

Α. Δεσμάνης

Αναλυτική Φωτογραμμετρία



Εκδόσεις Ζήτη

Αθανάσιος Δερμάνης

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Εξώφυλλο: "Μελέτη Προοπτικής" του Albrecht Dürer
(σε ελεύθερη παραποίηση)

ISBN 960-431-004-6

© Copyright, 1991. Α. Δερμάνης

Analytical Photogrammetry
A. Dermanis, 1991

Η κατά οποιονδήποτε τρόπο αναπαραγωγή, δημοσίευση ή χρησιμοποίηση όλου ή μερών του βιβλίου αυτού απαγορεύεται χωρίς την έγγραφη έγκριση του συγγραφέα, εξαιρουμένης της επιστημονικής αναφοράς.

Φωτοστοιθεσία - Εκτύπωση

Π. ΖΗΤΗ & σια ο.ε.

Σόλωνος 79-81

☎ 825 453, 849 178

Θεσσαλονίκη

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27

☎ 203 720

Θεσσαλονίκη

Πρόλογος

Η Φωτογραμμετρία είναι μία επιστήμη που, παρά την τεράστια σημασία της για τις πρακτικές εφαρμογές, δεν γνώρισε στη χώρα μας την ανάπτυξη που θα έπρεπε, τόσο στο επαγγελματικό όσο και στον ακαδημαϊκό χώρο.

Η σύγκριση μάλιστα με την σχεδόν πληθωρική ανάπτυξη της Γεωδαισίας και της Τοπογραφίας, τονίζει ακόμη περισσότερο την αναγκαιότητα της παραπέρα ανάπτυξης της Φωτογραμμετρίας στα πανεπιστήμια μας. Ένα πρώτο δήμα στην κατεύθυνση αυτή είναι και η συμβολή στην φτώχη και απαρχαιωμένη ελληνική φωτογραμμετρική βιβλιογραφία.

Αφορμή για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού υπήρξε η διδασκαλία, τα τελευταία χρόνια, του ομώνυμου μαθήματος στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Πέρα όμως από την κάλυψη των διδακτικών αναγκών, έγινε προσπάθεια για τη δημιουργία ενός βασικού συγγράμματος αναφοράς, που ελπίζουμε ότι θα είναι χρήσιμο σε όσους ασχολούνται ή ενδιαφέρονται για τη Φωτογραμμετρία.

Παρά το γεγονός ότι η σύγχρονη Φωτογραμμετρία είναι ουσιαστικά Αναλυτική Φωτογραμμετρία (τουλάχιστον μέχρις ότου γίνει ψηφιακή), το βιβλίο αυτό δεν είναι βιβλίο "Βασικής Φωτογραμμετρίας" ή "Εισαγωγής στη Φωτογραμμετρία", κενό που θα καλυφθεί σύντομα από άλλους συναδέλφους. Είναι αντίθετα μία προσέγγιση στο αντικείμενο από τη σκοπιά του ειδικού στην ανάλυση δεδομένων, προσέγγιση που έχει σκοπό να καταδείξει την ενότητα των επιστημών του Τοπογράφου Μηχανικού και που στηρίζεται στην αξιοποίηση των ήδη αποκτημένων γνώσεων στην Τοπογραφία και τη Γεωδαισία.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της χώρας μας και τη μεγάλη της πολιτιστική κληρονομιά, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις επίγειες εφαρμογές για την αποτύπωση μνημείων και μάλιστα στη συνεργασία με τις συμπληρωματικές τοπογραφικές μεθόδους.

Με σκοπό να διευκολυνθεί η πρόσβαση στο κείμενο, μία σειρά από εκτενείς αποδείξεις μεταφέρθηκαν σε Παραρτήματα. Για τον ίδιο λόγο, μια σειρά από ειδικότερες εφαρμογές δίνονται με τη μορφή παραδειγμάτων, που έχουν συγκεντρωθεί στο τέλος κάθε κεφαλαίου, και που υποδοθούν, παράλληλα, την κατανόηση και την εμπέδωση της σχετικής θεωρίας.

