitián, M.U., Paz-Ferreiro, J., Siqueira, G.M., Vázquez, E.V., 2010. Mapping of soil micronutrients in an european atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. *Bragantia* 69, 175–186.
- Danalatos, N., Archontoulis, S. V, 2004. POTENTIAL GROWTH AND BIOMASS PRODUCTIVITY OF KENAF (HIBISCUS CANNABINUS L .) UNDER CENTRAL GREEK CONDITIONS : II . THE INFLUENCE OF VARIETY , SOWING TIME AND PLANT DENSITY.
- Danalatos, N.G., 1993. Quantified analysis of selected land use systems in the Larissa Region, Greece. Wageningen University.
- Drury, J.L., Riek, L., Rackliffe, N., 2006. A decomposition of UAV-related situation awareness. In: *Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction - HRI '06*. ACM Press, New York, New York, USA, p. 88.
- Fang, H., Ye, Y., Liu, W., Wei, S., Ma, L., 2017. Hailun Experiment for LAI Measurement (HELM 2016) Field Report.
- Gashler, M., 2011. Waffles: A Machine Learning Toolkit. *The Journal of Machine Learning Research* 12, 2383–2387.
- Gevaert, C.M., Suomalainen, J., Tang, J., Kooistra, L., 2015. Generation of Spectral–Temporal Response Surfaces by Combining Multispectral Satellite and Hyperspectral UAV Imagery for Precision Agriculture Applications. *IEEE Journal*

of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 8, 3140–3146.

Gong, G., Mattevada, S., O'Bryant, S.E., 2014. Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environmental Research* 130, 59–69.

Gundlach, J., Foch, R.J., 2014. Unmanned aircraft systems innovation at the Naval Research Laboratory. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Virginia.

Hatzopoulos, J.N., 2008. TOPOGRAPHIC MAPPING. Universal Publishers, Boca Raton.

Hatzopoulos, J.N., Stefanakis, D., Georgopoulos, A., Tapinaki, S., Pantelis, V., Liritzis, I., 2017. Use of various surveying technologies to 3D digital mapping and modelling of cultural heritage structures for maintenance and restoration purposes: The Tholos in Delphi, Greece. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 17, 311–336.

Hatzopoulos, J.N., Vasilakos, C., Christofidis, S., Htouris, S., Loupou, A.-C., 2006. PHOTOGRAMMETRIC MAPPING OF MEDITERRANEAN DEFENSE STRUCTURES USING AN AMATEUR DIGITAL CAMERA, GPS AND THEODOLITE. In: *ASPRS 2006 Annual Conference*. Reno, Nevada.

Herwitz, S., Johnson, L., Dunagan, S., Higgins, R., Sullivan, D., Zheng, J., Lobitz, B., Leung, J., Gallmeyer, B., Aoyagi, M., Slye, R., Brass, J., 2004. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture* 44, 49–61.

Huete, A., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309.

Huete, A.R., Jackson, R.D., 1987. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sensing of Environment* 23, 213–IN8.

Hunt, E.R., Hively, W.D., Daughtry, C.S.T., Mccarty, G.W., Fujikawa, S.J., Ng, T.L.,

- Tranchitella, M., Linden, D.S., Yoel, D.W., 2008. Remote Sensing of Crop Leaf Area Index Using Unmanned Airborne Vehicles. *Proceedings of the Pecora 17 Symposium 17*, 18–20.
- Jackson, R.D., Huete, A.R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine 11*, 185–200.
- James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology 280*, 51–66.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment 112*, 3833–3845.
- Johansen, T.A., Cristofaro, A., Sorensen, K., Hansen, J.M., Fossen, T.I., 2015. On estimation of wind velocity, angle-of-attack and sideslip angle of small UAVs using standard sensors. In: *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, pp. 510–519.
- Johnson, L.F., Herwitz, S., Dunagan, S., Lobitz, B., Sullivan, D., Slye, R., 2003. Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. In: *Symposium on Remote Sensing of Environment*.
- Jones, B., 2013. Plane: L1 Control for Straight and Curved Path Following [WWW Document]. URL <https://github.com/ArduPilot/ardupilot/pull/101> (accessed 1.26.18).
- Kälber, S., 2008. 1 . 1 . Situation before and without RTCM 3 . 1 Transformation Messages With the global process of the installation of GNSS positioning services, CZEPOS in Czech Republic .
- Lang, A.R.G., 1991. Application of some of Cauchy's theorems to estimation of surface areas of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance. *Agricultural and Forest Meteorology 55*, 191–212.
- Lelong, C., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., Baret, F., 2008. Assessment of

Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors* 8, 3557–3585.

