

Παραγωγή και Αξιολόγηση Φωτογραμμετρικών Προϊόντων Υψηλής Ανάλυσης με Χρήση μη Επανδρωμένου Αυτόνομου Πτητικού Μέσου (U.A.V.)

Η. Ποντίκας¹, Δ. Πέκαλης¹, Κ. Γκέντσος¹,
Ο. Γεωργούλα², Π. Πατιάς²

1 ΠΜΣ Γεωπληροφορική – Διαχείριση Φωτογραμμετρικής Παραγωγής και Τηλεοπτική-σης σε Περιβάλλον GIS

2 Καθηγητής ΤΑΤΜ-ΑΠΘ

Περίληψη: Η χρήση UAV σήμερα ολοένα και αυξάνεται λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας και αποτελεσματικότητας στην λήψη υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφιών (α/φ), σε συνδυασμό με την ανάπτυξη αλγορίθμων αυτόματης επεξεργασίας δεδομένων. Η φωτογραμμετρία μη επανδρωμένων αεροσχημάτων είναι μία σύγχρονη εξέλιξη της ψηφιακής φωτογραμμετρίας που μπορεί να συνδυάσει επίγεια και εναέρια μέσα λήψης φωτογραφιών, για την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων κάνοντας χρήση αλγόριθμους από την κλασσική φωτογραμμετρία έως και computer vision αλγόριθμους. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η απόκτηση υψηλής ανάλυσης α/φ με την χρήση U.A.V., την παραγωγή και αξιολόγηση φωτογραμμετρικών προϊόντων με λογισμικά κλασσικής φωτογραμμετρίας καθώς και λογισμικά computer vision. Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε ήταν ένα τμήμα του οικισμού της Γουμένισσας, στον δήμο Παιονίας του νομού Κιλκίς. Το πτητικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ebee της εταιρίας SenseFly με την κάμερα Canon PowerShot ELPH 110 HS 16.1MP. Πραγματοποιήθηκε η λήψη 359 α/φ με μέση χωρική ανάλυση εδάφους 3.6cm. Για την παραγωγή των φωτογραμμετρικών προϊόντων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Pix4d, Agisoft Photoscan και Erdas Imagine Photogrammetry.

1. Εισαγωγή

Το πτητικό μέσο, που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ebee της εταιρίας SenseFly. Πρόκειται για ένα ελαφρύ σκάφος βάρους 0.7kg πλήρες φορτίο, άνοιγμα φτερών 96cm και αυτονομία πτήσης 45'. Οι αισθητήρες που φέρει είναι ανέμου, εδάφους, μονόσυχο G.P.S. , I.N.S., αυτόματο πιλότο και ραδιοζεύξη.

Η περιοχή μελέτης ήταν ένα τμήμα του οικισμού της Γουμένισσας, στον δήμο Παιονίας του νομού Κιλκίς. Πρόκειται για ένα πυκνοδομημένο οικισμός προ του '23 με χαμηλά κτίρια (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Περιοχή μελέτης

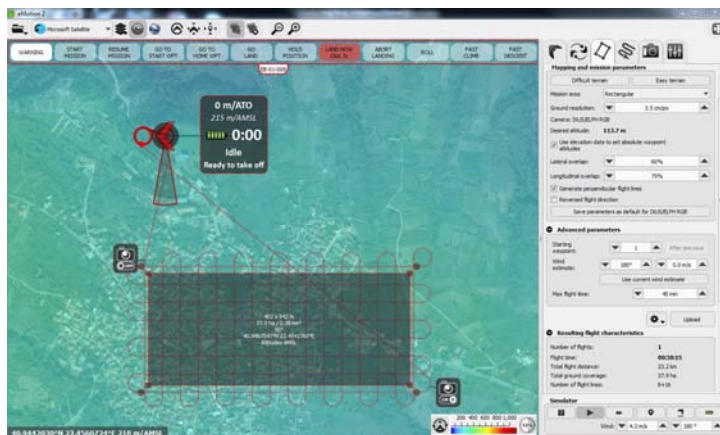
2. Προγραμματισμός πτήσης

Ζητούμενο ήταν η παραγωγή ενός υψηλής ανάλυσης ορθομοσαϊκού κλίμακας 1/200. Η επιθυμητή ακρίβεια του τελικού προϊόντος σύμφωνα με την διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού πρέπει να είναι μικρότερη των 5cm οριζοντιογραφικά και 10 cm υψομετρικά. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη ανάλυση το τελικό pixel size προγραμματίστηκε στα 3.5cm. Σύμφωνα με την παραπάνω παράμετρο το ύψος πτήσης υπολογίστηκε στα 114 m λαμβάνοντας υπόψη την σχέση 1.

$$\begin{aligned} H [m] &= (imW \times GSD \times F_R) / (S_W \times 100) = \\ &= (3456 \times 3.5 \times 4.37) / (4629 \times 100) = 114 \text{ m} \end{aligned} \quad (1)$$