Εκτός από τη Γενική Βιβλιογραφία, όπου περιλαμβάνονται βασικά συγγράμματα, δίνεται στο τέλος ορισμένων κεφαλαίων και μία επιλογή από τη σχετική βιβλιογραφία, για όσους θέλουν να μελετήσουν παραπέρα κάποιο ειδικότερο θέμα.

Ευχαριστίες οφείλονται σε όλους όσους βοήθησαν στη δημιουργία αυτού του βιβλίου και ιδιαίτερα στη συνάδελφο Όλγα Γεωργούλα για τη συνεχή στήριξη της προσπάθειας αυτής. Ευχαριστούμε επίσης το συνάδελφο Δημήτρη Καρανταΐδη από το Κέντρο Διαφύλαξης της Αγιορείτικης Κληρονομιάς, για την παραχώρηση των αποτυπώσεων μνημείων που περιλαμβάνονται στο τελευταίο κεφάλαιο, καθώς και στον Καθηγητή Μανώλη Ανδρόνικο για την άδεια δημοσίευσης των δύο από τις αποτυπώσεις αυτές.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβρης 1990

Α. Δεσμάνης

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Συστήματα αναφοράς	7
2.1. Το σύστημα αναφοράς του φωτογραφικού επιπέδου.....	7
2.2. Το σύστημα αναφοράς της φωτογραφίας.....	8
2.3. Το επίγειο σύστημα αναφοράς.....	10
2.4. Το σύστημα αναφοράς του μοντέλου.....	13
2.5. Σχέσεις ανάμεσα στα συστήματα αναφοράς.....	14
2.5.1. Η σχέση ανάμεσα στα συστήματα του φωτογραφικού επιπέδου και της φωτογραφίας.....	14
2.5.2. Η σχέση ανάμεσα στο σύστημα της φωτογραφίας και το επίγειο σύστημα.....	16
2.5.3. Η σχέση ανάμεσα στο σύστημα αναφοράς του μοντέλου και το επίγειο σύστημα.....	17
3. Μαθηματικά μοντέλα	23
3.1. Η γεωμετρία της φωτογραφικής λήψης.....	23
3.2. Οι εξισώσεις συγγραμμικότητας.....	25
3.3. Η εξίσωση συνεπιπεδότητας.....	26
3.4. Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων συγγραμμικότητας.....	33
3.5. Η γραμμικοποίηση της εξίσωσης συνεπιπεδότητας.....	38
3.6. Παραδείγματα.....	41
4. Στοιχειώδη προβλήματα	47
4.1. Γενικά.....	47
4.2. Εμπροσθοτομία.....	50
4.3. Εξωτερικός προσανατολισμός μιας φωτογραφίας (οπισθοτομία).....	54
4.4. Σχετικός προσανατολισμός ζεύγους φωτογραφιών.....	57
4.5. Απόλυτος προσανατολισμός μοντέλου.....	62
4.6. Ταυτόχρονος σχετικός και απόλυτος προσανατολισμός ζεύγους φωτογραφιών.....	68
4.7. Παραλλαγές των βασικών προβλημάτων.....	79
4.8. Η εφαρμογή των βασικών προβλημάτων.....	82
4.9. Παραδείγματα.....	86
5. Όργανα μετρήσεων και αναγωγές	115
5.1. Μονοσυγκριτές.....	115
5.2. Στερεοσυγκριτές.....	120

