



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

## ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

### ΣΤΕΡΕΟ-ΟΡΘΟΕΙΚΟΝΑ: ΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

**ΣΟΦΙΑ Μ ΣΟΪΛΕ**

*Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.*

*Επιβλέπων: Χ. ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ*

ΑΘΗΝΑ 2013

## **Το πρώτο σκαλί**

...

*Κι αν είσαι στο σκαλί το πρώτο, πρέπει  
νάσαι υπερήφανος κ' ευτυχισμένος.  
Εδώ που έφθασες, λίγο δεν είναι·  
τόσο που έκαμες, μεγάλη δόξα.  
Κι αυτό ακόμη το σκαλί το πρώτο  
πολύ από τον κοινό τον κόσμο απέχει.  
Εις το σκαλί για να πατήσεις τούτο  
πρέπει με το δικαίωμά σου νάσαι  
πολίτης εις των ιδεών την πόλι.  
Και δύσκολο στην πόλι εκείνην είναι  
και σπάνιο να σε πολιτογραφήσουν.  
Στην αγορά της βρίσκεις Νομοθέτας  
που δεν γελά κανένας τυχοδιώκτης.  
Εδώ που έφθασες, λίγο δεν είναι·  
τόσο που έκαμες, μεγάλη δόξα.*

*Κ. Π.Καβάφης*



# Περιεχόμενα

---

<b>Περιεχόμενα</b>	<b>i</b>
<b>Περιεχόμενα εικόνων</b>	<b>iii</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Ευχαριστίες</b>	<b>ix</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Η έννοια της στερεο-ορθοεικόνας.....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	2
1.3 Πρωτότυπα σημεία.....	2
<b>2 Στερεο-Ορθοεικόνα</b>	<b>3</b>
2.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	3
2.2 Αλγόριθμοι Υπολογισμού Τεχνητής Παράλλαξης.....	6
2.2.1 Στερεοζεύγος ορθοεικόνων.....	6
2.2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού της Τεχνητής Παράλλαξης.....	8
2.3 Επίδραση σφάλματος του DSM στον υπολογισμό της x-παράλλαξης.....	11
<b>3 Ανάπτυξη Λογισμικού Παραγωγής Ορθοεικόνας &amp; StereoOrthoMate</b>	<b>17</b>
3.1 Διαδικασία Παραγωγής Ορθοεικόνας.....	17
3.2 Διαδικασία Παραγωγής StereoOrthoMate με αρχικά δεδομένα δύο ορθοεικόνες και DSM.....	19
3.3 Δημιουργία Στερεοζεύγους Ορθοεικόνων με δεδομένα μία ορθοεικόνα και DSM.....	23
<b>4 Στερεοσκοπική παρατήρηση και μετρήσεις</b>	<b>25</b>
4.1 Εικόνες Αναγλύφου (Anaglyph 3D images).....	25
4.2 Στερεοζεύγος Ορθοεικόνων σε Εμπορικά Λογισμικά.....	27
4.2.1 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGIS (ArcMap, ArcScene).....	27
4.2.2 Φωτογραμμετρικό λογισμικό Earth Resources Data Analysis System (Erdas).....	29
4.3 Στερεοζεύγος Ορθοεικόνων σε Ελεύθερα Λογισμικά.....	32

4.3.1	QuantumGIS - Grass .....	33
4.3.2	Paraview .....	34
<b>5</b>	<b>Ανάπτυξη Λογισμικού OrthoStereoPair (OSP)</b>	<b>36</b>
5.1	Ανάπτυξη Λογισμικού Ορθοφωτογραφίας και SOM .....	36
5.2	Γραφική Διεπαφή OrthoStereoPair .....	37
5.2.1	Συναρτήσεις του OrthoStereoPair .....	45
5.3	Στερεοσκοπική Παρατήρηση στο OrthoStereoPair .....	46
<b>6</b>	<b>Εφαρμογές με πραγματικά δεδομένα</b>	<b>47</b>
6.1	Περιοχή I .....	47
6.2	Περιοχή II .....	53
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>58</b>
7.1	Γενικά συμπεράσματα .....	58
7.2	Προτάσεις επέκτασης της έρευνας .....	60
	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές</b>	<b>61</b>
	Στην ελληνική γλώσσα .....	61
	Ξενόγλωσσες .....	61
	Ιστοσελίδες .....	62

## Περιεχόμενα εικόνων

---

Εικόνα 2-1: Το αναλυτικό όργανο Stereocompiler, που κατασκευάστηκε από τον Blachut (1971) .....	3
Εικόνα 2-2: Τεχνητή προσθήκη σημείων στο DSM για την παραγωγή ορθοεικόνας και SOM.....	6
Εικόνα 2-3: Εικόνες αναγλύφου από στερεο-ορθοεικόνες, με χρήση διαφορετικών DSM (Chang, 2008) .....	6
Εικόνα 2-4: Σχηματική παρουσίαση παραγωγής της ορθοεικόνας (αριστερά) και η βασική αρχή δημιουργίας της στερεο-ορθοεικόνας (με τη μέθοδο της πλάγιας παράλληλης προβολής) (δεξιά) (Kraus, 1984).....	7
Εικόνα 2-5: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου παράλληλης προβολής. Αριστερά η σύνταξη της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM.....	8
Εικόνα 2-6: Λογαριθμική Μέθοδος Προβολής. Αριστερά η σύνταξη της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM .....	9
Εικόνα 2-7: Δημιουργία τεχνητής παράλλαξης ίδιου μεγέθους με την ‘πραγματική’ .....	10
Εικόνα 2-8: Μέθοδος μη Παράλληλης Προβολής. Αριστερά η παραγωγή της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM..	11
Εικόνα 2-9: Διάγραμμα ροής εργασιών για τον προσδιορισμό υψομέτρων από στερεο-ορθοεικόνες .....	12
Εικόνα 2-10: Επίδραση της ακρίβειας των υψομέτρων στη θέση του σημείου στις στερεο-ορθοεικόνες .....	14
Εικόνα3-1: Σχηματική διαδικασία σύνταξης ψηφιακής ορθοεικόνας.....	17
Εικόνα 3-2: Διπλές εγγραφές στην ορθοεικόνα .....	18
Εικόνα 3-3: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ζεύγους ορθοεικόνας και SOM .....	19
Εικόνα 3-4: Σχηματική επανασύσταση της εικόνας SOM .....	21
Εικόνα 3-5: Δημιουργία της εικόνας SOM.....	22
Εικόνα 4-1: Εικόνα Αναγλύφου (γλυπτό στον αρχαιολογικό χώρο της Περσέπολης, <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/File:Persepolis_(By_Abdolazim_Hasseli).jpg">http://en.wikipedia.org/wiki/File:Persepolis_(By_Abdolazim_Hasseli).jpg</a> ) και γυαλιά με φίλτρα κόκκινο-κυανό..	26
Εικόνα 4-2: Εικόνα Αναγλύφου, από τμήμα του πύργου στην είσοδο του Καστέλου στη Ρόδο .....	27
Εικόνα 4-3: Εικόνα αναγλύφου του αρχαιολογικού χώρου της Αρχαίας Μεσσήνης στο Περιβάλλον ArcScene .	28
Εικόνα 4-4: 3D ψηφιοποίηση στο ArcScene εικόνας αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου του θεάτρου Δελφών .....	29
Εικόνα 4-5: 3D ψηφιοποίηση εικόνας αναγλύφου στην περιοχή ιδιαίτερου φυσικού κάλλους στην τεχνητή λίμνη του Λάδωνα .....	29
Εικόνα 4-6: Περιβάλλον του Terrain Anaglyph ERDAS .....	30
Εικόνα 4-7: Εισαγωγή εικόνων αναγλύφου στο Stereo Anaglyph .....	31
Εικόνα 4-8: Περιβάλλον Stereo Analyst ERDAS.....	31
Εικόνα 4-9: Στερεοζεύγος ορθοεικόνων στο Stereo Analyst ERDAS.....	32
Εικόνα 4-10: Δημιουργία εικόνας αναγλύφου στο περιβάλλον του NVIZ .....	34

Εικόνα 4-11: Εικόνα αναγλύφου στο περιβάλλον Paraview.....	35
Εικόνα 5-1: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία γραφικής διεπιφάνειας .....	37
Εικόνα 5-2: Ειδικού τύπου παράθυρο - dialog .....	39
Εικόνα 5-3: Το γραφικό περιβάλλον του OrthoStereoPair .....	40
Εικόνα 5-4: Γραφική διεπαφή OrthoStereoPair .....	41
Εικόνα 5-5: Εισαγωγή Ορθοεικόνας και εικόνας SOM.....	41
Εικόνα 5-6: Εντολές για δημιουργία Ορθοεικόνας και SOM .....	42
Εικόνα 5-7: Εντολές για την εξάλειψη της x-παράλλαξης.....	42
Εικόνα 5-8: Εντολές για απόδοση σημείων και γραμμών .....	43
Εικόνα 5-9: Εντολή για εξαγωγή γραμμών και σημείων σε format DXF και SHP .....	43
Εικόνα 5-10: Πλήκτρα για την εξάλειψη της x-παράλλαξης.....	44
Εικόνα 6-1: Ορθοεικόνα τμήματος αναλημματικού τοίχου του Θεάτρου Δελφών (περιοχή I) .....	48
Εικόνα 6-2: Γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων της SOM.....	49
Εικόνα 6-3: Λεπτομέρεια του πίνακα γεωδαιτικών συντεταγμένων της SOM.....	49
Εικόνα 6-4: Θέσεις εικονοστοιχείων της ορθοεικόνας (με κόκκινο) και των αντίστοιχων της SOM (με μπλε) .....	50
Εικόνα 6-5: Η εικόνα SOM της περιοχής I.....	51
Εικόνα 6-6: Ορθοεικόνα και SOM ίδιων διαστάσεων.....	52
Εικόνα 6-7: Εικόνα αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου (περιοχή I).....	52
Εικόνα 6-8: Διαδικασία ψηφιοποίησης στο περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη SOP (περιοχή I).....	53
Εικόνα 6-9: Ορθοεικόνα τμήματος του αναλημματικού τοίχου του Θεάτρου Δελφών (περιοχή II) .....	54
Εικόνα 6-10: Αρχικές και μετακινημένες θέσεις εικονοστοιχείων της ορθοεικόνας (περιοχή II) .....	54
Εικόνα 6-11: Εικόνα SOM της περιοχής II .....	55
Εικόνα 6-12: Εικόνα αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου (περιοχή II) .....	55
Εικόνα 6-13: Διαδικασία ψηφιοποίησης στο περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη OSP για την περιοχή II .....	56
Εικόνα 6-14: Σύγκριση απόδοσης γεωμετρικών στοιχείων για την περιοχή II .....	57
Εικόνα 6-15: Σύγκριση απόδοσης γεωμετρικών στοιχείων για την περιοχή II στο SSK και στην αρχική Ορθοεικόνα .....	57

## Περίληψη

---

Είναι γνωστή και ευρέως διαδεδομένη η χρήση φωτογραμμετρικών τεχνικών για τη γεωμετρική τεκμηρίωση – καταγραφή των μνημείων. Βασική τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η στερεοσκοπική απόδοση, η οποία έχει το πλεονέκτημα της 3D παρατήρησης και μέτρησης με αποτέλεσμα την ακριβή ψηφιοποίηση ακμών και λοιπών λεπτομερειών. Αυτή η τεχνική απαιτεί από τον χρήστη να έχει εξειδικευμένες γνώσεις φωτογραμμετρίας και ειδικό εξοπλισμό. Άλλη τεχνική είναι η ορθοεικόνα, που είναι ένα εύχρηστο εικονιστικό (raster) προϊόν με δυνατότητα ψηφιοποίησης σε 2D διαστάσεις, που όμως δεν είναι επαρκής για απόδοση μνημείων με πολύπλοκες επιφάνειες.

Η έννοια της stereo-orthophoto (στερεο-ορθοφωτογραφία/στερεο-ορθοεικόνα) εισήχθη πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για την εφαρμογής της για χαρτογραφικούς, κτηματολογικούς και άλλους σκοπούς για αρκετά χρόνια. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της ορθοεικόνας με τη δυνατότητα 3D παρατήρησης και μέτρησης. Την τελευταία 15ετία ξανατονώθηκε το ενδιαφέρον για την τεχνική αυτή με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών και τον συνδυασμό της με συστήματα GIS. Όμως, όλες οι καταγεγραμμένες στη βιβλιογραφία αναφορές της αφορούν εναέριες εφαρμογές.

Στη παρούσα εργασία αναπτύσσεται και προτείνεται η εφαρμογή της stereo-orthophoto τεχνικής στην απόδοση και ψηφιοποίηση πολύπλοκων επιφανειών μνημείων για γεωμετρική τεκμηρίωση σε μεγάλη κλίμακα. Η χρήση της αποτελεί μία ελκυστική λύση για αρχιτέκτονες και αρχαιολόγους, χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις φωτογραμμετρίας, δίνοντας τη δυνατότητα 3D παρατήρησης με αποτέλεσμα την καλύτερη ερμηνεία των στοιχείων του αντικειμένου και την ακριβέστερη ψηφιοποίηση (ακμών, φθορών κ.α.).

Η βασική αρχή για τη δημιουργία ενός ζεύγους στερεο-ορθοεικόνων (stereo orthophoto pair) είναι η εισαγωγή τεχνητής παράλλαξης, μέσω του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας (Digital Surface Model - DSM) του αντικειμένου, στην μία από τις δύο ορθοφωτογραφίες, που μπορούν να παραχθούν από τις δύο αρχικές εικόνες: δημιουργία της stereo-mate (η δεύτερη -δεξιά- εικόνα του ζεύγους στερεο-ορθοεικόνων). Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την εισαγωγή της τεχνητής x-παράλλαξης σε κάθε pixel της ορθοεικόνας, όπως η *Logarithm Projection Method* (Μέθοδος Λογαριθμικής προβολής), η *Parallel Projection Method* (Μέθοδος Παράλληλης προβολής) και η *Non-Parallel Projection Method* (Μέθοδος Μη Παράλληλης προβολής). Στην εφαρμογή, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η τελευταία, η οποία είναι η πλέον ακριβής μέθοδος.

Συντάχθηκε λογισμικό, σε περιβάλλον MatLab, για την παραγωγή της στερεο-ορθοεικόνας με δύο τρόπους:

- όταν τα δεδομένα είναι οι δύο (2) ορθοεικόνες, που έχουν παραχθεί από την αριστερή και τη δεξιά εικόνα του αρχικού στερεομοντέλου, και το DSM του αντικειμένου, οπότε η stereo-mate δημιουργήθηκε από την ορθοεικόνα που παράχθηκε από την αρχική δεξιά εικόνα, και
- όταν τα δεδομένα είναι μία (1) ορθοεικόνα και το DSM του αντικειμένου.

Για την επίτευξη της στερεοσκοπικής παρατήρησης χρησιμοποιείται η τεχνική των εικόνων αναγλύφου (anaglyph images).



Εκτός του αναπτυχθέντος λογισμικού, διερευνήθηκε η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης, τρισδιάστατων (3D) μετρήσεων και, εν τέλει, απόδοσης-ψηφιοποίησης των στοιχείων του αντικειμένου με την εισαγωγή του stereo orthophoto pair:

- σε εμπορικά φωτογραμμετρικά λογισμικά, όπως το ERDAS, ή σε εμπορικά συστήματα GIS, όπως το ArcGIS (της ESRI), αλλά στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η ύπαρξη εξειδικευμένου λογισμικού
- σε συστήματα GIS ανοικτού κώδικα (open source GIS software), όπως το Grass ή QuantumGIS.

Οι παραπάνω τεχνικές και διαδικασίες εφαρμόστηκαν σε δεδομένα από το ανάλημμα του αρχαίου θεάτρου των Δελφών. Ο έλεγχος των προϊόντων έγινε με σημεία ελέγχου, των οποίων οι συντεταγμένες ήταν γνωστές με μεγάλη ακρίβεια, και τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά τόσο στη λειτουργικότητα της μεθόδου όσο και στην ακρίβεια.

Αρα, η τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας δίνει τη δυνατότητα σε χρήστες χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις φωτογραμμετρίας, να κάνουν 3D λεπτομερείς αποδόσεις σε σύνθετες επιφάνειες μνημείων, με δεδομένα μόνον ορθοφωτογραφίες and DSM, και χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα.