Li, X., Zhang, J., Liu, J., Liu, J., Zhu, A., Lv, F., Zhang, C., 2011. A modified checkbook irrigation method based on GIS-coupled model for regional irrigation scheduling. *Irrigation Science* 29, 115–126.

Lim, H., Park, J., Lee, D., Kim, H.J., 2012. Build Your Own Quadrotor: Open-Source Projects on Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19, 33–45.

Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, R.R., Running, S.W., 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, 214–231.

Oliver, M.A., Webster, R., 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA* 113, 56–69.

Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C., 2010. Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing* 2, 2274–2304.

Park, S., Deyst, J., How, J.P., 2004. A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. Rhode Island, p. 16.

Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J.J., 2016. Spatial analysis of compositional data: A historical review. *Journal of Geochemical Exploration* 164, 28–32.

Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M., Susan, , Daughtry, C.S.T., Upchurch, D.R., Daughtry, C.S.T., 2003. Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* 69, 647–664.

Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G. V, Stone, M.L., Lukina, E. V, Thomason, W.E., Schepers, J.S., Raun, W.R., Johnson, G. V, Lukina, E. V, Thomason, W.E., 2001.

In-Season Prediction of Potential Grain Yield in Winter Wheat Using Canopy Reflectance. *Agronomy journal* 93, 49–61.

Rodriguez, D., Fitzgerald, G.J., Belford, R., Christensen, L.K., 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Australian Journal of Agricultural Research* 57, 781.

Rogan, J., Franklin, J., Stow, D., Miller, J., Woodcock, C., Roberts, D., 2008. Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms. *Remote Sensing of Environment* 112, 2272–2283.

Ross, J., 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*, Dr W.Junk Publishers, the Hague. Springer Netherlands, Dordrecht.

Shesherao Biradar, A., 2014. *Wind Estimation and Effects of Wind on Waypoint Navigation of UAVs*. ARIZONA STATE UNIVERSITY.

Si, X., Zheng, H., 2010. High Performance Remote Sensing Image Processing Using CUDA. In: *2010 Third International Symposium on Electronic Commerce and Security*. IEEE, pp. 121–125.

Smith, W.K., Schoettle, A.W., Cui, M., 1991. Importance of the method of leaf area measurement to the interpretation of gas exchange of complex shoots. *Tree physiology* 8, 121–7.

Stefanakis, D., Hatzopoulos, J.N., Margaris, N., 2013. CREATION OF A REMOTE SENSING UNMANNED AERIAL SYSTEM (UAS) FOR PRECISION AGRICULTURE AND RELATED MAPPING APPLICATIONS. In: *ASPRS 2013 Annual Conference*. Baltimore, p. 668.

Tomanis, L., Kavvadias, A., Psomiadeis, E., Michas, S., Stefanakis, D., 2017. DAM BREAK ANALYSIS AND FLOOD WAVE ROUTING USING HEC-RAS AND UNMANNED AERIAL SYSTEM 3D DIGITAL MODEL DATA , THE CASE OF BRAMIANOS DAM , CRETE (In Greek). In: *11th International Hydrogeological Congress At: Athens-Agricultural University*. Athens.

Turner, D., Lucieer, A., Malenovský, Z., King, D., Robinson, S., Turner, D., Lucieer, A.,

- Malenovský, Z., King, D.H., Robinson, S.A., 2014. Spatial Co-Registration of Ultra-High Resolution Visible, Multispectral and Thermal Images Acquired with a Micro-UAV over Antarctic Moss Beds. *Remote Sensing* 6, 4003–4024.
- Ublox, A., 2017a. LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet.
- Ublox, A., 2017b. NEO-M8P u-blox M8 High Precision GNSS Modules Data Sheet.
- Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Global Forecast to 2020, 2014.
- Valavanis, K. (Kimon), Vachtsevanos, G.J., 2015. Handbook of unmanned aerial vehicles.
- Wang, J., Rich, P.M., Price, K.P., Kettle, W.D., 2005. Relations between NDVI, Grassland Production, and Crop Yield in the Central Great Plains. *Geocarto International* 20, 5–11.
- WATSON, D.J., 1947. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: II. The Effect of Varying Nutrient Supply on Net Assimilation Rate and Leaf Area. *Annals of Botany* 11, 375–407.
- Yoshimoto, H., Jo, K., Hori, K., 2008. Design of installation with interactive UAVs. In: *Proceedings of the 2008 International Conference in Advances on Computer Entertainment Technology - ACE '08*. ACM Press, New York, New York, USA, p. 424.
- Zhang, W., Lv, S., Guan, X., 2017. Application of lightweight materials in structure concept design of large-scale solar energy unmanned aerial vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 242, 012009.
- Zheng, G., Moskal, L.M., 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* 9, 2719–2745.
- Zormpas, K., Vasilakos, C., Athanasis, N., Soulakellis, N., Kalabokidis, K., 2017. DEAD FUEL MOISTURE CONTENT ESTIMATION USING REMOTE SENSING, Zormpas K. et al/ *European Journal of Geography*.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανδρουλακάκης, Ν., Κοντάκος, Η., Κουτσόπουλος, Κ., 2010. Εισαγωγή στην Γεωστατιστική, Προχωρημένο τμήμα ΓΣΠ, Εγχειρίδιο Σεμιναρίου,.