5.3. Οι αναγωγές των μετρήσεων.....	121
5.3.1. Διορθώσεις λόγω παραμορφώσεων.....	123
5.3.2. Διορθώσεις λόγω ατμοσφαιρικής διάθλασης.....	128
5.4. Εργαστηριακή βαθμονόμηση.....	129
5.5. Αναλυτικές μέθοδοι βαθμονόμησης.....	136
5.6. Παραδείγματα.....	140
Βιβλιογραφία.....	159
6. Αεροτριγωνισμός.....	161
6.1. Ο ρόλος του αεροτριγωνισμού στις φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις.....	161
6.2. Η μεθοδολογία των φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τοπογραφικές μεθόδους.....	168
6.3. Η μέθοδος των ανεξάρτητων μοντέλων.....	170
6.3.1. Η μέθοδος των ανεξάρτητων μοντέλων με 7 παραμέτρους.....	171
6.3.2. Η μέθοδος των ανεξάρτητων μοντέλων με διαχωρισμό της συνόρθωσης κατά οριζοντιογραφία και υψομετρία.....	177
6.4. Η μέθοδος της δέσμης.....	183
6.5. Αεροτριγωνισμός με τη μέθοδο της δέσμης και ταυτόχρονη βαθμονόμηση.....	187
6.6. Αεροτριγωνισμός με πρόσθετες παρατηρήσεις.....	190
6.7. Παραδείγματα.....	195
Βιβλιογραφία.....	210
7. Επίγεια φωτογραμμετρία.....	215
7.1. Γενικά χαρακτηριστικά των εφαρμογών της επίγεια φωτογραμμετρίας.....	215
7.2. Η εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων στην επίγεια φωτογραμμετρία.....	218
7.3. Η μέθοδος DLT.....	221
7.4. Η μέθοδος της δέσμης.....	231
7.5. Η μέθοδος των γωνιών.....	239
7.6. Εσωτερικές δεσμεύσεις και ελεύθερα δίκτυα.....	246
7.7. Συνδυασμός φωτογραμμετρικών και τοπογραφικών μετρήσεων στις αποτυπώσεις μνημείων.....	255
7.8. Παραδείγματα.....	267
Βιβλιογραφία.....	284
8. Αναλυτική αναγωγή.....	293
8.1. Γενικά.....	293
8.2. Ο μετασχηματισμός από το επίπεδο της φωτογραφίας στο επίπεδο του αντικειμένου.....	294
8.3. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός.....	297
8.4. Προσδιορισμός των παραμέτρων μετασχηματισμού.....	298
8.5. Εφαρμογή της εμπροσθοτομίας στην αναλυτική αναγωγή....	302

9. Ακρίβεια και αξιοπιστία	303
9.1. Γενικά.....	303
9.2. Η ακρίβεια των στοιχειωδών προβλημάτων.....	306
9.2.1. Οπισθοτομία.....	308
9.2.2. Εμπροσθοτομία.....	310
9.2.3. Σχετικός προσανατολισμός.....	313
9.2.4. Απόλυτος προσανατολισμός μοντέλου.....	315
9.3. Ακρίβεια του αεροτριγωνισμού.....	317
9.3.1. Η θεωρητική ακρίβεια του αεροτριγωνισμού.....	317
9.3.2. Εμπειρικός προσδιορισμός της ακρίβειας.....	321
9.4. Εφαρμογές των στατιστικών ελέγχων.....	325
9.4.1. Έλεγχος της μεταβλητότητας αναφοράς.....	326
9.4.2. Στατιστικοί έλεγχοι με δάση τη γενική υπόθεση.....	327
9.4.3. Σάρωση δεδομένων.....	330
9.4.4. Έλεγχος των πρόσθετων παραμέτρων.....	331
9.5. Βελτιστοποίηση.....	334
Βιβλιογραφία.....	336
10. Από την αναλυτική στην ψηφιακή φωτογραμμετρία	343
10.1. Σύγχρονες εξελίξεις στη φωτογραμμετρία.....	343
10.2. Εκσυγχρονισμός των αναλογικών οργάνων.....	344
10.3. Αναλυτικά όργανα.....	348
10.4. Ψηφιακή φωτογραφία και συσχέτιση.....	353
Βιβλιογραφία.....	366
<i>Παράρτημα Α</i>	
Γραμμικοποίηση των εξισώσεων συγγραμμικότητας.....	371
<i>Παράρτημα Β</i>	
Γραμμικοποίηση των εξισώσεων συνεπιπεδότητας.....	379
<i>Παράρτημα Γ</i>	
Γραμμικοποίηση των εξισώσεων μετασχηματισμού από το έδαφος στο μοντέλο.....	384
<i>Παράρτημα Δ</i>	
Ανασκόπηση των μεθόδων συνόρθωσης των παρατηρήσεων.....	387
<i>Παράρτημα Ε</i>	
Γραμμικοποίηση των εξισώσεων συγγραμμικότητας με γωνίες στροφής α , ω , κ (αζιμούθιο, κλίση, στρέψη).....	392
<i>Παράρτημα Ζ</i>	
Στοιχεία Rodriguez.....	399
<i>Παράρτημα Η</i>	
Η σχέση ανάμεσα στη μέθοδο DLT και τη μέθοδο της δέσμης....	404
<i>Παράρτημα Θ</i>	
Αλγόριθμοι για τον μικτό φωτογραμμετρικό-τοπογραφικό τριγωνισμό.....	411
Γενική Βιβλιογραφία.....	419