## Abstract

---

The use of photogrammetric techniques for geometric documentation of monuments is widely known and applied. The basic techniques used are: (a) the stereo-restitution which has the advantage of 3D observation and accurate digitization, but which requires that the user has specific photogrammetric knowledge and equipment, and (b) the orthophoto, which is an easy to use raster product that enables 2D digitization which is not sufficient for monuments which have complex surfaces.

The concept of stereo-orthophoto was first introduced at the end of the 1960s and there was a great interest in using it in cartography and cadastral applications as well as for other purposes for several years. It combines the advantages of both the orthophoto and the 3D observation and measuring. During the last 15 years the interest for in that technique was revitalized by using digital methods and combining it with GIS environment. However, all the so far recorded references regard aerial applications.

This thesis research develops and suggests the use of the stereo-orthoimage technique in restitution and digitization of complex surfaces of monuments for their large scale geometric documentation. This may be an attractive alternative tool among architects and archaeologists how do not specialize in photogrammetry, by providing 3D observation and therefore better interpretation of object details and more accurate digitization.

The basic principle for the creation of a Stereo Orthophoto Pair (SOP) is the introduction of an artificial parallax, through the Digital Surface Model (DSM), to one of the two orthoimages that may be produced from the two original images: creation of the stereo-mate (the second left image of the stereo-orthoimage pair). Various techniques have been suggested for the introduction of artificial x-parallax to each pixel of the orthoimage, such as the *Logarithm Projection Method*, the *Parallel Projection Method* and the *Non-Parallel Projection Method*. The latter has been used in this research as it is the most accurate one.

In-house software has been developed in MatLab environment for the stereo-orthoimage production in two ways:

- when the initial data used are the two orthoimages (derived from the left and right image of the initial stereo model) and the DSM of the object, then the stereo-mate prepared has derived from the orthoimage produced from the right image, and
- when the data used is an orthoimage and the DSM.

The “anaglyph images” technique is used to achieve a stereoscopic effect.

Except for the developed software, the possibility of stereoscopic observation as well as 3D measurements and restitution-digitization of the detail elements of the object has been investigated by introducing the SOP into either:

- commercial photogrammetric software, such as ERDAS, or GIS, such as the ArcMap of ESRI; this procedure requires the use of a specialized software, or
- open source GIS software, such as the Grass or QuantumGIS.

The above mentioned techniques and procedures have been applied in this project using data from the ancient theatre of Delphi (close range application). The testing of the derived products has been

performed using check points, the coordinates of which were known with great accuracy; the test results are exceptionally satisfying both in terms of achieved accuracy and functionality of the method.

Consequently, the OSP technique may enable users with no specialization in photogrammetry to accomplish 3D detailed restitution of complex surfaces of monuments using orthoimages, DSM, and open source software.

## Ευχαριστίες

---

Ευχαριστώ θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη, για την ανάθεση του τόσο ενδιαφέροντος θέματος, την συνεχή καθοδήγησή του, τις εύστοχες υποδείξεις, και ιδέες του, οι οποίες υπήρξαν πολύτιμες. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την άμεση, διαρκή και ουσιαστική συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των τελευταίων... πολλών ετών και για την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει!

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ πολύ τη φίλη και συνάδελφο Ινώ Παπαγεωργάκη για την ανιδιοτελή στήριξή της, την προθυμία της να με βοηθήσει και να με ενθαρρύνει στη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης το φίλο και συνάδελφο Βαγγέλη Ξυνογαλά που με προθυμία και καλή διάθεση, με βοήθησε όποτε του το ζήτησα.

Ευχαριστώ τον κ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο για την διάθεσή του να ψάξει και να δώσει απαντήσεις σε θέματα προγραμματισμού που άπτονταν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Χρήστο Παπαγεωργάκη για τις τεχνικές γνώσεις που μου παρέιχε στον προγραμματισμό, βελτιώνοντας τους κώδικες που αναπτύχθηκαν και τη πολύτιμη βοήθειά του στο στήσιμο του Γραφικής Διεπαφής Χρήστη OrthoStereoPair (OSP).



# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Η έννοια της στερεο-ορθοεικόνας

Η έννοια της στερεο-ορθοεικόνας εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1960 από τον Collins (1968). Υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον και πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη της παραγωγής και χρήσης της, όπως ο Blachut (1972;1979), Kraus (1976) κ.α. Η εφαρμογή της αφορούσε σε χαρτογραφικούς, κτηματολογικούς και άλλους σκοπούς, για αρκετά χρόνια.

Συνήθως το ζεύγος στερεο-ορθοεικόνων (stereo ortho pair) αποτελείται από:

- την αριστερή ορθοεικόνα, που έχει προκύψει από τη μια (αριστερή ή δεξιά) του ζεύγους των αρχικών εικόνων, και
- τη δεξιά 'σύντροφο' (mate) της ορθοεικόνας (Stereo Ortho Mate – SOM), δηλαδή μια εικόνα που έχει τεχνητά δημιουργηθεί ώστε να είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση. Η διαδικασία παραγωγής της SOM μπορεί να επιτευχθεί με επεξεργασία της διαθέσιμης ορθοεικόνας, με χρήση του, επίσης γνωστού, Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας (DSM). Εισάγεται τεχνητή x-παράλλαξη για κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της ορθοεικόνας, η οποία υπολογίζεται είτε ως μια γραμμική συνάρτηση του υψομέτρου, είτε ως λογαριθμική συνάρτηση αυτού (Collins, 1970). Έτσι υπολογίζεται η θέση στη SOM κάθε εικονοστοιχείου της ορθοεικόνας, στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Τέλος, γίνεται επανασύσταση της εικόνας, ώστε να προκύψει μία οπτική εικόνα που θα αποτελέσει τη mate της ορθοεικόνας.

Η τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας συνδυάζει, και αυξάνει, τα πλεονεκτήματα της ορθοεικόνας με τη δυνατότητα 3D παρατήρησης και μέτρησης. Η χρήση της στερεο-ορθοεικόνας προσφέρει στον χρήστη την τρισδιάστατη παρατήρηση, και μέτρηση όπως ένα κλασικό στερεοσκοπικό ζευγάρι εικόνων με αποτέλεσμα την ακριβή αναγνώριση και παρατήρηση χαρακτηριστικών που ενδιαφέρουν τον χρήστη, αλλά και τη δυνατότητα προσδιορισμού της τρίτης διάστασης (υψομέτρων) με ακρίβεια, σε ορισμένες περιπτώσεις, καλύτερη από του υπάρχοντος DSM.

Την τελευταία 15ετία αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για την τεχνική αυτή, με τη χρήση ψηφιακών μεθόδων και τον συνδυασμό της με συστήματα GIS. Όμως, όλες οι καταγεγραμμένες στη βιβλιογραφία αναφορές της, αφορούν σε εναέριες εφαρμογές με χρήση Αεροφωτογραφιών, Δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης και εικόνων SAR.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται και προτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής της στερεο-ορθοεικόνας στην απόδοση και ψηφιοποίηση πολύπλοκων επιφανειών μνημείων, για γεωμετρική τεκμηρίωση σε μεγάλη κλίμακα. Η χρήση της αποτελεί μία ελκυστική λύση για αρχιτέκτονες και αρχαιολόγους, καθώς δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις φωτογραμμετρίας ούτε ειδικό φωτογραμμετρικό εξοπλισμό, ενώ παρέχει τη δυνατότητα τρισδιάστατης παρατήρησης που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ερμηνεία των στοιχείων του αντικειμένου και την ακριβέστερη ψηφιοποίησή τους.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η έννοια της στερεο-ορθοεικόνας και τα βασικά πλεονεκτήματα της εφαρμογή της. Αναφέρεται σύντομα ο τρόπος υπολογισμού της τεχνητής x-παράλλαξης και ο τρόπος παραγωγής της SOM. Επίσης, παρουσιάζονται οι λόγοι που αποτέλεσαν το κίνητρο για την εφαρμογή της τεχνικής της SOM στα μνημεία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στις μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν για την εφαρμογή της τεχνικής της στερεο-ορθοφωτογραφίας/εικόνας. Παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι υπολογισμού της τεχνητής x-παράλλαξης, που εισάγεται στην ορθοεικόνα για να παραχθεί η SOM, καθώς επίσης εξετάζεται η επίδραση του σφάλματος του DSM στον υπολογισμό αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται το θεωρητικό υπόβαθρο για το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την παραγωγή της ορθοεικόνας, και της 'βοηθητικής' εικόνας SOM. Τέλος αναλύονται οι περιπτώσεις των διαφορετικών δεδομένων για τη δημιουργία της SOM.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης και μέτρησης στο στερεοζεύγος που αποτελείται από την ορθοεικόνα και την SOM. Η διερεύνηση της μέτρησης και ψηφιοποίησης στο παραπάνω ζεύγος γίνεται αρχικώς σε εμπορικά φωτογραμμετρικά λογισμικά, σε εμπορικά συστήματα GIS και σε ελεύθερα λογισμικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του λογισμικού OrthoStereoPair (OSP). Παρουσιάζονται οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της Ορθοεικόνας και της SOM, καθώς και του γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής με τον χρήστη, στο οποίο εκτελούνται οι διαδικασίες της ψηφιοποίησης στο στερεοζεύγος ορθοεικόνων με τρισδιάστατη παρατήρηση.

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η εφαρμογή της παρούσας εργασίας, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ο τρόπος με τον οποίον επιτυγχάνεται η απόδοση της οριζοντιογραφικής πληροφορίας στην στερεο-ορθοεικόνα. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της εφαρμογής, και οι συγκρίσεις που έγιναν με δεδομένα που ήδη υπήρχαν ή προέκυψαν από τα εμπορικά λογισμικά.

Εν κατακλείδι, στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική ερευνητική διερεύνηση της διαδικασίας παραγωγής και χρήσης της στερεο-ορθοεικόνας.

## 1.3 Πρωτότυπα σημεία

Η εφαρμογή της τεχνικής της στερεο-ορθοεικόνας προέκυψε από την ανάγκη της άντλησης της πληροφορίας που έχει μία ορθοεικόνα συνδυάζοντας τη δυνατότητα 3D παρατήρησης και μέτρησης σε αυτήν. Τα πεδία εφαρμογών της σύμφωνα με τη βιβλιογραφία περιορίζονται στην ενημέρωση χαρτογραφικών και κτηματολογικών διαγραμμάτων μέσης κλίμακας, με χρήση αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης ή ακόμη και εικόνων SAR.

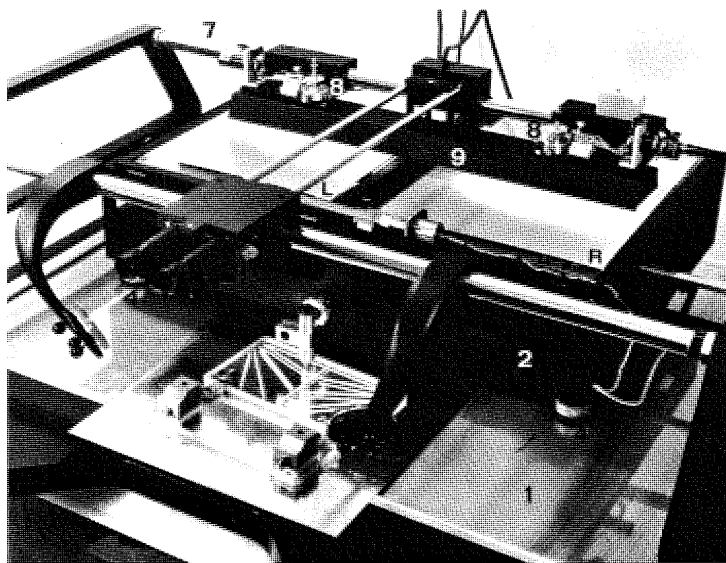
Στη παρούσα εργασία διερευνάται και προτείνεται η χρήση της τεχνικής στερεο-ορθοεικόνας στην απόδοση και ψηφιοποίηση πολύπλοκων επιφανειών μνημείων για γεωμετρική τεκμηρίωση σε μεγάλη κλίμακα. Η προοπτική της χρήσης της τεχνικής SOM είναι πολύ ελπιδοφόρα με αποτελέσματα που ικανοποιούν τις τεχνικές προδιαγραφές και ακρίβειες. Επίσης, είναι σημαντικό ότι η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί από χρήστες χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις φωτογραμμετρίας, όπως Αρχιτέκτονες και Αρχαιολόγους, δίνοντάς τους τη δυνατότητα παρατήρησης και μέτρησης σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι η δυνατότητα καλύτερης ερμηνείας των στοιχείων του αντικειμένου και ακριβέστερης ψηφιοποίησης. Οι μετρήσεις και η τρισδιάστατη παρατήρηση γίνονται σε γραφικό περιβάλλον, που αναπτύχθηκε στο Matlab.

## 2 Στερεο-Ορθοεικόνα

### 2.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές η έννοια της στερεο-ορθοφωτογραφίας εισήχθη από τον Collins το 1967 στο Εθνικό Συμβούλιο Ερευνών του Καναδά (National Research Council - NRC) (Collins, 1972), με εφαρμογές στο Κτηματολόγιο και τη μεσαίας κλίμακας Χαρτογράφηση. Η πρωτοποριακή δημοσίευση του Blachut (1971) είναι πλέον αρκετά παλιά, αλλά εξακολουθεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και λεπτομέρειες σχετικά με τη θεωρία των στερεο-ορθοεικόνων, και τις πιθανές εφαρμογές τους στην ενημέρωση Χαρτογραφικού Υποβάθρου και Κτηματολογικών Διαγραμμάτων. Η τεχνική της SOM προτάθηκε με μεγάλο ενθουσιασμό από του ερευνητές (Blachut 1976, Kraus et al. 1976) στις αναπτυσσόμενες χώρες για την εύκολη χαρτογράφηση και τη σωστή φωτοερμηνεία μεγάλων εκτάσεων. Για πρώτη φορά η χαρτογράφηση και η φωτοερμηνεία μπορούσαν να έχουν ένα κοινό υπόβαθρο επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση στην ποιότητα των προϊόντων.

Στο διάστημα 1972-1976 παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας, και πολλοί ερευνητές αναζητούσαν τρόπους για την ανάπτυξή της. Εκείνο το διάστημα έγιναν έλεγχοι για την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια της μεθόδου και κατασκευάστηκαν ειδικά αναλυτικά όργανα, όπως το NRC Stereocompiler (Blachut, 1976) και το Stereograph (Kraus, 1981), στα οποία υπήρχε η δυνατότητα να εισαχθούν η ορθοφωτογραφία και η stereomate σωστά ευθυγραμμισμένες για να μπορούν να ψηφιοποιηθούν. Οποιαδήποτε σχετική μετατόπιση στην διεύθυνση Y εισήγαγε μια σταθερή κάθετη παράλλαξη, εύκολα αναγνωρίσιμη και η οποία έπρεπε να διορθωθεί με κατάλληλη Y κίνηση του αντίστοιχου φορέα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του Stereocompiler, που το διαφοροποιούσε από τα υπάρχοντα τότε αναλογικά και αναλυτικά φωτογραμμετρικά όργανα, ήταν η δομική απλότητα του οργάνου, η ευκολία σχεδίασης και παραγωγής του τελικού προϊόντος (σημαντικό χαρακτηριστικό για την εποχή) και η συνεχής παρατήρηση, μέσα από την ίδια τη σκοπευτική διάταξη, του αποτελέσματος της σχεδίασης. Στην Εικόνα 2-1 φαίνεται το αναλυτικό όργανο Stereocompiler.