Γκουτζιώτης, Ι.Γ., 2011. Πολυμερικά και σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας στην αεροναυπηγική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας.

Ντάφης, Σπ. 1986. Δασική Οικολογία. Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη. Θεσσαλονίκη.

Ρετσιλίδου, Ο., 2017. Διερεύνηση τεχνικών τηλεπισκόπησης και ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ακριβή εκτίμηση της καύσιμης ύλης με βάση τη βλάστηση χρησιμοποιώντας δύο εποχικές δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης: εφαρμογή σε δεδομένα μεγάλης έκτασης. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Σχολή Περιβάλλοντος. Τμήμα Περιβάλλοντος.

Χατζόπουλος Ιωάννης Ν., 2012, “Γεωχωροπληροφορική Τοπογραφία”, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN: 978-960-418-353-1, 990 σελίδες.

Goldammer, G., J., Ξανθόπουλος, Γ., Ευτυχίδης, Γ., Μαλλίνης, Γ., Μητσόπουλος, Ι., Δημητρακόπουλος, Α., 2019, Έκθεση της Ανεξάρτητης Επιτροπής που έχει συσταθεί με την Πρωθυπουργική Απόφαση Υ60 (ΦΕΚ 3937/Β/2018) για την ανάλυση των υποκείμενων αιτιών και τη διερεύνηση των προοπτικών διαχείρισης των μελλοντικών πυρκαγιών δασών και υπαίθρου στην Ελλάδα. THE GLOBAL FIRE MONITORING CENTER (GFMC) SECRETARIAT OF THE GLOBAL WILDLAND FIRE NETWORK UNISDR WILDLAND FIRE ADVISORY GROUP INTERNATIONAL WILDFIRE PREPAREDNESS MECHANISM INTERNATIONAL FIRE AVIATION WORKING GROUP.

Δημοσιεύσεις κατά την διάρκεια της Διδακτορικής Διατριβής

Hatzopoulos, J.N., Stefanakis, D., Georgopoulos, A., Tapinaki, S., Pantelis, V., Liritzis, I., 2017. Use of various surveying technologies to 3D digital mapping and modelling of cultural heritage structures for maintenance and restoration purposes: The Tholos in Delphi, Greece. Mediterranean Archaeology and Archaeometry 17, 311–336.

Stefanakis, D., Vassiliou, H. 2014. Mapping of the Christian Churches in Medieval City

of Rhodes Island. A new perspective of the orientation with the use of a Remote Sensing Unmanned Aerial System (UAS). In. SEAC 2014: The materiality of the sky co-hosted by the university of Malta and heritage Malta

Stefanakis, D., Hatzopoulos, J.N., Margaris, N., 2013. CREATION OF A REMOTE SENSING UNMANNED AERIAL SYSTEM (UAS) FOR PRECISION AGRICULTURE AND RELATED MAPPING APPLICATIONS. In: ASPRS 2013 Annual Conference. Baltimore, p. 668.

Tomanis, L., Kavvadias, A., Psomiadeis, E., Michas, S., Stefanakis, D., 2017. DAM BREAK ANALYSIS AND FLOOD WAVE ROUTING USING HEC-RAS AND UNMANNED AERIAL SYSTEM 3D DIGITAL MODEL DATA , THE CASE OF BRAMIANOS DAM , CRETE (In Greek). In: 11th International Hydrogeological Congress At: Athens-Agricultural University. Athens.

Χανιώτη, Μ., Γεραρχάκης, Ν., (Σμχης ΜΧΚ), Στεφανάκης, Δ., Ζερβός, Π. 2016 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ. Πρακτικά Συνεδρίου, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Πολιτικής Προστασίας, Safe Evros 2016.