1

Εισαγωγή

Η φωτογραμμετρία είναι η επιστήμη και τεχνική του προσδιορισμού της γεωμετρικής μορφής φυσικών αντικειμένων, αξιοποιώντας την απεικόνιση των αντικειμένων αυτών σε φωτογραφίες.

Ο όρος **αναλυτική φωτογραμμετρία** (analytical photogrammetry) αναφέρεται στο σύνολο εκείνων των μεθόδων της φωτογραμμετρίας που βασίζονται, κατά κύριο λόγο, στην εκτέλεση αριθμητικών υπολογισμών που στηρίζονται σε κατάλληλες **αναλυτικές** μαθηματικές σχέσεις (εξισώσεις). Έτσι για την αναλυτική φωτογραμμετρία χρησιμοποιείται ορισμένες φορές και ο όρος **υπολογιστική φωτογραμμετρία** (computational photogrammetry).

Η αναλυτική φωτογραμμετρία χρησιμοποιεί μεθόδους που διαφέρουν από τις κλασσικές **αναλογικές** μεθόδους, όπου ο προσδιορισμός της γεωμετρικής μορφής γίνεται με τη χρήση οπτικομηχανικών μέσων, χωρίς όμως να είναι, όπως θα δούμε, και τελείως ανεξάρτητη από αυτές.

Πέρα από τη φωτογραμμετρία, ο όρος "**αναλογικό**" χρησιμοποιείται σε αντιδιαστολή με τον όρο "**ψηφιακό**" σε πολλές διαδικασίες της καθημερινής μας ζωής. Έχουμε, π.χ., το ψηφιακό ρολόι, την ψηφιακή ζυγαριά, τον ψηφιακό επιλογέα συχνότητας του ραδιοφώνου, που αντικαθιστούν τις προγενέστερες αναλογικές τους μορφές. Στα αναλογικά όργανα ένα συνεχές φυσικό φαινόμενο (χρόνος, βάρος, συχνότητα) μετατρέπεται σε συνεχή μηχανική κίνηση ενός δείκτη πάνω σε ένα αριθμημένο πλαίσιο. Αντίθετα στα ψηφιακά όργανα τα μεγέθη των φυσικών φαινομένων μετατρέπονται σε διακριτούς αριθμούς (ψηφία) που εμφανίζονται σε μια οθόνη για άμεση ανάγνωση.

Θα ένοιωθε, λοιπόν, κανείς τον πειρασμό να αναφερθεί στην "ψηφιακή φωτογραμμετρία", αλλά ο όρος αυτός είναι αδόκιμος, ή τουλάχιστον πρόωρος. Και αυτό γιατί το πρώτο στάδιο της φωτογραμμετρικής διαδικασίας, η συλλογή των δεδομένων με τη φωτογραφική λήψη, είναι ένα