Σύμφωνα με τις δεδομένες διαστάσεις του αισθητήρα (6.17x4.63 mm) καθώς και το μέγεθος του pixel (1.338 μm), η έκταση που καλύπτει μια α/φ σε αυτό το ύψος πτήσης είναι 160x120 m. Η επικάλυψη ορίστηκε στο ποσό 60% κατά πλάτος και 75% κατά μήκος, η βάση των α/φ στα 30 m και η κατά πλάτος απόσταση των διαδοχικών γραμμών πτήσης στα 64.5 m. Για την επίτευξη μεγαλύτερης επικάλυψης και την συλλογή μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, αποφασίστηκε η πραγματοποίηση και κάθετων γραμμών πτήσης. Προκειμένου το ύψος πτήσης να διατηρηθεί σταθερό χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Shuttle Radar Topography Mission (S.R.T.M.).

Ο προγραμματισμός της πτήσης πραγματοποιήθηκε από το λογισμικό eMotion και η πτήση υπολογίστηκε στα 30 min. Όλη η πτήση ελεγχόταν σε πραγματικό χρόνο μέσω του λογισμικού (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Προγραμματισμός - παρακολούθηση πτήσης στο λογισμικό eMotion

3. Μέτρηση φωτοσταθερών

Η απαιτούμενη οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια των φωτοσταθερών ορίζεται στο 0.5 της οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας των τελικών προϊόντων. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι η οριζοντιογραφική και η υψομετρική ακρίβεια πρέπει να είναι 2.5 cm και 5 cm αντίστοιχα. Για την επιτευξη των απαιτούμενων ακριβειών επιλέχθηκε οι μετρήσεις να γίνουν με διπλόσυχνα G.N.S.S. (Leica GS14). Τοποθετήθηκε μόνιμος σταθμός αναφοράς στο κέντρο της περιοχής μελέτης ο οποίος κατέγραφε στατικές παρατηρήσεις προκειμένου να επιλυθεί και να ενταχθεί στο κρατικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ '87). Τα φωτοσταθερά μετρήθηκαν με την μέθοδο R.T.K. κάνοντας χρήση τον μόνιμο σταθμό αναφοράς. Μετρήθηκαν 31 δίδυμα φωτοσταθερά κατανομημένα ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή μελέτης (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Κατανομή φωτοσταθερών

4. Φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων

4.1. Pix4d

Είναι ένα δημοφιλές εμπορικό πακέτο λογισμικού που αναπτύχθηκε από την εταιρεία PIX4D. Το εξέχον χαρακτηριστικό αυτού του λογισμικού είναι ότι επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων με την χρήση των εργαλείων Ray Cloud και Mosaic Editor.

4.4.1. Εισαγωγή εικόνων – εκτέλεση προσανατολισμών

Αρχικά έγινε η εισαγωγή των 359 α/φ στο λογισμικό και τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι:

- Καθορισμός τρόπου λήψης αεροφωτογραφιών και επεξεργασίας τους
- Καθορισμός βήματος εντοπισμού ομόλογων σημείων
- Συσχέτιση εικόνων
- Υπολογισμός παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού (προσωρινές τιμές εξωτερικού)
- Επιλογή εξαγωγή παραμέτρων, γεωμετρικά διορθωμένων εικόνων και χαμηλής ανάλυσης Ορθομωσαϊκού

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή των φωτοσταθερών στις εικόνες, τα φωτοσταθερά διακρίνονται στο νέφος σημείων, του οποίου η θέση είναι προσεγγιστική. Στη συνέχεια με την επιλογή δύο ή τριών σημείων δίνεται η δυνατότητα από το λογισμικό επαναπροσδιορισμού της θέσης του νέφους σημείων και να συνεχιστεί η επιλογή των φωτοσταθερών στις εικόνες, με καλύτερες προσεγγιστικές τιμές και ταυτόχρονο έλεγχο ακρίβειας σημείου και τυχόν αποκλίσεων ή χονδροειδών σφαλμάτων. Από το σύνολο των 31 φωτοσταθερών επιλέχθηκαν 22 σημεία ως σταθερά (control point) και 9 ως σημεία ελέγχου (check point). Από την επίλυση της δέσμης υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα στα 0.014m (Πίνακας 1).

4.1.2. Δημιουργία νέφους σημείων (point cloud)

Για τη δημιουργία του νέφους σημείων ορίστηκαν οι απαιτούμενοι παράμετροι όπως η πυκνότητα του, η λήψη πληροφορίας από τουλάχιστον τρεις φωτογραφίες, επιλέχθηκαν φίλτρα διόρθωσης θορύβου, ο αλγόριθμος Semi Global Matching και οπτικοποίηση στα 2.5D (κατάλληλο για δημιουργία ορθομωσαϊκού).