Εικόνα 2-1: Το αναλυτικό όργανο Stereocompiler, που κατασκευάστηκε από τον Blachut (1971)



Η παραπάνω τεχνική και τα αντίστοιχα αναλυτικά φωτογραμμετρικά όργανα, σύμφωνα με τους ερευνητές της δεκαετίας του 1970, παρείχαν μια αποτελεσματική λύση στην ενημέρωση υπαρχόντων χαρτών, που αποτελούσε ένα από τα πιο περίπλοκα προβλήματα χαρτογράφησης την εποχή εκείνη. Το προϊόν ήταν ένας γεωμετρικά σωστός, τρισδιάστατος χάρτης. Αυτό μπορούσε να αλλάξει την έννοια του χάρτη σε διάφορες εφαρμογές και να επιτρέψει σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής χαρτογραφικού υποβάθρου. Δεν υπήρχε καμία αμφιβολία ότι η εφαρμογή της τεχνικής της SOM επέτρεπε την γρήγορη και οικονομική χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών, που μέχρι τότε δεν είχαν αποτυπωθεί λόγω της πολυπλοκότητας, των εξόδων και της βραδύτητας της συμβατικής τοπογραφικής διαδικασίας. Επίσης, είχε προταθεί από τους ερευνητές η χρήση της στερεο-ορθοεικόνας από γεωλόγους και δασολόγους, με στόχο την ολοκλήρωση σχεδίων και ελέγχων για περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Όμως, παράλληλα με τα οφέλη, υπήρχαν περιορισμοί και μειονεκτήματα της παραπάνω τεχνικής, που πρέπει να αναφερθούν. Δεδομένου ότι η τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας, χρησιμοποιούσε την ορθοεικόνα, παράγωγο προϊόν των αρχικών εικόνων, η ακρίβεια της τεχνικής που περιγράφηκε δεν ικανοποιούσε, σε ορισμένες περιπτώσεις, την ακρίβεια των κλασικών φωτογραμμετρικών μεθόδων. Ως εκ τούτου, εάν ήταν πρωταρχικής σημασίας η επίτευξη της υψηλότερης δυνατής ακρίβεια, μάλλον έπρεπε να γίνει χρήση της κλασικής μεθόδου διεικονικής φωτογραμμετρικής απόδοσης ή των επίγειων τοπογραφικών τεχνικών. (Blachut, 1971). Τα μειονεκτήματα αυτά αποθάρρυναν πιθανούς χρήστες, όπως αρχιτέκτονες, γεωλόγους, δασολόγους, τοπογράφους, στη χρήση και ανάπτυξης της στερεο-ορθοεικόνας.

Έτσι για τα επόμενα περίπου είκοσι χρόνια, το ενδιαφέρον για την τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας συρρικνώθηκε και κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1980 και 1990 είχε σχεδόν εξαφανιστεί. Η κύρια αιτία της μείωσης του ενδιαφέροντος ήταν η προσαρμογή της τεχνικής αυτής στις τεχνικές και τα όργανα της αναλογικής και αναλυτικής φωτογραμμετρίας. Οι ορθοεικόνες και τα stereo-mate αυτών στη δεκαετία του 1970 τυπωνόταν σε φωτοευαίσθητο φιλμ, οπότε η ραδιομετρική τους ποιότητα ήταν χαμηλή. Επίσης, τα όργανα που χρησιμοποιούνταν για την τρισδιάστατη παρατήρηση και μέτρηση ήταν πολύ μεγάλα και, επομένως, μη πρακτικά.

Όμως τη δεκαετία του 1980, με τη χρήση των ψηφιακών εικόνων από δορυφορικούς δέκτες, υπήρξαν κάποιες μεμονωμένες αναφορές στην τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας, και μάλιστα με τη χρήση εικόνων SAR (Damen et al 1986, Domik et al 1986). Στην προσπάθεια διερεύνησης των δυνατοτήτων που παρέχουν οι εικόνες SAR και των πιθανών μελλοντικών εφαρμογών τους, περιλαμβάνεται και η αναφορά στη χρησιμότητα παραγωγής και χρήσης στερεο-ορθοεικόνας, στην περίπτωση που τα διαθέσιμα δεδομένα είναι μόνο μία εικόνα και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Την χαρακτηρίζουν ως αποτελεσματικό μέσο για την σωστή ερμηνεία της εικόνας, που παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού των εξάρσεων του εδάφους αξιοποιώντας τη βέλτιστη τρισδιάστατη παρατήρηση.

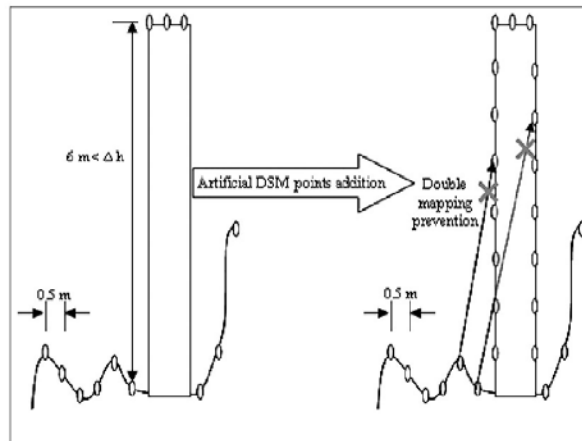
Επίσης, ο Baltsavias (1993, 1996) προτείνει την ένταξη των στερεο-ορθοεικόνων (από οπτικές αρχικές εικόνες) σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) ως ένα ισχυρό εργαλείο εξαγωγής χωρικών και γεωγραφικών πληροφοριών. Δίνεται έμφαση στην εξαγωγή των πληροφοριών με τη χρήση 3D ορθοεικόνων και στις δυνατότητές τους ειδικά στην ενημέρωση και τη δημιουργία βάσεων δεδομένων και την αυτόματη χαρτογράφηση. Αναφέρει τη δυνατότητα των συστημάτων GIS να υποστηρίξουν την επίθεση (draping) της ορθοεικόνας στο διαθέσιμο Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας και τη δημιουργία μιας SOM επιλέγοντας απλώς μια πλάγια παράλληλη προβολή της υψής του εδάφους. Ωστόσο αυτός ο τρόπος παραγωγής της SOM δεν είναι ο βέλτιστος, καθώς τόσο η ακρίβεια όσο και η αυστηρότητα των υπολογισμών του draping είναι συνήθως άγνωστη στον χρήστη. Τέλος, γίνεται αναφορά στα πολλά πλεονεκτήματα των SOM σχετικά με τη δυνατότητα που έχει ο χρήστης να αναγνωρίσει καλύτερα και

να ψηφιοποιήσει τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που τον ενδιαφέρουν και τη δυνατότητα εύρεσης υψομέτρων με αυξημένη ακρίβεια (βλ. κεφάλαιο 3).

Μελετώντας τη βιβλιογραφία μετά το 2000 διαπιστώνεται ότι εξακολουθεί να έχει ερευνητικό ενδιαφέρον η τεχνική της στερεο-ορθοεικόνας. Τονίζεται ιδιαίτερα η μετρητική της αξία και η ένταξή της ως εργαλείο στα συστήματα GIS ανοικτού λογισμικού. Θεωρείται ότι αυτά τα συστήματα GIS έχουν μεγάλο αριθμό χρηστών διαφόρων επιστημονικών πεδίων, για τους οποίους η ορθοεικόνα θα μπορούσε να αποτελεί προϊόν με υψηλή μετρητική και φωτοερμηνευτική αξία. Προτείνεται λοιπόν η ένταξη της στερεο-ορθοεικόνας ως εργαλείο μέσα στο GIS, ως συμπληρωματικό της ορθοεικόνας, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα καλύτερης ερμηνείας της εικόνας εκμεταλλευόμενοι την στερεοσκοπική παρατήρηση (Pyka, 2012).

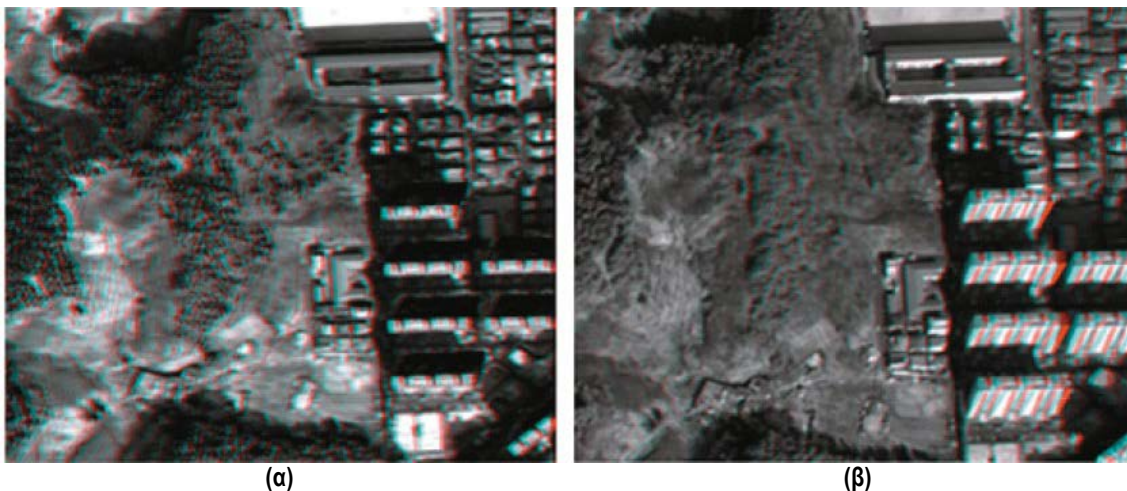
Οι Li et al. (2002) προκειμένου να επιτύχουν αδιάλειπτη 3D παρατήρηση και μετρήσεις, σε περιοχή μεγαλύτερης έκτασης από αυτήν που καλύπτεται από ένα στερεοσκοπικό ζεύγος ορθοεικόνων, προτείνουν τη δημιουργία μιας Βάσης Δεδομένων από στερεο-ορθοεικόνες χωρίς συρραφές (Seamless Database Stereo Orthoimage). Έτσι, γίνεται παραγωγή ορθοεικόνων και SOM από όλες τις αεροφωτογραφίες που καλύπτουν την περιοχή ενδιαφέροντος, ακολουθεί η ανάπτυξη και δημιουργία της Βάσης Δεδομένων των ορθοεικόνων και των αντίστοιχων SOM και παρέχεται η δυνατότητα για αυτόματη ανάκληση και διαχείριση (παρατήρηση, μετρήσεις) του κάθε στερεοζεύγους ορθοεικόνων. Η δημιουργία αυτής της βάσης δεδομένων στερεο-ορθοεικόνων έχει πολλά πλεονεκτήματα και μπορεί να λειτουργήσει σε περιβάλλον GIS και CAD, δίνοντας έτσι ένα νέο προϊόν με εφαρμογές σε πολλές ειδικότητες επιστημόνων. Για παράδειγμα, γεωπόνοι και δασολόγοι έχουν τη δυνατότητα 3D παρατηρήσεων και μετρήσεων του ύψους της βλάστησης και της έκτασης των δασικών περιοχών. Οι γεωλόγοι μπορούν να παρατηρήσουν και να μετρήσουν τις γεωλογικές μορφές και να προβούν σε 3D φωτοερμηνείες. Επίσης, υπάρχουν εφαρμογές στο αντικείμενο των Πολιτικών Μηχανικών, π.χ. εξαγωγή τομών για κατασκευαστικά έργα κ.α., στο πεδίο της Υδρολογίας για τρισδιάστατες μετρήσεις και ανάλυση δεδομένων. Τέλος, πολεοδόμοι, χωροτάκτες και περιβαλλοντολόγοι μπορούν να σχεδιάσουν και να προτείνουν λύσεις έχοντας ως υπόβαθρο 3D απεικόνιση του τοπίου, σε 'πραγματικές'-γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Στην βιβλιογραφία, επίσης, συναντάται τα τελευταία χρόνια η χρήση της τεχνικής της στερεο-ορθοεικόνας σε εφαρμογές σε αστικές περιοχές, όταν τα αρχικά δεδομένα είναι (οπτικές) δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή που αναφέρει ο Chang (2008), όπου τα δεδομένα είναι μία ναδρική και μία πλάγια εικόνα αστικής περιοχής, με πολύ ψηλά κτίρια. Η γεωαναφορά των εικόνων έγινε με το προσεγγιστικό μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων (Rational Functions) και ο υπολογισμός της x-παράλλαξης, για τη δημιουργία της stereomate, με τη μέθοδο της παράλληλης προβολής, προφανώς, λόγω της γεωμετρίας των δορυφορικών εικόνων και της μεγάλης απόστασης λήψης τους (στοιχεία που τις διαφοροποιούν από τις αεροφωτογραφίες). Έτσι, αρχικώς δημιουργήθηκε η stereomate από την αρχική πλάγια δορυφορική εικόνα. Στη συνέχεια προτείνεται η πύκνωση του υπάρχοντος DSM της περιοχής. κυρίως στις όψεις των κτιρίων, όπου γνωρίζοντας το υψόμετρο στην οροφή του κτιρίου και στο έδαφος, και παρατηρώντας στερεοσκοπικά, προστέθηκαν σημεία στην όψη του κτιρίου που είχαν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά 0.50 m. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα εικονικό επαυξημένο 3D DSM. Χρησιμοποιώντας αυτό το DSM έγινε παραγωγή ορθοεικόνας, με σημαντικά μειωμένες αποκρύψεις στις περιοχές γύρω από τα κτίρια. Το ποσοστό των αποκρύψεων που εξακολούθησαν να υπάρχουν ήταν 5.5%, ενώ με την κλασική διαδικασία το ποσοστό των αποκρύψεων ήταν 21.5%. Στην Εικόνα 2-2 φαίνεται η διαδικασία πύκνωση του DSM για την παραγωγή της ορθοεικόνας και της SOM.



Εικόνα 2-2: Τεχνητή προσθήκη σημείων στο DSM για την παραγωγή ορθοεικόνας και SOM

Στην Εικόνα 2-3 παρατίθενται οι εικόνες αναγλύφου (απαιτούνται κόκκινα-μπλε γυαλιά για την 3D παρατήρησή τους), που προέκυψαν από τη δημιουργία της stereomate με το υπάρχον DSM (Εικόνα 2-3α) και από την εφαρμογή της προταθείσας διαδικασίας (Εικόνα 2-3β).



Εικόνα 2-3: Εικόνες αναγλύφου από στερεο-ορθοεικόνας, με χρήση διαφορετικών DSM (Chang, 2008)

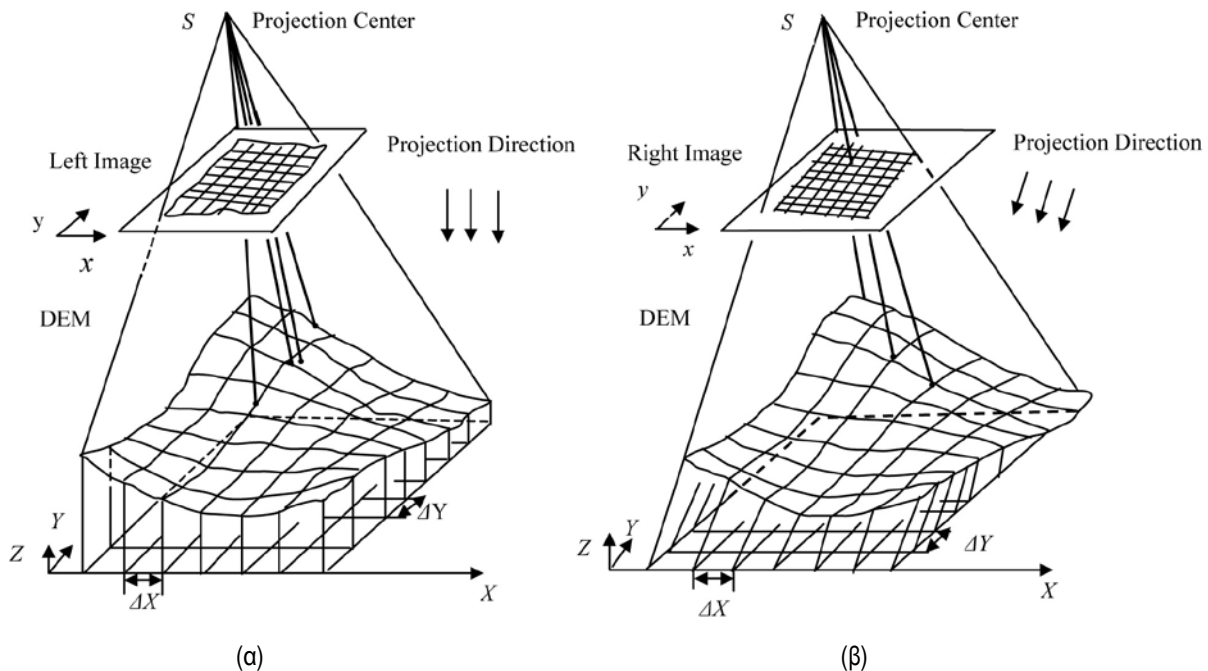
## 2.2 Αλγόριθμοι Υπολογισμού Τεχνητής Παράλλαξης

### 2.2.1 Στερεοζεύγος ορθοεικόνων

Στη φωτογραμμετρία η ανάπλαση και η απόδοση τρισδιάστατων αντικειμένων γίνεται με τη βοήθεια τουλάχιστον δύο φωτογραφικών λήψεων. Η στερεοσκοπική παρατήρηση ζεύγους εικόνων παρέχει μια αντίληψη του χώρου με τονισμένο το ανάγλυφο ή, με άλλα λόγια, με επαυξημένη πλαστικότητα (Kraus, 2003). Το στερεοσκοπικό μοντέλο χρησιμεύει για ταχύτερη παρατήρηση και ακριβέστερη σκόπευση των ομόλογων σημείων, μέσω της ιπτάμενης μάρκας. Οι δύο εικόνες παρουσιάζουν μόνο x-παραλλάξεις παράλληλες προς τη βάση (οριζόντιες παραλλάξεις), ενώ οι κάθετες y-παραλλάξεις έχουν εξαλειφθεί κατά τη αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού. Το πλεονέκτημα της στερεοσκοπικής παρατήρησης είναι η δυνατότητα της συνεχούς οριζοντιογραφικής και υψομετρικής απόδοσης στο στερεομοντέλο.