στάδιο καθαρά αναλογικό. Μόνο όταν η κλασική αναλογική φωτογραφία θα έχει αντικατασταθεί από μιας υψηλής πιστότητας ψηφιακή φωτογραφία, παρόμοια με εκείνη της τεχνικής βίντεο (μαγνητοσκοπήσης) στην τηλεόραση, θα μπορούσε να μιλήσει κανείς για **ψηφιακή φωτογραμμετρία**. Ψηφιακές φωτογραφίες έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στη φωτογραμμετρία, αλλά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση τους είναι ουσιαστικά οι ίδιες με εκείνες της αναλυτικής φωτογραμμετρίας με αναλογικές φωτογραφίες. Μόνο με τη μελλοντική ανάπτυξη νέων τεχνικών ανάλυσης που θα εκμεταλεύονται πλήρως την ιδιαίτερη δομή των δεδομένων της ψηφιακής φωτογραφίας, μία νέα, πραγματικά ψηφιακή, φωτογραμμετρία θα αντικαταστήσει την αναλυτική, όπως εκείνη αντικατέστησε την αναλογική.

Ας παρατηρήσουμε ότι η ψηφιακή φωτογραφία, (ή, ορθότερα, η ψηφιακή απεικόνιση), χρησιμοποιείται ήδη στην τηλεπισκόπηση, και υπάρχει η γενική τάση για τη χρησιμοποίηση του ευρύτερου όρου **ψηφιακές αποτυπώσεις** (digital mapping).

Στην κλασική φωτογραμμετρία χρησιμοποιούνται αναλογικά όργανα, όπου οι κύριες φωτογραμμετρικές διαδικασίες (εσωτερικός, εξωτερικός και σχετικός προσανατολισμός) επιτυγχάνονται με οπτικά και μηχανικά μέσα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου (στερεομοντέλο), από το οποίο γίνεται και η τελική καταγραφή της γεωμετρίας του αντικειμένου, σε αναλογική και πάλι μορφή πάνω στον χάρτη.

Η αναλυτική φωτογραμμετρία ξεκινά με την ψηφιοποίηση από την οποία θα προκύψουν τα αρχικά αριθμητικά δεδομένα, που η παραπέρα υπολογιστική τους επεξεργασία θα δώσει τις συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου, από τις οποίες ορίζεται (ψηφιακά πλέον και όχι αναλογικά) η γεωμετρική του μορφή. Η δημιουργία του (αναλογικού) χάρτη είναι πλέον ένα τελευταίο, αλλά όχι πάντα απαραίτητο, στάδιο.

Η ψηφιοποίηση αφορά κυρίως τη μέτρηση των συντεταγμένων (x, y) των εικόνων των σημείων πάνω στη φωτογραφία. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, γίνεται και ψηφιοποίηση με τη μέτρηση των συντεταγμένων (x, y, z) σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο (στερεομοντέλο) που έχει δημιουργηθεί με τη χρήση αναλογικού οργάνου.

Η αναλυτική φωτογραμμετρία αναπτύσσεται ιστορικά, και όσον αφορά τις πρακτικές εφαρμογές, μετά από τις αναλογικές μεθόδους, με πρώτο στάδιο τον **αναλυτικό αεροτριγωνισμό**. Η ανάγκη να είναι γνωστές οι συντεταγμένες στο χώρο ορισμένων σημείων για τον εξωτερικό προσανατολισμό των μοντέλων, ώστε να ενταχθούν σε ένα ενιαίο επίγειο σύστημα αναφοράς, απαιτεί την ύπαρξη ενός σχετικά πυκνού επίγειου δικτύου σημείων που να είναι αναγνωρίσιμα πάνω στις φωτογραφίες (φωτοσταθερά). Επειδή τό κόστος των επίγειων μεθόδων τριγωνισμού είναι υψηλό, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την πύκνωση των υπαρχόντων επίγειων

δικτύων ελέγχου, με τις καθαρά φωτογραμμετρικές μεθόδους αερο-τριγωνισμού, πρώτα αναλογικές και στη συνέχεια αναλυτικές.