4.1.3. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου και Ορθομωσαϊκού

Ακολούθως για τη δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (Ψ.Μ.Α.) και Ορθομωσαϊκού ορίστηκε το βήμα κανάβου του Ψ.Μ.Α. (DSM) στα 7.2 cm (χωρική ανάλυση x2) και επιλογή βήματος για την διόρθωση της ραδιομετρίας της εικόνας. Για την δημιουργία της υψής του ορθομωσαϊκού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος weighted average with visibility, όπου γίνεται έλεγχος ορατότητας του κάθε pixel

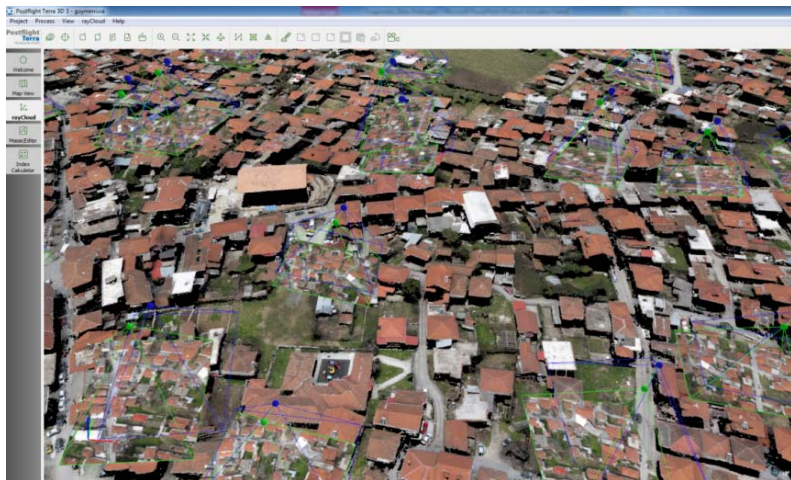
Πίνακας 1. Αποτελέσματα επίλυσης δέσμης

🔍 Images	median of 33835 keypoints per image	✔️
🔍 Dataset	359 out of 359 images calibrated (100%), all images enabled	✔️
🔍 Camera Optimization	0.72% relative difference between initial and final focal length	✔️
🔍 Matching	median of 10531.5 matches per calibrated image	✔️
🔍 Georeferencing	22 GCPs (22 3D), mean error = 0.014 m	✔️

Mean		-0.000029	-0.000205	0.002798		
Sigma		0.011089	0.013850	0.018513		
RMS Error		0.011089	0.013851	0.018724		

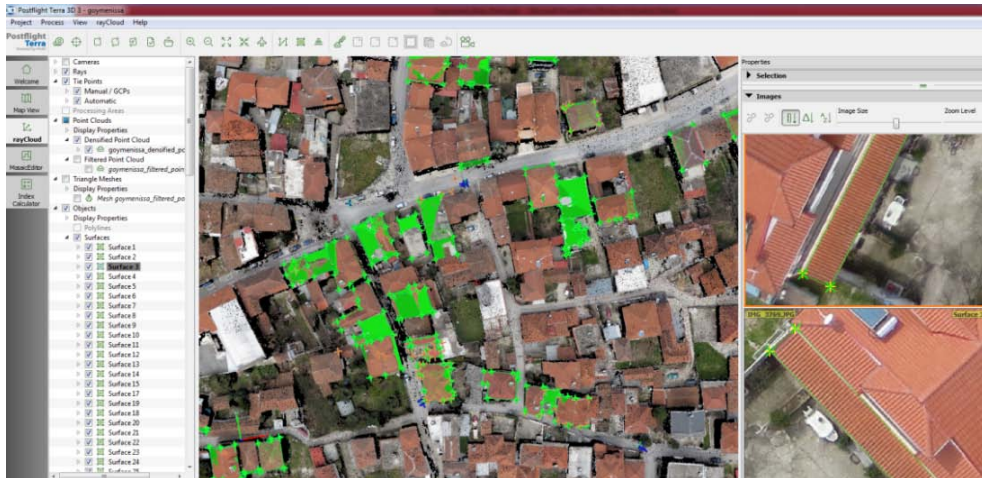
0 out of 9 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP16	0.0200/0.0200	0.0105	-0.0618	-0.0199	0.8493	12 / 12
GCP12	0.0200/0.0200	0.0134	-0.0089	-0.0410	0.5034	9 / 9
109	0.0200/0.0200	0.0283	-0.0076	-0.0142	0.3165	10 / 10
79	0.0200/0.0200	-0.0508	0.0173	-0.0401	0.1932	9 / 9
69	0.0200/0.0200	-0.0119	-0.0246	0.0212	0.6751	11 / 11
56	0.0200/0.0200	-0.0166	0.0058	-0.0647	0.4567	11 / 11
42	0.0200/0.0200	0.0345	0.0217	0.0364	0.5983	10 / 10
23	0.0200/0.0200	0.0236	-0.0076	-0.0212	0.4946	15 / 15
4	0.0200/0.0200	0.0192	-0.0000	-0.0266	0.4863	14 / 14
Mean		0.005568	-0.007297	-0.018907		
Sigma		0.025657	0.023448	0.029413		
RMS Error		0.026255	0.024558	0.034965		