Η βασική αρχή της στερεο-ορθοεικόνας είναι η υλοποίηση ενός στερεοσκοπικού ζεύγους ορθοεικόνων, με στόχο την προσομοίωση του στερεοζεύγους εικόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα

αδιάλειπτης στερεοσκοπικής παρατήρησης και τη σκόπευση σημείων στο 3D περιβάλλον του μοντέλου που δημιουργείται. Στην Εικόνα 2-4 παρουσιάζεται η βασική αρχή της στερεο-ορθοεικόνας (Kraus, 1984).



Εικόνα 2-4: Σχηματική παρουσίαση παραγωγής της ορθοεικόνας (αριστερά) και η βασική αρχή δημιουργίας της στερεο-ορθοεικόνας (με τη μέθοδο της πλάγιας παράλληλης προβολής) (δεξιά) (Kraus, 1984)

Η Εικόνα 2-4α δείχνει σχηματικά την κλασική διαδικασία παραγωγής της ορθοεικόνας από την αριστερή εικόνα μέσω του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι ένα εικονιστικό προϊόν, μια εικόνα που έχει αναχθεί διαφορικά ώστε να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις της αρχικής εικόνας, που οφείλονταν στην επίδραση των κλίσεων και στις εκτροπές λόγω αναγλύφου. Οι κυριότερες ιδιότητες είναι ότι έχει ενιαία κλίμακα, περιέχει ποιοτική πληροφορία, έχει μετρητική αξιοπιστία και αποτελεί ευέλικτο ψηφιακό προϊόν. Η παραγωγή της διαφορικά αναγμένης εικόνας ή ορθοεικόνας είναι μια αυτοματοποιημένη ψηφιακή μονοεικονική φωτογραμμετρική διαδικασία, που έχει ως αποτέλεσμα την απεικόνιση του χώρου σε ορθή προβολή. Ακτινική μετατόπιση στην παραγόμενη εικόνα εμφανίζεται μόνον στις οριζοντιογραφικές θέσεις των σημείων των υπερκείμενων της επιφάνειας του εδάφους, π.χ. κτιρίων ή άλλων τεχνικών έργων.

Στην Εικόνα 2-4β φαίνεται η διαδικασία παραγωγής της StereoOrthoMate (SOM) από την δεξιά εικόνα του αρχικού στερεοζεύγους. Η βασική διαφορά της SOM από την ορθοεικόνα είναι η πλάγια προβολή του χώρου, που επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μιας τεχνητής x-παράλλαξης σε κάθε εικονοστοιχείο της ορθοεικόνας. Έχουν προταθεί και εφαρμοσθεί διάφοροι τρόποι υπολογισμού της τεχνητής παράλλαξης, είτε ως γραμμική συνάρτηση του υψομέτρου είτε ως λογαριθμική συνάρτησή του (Collins, 1972). Η απλούστερη μέθοδος υπολογισμού και εισαγωγής τεχνητής παράλλαξης είναι η εφαρμογή της μεθόδου της πλάγιας παράλληλης προβολής, δηλαδή η προβολή μέσω παράλληλων ακτίνων, που σχηματίζουν μια ορισμένη γωνία με τον άξονα Z (Εικόνα 2-5β). Οι τεχνητές παραλλάξεις, όπως και οι x-παραλλάξεις σε ζεύγος εικόνων, περιέχουν την πληροφορία του ανάγλυφου, οπότε η εισαγωγή τους στη 'δεξιά ορθοεικόνα' (ορθοεικόνα που έχει προκύψει από τη δεξιά εικόνα του αρχικού στερεοζεύγους) δημιουργεί μια νέα 'βοηθητική εικόνα', η οποία μπορεί να υλοποιηθεί μαζί με την ορθοεικόνα ένα στερεοζεύγος:

- αριστερή εικόνα του στερεοζεύγους είναι η ορθοεικόνα (μπορεί να προέρχεται από οποιαδήποτε εικόνα του αρχικού στερεοζεύγους ή και να αποτελεί μωσαϊκό επιμέρους ορθοεικόνων)
- δεξιά εικόνα του στερεοζεύγους είναι η SOM.

Θεωρητικώς, από τον τρόπο δημιουργίας αυτού του στερεοζεύγους, δεν νοείται η ύπαρξη κάθετης (y) παράλλαξης. Στην πράξη, η σύνταξη ορθοεικόνων και από τις δύο εικόνες του αρχικού στερεοζεύγους, στη μια από τις οποίες προστίθεται η τεχνητή παράλλαξη, μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση y-παράλλαξης στο ζεύγος των στερεο-ορθοεικόνων (σχετική μετάθεση ως προς τον Y άξονα), που, προφανώς, δυσκολεύει τη στερεοσκοπική παρατήρηση.

## 2.2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού της Τεχνητής Παράλλαξης

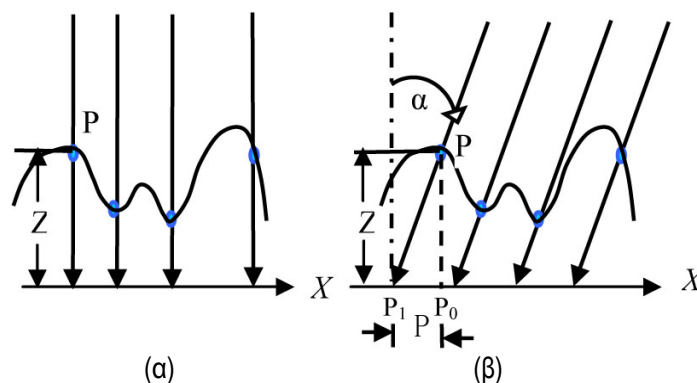
Το βασικό πλεονέκτημα της δημιουργίας του στερεοζεύγους ορθοεικόνων είναι η δυνατότητα 3D σκόπευσης σημείων στο μοντέλο. Άρα ο υπολογισμός του μεγέθους της τεχνητής x-παράλλαξης που εισάγεται στην 'δεξιά ορθοεικόνα' έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη συνέχεια θα γίνει σύντομη αναφορά σε τρεις μεθόδους υπολογισμού της τεχνητής παράλλαξης, που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία: (α) τη μέθοδο (πλάγιας) παράλληλης προβολής, (β) τη λογαριθμική μέθοδο προβολής και (γ) τη μέθοδο μη παράλληλης προβολής.

### (α) Μέθοδος πλάγιας παράλληλης προβολής

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά την πρώτη εφαρμογή της διαδικασίας της στερεο-ορθοφωτογραφίας, τη δεκαετία του 1960, γιατί είναι η απλούστερη για τη δημιουργία της stereomate (Blachut, 1971; Collins, 1972), αλλά δεν είναι η ακριβέστερη. Η βασική αρχή της φαίνεται στην Εικόνα 2-5. Η τεχνητή παράλλαξη εισάγεται με τη μετάθεση των σημείων της ορθοεικόνας κατά μια ποσότητα, που προκύπτει από την εφαρμογή μιας πλάγιας παράλληλης προβολής.

Στην Εικόνα 2-5α απεικονίζεται η ορθή προβολή (κατακόρυφη παράλληλη προβολή) του αντικείμενου, δηλαδή η απεικόνιση του χώρου στην ορθοεικόνα. Αν θεωρηθεί σημείο P στο έδαφος (αντικείμενο), με Z την υψομετρική του διαφορά ως προς το επίπεδο αναφοράς, τότε, σύμφωνα με την Εικόνα 2-5β, το σημείο P<sub>0</sub> είναι η ορθή προβολή του σημείου P στην ορθοεικόνα και P<sub>1</sub> είναι το ίχνος της προβολής του P στη νέα 'βοηθητική εικόνα' εφαρμόζοντας πλάγια παράλληλη προβολή με γωνία κλίση α ως προς τον άξονα Z. Στην περίπτωση αυτή η τεχνητή παράλλαξη P αποτελεί μια γραμμική συνάρτηση του υψομέτρου και δίνεται από τη σχέση:

$$P = \tan \alpha \cdot Z \quad (2.1)$$



Εικόνα 2-5: Αρχή λειτουργίας της μεθόδου παράλληλης προβολής. Αριστερά η σύνταξη της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM

Για να είναι εφικτή η στερεοσκοπική παρατήρηση και κατά συνέπεια η 3D μέτρηση, θα πρέπει η γωνία  $\alpha$  που αντιστοιχεί στο μέγεθος της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης που εισάγεται στη δεξιά ορθοεικόνα να δίνει αντίστοιχες τιμές με τις παραλλάξεις του στερεομοντέλου των αρχικών εικόνων. Συνήθως η γωνία της πλάγιας παράλληλης προβολής λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\tan \alpha = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

όπου:  $B$  η βάση του στερεοζεύγους και  
 $H$  το υψόμετρο πτήσης.

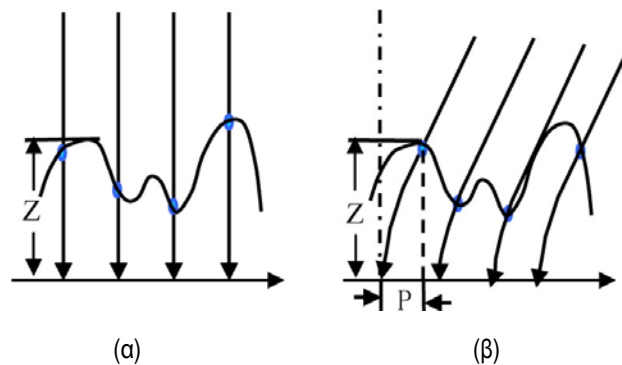
Υπολογίζοντας τις  $x$ -παραλλάξεις δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των υψομέτρων και υψομετρικών διαφορών μεταξύ των σημείων, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$Z_i = \frac{P_i}{k} M + Z_o \quad (2.3a) \quad \text{και} \quad \Delta Z_{ij} = (P_i - P_j) \frac{1}{k} M \quad (2.3b)$$

όπου:  $P_i$  η  $x$ -παράλλαξη του σημείου  $i$ ,  
 $k$  συντελεστής,  
 $M$  ο συντελεστής κλίμακας της ορθοεικόνας και  
 $Z_o$  η υψομετρική αφετηρία.

### (β) Λογαριθμική μέθοδος προβολής

Ο υπολογισμός της  $x$ -παράλλαξης με τη μέθοδο της παράλληλης προβολής προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση της διαφοράς των υψομέτρων των διάφορων σημείων του χώρου που απεικονίζεται στις εικόνες σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς. Όμως οι υπολογιζόμενες τιμές των τεχνητών παραλλάξεων δεν συμφωνούν με τις αντίστοιχες  $x$ -παραλλάξεις του αρχικού στερεομοντέλου και αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη στερεοσκοπική παρατήρηση και στις 3D σκοπεύσεις. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα προτείνεται η εφαρμογή της Λογαριθμικής Μεθόδου για τον υπολογισμό της  $x$ -παράλλαξης. Η αρχή της λογαριθμικής μεθόδου προβολής φαίνεται στην Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Λογαριθμική Μέθοδος Προβολής. Αριστερά η σύνταξη της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM

Η σχέση υπολογισμού της  $x$ -παράλλαξης με τη μέθοδο της Λογαριθμικής Προβολής είναι (Collins, 1972):

$$P = B \cdot \ln\left(\frac{H}{H - Z}\right) \quad (2.4)$$

όπου:  $B$  η βάση του στερεοζεύγους των ορθοεικόνων  
 $H$  το υψόμετρο πτήσης

$Z$  το υψόμετρο των σημείων που απεικονίζονται στην εικόνα

$P$  η τεχνητή παράλλαξη που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο.

Σύμφωνα με την Λογαριθμική Μέθοδο το υψόμετρο στο σημείο  $i$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Z_i = H(1 - \exp(-\frac{P_i}{B})) + Z_0 \quad (2.5)$$

όπου:  $B$  η βάση του στερεοζεύγους των ορθοεικόνων

$H$  το υψόμετρο πτήσης

$P_i$  το μέγεθος της  $x$ -παράλλαξης στο σημείο  $i$

$Z_0$  η υψομετρική αφετηρία.

### (γ) Μέθοδος μη παράλληλης προβολής

Η Λογαριθμική Μέθοδος Προβολής μπορεί να εισάγει  $x$ -παράλλαξη αντίστοιχη με την αρχική παράλλαξη του στερεοζεύγους, όμως το σημείο τομής μεταξύ της λογαριθμικής συνάρτησης και του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) προσδιορίζεται με διαδοχικές προσεγγίσεις. Για το λόγο αυτό δεν θεωρείται εύχρηστη η εφαρμογή της Λογαριθμικής Μεθόδου Προβολής, οπότε είναι αναγκαία η αντιμετώπιση του προβλήματος με χρήση άλλης μεθόδου.

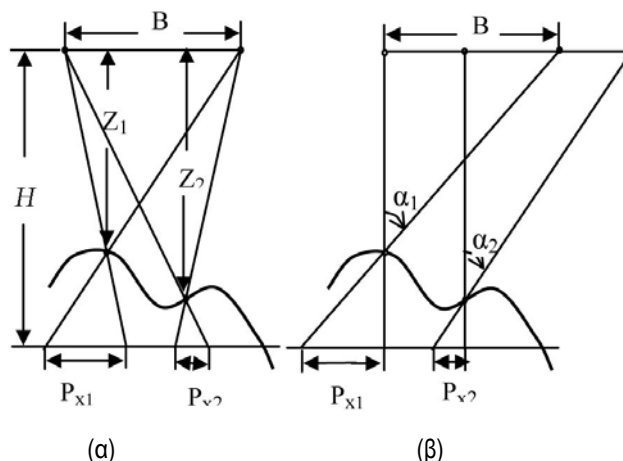
Η Εικόνα 2-7α δείχνει τις παραλλάξεις στο στερεομοντέλο των (αρχικών) αεροφωτογραφιών, σε δύο σημεία εδάφους με διαφορετικά υψόμετρα ως προς το υψομετρικό επίπεδο αναφοράς ('πραγματικές' παραλλάξεις). Αντίστοιχα η Εικόνα 2-7β δείχνει τις δύο ακτίνες προβολής, από τη stereomate, με διαφορετικές γωνίες  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  ώστε να προσδιορισθούν τεχνητές παραλλάξεις ίδιου μεγέθους με τις παραλλάξεις στο αρχικό στερεομοντέλο (τις 'πραγματικές' παραλλάξεις). Από τη γεωμετρίας του σχήματος, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις γωνίες  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  που σχηματίζουν οι δύο ακτίνες προβολής με τον άξονα  $Z$ , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (2.6α) και (2.6β):

$$\tan \alpha_1 = \frac{B}{Z_1} \quad (2.6\alpha) \quad \tan \alpha_2 = \frac{B}{Z_2} \quad (2.6\beta)$$

όπου:  $\alpha_1, \alpha_2$  οι γωνίες που σχηματίζουν οι δύο ακτίνες προβολής με τον άξονα  $Z$ ,

$B$  η βάση του στερεοζεύγους,

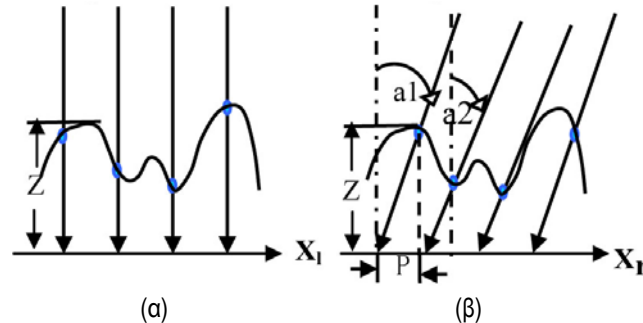
$Z_1, Z_2$  τα υψόμετρα των δύο σημείων ως προς το επίπεδο αναφοράς.