Στη συνέχεια οι αναλυτικές μέθοδοι αντικατέστησαν, σχεδόν πλήρως, και τις υπόλοιπες φωτογραμμετρικές διαδικασίες, με την κατασκευή των **αναλυτικών φωτογραμμετρικών οργάνων**. Η ανάπτυξη των αναλυτικών οργάνων όπου οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες γίνονται με υπολογιστικά μέσα, έγινε δυνατή χάρις στην εμφάνιση και εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Σήμερα δεν κατασκευάζονται πλέον αναλογικά όργανα, αλλά μόνο αναλυτικά. Υπάρχει όμως ακόμα στην παραγωγή ένας πολύ μεγάλος αριθμός αναλογικών οργάνων, επειδή τό κόστος της αντικατάστασης τους από τα πλέον σύγχρονα αναλυτικά είναι εξαιρετικά υψηλό. Τα όργανα αυτά εκσυγχρονίζονται, σε κάποιο βαθμό, με την προσθήκη συστημάτων ψηφιοποίησης συντεταγμένων του στερεομοντέλου και καταγραφής τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, πριν από την τελική απόδοση σε χάρτη με τη χρήση **αυτόματου σχεδιαστή** (plotter), όπως και στα αναλυτικά όργανα.

Τα στοιχεία εισόδου και εξόδου στις διαδικασίες της αναλυτικής φωτογραμμετρίας είναι, σχεδόν αποκλειστικά, αριθμητικές τιμές συντεταγμένων. Για το λόγο αυτό θα εξετάσουμε πρώτα τα **συστήματα αναφοράς** που χρησιμοποιούνται στην φωτογραμμετρία και στα οποία αναφέρονται οι σχετικές συντεταγμένες: το τρισδιάστατο επίγειο σύστημα, το διδιάστατο σύστημα της φωτογραφίας και ένα τρισδιάστατο σύστημα που είναι συνδεδεμένο με τη θέση της φωτογραφικής μηχανής κατά τη στιγμή της λήψης. Από τις σχέσεις ανάμεσα στα συστήματα αυτά θα προκύψουν οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην αναλυτική φωτογραμμετρία.

Τα προβλήματα της αναλυτικής φωτογραμμετρίας είναι τυπικά προβλήματα προσδιορισμού ενός αριθμού αγνώστων μεγεθών από ένα ορισμένο αριθμό παρατηρήσεων, όταν είναι γνωστές οι αναλυτικές (κατά κανόνα μη γραμμικές) σχέσεις που συνδέουν παρατηρήσεις και αγνώστους. Όταν ο αριθμός των αγνώστων και ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι ο ίδιος, έχουμε ένα πρόβλημα επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων, που αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια γραμμικοποίησης και διαδοχικών προσεγγίσεων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αριθμός των επηρεασμένων από σφάλματα παρατηρήσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των αγνώστων και έτσι τα προβλήματα της αναλυτικής φωτογραμμετρίας αντιμετωπίζονται με τις γνωστές μας μεθόδους **συνόρθωσης των παρατηρήσεων**.

Τα προβλήματα που θα εξετάσουμε είναι τα εξής:

- **Βαθμονόμηση:** Προσδιορισμός των παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού με τη φωτογράφιση πρότυπων συνόλων σημείων, με γνωστή γεωμετρική μορφή.
- **Εξωτερικός προσανατολισμός μιας φωτογραφίας:**
Προσδιορισμός των συντεταγμένων του κέντρου προβολής και των γωνιών προσανατολισμού της φωτογραφικής μηχανής από γνωστές συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται και φωτογραμμετρική **οπισθοτομία** ή οπισθοτομία στο χώρο.
- **Σχετικός προσανατολισμός ζεύγους φωτογραφιών:**
Προσδιορισμός των συντεταγμένων της βάσης μεταξύ των δύο κέντρων λήψης (εκτός από την κλίμακα), και του σχετικού προσανατολισμού των δύο θέσεων της φωτογραφικής μηχανής.
- **Φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία** (εμπροσθοτομία στο χώρο):
Προσδιορισμός των συντεταγμένων στο χώρο ενός σημείου από δύο φωτογραφίες, όταν είναι γνωστός ο εξωτερικός προσανατολισμός των φωτογραφιών.
- **Απόλυτος προσανατολισμός μοντέλου:**
Προσδιορισμός των παραμέτρων που συνδέουν το επίγειο σύστημα αναφοράς με ένα σύστημα αναφοράς του μοντέλου, από γνωστές συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου.
- **Ταυτόχρονος σχετικός και απόλυτος προσανατολισμός ζεύγους φωτογραφιών:**
Προσδιορισμός των συντεταγμένων των δύο κέντρων προβολής και των γωνιών προσανατολισμού των δύο θέσεων της φωτογραφικής μηχανής, από γνωστές συντεταγμένες σημείων του αντικειμένου.