Εικόνα 4. 2.5D Point Cloud

του ορθομοσαϊκού σύμφωνα με το Ψ.Μ.Α. και δημιουργείται ένας πίνακας βάρους για το αντίστοιχο pixel της κάθε εικόνας. Κατά τον έλεγχο του τελικού προϊόντος εντοπίστηκαν οι προβληματικές περιοχές, όπως γεωμετρικές παραμορφώσεις και ανεπιθύμητοι σχηματισμοί (artefacts) σφάλματα λόγω φακού ή αλγορίθμου. Ακολούθησε η διαδικασία της διόρθωσης τους στο RayCloud Editor και το Mosaic Editor.



Εικόνα 5. Διόρθωση Ψ.Μ.Α. με την δημιουργία Surfaces στο RayCloud Editor



Εικόνα 6. Διόρθωση εικόνας τοπικά με την αντικατάσταση τμήματος στο Mosaic Editor

Οι περισσότερες διορθώσεις πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό του Pix4d ενώ κάποια εναπομείναντα σφάλματα διορθώθηκαν στο λογισμικό Adobe PhotoShop.



Εικόνα 7. Τελικό ορθομωσαϊκό

4.1.4. Έλεγχος ακρίβειας τελικών προϊόντων

Κατά την λήψη των φωτοσταθερών στο πεδίο μετρήθηκαν παράλληλα και δίδυμα σημεία, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένας χονδρικός έλεγχος των συντεταγμένων των Φ/Σ ακόμα και στο έδαφος κατά την εκτέλεση των παρατηρήσεων. Σε περίπτωση που κάποιο Φ/Σ αποδειχθεί λανθασμένο μπορεί να αντικατασταθεί από το δίδυμό του χωρίς να χρειαστεί ξανά εργασία πεδίου. Τα δίδυμα Φ/Σ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου (ορθοεικόνας, DTM, Φ/Γ διαγράμματος) καθώς εξασφαλίζουν όλες τις προϋποθέσεις (ακρίβεια 3x, αριθμός ≥ 20 , καλά αναγνωρίσιμα) (Πατιάς Π., 2010). Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν 16 σημεία ελέγχου τα οποία μετρήθηκαν με διπλόσυχο G.N.S.S. Leica GS14.

Για κάθε σημείο υπολογίστηκε:

$$d_i = \sqrt{(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2} = \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2} \quad (2)$$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

$$\sigma_{op}^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n d_i^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\delta x_i^2 + \delta y_i^2) = \frac{2}{2n} \sum_{i=1}^n [(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2] \quad (3)$$

Ο έλεγχος ακρίβειας πραγματοποιήθηκε για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Από τον έλεγχο αξιοπιστίας πέρασαν όλα τα σημεία και υπολογίστηκε το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα σ_{op}^2 και γίνεται ο έλεγχος:

Πίνακας 2. Οριζοντιογραφικός έλεγχος αξιοπιστίας

Άθροισμα (m)	$\sum di^2$	0.031
	$\sigma_{op}^2 = \frac{1}{2n}(\sum di^2)$	0.001
Έλεγχος Αξιοπιστίας (m)	$di \leq 2.16\sigma_{op}$	0.067
	$\sigma_{op}^2 = \frac{1}{2n}(\sum di^2)$	0.001

$$\sigma_{op} \leq 0.9\sigma_{ortho}^{προδιαγραφών} = 0.03 \leq 0.9 \times 0.05 \text{ m} = 0.045 \text{ m} \quad (4)$$

Από τον έλεγχο παρατηρείται ότι το τελικό ορθομωσαϊκό πληρεί τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις ακρίβειας για κλίμακα 1:200

Όμοια ελέγχθηκε και το Ψ.Μ.Α. και για κάθε σημείο ελέγχου υπολογίστηκαν οι διαφορές

$$dz_i = Z - z_i \quad (5)$$

Από τις τιμές των υψομέτρων των 15 σημείων ελέγχου υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα:

$$\sigma_{κατ}^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \delta z_i^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(Z_i - z_i)^2] \quad (6)$$

Τα σημεία ελέγχθηκαν για πιθανά χονδροειδή σφάλματα και όσα δεν πέρασαν τον έλεγχο απορρίφθηκαν

Πίνακας 3. Υψομετρικός έλεγχος αξιοπιστίας

Άθροισμα δz_i^2 (m)		0.05
	$\sigma_{κατ}^2 = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum \delta z_i^2$	0.047
Έλεγχος αξιοπιστίας (m)	$\delta z_i \leq 1.96\sigma_{κατ}$	0.427
	$\sigma_{κατ}^2 = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum \delta z_i^2$	0.002