Εικόνα 2-7: Δημιουργία τεχνητής παράλλαξης ίδιου μεγέθους με την 'πραγματική'

Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται Μέθοδος μη-παράλληλης προβολής, με την οποία οι (τεχνητές)  $x$ -παράλλάξεις που υπολογίζονται και εισάγονται στη δεξιά ορθοεικόνα είναι ίδιες με τις 'πραγματικές'

παραλλάξεις, με αποτέλεσμα να υλοποιείται το στερεοζεύγος των ορθοεικόνων με ακριβέστερο τρόπο. Στην Εικόνα 2-8 φαίνεται η βασική αρχή αυτής της μεθόδου. Η γωνία της ακτίνας προβολής της SOM αλλάζει ανάλογα με το υψόμετρο του σημείου στο έδαφος, με αποτέλεσμα η παράλλαξη που εισάγεται στην τετμημένη του κάθε εικοστοιχείου να είναι πολύ κοντά στο μέγεθος της παράλλαξης του στερεοζεύγους των αρχικών αεροφωτογραφιών.



Εικόνα 2-8: Μέθοδος μη Παράλληλης Προβολής. Αριστερά η παραγωγή της ορθοεικόνας και δεξιά της SOM

Η σχέση που δίνει την x-παράλλαξη με τη μέθοδο της μη παράλληλης προβολής ακτίνων των σημείων στο χώρο είναι η ακόλουθη:

$$P = \frac{BZ}{H - Z} \quad (2.7)$$

Γνωρίζοντας την x-παράλλαξη για κάθε σημείο του εδάφους, έχουμε τη δυνατότητα υπολογισμού του υψόμετρου του σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$Z_i = \frac{P_i H}{B + P_i} \quad (2.8)$$

όπου:  $B$  η βάση του στερεοζεύγους (των ορθοεικόνων)

$H$  το υψόμετρο πτήσης

$Z_i$  το υψόμετρο του σημείου  $i$

$P_i$  η (τεχνητή) παράλλαξη που αντιστοιχεί στο σημείο  $i$ .

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός της x-παράλλαξης έγινε με τη μέθοδο της μη-παράλληλης προβολής των ακτίνων των σημείων του εδάφους. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε διότι η ποσότητα της τεχνητής παράλλαξης που εισάγεται στην δεξιά ορθοεικόνα προσομοιώνει βέλτιστα την παράλλαξη του αρχικού στερεοζεύγους των αεροφωτογραφιών.

### 2.3 Επίδραση σφάλματος του DSM στον υπολογισμό της x-παράλλαξης

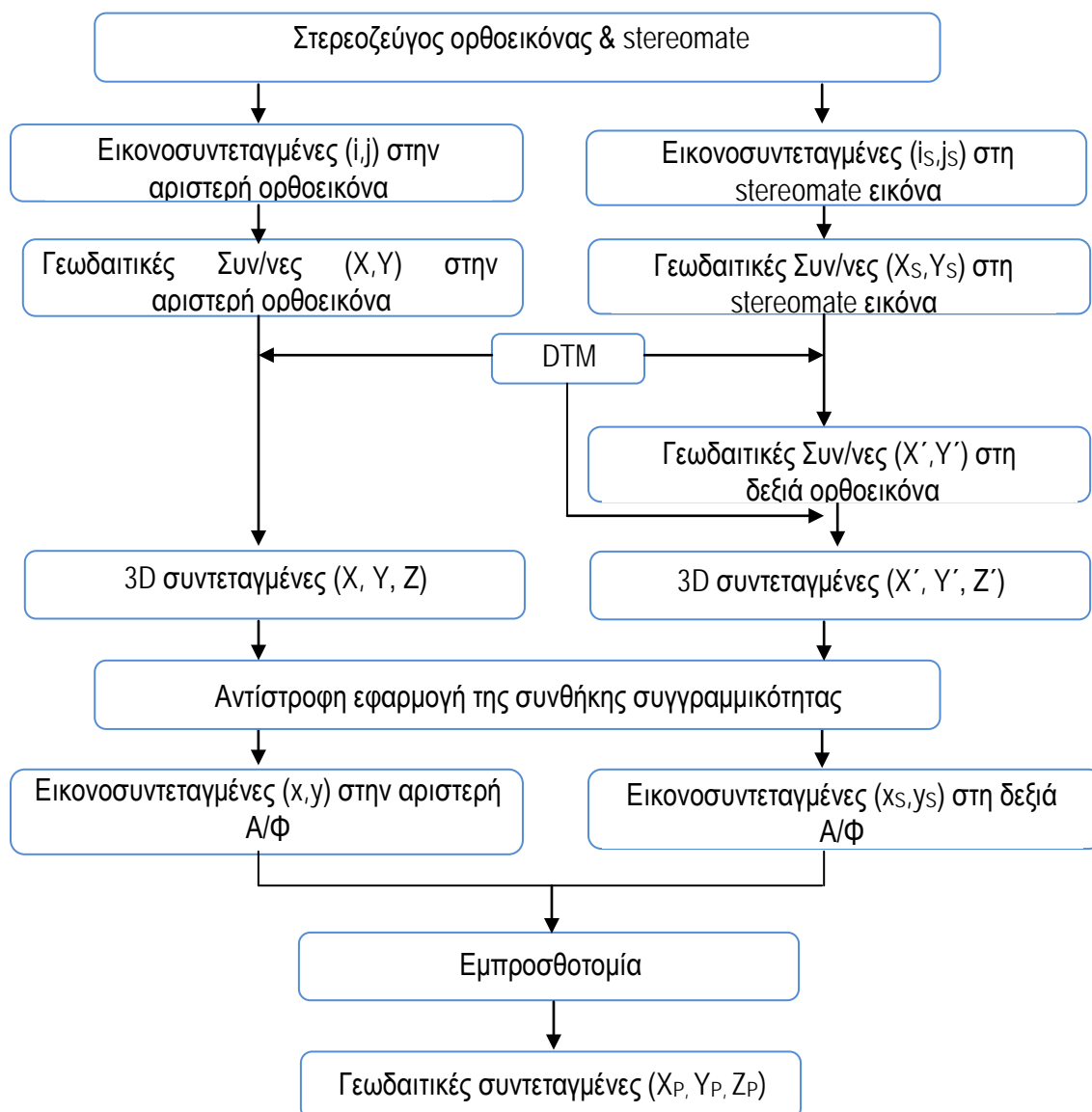
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται κατά πόσο επηρεάζεται η τεχνητή x-παράλλαξη, που εισάγεται στην ορθοεικόνα, από τυχόν σφάλματα που υπάρχουν στο DSM. Στόχος είναι να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο είναι δυνατόν με την τρισδιάστατη μέτρηση γεωδαιτικών συντεταγμένων στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων (εφαρμογή εμπροσθοτομίας) μπορούν να προσδιορισθούν υψόμετρα με καλύτερη ακρίβεια από αυτήν του υπάρχοντος DSM.

Αφορμή υπήρξαν οι αντίστοιχες αναλύσεις και προσπάθειες που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, τη δεκαετία του 1990. Για παράδειγμα, οι Baltasvias (1996) και Li et al. (1996) αναφέρουν ότι η ακρίβεια μετρήσεων σημείων σε ζεύγος στερεο-ορθοεικόνων είναι υψηλή σε σύγκριση με αντίστοιχες που έγιναν στα στερεοζεύγη των αρχικών αεροφωτογραφιών. Επισημαίνεται



ότι οι μετρήσεις (X,Y,Z) μπορεί να είναι ακριβείς ανεξάρτητα από τυχόν λάθη του DTM από το οποίο προήλθαν οι ορθοεικόνας, με την προϋπόθεση το μέγεθος του εικονοστοιχείου της ορθοεικόνας να είναι ίδιο με της αρχικής εικόνας. Ο Wang (2004) εφαρμόζοντας αντίστοιχη διαδικασία σε δύο διαφορετικά σετ δεδομένων έκρινε ότι τα αποτελέσματα από τις στερεο-ορθοεικόνας ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Το ένα σετ αναφερόταν σε αγροτική περιοχή, με κλίμακα αρχικών εικόνων 1:25.000 και βήμα κανάβου DEM 12.5 m. Μετρήθηκαν 20 σημεία εδάφους στα αρχικά ζεύγη εικόνων και στα στερεοζεύγη ορθοεικόνας και τα σφάλματα RMS ήταν:  $RMS(X) = 0.083$  m,  $RMS(Y) = 0.074$  m και  $RMS(Z) = 0.084$  m. Το δεύτερο σετ δεδομένων αφορούσε σε αστική περιοχή, με κλίμακα αεροφωτογραφιών περίπου 1:8.000 και βήμα κανάβου DEM 5 m, στο οποίο μετρήθηκαν 20 σημεία (γωνίες σπιτιών) στα αρχικά στερεοζεύγη και στα στερεοζεύγη των ορθοεικόνας. Τα σφάλματα RMS ήταν  $RMS(X) = 0.075$  m,  $RMS(Y) = 0.080$  m και  $RMS(Z) = 0.105$  m.

Όμως, μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία αναφέρονται έρευνες της ακρίβειας σε στερεοζεύγη ορθοεικόνας με δεδομένα εναέριες και δορυφορικές αρχικές εικόνες. Στην παρούσα εργασία γίνεται γενικότερη ανάλυση της ακρίβειας υπολογισμού υψομέτρων από στερεοζεύγος ορθοεικόνας, με στόχο να διαπιστωθεί τι ισχύει σε εφαρμογές της εγγύς Φωτογραμμετρίας.



Εικόνα 2-9: Διάγραμμα ροής εργασιών για τον προσδιορισμό υψομέτρων από στερεο-ορθοεικόνας

Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για τον υπολογισμό του υψομέτρου ενός σημείου, από την παρατήρησή του σε ζεύγος στερεο-ορθοεικόνων, δίνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνα 2-9 και περιγράφεται παρακάτω:

- Γίνεται 3D σκόπευση του σημείου στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων και οι συντεταγμένες του, σε ρίχελ, αποθηκεύονται ως  $I, J$  για την αριστερή ορθοεικόνα και ως  $I_s, J_s$  για την SOM εικόνα.
- Γίνεται μετατροπή από το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας ( $I, J$  και  $I_s, J_s$ ) στο γεωδαιτικό σύστημα, σε οριζοντιογραφικές συντεταγμένες  $X, Y$  για την ορθοεικόνα και  $X_s, Y_s$  για τη SOM εικόνα.
- Στη συνέχεια, και μόνο για την SOM εικόνα, υπολογίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του σημείου, αφαιρώντας την ποσότητα της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης, βάσει του τύπου  $X_{ορθο} = X_{mate} - Px$ , οπότε αυτές μετατρέπονται στο σύστημα της δεξιάς ορθοεικόνας σε  $X', Y'$ .
- Γίνεται διγραμμική παρεμβολή και προσδιορίζεται το υψόμετρο του σημείου από το διαθέσιμο DEM στην αριστερή και τη δεξιά ορθοεικόνα  $X, Y, Z$  και  $X', Y', Z'$  αντίστοιχα.
- Μέσω εφαρμογής της αντίστροφης συνθήκης συγγραμμικότητας, υπολογίζονται οι εικοσυντεταγμένες  $x_{ap}, y_{ap}$  και  $x_{δεξ}, y_{δεξ}$  στις αρχικές εικόνες, από τις οποίες συντάχθηκαν οι δύο ορθοεικόνες.
- Εφαρμόζεται η φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία για τον προσδιορισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων του σημείου ( $X_p, Y_p, Z_p$ ), από την τομή των ομόλογων ακτίνων.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία, των οποίων επιζητείται ο υπολογισμός του υψομέτρου.

Στην Εικόνα 2-10 φαίνεται σχηματικά η ανάλυση της ακρίβειας μέτρησης υψομέτρων, όπου  $O_1$  και  $O_2$  είναι τα σημεία λήψης της αριστερής και δεξιάς εικόνας του στερεοζεύγους των αρχικών εικόνων, από τις οποίες προήλθαν η αριστερή και η δεξιά ορθοεικόνα αντίστοιχα, τα οποία ορίζουν τη βάση  $B$  του στερεοζεύγους. Η τομή δύο ομόλογων ακτίνων έστω ότι γίνεται στην επιφάνεια του αντικειμένου σε σημείο με τρίτη διάσταση (υψόμετρο)  $Z$ , που αποτελεί τη θεωρητικά σωστή τιμή. Η  $X_1$  είναι η τετμημένη του σημείου στην αριστερή εικόνα (συντεταγμένη κατά τον άξονα λήψης) και η  $X_2$  είναι η τετμημένη στην δεξιά εικόνα. Αν το υπάρχον DSM έχει σφάλμα στο συγκεκριμένο σημείο ίσο με  $\Delta Z$ , έστω ότι η ακτίνα από την αριστερή εικόνα θα τμήσει την επιφάνεια του αντικειμένου σε σημείο που υψομετρικά διαφέρει από το (σωστό)  $Z$  κατά ποσότητα  $\Delta Z_1$  (υψομετρικό σφάλμα). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σφάλματος στην οριζοντιογραφική θέση του σημείου στην ορθοεικόνα ίσο με  $\Delta x_1$ . Από τα όμοια τρίγωνα προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta Z_1} = \frac{x_1}{H - Z} \quad (2.9)$$

όπου  $H$  είναι το υψόμετρο πτήσης για τη λήψη της αρχικής εικόνας.

Από τη σχέση (2.9) προκύπτει ότι στην αριστερή εικόνα το μέγεθος του οριζοντιογραφικού σφάλματος είναι:

$$\Delta x_1 = -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1}{H - Z} \quad (2.10)$$

Η σχέση (2.10) δείχνει πως μεταβάλλεται το σφάλμα στην οριζοντιογραφική θέση του σημείου λόγω υψομετρικού σφάλματος  $\Delta Z_1$ .

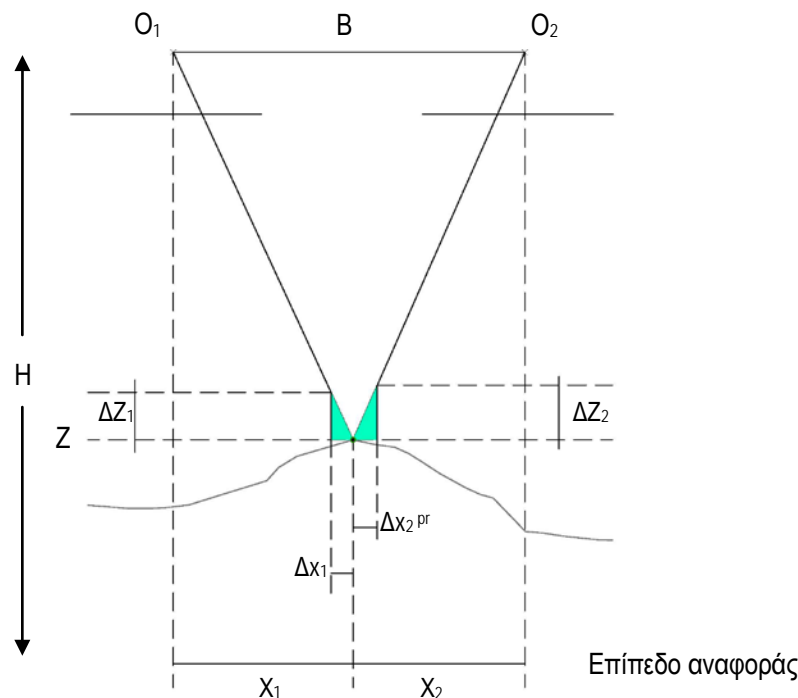
Αντίστοιχα, αν η τομή της ομόλογης ακτίνας από τη δεξιά εικόνα με την εσφαλμένη επιφάνεια του αντικειμένου καταλήγει σε εισαγωγή υψομετρικού σφάλματος  $\Delta Z_2$ , στην δεξιά ορθοεικόνα θα εισαχθεί οριζοντιογραφικό σφάλμα  $\Delta x_2^{pr}$  (Εικόνα 2-10), που δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta x_2^{proj} = \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2}{H - Z} \quad (2.11)$$

Τα  $\Delta x_1$  και  $\Delta x_2^{pr}$  οδηγούν σε σφάλμα στον υπολογισμό της παράλλαξης του σημείου, που οφείλεται στην κεντρική προβολή.

Στη stereomate εικόνα, η οποία έχει προέλθει από τη δεξιά ορθοεικόνα, η επίδραση στη θέση του σημείου επί του άξονα λήψης λόγω του σφάλματος στα υψόμετρα του DSM, είναι διπλή.