Διάφορα είδη αναλυτικών αεροτριγωνισμών:

- **Αεροτριγωνισμός με τη μέθοδο των ανεξάρτητων μοντέλων:**
Πρόκειται για ένα ταυτόχρονο απόλυτο προσανατολισμό πολλών μοντέλων. Με βάση γνωστές συντεταγμένες ορισμένων σημείων του εδάφους, αναλύονται παρατηρήσεις συντεταγμένων περισσοτέρων σημείων σε αναλογικά δημιουργημένα μοντέλα, με σκοπό τον υπολογισμό των παραμέτρων μετασχηματισμού κάθε μοντέλου, αλλά και των συντεταγμένων στο έδαφος όλων των σημείων.
- **Αεροτριγωνισμός με τη μέθοδο δέσμης:**
Πρόκειται για ένα ταυτόχρονο σχετικό και απόλυτο προσανατολισμό πολλών φωτογραφιών. Με βάση γνωστές συντεταγμένες ορισμένων σημείων του εδάφους, αναλύονται παρατηρήσεις συντεταγμένων πε-

ρισσοτέρων σημείων σε πολλές φωτογραφίες. Προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των κέντρων προβολής και οι γωνίες προσανατολισμού όλων των φωτογραφιών, αλλά και οι συντεταγμένες στο έδαφος όλων των σημείων.

– **Αεροτριγωνισμός με τη μέθοδο δέσμης και ταυτόχρονη βαθμονόμηση:**

Επέκταση του αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο δέσμης, ώστε να συμπεριλαμβάνονται στις άγνωστες παραμέτρους και να προσδιορίζονται ταυτόχρονα και παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού της φωτογραφικής μηχανής.

Σε όλα τα παραπάνω προβλήματα οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι συντεταγμένες των εικόνων σημείων πάνω στις φωτογραφίες με εξαίρεση τον απόλυτο προσανατολισμό μοντέλου και τον αεροτριγωνισμό με τη μέθοδο των ανεξάρτητων μοντέλων, όπου χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις των συντεταγμένων του μοντέλου. Οι συντεταγμένες ορισμένων σημείων του αντικειμένου (σημεία ελέγχου) θεωρούνται συνήθως απόλυτα γνωστές. Είναι όμως δυνατόν να αντιμετωπισθούν και σαν "παράμετροι με βάρη", σαν ψευδοπαρατηρήσεις δηλαδή με γνωστό πίνακα συμμεταβλητότητας (αν και συνήθως οι συμμεταβλητότητες αγνοούνται στην πράξη και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι μεταβλητότητες).

Τέλος θα εξετάσουμε και μικτές φωτογραμμετρικές-γεωδαιτικές μεθόδους, όπου, εκτός από τις συνηθισμένες φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις, χρησιμοποιούνται και γεωδαιτικές παρατηρήσεις, είτε κλασσικές (αποστάσεις, γωνίες, υψόμετρα), είτε σύγχρονες, όπως παρατηρήσεις με δορυφορικά συστήματα (GPS) και αδρανειακά συστήματα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι μικτές φωτογραμμετρικές - τοπογραφικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην επίγεια φωτογραμμετρία για την αποτύπωση μνημείων.