Ο έλεγχος ακρίβειας πραγματοποιήθηκε για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$, υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $\sigma_{κατ}^2$ και γίνεται ο έλεγχος:

$$\sigma_{κατ} \leq 0.9 \sigma_{DTM}^{προδιαγραφών} = 0.04 \leq 0.9 \times 0.10 \text{ m} = 0.09 \text{ m} \quad (7)$$

Από τους παραπάνω ελέγχους προκύπτει ότι το DSM πληρεί τις προδιαγραφές για κλίμακα 1:200

4.2. Agisoft

Το λογισμικό Agisoft PhotoScan Pro επιτρέπει τη δημιουργία υψηλής ανάλυσης ορθοφωτογραφιών και εξαιρετικής λεπτομέρειας ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (Digital Elevation Model - DEM) - πολυγωνικά μοντέλα με υφή. Η πλήρως αυτοματοποιημένη ροή εργασίας επιτρέπει και σε έναν μη ειδικό να επεξεργαστεί χιλιάδες αεροφωτογραφίες σε έναν υπολογιστή για να παράγει φωτογραμμετρικά προϊόντα επαγγελματικού επιπέδου.

4.2.1. Φωτογραμμετρική παραγωγή

Για την φωτογραμμετρική παραγωγή στο λογισμικό Agisoft χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια φωτοσταθερά και από την επίλυση της δέσμης υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα οριζοντιογραφικά στα 0.025 m και υψομετρικά 0.125 cm.



Εικόνα 8. Παραχθέν DSM με βήμα 0.075 m από το λογισμικό Agisoft

Για την δημιουργία της υφής του ορθομωσαϊκού επιλέχθηκε ο αλγόριθμος mosaic, σύμφωνα με τον οποίο δεν «αναμειγνύονται» οι λεπτομέρειες από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες αλλά χρησιμοποιείται η καταλληλότερη φωτογραφία, δηλαδή αυτή στην οποία το τελικό pixel έχει την μικρότερη απόσταση από το κέντρο της φωτογραφίας.

Τα σφάλματα τα οποία παρατηρήθηκαν ήταν γεωμετρικές παραμορφώσεις κτηρίων, μαντρότοιχων κλπ. Γενικότερα, παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις στις ακμές των αντικειμένων, ανεπιθύμητοι σχηματισμοί (Artefacts), σφάλματα λόγω φακού και αλγόριθμου και προβλήματα στα κινούμενα αντικείμενα (αυτοκίνητα). Το λο-



Εικόνα 9. Ορθομωσαϊκό

γισμικό δεν παρέχει δυνατότητα επέμβασης και διόρθωσης των ανεπιθύμητων σφαλμάτων των τελικών φωτογραμμετρικών προϊόντων, ενώ δύναται να αφαιρεθούν μόνο σημεία από το Point Cloud.

4.2.2. Έλεγχος ακρίβειας τελικών προϊόντων

Για τον έλεγχο των τελικών φωτογραμμετρικών προϊόντων χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια 16 σημεία ελέγχου. Από τις σχέσεις (2) και (3) υπολογίστηκε το διάνυσμα di και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σ_{op}^2 :

Πίνακας 4. Οριζοντιογραφικός έλεγχος αξιοπιστίας

Άθροισμα (m)	$\sum di^2$	0.033
	$\sigma_{op}^2 = \frac{1}{2n} (\sum di^2)$	0.001
Έλεγχος αξιοπιστίας (m)	$di \leq 2.16\sigma_{op}$	0.069
	$\sigma_{op}^2 = \frac{1}{2n} (\sum di^2)$	0.001

Ο έλεγχος ακρίβειας πραγματοποιήθηκε για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Από τον έλεγχο αξιοπιστίας πέρασαν όλα τα σημεία και υπολογίστηκε το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα σ_{op}^2 και γίνεται ο έλεγχος σύμφωνα με την σχέση (4):

$$\sigma_{op} \leq 0.9\sigma_{\text{ortho}}^{\text{προδιαγραφών}} = 0.03 \leq 0.9 \times 0.05 \text{ m} = 0.045 \text{ m} \quad (4)$$

Από τον έλεγχο παρατηρείται ότι το τελικό ορθομωσαϊκό πληρεί τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις ακρίβειας για κλίμακα 1:200

Όμοια ελέγχθηκε και το Ψ.Μ.Α. και για κάθε σημείο ελέγχου υπολογίστηκαν οι διαφορές σύμφωνα με την σχέση (5).

Από τις τιμές των υψομέτρων των 15 σημείων ελέγχου υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σύμφωνα με την σχέση (6).

Τα σημεία ελέγχθηκαν για πιθανά χονδροειδή σφάλματα και όσα δεν πέρασαν τον έλεγχο απορρίφθηκαν.