- άμεση, λόγω της οριζοντιογραφικής μετάθεσης του σημείου στην ορθοεικόνα, που προκαλείται από το σφάλμα του υψομέτρου, και μεταφράζεται στην ποσότητα  $\Delta x_2^{pr}$  και
- έμμεση, λόγω του σφάλματος που υπεισέρχεται στον υπολογισμό της τεχνητής παράλλαξης από το DSM. Το σφάλμα αυτό είναι ίσο με  $\Delta x_2^{art}$ .



Εικόνα 2-10: Επίδραση της ακρίβειας των υψομέτρων στη θέση του σημείου στις στερεο-ορθοεικόνες

Το οριζοντιογραφικό σφάλμα του σημείου στην stereomate θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα του σφάλματος της παράλλαξης της κεντρικής προβολής και της τεχνητής παράλλαξης:

$$\Delta x_2 = \Delta x_2^{pr} - \Delta x_2^{art} \quad (2.12)$$

Για την εύρεση της ποσότητας  $\Delta x_2^{art}$  εφαρμόζεται ο νόμος μετάδοσης των σφαλμάτων, για τη μεταβλητή  $Z$ , στη σχέση (2.7), οπότε προκύπτει:

$$\Delta x_2^{art} = \left( \frac{B}{H - Z} + \frac{B \cdot Z}{(H - Z)^2} \right) \cdot \Delta Z_2 = \frac{B \cdot H}{(H - Z)^2} \cdot \Delta Z_2 \quad (2.13)$$

Το σφάλμα της παράλλαξης κατά τη σκόπευση στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta P_x = \Delta x_1 - \Delta x_2 = \Delta x_1 - \Delta x_2^{proj} + \Delta x_2^{art} \quad (2.14)$$

Με δεδομένο ότι η βάση του μοντέλου  $B$  ισούται με  $B = x_1 + x_2$ , γίνεται αντικατάσταση και προκύπτουν τα παρακάτω:

$$\begin{aligned} \Delta P_x &= -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1}{H-Z} - \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2}{H-Z} + \Delta Z_2 \cdot \frac{B \cdot H}{(H-Z)^2} = \\ &= -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1 \cdot H - x_1 \cdot Z}{(H-Z)^2} - \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2 \cdot H - x_2 \cdot Z}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_1 \cdot H}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2 \cdot H}{(H-Z)^2} = \\ &= -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1 \cdot H}{(H-Z)^2} + \Delta Z_1 \cdot \frac{x_1 \cdot Z}{(H-Z)^2} - \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2 \cdot H}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2 \cdot Z}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_1 \cdot H}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_2 \cdot H}{(H-Z)^2} = \\ &= -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1 \cdot (H-Z)}{(H-Z)^2} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_1 \cdot H + x_2 \cdot Z}{(H-Z)^2} \end{aligned}$$

$$\Delta P_x = -\Delta Z_1 \cdot \frac{x_1}{H-Z} + \Delta Z_2 \cdot \frac{x_1 \cdot H + x_2 \cdot Z}{(H-Z)^2} \quad (2.16)$$

Στην περίπτωση των εναέριων ή δορυφορικών (αρχικών) εικόνων, που το υψόμετρο πτήσης είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τα υψόμετρα των σημείων (και τις υψομετρικές διαφορές του εδάφους), για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει:

$$H - Z \approx H \quad (2.17)$$

οπότε η σχέση (2.16) γίνεται:

$$\Delta P_x = \frac{x_1}{H-Z} \cdot (\Delta Z_2 - \Delta Z_1) \quad (2.18)$$

Όμως, για τις πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί, χωρίς απόκλιση από την πραγματικότητα, ότι:  $\Delta Z_1 = \Delta Z_2$ , οπότε προκύπτει ότι  $\Delta P_x = 0$ . Δηλαδή, τυχόν υψομετρικό σφάλμα στο υπάρχον DSM δεν επηρεάζει την παράλλαξη, με αποτέλεσμα ο προσδιορισμός υψομέτρων στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων μπορεί να έχει καλύτερα αποτελέσματα από ότι στο αρχικό ζεύγος εικόνων ή ότι με παρατηρήσεις στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων μπορεί να βελτιωθεί το υπάρχον DSM.

Όμως, τα παραπάνω συμπεράσματα δεν ισχύουν, γενικώς, σε εφαρμογές της Εγγύς Φωτογραμμετρίας και ο λόγος είναι ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η απόσταση λήψης της εικόνας από το αντικείμενο δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από τις 'υψομετρικές' διαφορές στο αντικείμενο, οπότε δεν ισχύει η παραδοχή (2.17). Σε επίγειες εφαρμογές, και κυρίως σε περιπτώσεις μνημείων και αρχαιολογικών ευρημάτων, το ανάγλυφο είναι ιδιαίτερα έντονο, με μεγάλες διαφορές βάθους. Συνεπώς, θεωρώντας ότι  $\Delta Z_1 = \Delta Z_2$ , η σχέση (2.16) όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απλοποιείται η σχέση (2.16) στην:

$$\Delta P_x = \frac{B \cdot H}{(H-Z)^2} \cdot \Delta Z \quad (2.19)$$

Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα της παράλλαξης επηρεάζεται από σφάλμα που πιθανόν υπάρχει στο DSM. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη σχέση (2.19), ισχύουν τα παρακάτω:

- **μεγαλύτερο** σφάλμα ( $DZ$ ) στο  $DSM$ , έχει ως αποτέλεσμα **την αύξηση** του σφάλματος στην προσδιοριζόμενη παράλλαξης  $\Delta\rho_x$
- **αύξηση** της βάσης  $B$  των εικόνων, **αυξάνει** το μέγεθος του σφάλματος της παράλλαξης  $\Delta\rho_x$
- **αύξηση** του υψομέτρου πτήσης  $H$ , δηλαδή απομάκρυνση του σημείου λήψης από το αντικείμενο, οδηγεί σε **μείωση** του σφάλματος της παράλλαξης  $\Delta\rho_x$ .

Για τον πρακτικό έλεγχο της παραπάνω ανάλυσης σφαλμάτων, θα ακολουθήσει, σε επόμενη ενότητα, αριθμητικό παράδειγμα με πραγματικά δεδομένα, με χρήση εικόνων μεγάλης κλίμακας. Εν συντομία αναφέρεται ότι τα δεδομένα είναι εικόνες κλίμακας, περίπου, 1:200 και απεικονίζουν αντικείμενο με έντονο ανάγλυφο. Για τον έλεγχο επιλέχθηκαν προσημασμένα σημεία και χαρακτηριστικά ευδιάκριτα σημεία, ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλη την έκταση του στερεοζεύγους ορθοεικόνων. Η σύγκριση αναφέρεται στις σκοπεύσεις των σημείων αυτών στο στερεοζεύγος των αρχικών (επίγειων) εικόνων και στις σκοπεύσεις στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων.

### 3 Ανάπτυξη Λογισμικού Παραγωγής Ορθοεικόνας & StereoOrthoMate

Η ανάπτυξη του λογισμικού για την παραγωγή της ορθοεικόνας και της SOM εικόνας έγινε στο περιβάλλον του προγράμματος Matlab (έκδοση 2013b) με τη χρήση συναρτήσεων, που υπάρχουν στις βιβλιοθήκες του προγράμματος και νέων που δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Εκτενέστερη περιγραφή ακολουθεί.

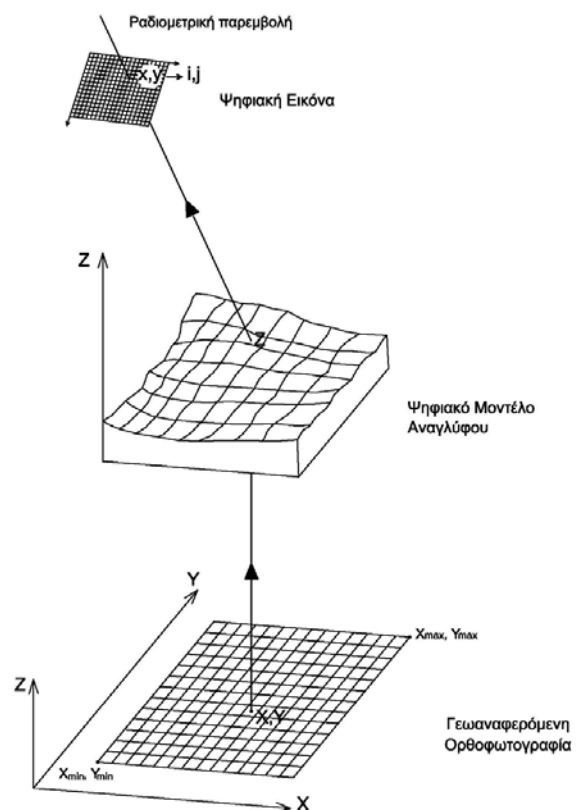
Η δομή του λογισμικού που αναπτύχθηκε, χωρίζεται σε τρία στάδια:

- στο πρώτο στάδιο, υλοποιείται η διαδικασία με την οποία, με δεδομένα το αρχικό στερεοζεύγος, τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και το DSM, παράγονται οι ορθοεικόνες από τις δύο εικόνες του αρχικού στερεοζεύγους.
- στο δεύτερο στάδιο γίνεται η παραγωγή της SOM εικόνας από τη μια από τις δύο ορθοεικόνες, συνήθως από τη δεξιά ορθοεικόνα, και
- στο τρίτο στάδιο υλοποιείται η διαδικασία που επιτρέπει τη στερεοσκοπική παρατήρηση και μέτρηση στο στερεοζεύγος της (αριστερής) ορθοεικόνας και της εικόνας SOM που παράχθηκε.

#### 3.1 Διαδικασία Παραγωγής Ορθοεικόνας

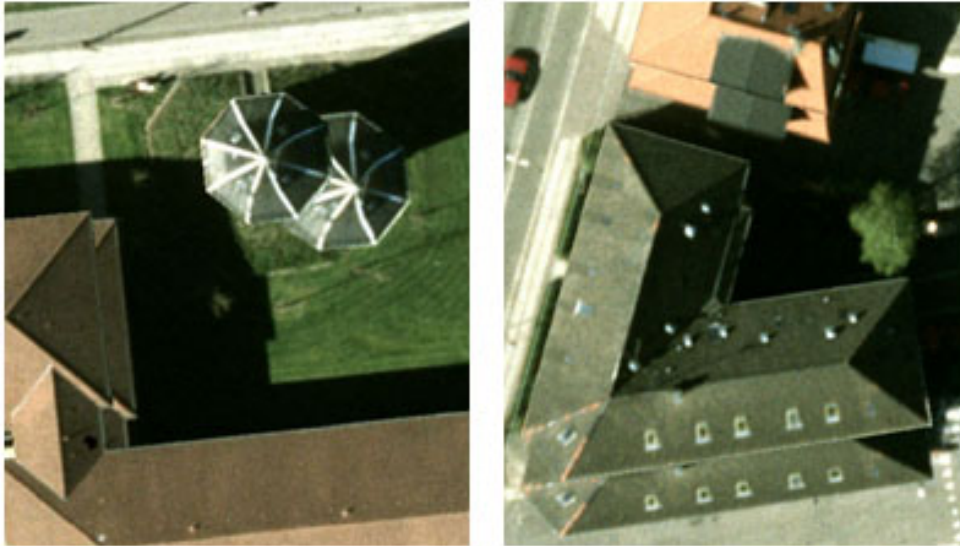
Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των ορθοεικόνων είναι η εφαρμογή της αντίστροφης διαδρομής, δηλαδή από την ορθοεικόνα προς την αρχική εικόνα (Καρράς και Πέτσα, 1998). Η διαδικασία ξεκινά από το πάνω αριστερό εικονοστοιχείο (ground element) της ορθοεικόνας και με δεδομένα εισαγωγής τις γεωδαιτικές του συντεταγμένες  $(X, Y)$  γίνεται διγραμμική παρεμβολή στο διαθέσιμο DSM για τον προσδιορισμό του υψομέτρου  $(Z)$  και με την αντίστροφη εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας και τον αντίστροφο αφινικό μετασχηματισμό προσδιορίζεται η θέση του σημείου στο σύστημα της αρχικής εικόνας, οπότε και λαμβάνεται ο τόνος (ραδιομετρική παρεμβολή), όπως φαίνεται στην Εικόνα3-1. Το DSM δίνεται είτε υπό τη μορφή σημείων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες  $(X, Y, Z)$  είτε υπό τη μορφή γεωαναφερόμενου τετραγωνικού κανάβου (grid).

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε όλα τα εικονοστοιχεία της ορθοεικόνας, με στόχο την παραγωγή μιας ορθοεικόνας από καθεμία αρχική εικόνα (αριστερή και δεξιά του στερεοζεύγους).



Εικόνα3-1: Σχηματική διαδικασία σύνταξης ψηφιακής ορθοεικόνας

Σημειώνεται ότι ο κώδικας που συντάχθηκε υλοποιεί έναν τυπικό αλγόριθμο ορθοαναγωγής, δηλαδή δεν γίνεται παραγωγή αληθούς ορθοεικόνας (true orthoimage). Έτσι, η παραγόμενη ορθοεικόνα περιέχει παραμορφώσεις, διπλές απεικονίσεις (double projections) και κρυφές περιοχές (που απαιτούν συμπλήρωση υψής από γειτονικές εικόνες), ακόμα και αν διατίθεται ακριβές και λεπτομερές DSM (Rau et al., 2002) (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Διπλές εγγραφές στην ορθοεικόνα

Στην σχετική βιβλιογραφία έχει επισημανθεί (Πέτσα κ.α., 2007) ότι μόνο ένα πλήρες 3D μοντέλο μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των σύγχρονων ορθοαναγωγών, σε περιπτώσεις που υπάρχουν έντονες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των αντικειμένων που απεικονίζονται στην εικόνα. Στις εφαρμογές πολύπλοκων επιφανειών με έντονο ανάγλυφο, όπως προσόψεις αρχαίων ναών, αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, αετώματα, κυονόκρανα κ.α., τα συνήθη DSM περιγράφουν την επιφάνεια σε 2.5 διαστάσεις (2.5D), δηλαδή έχουν μόνο μία τιμή υψομέτρου σε κάθε οριζοντιογραφική θέση.

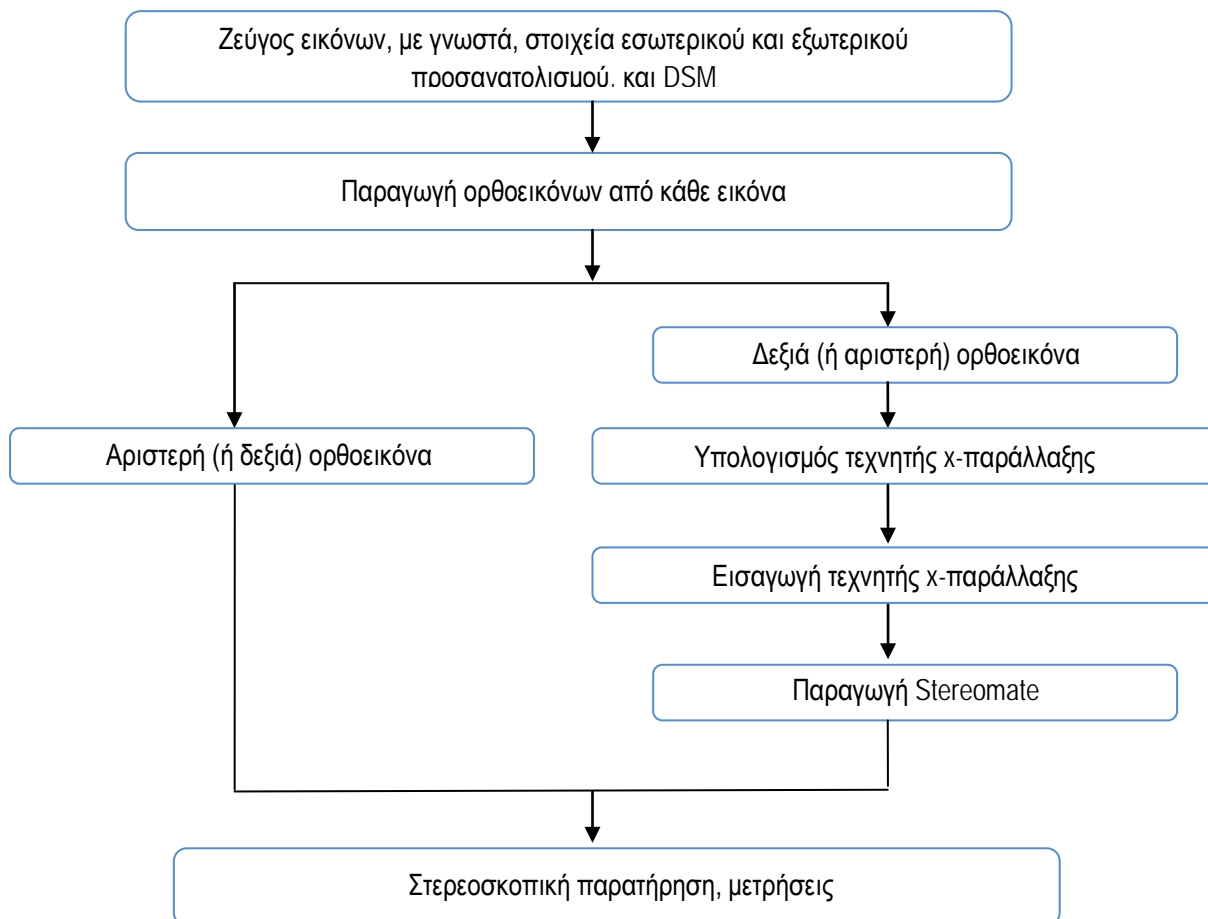
Επίσης, η ποιότητα των ορθοφωτογραφιών εξαρτάται από τις αρχικές εικόνες και μπορεί να υποβαθμιστεί εξαιτίας ραδιομετρικών διαφορών μεταξύ διαδοχικών εικόνων, την ανεπαρκή κάλυψη κενών (hole-filling) ή τις παραμένουσες σκιές. Στην περίπτωση που το ψηφιακό μοντέλο αφορά μόνο το ανάγλυφο του εδάφους, τότε στην ορθοεικόνα θα υπάρχουν παραμορφώσεις, όπως λάθος κλίμακα και μετάθεση, οι οποίες δημιουργούν αποκρύψεις (occlusions) περιοχών του αντικειμένου.