Οι ιδιαιτερότητες των φωτογραμμετρικών εφαρμογών με επίγειες φωτογραφίες, καθώς και το ιδιαίτερο ενδιαφέρον τους για τη χώρα μας, επιβάλουν την ξεχωριστή ανάπτυξη της **επίγεια αναλυτικής φωτογραμμετρίας**. Στην επίγεια φωτογραμμετρία κυριαρχεί η μέθοδος της δέσμης, είτε με παρόμοια μορφή όπως στον αεροτριγωνισμό, είτε με ένα διαφορετικό μαθηματικό μοντέλο, τον ευθύ γραμμικό μετασχηματισμό (DLT), όπου τις συντεταγμένες των κέντρων προβολής και τις γωνίες προσανατολισμού, κάθε φωτογραφίας, αντικαθιστούν παράμετροι χωρίς συγκεκριμένο φυσικό νόημα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ταυτόχρονη ανάλυση φωτογραμμετρικών και τοπογραφικών μετρήσεων σε μία κοινή συνόρθωση. Μία ιδιαιτερότητα της επίγεια φωτογραμμετρίας, και ιδιαίτερα των περιπτώσεων με υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας, είναι η περίπτωση όπου δεν υπάρχουν καθόλου σημεία με γνωστές συντεταγμένες και ο

προσδιορισμός συντεταγμένων ακολουθεί την λύση "ελευθέρου δικτύου" με μεθόδους παρόμοιες με εκείνες των γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών.

Ο προσδιορισμός των οριζόντιων συντεταγμένων σημείων μιας επίπεδης οριζόντιας περιοχής, από μία και μόνο φωτογραφία, είναι το αντικείμενο της **αναλυτικής αναγωγής**, όπου, με βάση ορισμένα γνωστά σημεία, προσδιορίζονται οι παράμετροι που μετασχηματίζουν συντεταγμένες από τη φωτογραφία στο έδαφος.

Η λύση όλων των παραπάνω προβλημάτων γίνεται με συνόρθωση παρατηρήσεων, από την οποία προκύπτουν, όχι βέβαια οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων, αλλά εκτιμήσεις τους, που για να χρησιμοποιηθούν σωστά πρέπει να συνοδεύονται από κάποιο μέτρο της **ακρίβειας** και της **αξιοπιστίας** τους. Η ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προσδιορισμών μπορεί να μελετηθεί είτε θεωρητικά (αναλυτικά για απλά προβλήματα, με εξομοίωση στον υπολογιστή για πιο πολύπλοκα), εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων, είτε εμπειρικά εκτελώντας πραγματικά πειράματα. Εκτός από την ακρίβεια των απλών φωτογραμμετρικών προβλημάτων και των διαφόρων αεροτριγωνισμών, θα δοθούν και οι μέθοδοι της στατιστικής, όπου, με τη βοήθεια στατιστικών ελέγχων, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη αξιοπιστία με τον εντοπισμό και την απομάκρυνση της επίδρασης των χονδροειδών και συστηματικών σφαλμάτων.

Εκτός από τις μεθόδους επεξεργασίας στοιχείων θα δοθεί και μια σύντομη παρουσία των μετρητικών συστημάτων (μονοσυγκριτές, στερεοσυγκριτές) καθώς και των σύγχρονων αναλυτικών φωτογραμμετρικών οργάνων, όπου η επεξεργασία των στοιχείων γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή σε "πραγματικό χρόνο" κατά διάρκεια του χειρισμού.

Τέλος θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή των σύγχρονων εξελίξεων στη φωτογραμμετρία, όπου κυριαρχεί η αυτοματοποίηση, οι μη υπολογιστικές εφαρμογές των υπολογιστών, και η συνεργασία με άλλα συστήματα συλλογής δεδομένων για τη δημιουργία μεγάλων συστημάτων επεξεργασίας και παρουσίασης πληροφοριών, που ονομάζονται **Συστήματα Πληροφοριών Γης**.