Πίνακας 5. Υψομετρικός έλεγχος αξιοπιστίας

Άθροισμα dz_i^2 (m)		0.23
	$\sigma_{κατ}^2 = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum \delta z_i^2$	0.008
Έλεγχος αξιοπιστίας (m)	$\delta z_i \leq 1.96\sigma_{κατ}$	0.173
	$\sigma_{κατ}^2 = \left(\frac{1}{2n}\right) \sum \delta z_i^2$	0.008

Ο έλεγχος ακρίβειας πραγματοποιήθηκε για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$, υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα $\sigma_{κατ}^2$ και γίνεται ο έλεγχος:

$$\sigma_{κατ} \leq 0.9\sigma_{DTM}^{προδιαγραφών} = 0.088 \leq 0.9 \times 0.10 \text{ m} = 0.09 \text{ m} \tag{7}$$

Από τους παραπάνω ελέγχους προκύπτει ότι το DSM πληρεί τις προδιαγραφές για κλίμακα 1:200

4.3. Σύγκριση φωτογραμμετρικών προϊόντων

Από την σύγκριση των δύο ορθομοσαϊκών παρατηρήθηκαν οι εξής διαφορές:

- Τα κινούμενα αντικείμενα στο Pix4d λόγω του χρησιμοποιούμενου αλγόριθμου (weighted average visibility) απεικονίζονται ημιδιαφανή, ενώ στο Agisoft λόγω του αλγόριθμου mosaic δεν εμφανίζονται ολόκληρα αλλά τμήματα αυτών.
- Στο Pix4d δίνεται η δυνατότητα επέμβασης για την διόρθωση του DSM στο RayCloud Editor με την σχεδίαση επιφανειών για την διόρθωση των ακμών των σκεπών. Αυτό έχει σαν συνέπεια την επιπεδοποίηση των σκεπών με αποτέλεσμα να παρατηρηθούν διπλοπροβολές με εντονότερα τα προβλήματα στις κορυφές των σκεπών
- Στο λογισμικό Pix4d δίνεται η δυνατότητα διόρθωσης γεωμετρικών παραμορφώσεων, σε περιοχές με ελλιπή πληροφορία, για τη δημιουργία σωστού DSM, σε αντίθεση με το Agisoft.
- Οι γωνίες των σκεπών στο Pix4d παρουσιάζουν καμπύλωση σε αντίθεση με το Agisoft που αποδίδονται ορθά

- Από την αφαίρεση των δύο DSM προέκυψαν διαφορές μόνο στα περιγράμματα των κτιρίων και στα δέντρα (εικόνα 10). Για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ υπολογίστηκε πως οι διαφορές βρίσκονται στο εύρος των τιμών $(-1.384, 1.82)$, με μέση τιμή 0.22 m και τυπική απόκλιση 0.80 m .



Εικόνα 10. Αφαίρεση DSM

4.4. Erdas Imagine Photogrammetry

Το λογισμικό πακέτο Erdas Imagine 2014 παρέχει εκείνα τα φωτογραμμετρικά εργαλεία (Imagine Photogrammetry), τα οποία επιτρέπουν τον χειροκίνητο ή αυτόματο εντοπισμό ομόλογων σημείων και την επίλυση αεροτριγωνισμού για την επεξεργασία και την ανάλυση αεροφωτογραφιών καθώς και δορυφορικών εικόνων.

4.4.1. Επίλυση δέσμης

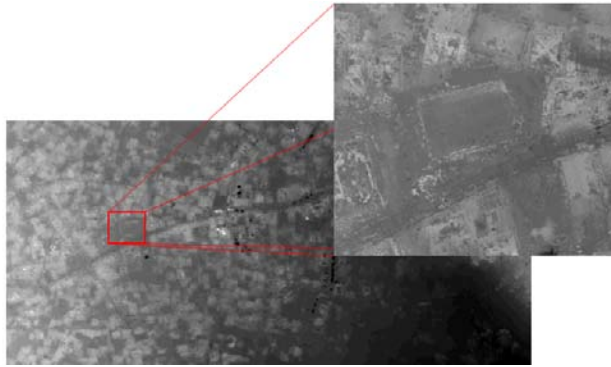
Για την επίλυση της δέσμης χρησιμοποιήθηκαν 359 εικόνες (undistorted). Η παρατήρηση των φωτοσταθερών πραγματοποιήθηκε στεροσκοπικά και ακολούθησε ο αυτόματος προσδιορισμός ομολόγων σημείων (auto tie points). Η επίλυση δέσμης έδωσε μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) 0.0014 mm .