Στην πραγματικότητα, το βασικό πρόβλημα είναι ότι οι συμβατικοί αλγόριθμοι ορθοαναγωγής αδυνατούν να χειριστούν σωστά μοντέλα 2.5D, δεδομένου ότι προϋποθέτουν πως όλα τα εμπλεκόμενα σημεία του μοντέλου είναι όντως ορατά στην εικόνα, δηλαδή δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των αποκρύψεων της εικόνας. Έχουν προταθεί και εφαρμοσθεί ποικίλες λύσεις για την παραγωγή σωστής ορθοφωτογραφίας, με εντοπισμό των αποκρύψεων εικόνας. Ορισμένες από αυτές (Amhar et al., 1998; Rau et al., 2002; Sheng et al., 2003) υιοθετούν παραλλαγές της τεχνικής του “Z-buffer”, μιας βασικής μεθόδου που χρησιμοποιείται στα Γραφικά Υπολογιστών (computer graphics) για να εντοπιστούν κρυμμένες περιοχές επιφανειών. Εν προκειμένω, όλα τα πολύγωνα της επιφάνειας επαναπροβάλλονται στην αρχική εικόνα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα “Z-buffer”, το οποίο καταγράφει για κάθε εικονοστοιχείο (pixel) την μικρότερη απόσταση της επιφάνειας από το κέντρο προβολής της εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο αντίστοιχος “χάρτης” που αποδίδει σε κάθε εικονοψηφίδα τον κωδικό του ορατού πολυγώνου. Έτσι, κρατούνται μόνο οι εικονοψηφίδες της αρχικής εικόνας που ‘δικαιούνται’ να συμμετέχουν στην διαδικασία ορθοαναγωγής. Οι Sheng et al. (2003) έχουν αναφερθεί σε ορισμένους περιορισμούς παρόμοιων αλγορίθμων, οι οποίοι είναι δυνατόν να

προκαλέσουν την εμφάνιση ανεπιθύμητων σχηματισμών (artefacts) στην ορθοφωτογραφία. Οι *Kuzmin et al.* (2004) πρότειναν έναν ταχύτερο αλγόριθμο, βάσει πολυγώνων, ανεξάρτητο της ανάλυσης, για τον εντοπισμό κρυμμένων επιφανειών. Οι τομές των πολυγώνων της επιφάνειας, προβαλλόμενες στην αρχική εικόνα, επιτρέπουν την υποδιαίρεση του επιπέδου της εικόνας σε τμήματα, για τα οποία δημιουργείται κατάλογος με τα αντίστοιχα επικαλυπτόμενα πολύγωνα ταξινομημένα κατά απόσταση από το κέντρο προβολής. Έτσι ορίζεται το ορατό πολύγωνα για κάθε τμήμα. Η προβολή των εν λόγω τμημάτων στην αρχική εικόνα ορίζει τις περιοχές της επιφάνειας, που είναι ορατές σε αυτήν. Επίσης, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για τη μοντελοποίηση υπερκείμενων αντικειμένων, οι οποίοι βασίζονται σε αισθητήρες απόστασης (range sensors) ή αυτόματες ή μη φωτογραμμετρικές τεχνικές (πχ. *Hoffman*, 2004; *Rau and Chen*, 2004; *Zhou et al.*, 2004). Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί ένα DSM που να περιγράφει πλήρως ολόκληρη την επιφάνεια του 3D αντικειμένου (*Πέτσα κ.α.*, 2007).

### 3.2 Διαδικασία Παραγωγής StereoOrthoMate με αρχικά δεδομένα δύο ορθοεικόνας και DSM

Το δεύτερο στάδιο του λογισμικού έχει στόχο την παραγωγή της SOM από τη μία ορθοεικόνα (συνήθως τη δεξιά), όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνα 3-3.



Εικόνα 3-3: Διάγραμμα ροής για την παραγωγή ζεύγους ορθοεικόνας και SOM

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία, που ακολουθείται στο λογισμικό, για την παραγωγή της SOM.



Η δεξιά και η αριστερή ορθοεικόνα ακολουθούνται από αρχεία γεωαναφοράς, στα οποία αναφέρονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες της κάθε εικόνας και το μέγεθος του ριχελί, παράμετρος που αποτελεί ένδειξη της ακρίβειάς τους. Οι τόνοι της ορθοεικόνας, από την οποία θα παραχθεί η SOM, αποθηκεύονται σε έναν πίνακα στο περιβάλλον του MatLab (διαστάσεων  $m \times n$ ).

Υπολογίζονται τα διανύσματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων  $X$  ( $1 \times n$ ) και  $Y$  ( $m \times 1$ ) από τα στοιχεία της γεωαναφοράς για κάθε γραμμή και στήλη της ορθοεικόνας.

Με παρεμβολή στο DSM υπολογίζονται τα υψόμετρα κάθε κελιού (εδαφοστοιχείου) της ορθοεικόνας και καταχωρούνται σε ένα πίνακα, επίσης διαστάσεων  $m \times n$ . Για την απόδοση υψομέτρου σε κάθε κελί της εικόνας χρησιμοποιείται η διγραμμική παρεμβολή, με βάρη τα αντίστροφα των τετραγώνων των αποστάσεων στα τεσσάρα κοντινότερα κελιά του DSM. Ο πίνακας στον οποίο είναι αποθηκευμένα τα υψόμετρα είναι αντίστοιχων διαστάσεων  $m \times n$ .

Με δεδομένο τον πίνακα των υψομέτρων, υπολογίζεται η τεχνητή  $x$ -παράλλαξη με τη μέθοδο της μη παράλληλης προβολής των ακτίνων ως προς τον άξονα  $Z$  για κάθε κελί, σύμφωνα με τη σχέση 2.7.

Στο επόμενο βήμα στόχος είναι ο υπολογισμός των νέων θέσεων στις οποίες πρέπει να μετακινηθούν οι (γεωδαιτικές) συντεταγμένες  $X$  της ορθοεικόνας, λόγω της εισαγωγής της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης, και κατ' επέκταση ο προσδιορισμός των τετμημένων της SOM εικόνας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$X_{SOM} = X_{\rho\theta\sigma} - Px \tag{3.1}$$

Τις νέες τετμημένες  $X_{som}$  συμπληρώνουν οι τεταγμένες των σημείων στην ορθοεικόνα και τα αντίστοιχα υψόμετρα αυτής. Αποτέλεσμα αυτών είναι η δημιουργία ενός πλήθους σημείων διατεταγμένων στο χώρο. Για τον προσδιορισμό των τόνων που θα έχει κάθε κελί της εικόνας SOM ακολουθείται διαδικασία επανασύστασης, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Στον πίνακα που αποθηκεύονται οι τιμές των γεωδαιτικών συντεταγμένων των κέντρων των εδαφοστοιχείων της ορθοεικόνας μετά την εισαγωγή της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης (σημεία της SOM) είναι σύνηθες, λόγω της επίδρασης του αναγλύφου, η τιμή ενός κελιού που βρίσκεται σε μία στήλη  $i, k$  να είναι μικρότερη από μία τιμή που βρίσκεται σε θέση  $i, j$ , ενώ  $k > j$ . Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να διαταχθούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες με αύξουσα τιμή του  $X_{som}$ . Για να είναι εφικτή η αντιστοίχιση των  $X_{som}$  με τη θέση τους στον πίνακα  $(i, j)$  καταχωρήθηκε, σε άλλον πίνακα, η αρχική τους θέση. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι διατεταγμένες γεωδαιτικές τετμημένες  $X_{som}$  και οι αντίστοιχοι δείκτες που περιγράφουν τη θέση από την οποία προήλθαν (πίνακας Index, διαστάσεων  $m \times n$ ). Η περιγραφείσα διαδικασία έγινε με τη συνάρτηση *findInRange.m*. Η συνάρτηση εφαρμόστηκε σε κάθε γραμμή του πίνακα που περιέχει τα  $X_{SOM}$ . Παρακάτω φαίνονται σχηματικά τα περιεχόμενα των πινάκων που αναλύονται παραπάνω.

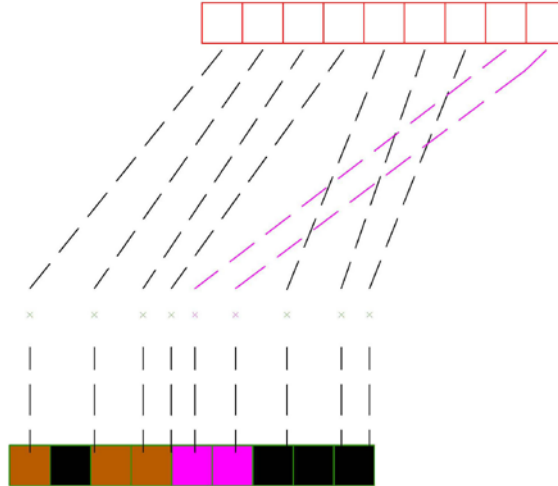
$X_{SOM}$	100.1	100.5	98.9	99.6	99.3	100
-----------	-------	-------	------	------	------	-----

Διατεταγμένο $X_{SOM}$	98.9	99.3	99.6	100	100.1	100.5
------------------------	------	------	------	-----	-------	-------

Θέση (Index)	3	5	4	6	1	2
--------------	---	---	---	---	---	---

Στην Εικόνα 3-4 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος συμπλήρωσης της ραδιομετρίας των κελιών της SOM, παρουσιάζοντας και την περίπτωση όπου σημεία με μεγαλύτερο υψόμετρο από τα γειτονικά

τους (π.χ. σημεία σε ταράτσα κτιρίου –απεικονίζονται με χρώμα magenta) μετατίθενται αριστερότερα, λόγω της εισαγωγής της τεχνητής παράλλαξης, από σημεία που στην ορθοεικόνα έχουν μικρότερη τετμημένη  $X$ . Για τη σωστή απόδοση των τόνων κατά την επανασύσταση της SOM, έχει προβλεφθεί η διαγραφή των σημείων που έχουν μεγαλύτερη τετμημένη ( $X$ ) και μικρότερη τιμή θέσης στον πίνακα Index, και κατ' επέκταση η εισαγωγή μαύρων κελιών στην SOM εικόνα.



Εικόνα 3-4: Σχηματική επανασύσταση της εικόνας SOM

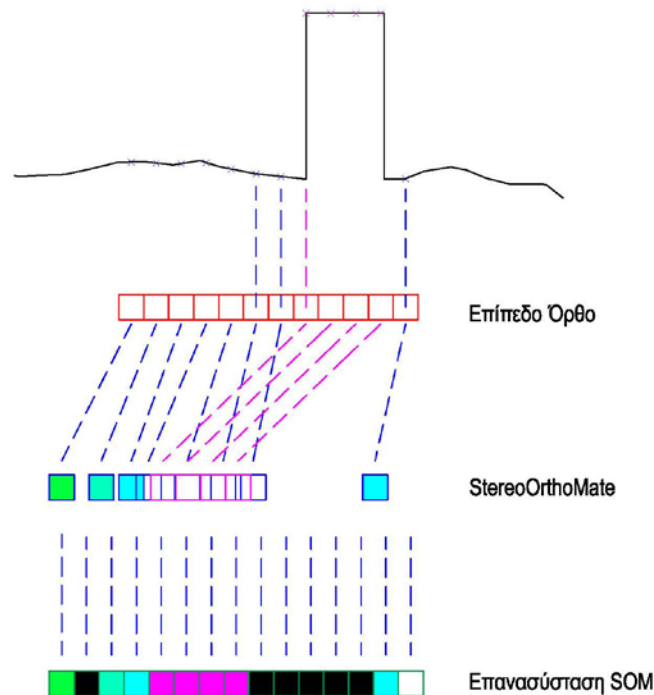
Η SOM εικόνα έχει αυστηρά το ίδιο μέγεθος εικονοστοιχείου με την ορθοεικόνα, ώστε να είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση. Όμως, λόγω της εισαγωγής του μεγέθους της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης, το εύρος των τετμημένων της SOM είναι διαφορετικό σε σύγκριση με την ορθοεικόνα, επομένως είναι διαφορετικός (μεγαλύτερος) και ο αριθμός των στηλών της (διαφορετική διάσταση κατά την έννοια των στηλών). Συγκεκριμένα, οι διαστάσεις της SOM είναι  $m \times n_{SOM}$  (όπου  $m$  ίδιο πλήθος γραμμών με την ορθοεικόνα), όπου  $n_{SOM}$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_{SOM} = \frac{X_{SOM,max} - X_{SOM,min}}{cell_{\acute{o}ρθo}} \quad (3.2)$$

Είναι απαραίτητο να γίνει επανασύσταση της εικόνας SOM, καθώς τα μετακινημένα (λόγω της εισαγωγής της τεχνητής παράλλαξης) κελιά της ορθοεικόνας έχουν μεταξύ τους επικαλύψεις και κενά διαστήματα. Για την απόδοση του χρωματικού τόνου (ραδιομετρίας) σε καθένα εικονοστοιχείο της (τελικής) SOM, αναζητείται το κοντινότερο από τα μετακινημένα κελιά της ορθοεικόνας. Στην αναζήτηση αυτή είναι δυνατόν να εμφανιστούν οι παρακάτω περιπτώσεις (Εικόνα 3-5):

- το εικονοστοιχείο της SOM να συμπίπτει με κάποιο από τα μετακινημένα κελιά (ορθοεικόνας), οπότε ο τόνος αυτού μεταφέρεται στο εικονοστοιχείο (περίπτωση όπου το κέντρο του εικονοστοιχείου της SOM ταυτίζεται με το  $X_{som,min}$ ),
- το εικονοστοιχείο να καλύπτει εν μέρει κάποιο μετακινημένο κελί (της ορθοεικόνας) και το υπόλοιπο να είναι σε περιοχή χωρίς κελιά (τόνους), οπότε καταχωρείται στο εικονοστοιχείο ο τόνος του (εν μέρει καλυπτόμενου) κελιού,
- το εικονοστοιχείο να καλύπτει εν μέρει τμήμα ενός μετακινημένου κελιού (της ορθοεικόνας), για παράδειγμα με τόνο  $tone1$ , και εν μέρει τμήμα άλλου μετακινημένου κελιού, π.χ. με τόνο  $tone2$ , ή να καλύπτει και περισσότερα από δύο μετακινημένα κελιά, οπότε από τα δύο πιο κοντινά κελιά εξ αυτών, στο εικονοστοιχείο της SOM δίνεται ο τόνος του κελιού με το μεγαλύτερο υψόμετρο,

- Το εικονοστοιχείο να κείται σε περιοχή που δεν καλύπτεται από μετακινημένα κελιά (της ορθοεικόνας), οπότε του αποδίδεται μηδενικός τόνος και εμφανίζεται στη εικόνα SOM ως μαύρο εικονοστοιχείο (Εικόνα 3-5).