4.4.2. Παραγωγή DSM

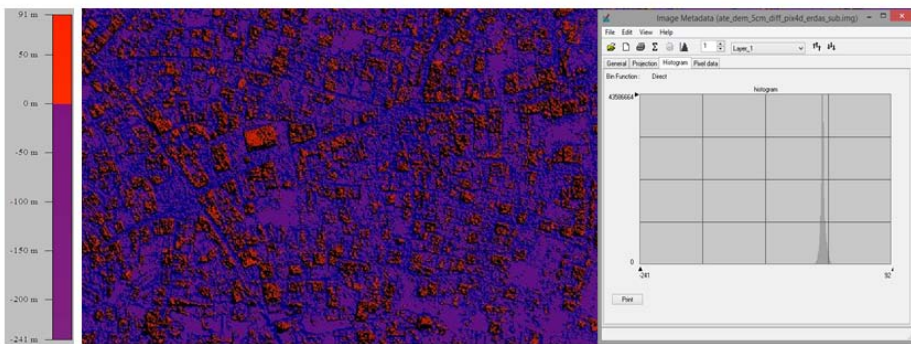
Για την παραγωγή του DSM χρησιμοποιήθηκε βήμα κανάβου 0.05 μ . Μεγάλα σφάλματα παρατηρήθηκαν στις περιοχές των εικόνων όπου υπήρχαν κτίρια και κυρίως στις ακμές αυτών όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα 11.

4.4.3. Αξιολόγηση φωτογραμμετρικών προϊόντων

Από την αφαίρεση των δύο DSM (Pix4d - Erdas) προέκυψαν διαφορές στους όγκους των κτιρίων, στις τεχνικές κατασκευές και δέντρα, ενώ αντιθέτως παρου-



Εικόνα 11. Παραχθέν DSM κανάβου 0.05 m.



Εικόνα 12. Αφαίρεση DSM

σιάζει καλή προσαρμογή στο έδαφος (εικόνα 12). Για επίπεδο σημαντικότητας $a=0.05$ υπολογίστηκε πως οι διαφορές βρίσκονται στο εύρος των τιμών $(-5.567, 5.857)$, με μέση τιμή 0.15 m και τυπική απόκλιση 2.86 m.

Κατά το στάδιο της παραγωγής του ορθομωσαϊκού λόγω των μεγάλων σφαλμάτων του DSM του Erdas χρησιμοποιήθηκε και αυτό του Pix4d. Από την σύγκριση των δύο ορθομωσαϊκών παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Εμφάνιση διπλοπροβολών
- Γεωμετρικές παραμορφώσεις
- Αδυναμία εξαγωγής μωσαϊκού με όλες τις εικόνες
- Έντονες ακτινικές παραμορφώσεις
- Αδυναμία διαχείρισης μεγάλου αριθμού α/φ (1/4 των 359 α/φ) κατά την παραγωγή του ορθομωσαϊκού

5. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η σύγκριση λογισμικών από το περιβάλλον της κλασσι-

κής φωτογραμμετρίας όπως επίσης και λογισμικών computer vision για την φωτογραμμετρική παραγωγή DSM και ορθομωσαϊκού με την χρήση δεδομένων από μη επανδρωμένο σκάφος.

Από την όλη φωτογραμμετρική παραγωγή και κατά την αξιολόγηση των τελικών προϊόντων διαπιστώθηκαν τα εξής:

Erdas Imagine

- Απαραίτητη γνώση στοιχείων εσωτερικού & εξωτερικού προσανατολισμού
- Γρήγορος εντοπισμός μικρού αριθμού αυτόματων ομόλογων σημείων
- Πολύ καλή ακρίβεια στην επίλυση της δέσμης
- Αυτόματη παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (ATE)
- Από την αξιολόγηση και σύγκριση του DSM παρατηρήθηκαν μικρά σφάλματα στο έδαφος, ενώ μεγάλα σφάλματα παρατηρήθηκαν στις περιοχές καλυμμένες με δέντρα και κτίρια. Διακρίνονται αιχμές (spikes) και γεωμετρικές παραμορφώσεις (irregular surfaces)
- Αδυναμία διαχείρισης όλου του πλήθους των Α/Φ και υποχρεωτική αραιώση των Α/Φ στο $\frac{1}{4}$ για την δημιουργία μωσαϊκού

Agisoft

- Δεν είναι απαραίτητη η γνώση στοιχείων εσωτερικού & εξωτερικού προσανατολισμού
- Καλή οριζοντιογραφική ακρίβεια
- Υψομετρική ακρίβεια εντός των προδιαγραφών ($\sigma_z = 2\sigma_{op}$)
- Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (point cloud) και δημιουργία χάρτη βάθους (depth maps), όπου παρατηρήθηκαν σφάλματα που δεν μπορούν να διορθωθούν εντός του λογισμικού
- Παραγωγή πυκνού DSM, διαπιστώθηκε από την αξιολόγηση ότι πληρεί τις προδιαγραφές κλ. 1/200
- Η παραγωγή ορθομωσαϊκού με την μέθοδο Mosaic, δεν αναμειγνύει τις λεπτομέρειες της εικόνας από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες αλλά χρησιμοποιεί την πιο κατάλληλη φωτογραφία, δηλαδή αυτή όπου το τελικό pixel έχει την μικρότερη απόσταση από το κέντρο της φωτογραφίας. Το αποτέλεσμα κρίθηκε καλύτερο από αυτό των άλλων λογισμικών

Pix4d

- Δεν είναι απαραίτητη η γνώση στοιχείων εσωτερικού & εξωτερικού προσανατολισμού
- Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (point cloud)
- Καλή οριζοντιογραφική ακρίβεια
- Υψομετρική ακρίβεια πολύ καλύτερη των προδιαγραφών ($\sigma_z < 2\sigma_{op}$), λόγω της χρήσης περισσότερων των δύο φωτογραφιών για τον υπολογισμό του κάθε

υπομέτρου και όχι υπολογισμό από ένα στερεοζεύγος (multi-image photogrammetry, multi-ray matching)

- Παραγωγή του ορθομωσαϊκού με την μέθοδο weighted average, χρησιμοποιήθηκε το DSM για τον καθορισμό ορατότητας ενός pixel από μία α/φ και δημιουργία πίνακα βάρους με τις αποστάσεις του κάθε pixel από το κέντρο της κάθε φωτογραφίας. Με την μέθοδο αυτή εντοπίστηκαν σφάλματα στις σκεπές των κτιρίων καθώς και ανεπιθύμητα artefacts.

	ERDAS IMAGINE PS	Pix4d	AGISOFT
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΟΜΟΛΟΓΑ ΣΗΜΕΙΑ	semi - automatic	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΞ. ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ POINT CLOUD	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
MULTI-RAY MATCHING	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ΑΓΝΩΣΤΟ
Παραγωγή Ορθομωσαϊκού	1/4 του συνόλου των εικόνων - προβλήματα ραδιομετρίας διπλοπροβολών κτλ	Weighted average visibility	Mosaic

Εικόνα 13. Πίνακας σύγκρισης φωτογραμμετρικών λογισμικών

6. Προτάσεις

- Θέσπιση νομικού πλαισίου κανονισμών αεροπλοΐας αυτονόμων αεροχημάτων
- Ενσωμάτωση τεχνικών computer vision στα προγράμματα κλασσικής φωτογραμμετρίας
- Βελτίωση αλγορίθμου παραγωγής point cloud για την βελτίωση των ακμών αντικειμένων
- Παραγωγή ορθομωσαϊκού με χρήση πίνακα βάρους, όπου θα υπολογίζεται από τη τιμή έντασης του κάθε pixel από κάθε φωτογραφία στην οποία διακρίνεται κάποιος κτίριος χρησιμοποιώντας το DSM και την απόσταση από το κέντρο της κάθε φωτογραφίας. Από αυτές τις τιμές θα αποκλείονται οι ακραίες και θα συμμετάσχει η κάθε μία στο τελικό pixel του ορθομωσαϊκού ανάλογα με το βάρος της.

Εναλλακτική πρόταση: Καταγραφή των ίδιων στοιχείων με την παραπάνω υπόθεση αλλά η τελική επιλογή δεν θα γίνει με βάση τον πίνακα βάρους αλλά με κριτήριο την μικρότερη απόσταση, αφού όπως έχει τονιστεί θα αποκλειστούν οι ακραίες τιμές των pixel. Η μεθοδολογία αυτή έχει σκοπό την απομάκρυνση των κινούμενων αντικειμένων όπως αυτοκίνητα και διπλές σκιάσεις.

Βιβλιογραφία

(α) Πανεπιστημιακές σημειώσεις:

- Πατιάς, Π., 2001. Ψηφιακή Φωτογραμμετρία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Πατιάς, Π., 2010. Σχεδιασμός Διερεύνηση και Έλεγχος Φωτογραμμετρικής Παραγωγής. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Γεωργούλα, Ο., 2014, Αναλυτική Φωτογραμμετρία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Καρράς, Γ., 2011, Φωτογραμμετρία ΙΙΙ. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Πέτσα, Ε., 2007, Ανάπτυξη Αλγορίθμων για την Αυτόματη Παραγωγή Φωτορρεαλιστικών Μοντέλων Ακριβείας με Συνδυασμό Τεχνικών Φωτογραμμετρίας επεξεργασίας εικόνας και Laser Scanning – Εφαρμογή σε Θέματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Τ.Ε.Ι. Αθήνας.

(β) Διαδικτυακές πηγές:

- Sensefly (Λογισμικό, <https://www.sensefly.com> ,προσπ. 05/2015)
- Pix4d (Λογισμικό, <http://www.pix4d.com> ,προσπ. 05/2015)
- Agisoft (Λογισμικό, <http://www.agisoft.com> ,προσπ. 05/2015)
- Hexagon Geospatial (Υπηρεσία , <http://www.hexagongeospatial.com> ,προσπ. 05/2015)
- ETH Zurich (Υπηρεσία, http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings ,προσπ. 05/2015)

(γ) Δημοσίευση σε Πρακτικά συνεδρίων:

- Bhandari, B., Oli, U., Pudasaini, U., Panta, N., 2015. Generation of High Resolution DSM Using UAV Images., Νεπάλ, σελ. 12.
- Τουρνάς, Ε., 2012. Φωτογραμμετρία Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων
1η πιλοτική εφαρμογή από τον ΟΚΧΕ, Κοζάνη, σελ. 1.