Εικόνα 3-5: Δημιουργία της εικόνας SOM

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας παραγωγής της SOM, είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση του στερεοζεύγους ορθοεικόνας, με τη μέθοδο των εικόνων αναγλύφου (anaglyph images), η οποία θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 4.

Η ποιότητα της SOM, και εν τέλει η σωστή στερεοσκοπική παρατήρηση, εξαρτάται από την ποιότητα της ορθοεικόνας, από την οποία προκύπτει η SOM και από την πυκνότητα (και ακρίβεια) του DSM:

- Στην περίπτωση που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο, όπου η ορθοεικόνα προέρχεται από τη μια (δεξιά) εικόνα του αρχικού στερεοζεύγους, όταν υπάρχουν έντονες υψομετρικές διαφορές στο αντικείμενο, ακόμη και αν διατίθεται πολύ πυκνό και αξιόπιστο DSM, η ορθοεικόνα θα έχει ατέλειες (διπλές απεικονίσεις, φλουταρισμένες περιοχές) που μεταφέρονται στην εικόνα SOM. Η κατάσταση επιδεινώνεται αν προστεθούν και οι (πιθανές) νεκρές περιοχές (μαύρα κελιά), που επισημάνθηκαν στην παραπάνω διερεύνηση (Εικόνα 3-5).
- Αν το DSM δεν είναι αρκετά πυκνό, ώστε να αποδίδει γεωμετρικά σωστά τις ακμές του αντικείμενου, το αποτέλεσμα είναι λανθασμένος υπολογισμός του μεγέθους της τεχνητής x-παράλλαξης. Άρα μειωμένης ποιότητας εικόνα SOM, και μάλιστα στις θέσεις (περιγράμματα ακμών) με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της μεθόδου της στερεο-ορθοεικόνας στις αρχαιολογικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Συνεπώς, για να υπάρχουν τα βέλτιστα αποτελέσματα, η παραγωγή της SOM πρέπει να γίνεται, με την προσθήκη τεχνητής παράλλαξης, σε 'αληθή' ορθοεικόνα (true orthoimage) και να είναι διαθέσιμο πυκνό DSM.

### 3.3 Δημιουργία Στερεοζεύγους Ορθοεικόνων με δεδομένα μία ορθοεικόνα και DSM

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η περίπτωση, όπου τα αρχικά δεδομένα είναι μία ορθοεικόνα και το DSM. Αποτελεί τη συνήθη περίπτωση, ιδίως σε αρχαιολογικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές, όπου ένας χρήστης, μη φωτογραμμέτρης (π.χ. αρχιτέκτονας, συντηρητής κοκ.), έχει στη διάθεσή του μια ορθοεικόνα του αντικειμένου ενδιαφέροντος και το ψηφιακό μοντέλου του αναγλύφου, και επιθυμεί την εξαγωγή μετρητικών πληροφοριών, μέσω ψηφιοποίησης στην οθόνη του Η/Υ. Ιδιαίτερα για πολύπλοκα αντικείμενα με ακανόνιστες ακμές (αρχαιολογικά ευρήματα, θραυσμένα αντικείμενα κ.α.) η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη σωστή και ακριβέστερη απόδοση. Στη συντριπτική πλειοψηφία αυτών των περιπτώσεων ο χρήστης ούτε διαθέτει τις αρχικές εικόνες και τα στοιχεία προσανατολισμού τους ούτε μπορεί να τα διαχειρισθεί (ακόμη και αν ήταν διαθέσιμα). Έτσι, για τη δημιουργία του ζεύγους στερεο-ορθοεικόνων πρέπει να χρησιμοποιηθεί/αξιοποιηθεί η (μια) ορθοεικόνα και, ταυτόχρονα, ο υπολογισμός των τεχνητών χ-παραλλάξεων να γίνει χωρίς τη γνώση άλλων στοιχείων, όπως το υψόμετρο λήψης και η βάση του (αρχικού) στερεοζεύγους.

Στη διαδικασία αυτή, η εικόνα SOM παράγεται από την διατιθέμενη ορθοεικόνα, και αποτελεί τη δεξιά εικόνα του στερεοζεύγους ορθοεικόνων, ενώ η ίδια η ορθοεικόνα αποτελεί την αριστερή εικόνα του ζεύγους.

Αρχικό στάδιο της διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της τεχνητής χ-παραλλάξης για κάθε κελί της ορθοεικόνας. Σύμφωνα με τη σχέση 2.7, στον υπολογισμό αυτό συμμετέχει το μέγεθος της βάσης του στερεοζεύγους, που πρόκειται να υλοποιηθεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση, αλλά και του (θεωρούμενου) υψομέτρου λήψης της (SOM) εικόνας. Συνεπώς, για να υπολογισθούν οι παραλλάξεις, είναι αναγκαίο να γίνουν παραδοχές για τα άγνωστα μεγέθη (B, H).

*Εκτίμηση του μεγέθους H:*

Το μέγεθος του εδαφοστοιχείου της ορθοεικόνας είναι γνωστό και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εκτίμηση της ακρίβειας με την οποία δημιουργήθηκε η ορθοεικόνα. Βάσει της ακρίβειας αυτής μπορεί να γίνει εκτίμηση της αρχικής κλίμακας των εικόνων από τις οποίες έχει παραχθεί.

Σημειωτέον ότι για τις αρχαιολογικές ή αρχιτεκτονικές εφαρμογές, η πλέον συνήθης περίπτωση αφορά σε απόδοση για τελική κλίμακα σχεδίασης 1:50. Έτσι, με γνωστό ότι ο λόγος της αρχικής κλίμακας των εικόνων προς την κλίμακα του τελικού προϊόντος (ορθοεικόνα) κυμαίνεται από 1/4 έως 1/6, η κλίμακα των αρχικών εικόνων προκύπτει 1:250, περίπου. Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι η σταθερά της φωτομηχανής, με την οποία έγιναν οι λήψεις των αρχικών εικόνων, κυμαίνεται από 30mm - 50mm. Με τις λογικές αυτές παραδοχές, προκύπτει ως απόσταση λήψης  $H_{λήψης} = 7.5$  m. Από το DSM υπολογίζεται το μέσο υψόμετρο της επιφανείας ( $H_{μέσο}$ ), οπότε προκύπτει το υψόμετρο λήψης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$H = H_{λήψης} + H_{μέσο} \quad (3.3)$$

*Εκτίμηση του μεγέθους B:*

Ο προσδιορισμός του μεγέθους της βάσης γίνεται από τη σχέση  $B/H_{λήψης} = \mu$ . Εμπειρικά προκύπτει ότι ο συντελεστής  $\mu$ , στις αρχαιολογικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές, κυμαίνεται από 1/3 έως 1/5. Συνεπώς, η βάση μπορεί να ληφθεί  $B = 2.5$  m.

Ακόμη και αν οι πραγματικές τιμές των H και B διαφέρουν από τις εκτιμήσεις τους που έγιναν παραπάνω, αυτό δεν επηρεάζει τη δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης στο ζεύγος των στερεο-ορθοεικόνων και, επίσης, δεν επηρεάζει την ακρίβεια της απόδοσης/ψηφιοποίησης του αντικειμένου

(μέσω της στερεοσκοπικής παρατήρησης), αφού οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του τελικού διανυσματικού προϊόντος προέρχονται από τις θέσεις των σημείων στην ορθοεικόνα.

Έχοντας γίνει οι παραδοχές για τα B και H, υπάρχουν, πλέον, όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό της τεχνητής x-παράλλαξης, που θα εισαχθεί στην ορθοεικόνα για την παραγωγή της SOM. Τα επόμενα στάδια της διαδικασίας είναι ίδια με τα περιγραφέντα στο κεφάλαιο 3.2, όπου στα δεδομένα υπήρχαν δύο ορθοεικόνες. Δηλαδή, γίνεται υπολογισμός των νέων θέσεων στις οποίες μετακινούνται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες X της ορθοεικόνας, λόγω της εισαγωγής της τεχνητής x-παράλλαξης, και κατ' επέκταση ο προσδιορισμός των τμημένων X της εικόνας SOM, σύμφωνα με τη σχέση 3.1 και ακολουθεί η επανασύσταση της SOM.

Η αριστερή εικόνα του ζεύγους των στερεο-ορθοεικόνων, στην εξεταζόμενη περίπτωση, είναι η αρχική ορθοεικόνα, ενώ η δεξιά εικόνα είναι η SOM, που προέκυψε με τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Σημειωτέον ότι, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί στοιχεία που φαίνονται στην αριστερή εικόνα λόγω της μετακίνησης των κελιών από την εισαχθείσα παράλλαξη να μην φαίνονται στην SOM.

Η στερεοσκοπική παρατήρηση επιτυγχάνεται με τη δημιουργία των εικόνων αναγλύφου κρατώντας το κόκκινο κανάλι από την αριστερή εικόνα και το μπλε-πράσινο από τη δεξιά.

Για την ποιότητα της SOM και της στερεοσκοπικής παρατήρησης των ορθοεικόνων, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (δημιουργία του στερεοζεύγους από δύο ορθοεικόνες). Ιδιαίτερα στην παρούσα περίπτωση, όπου τα αρχικά δεδομένα είναι μια, μόνον, ορθοεικόνα, η ορθοεικόνα αυτή είναι εφικτό και λογικό να είναι 'αληθής' (true orthoimage). Ταυτόχρονα, η ακρίβεια και πυκνότητα του DSM πρέπει να είναι ικανοποιητικές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (έντονο ανάγλυφο, πολυπλοκότητα επιπέδων, μεγάλη κλίμακα προϊόντος).

## 4 Στερεοσκοπική παρατήρηση και μετρήσεις

---

### 4.1 Εικόνες Αναγλύφου (Anaglyph 3D images)

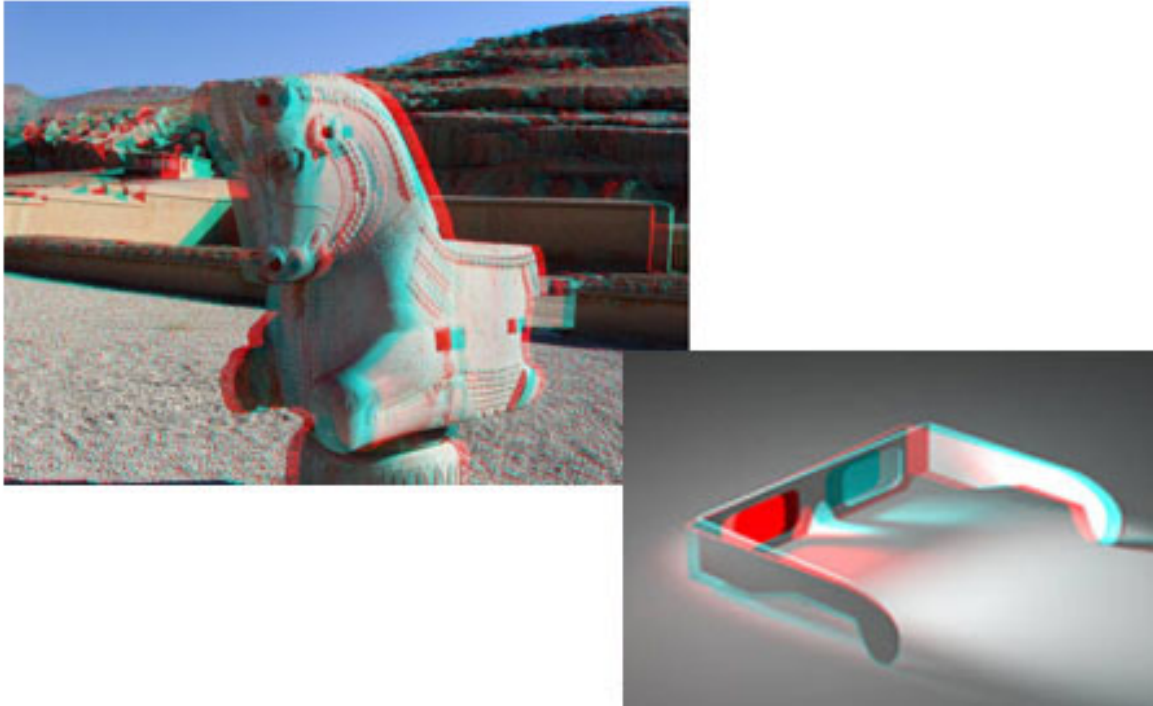
Οι Εικόνες Αναγλύφου αποτελούνται από δύο διαφορετικά φιλτραρισμένες έγχρωμες εικόνες, μια για κάθε μάτι. Η αίσθηση της στερεοσκοπικής παρατήρησης επιτυγχάνεται όταν ο χρήστης παρατηρεί τις εικόνες φορώντας κατάλληλα γυαλιά (color-coded anaglyph glasses) διαφορετικού χρώματος για κάθε μάτι, ανάλογο με το φίλτρο της εικόνας που προβάλλεται σε αυτό. Τα γυαλιά μπορεί να είναι χαμηλού κόστους, με χάρτινο πλαίσιο, ή πλαστικά ή από άλλο υλικό. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν γυαλιά κόκκινου-πράσινου χρώματος, κατάλληλα για τη θέαση μόνον ασπρόμαυρων εικόνων. Μετά το 2000 αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για την παρατήρηση έγχρωμων εικόνων αναγλύφου, λόγω της χρήσης τους από το ευρύ κοινό στην παρακολούθηση 3D ταινιών (κινηματογράφο, video, CD), σε παιχνίδια στον υπολογιστή, εικόνες στο διαδίκτυο, ακόμα και σε έντυπα (κόμικς, περιοδικά κ.α.). Χρησιμοποιείται, πλέον, άλλος συνδυασμός χρωμάτων στα φίλτρα των γυαλιών. Σήμερα, ο πιο συνηθισμένος είναι κόκκινο, ως αριστερό φίλτρο και κυανό (που είναι σύνθεση πράσινου και μπλε) ως δεξιό. Το κυανό χρώμα χρησιμοποιείται, αντί του μπλε, γιατί αποδίδει καλύτερα τους τόνους. Έτσι, επιτυγχάνεται καλή αντίληψη για τα πράσινα και μπλε χρώματα αλλά φτωχή για τα κόκκινα. Εναλλακτικές λύσεις, με καλύτερα αποτελέσματα στην αντίληψη των χρωμάτων και της 3D παρατήρησης, είναι η χρήση φίλτρων σκούρου κόκκινου και κυανού, που είναι συνδυασμός πράσινου, μπλε και λίγο κόκκινου, ή φίλτρων magenta (συνδυασμός κόκκινου και μπλε) και κυανού (συνδυασμός πράσινου και μπλε). Μια πρόσφατη εξέλιξη, που παρουσιάστηκε πρώτη φορά το 2007 και βγήκε στην παραγωγή το 2010 από την εταιρεία TriOviz, είναι η κατασκευή γυαλιών με φίλτρα 'σύνθετο magenta' και 'σύνθετο πράσινο', που επιτυγχάνει πολύ καλή τρισδιάστατη αντίληψη με πλήρη και ευχάριστα φυσικά χρώματα (<http://trioviz.com/en/>)

Οι εικόνες αναγλύφου, εκτός των βιντεοπαιχνιδιών και ταινίες όπου δίνουν μια εντυπωσιακή αίσθηση του 3d χώρου, έχουν εφαρμογές σε διάφορες επιστήμες όπου η αντίληψη του βάθους κρίνεται χρήσιμη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία εφαρμογή της NASA σε αυτοματοποιημένο όχημα με κινητήρα (Mars Rover), το οποίο φωτογραφίζει όλη την επιφάνεια του πλανήτη Άρη με εικόνες αναγλύφου. Επίσης, η STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) είναι μια ηλιακή αποστολή, όπου δύο σχεδόν πανομοιότυπα διαστημικά σκάφη τέθηκαν το 2006 σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο παίρνοντας εικόνες αναγλύφου, που επιτρέπουν τη στερεοσκοπική απεικόνιση του Ήλιου και των ηλιακών φαινομένων. Παρόμοιες εφαρμογές αναφέρονται από το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ σε γεωλογικές απεικονίσεις. Άλλη πρόσφατη εφαρμογή είναι η 3D απεικόνιση της καρδιάς ([http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph\\_3D](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D)).

Σημαντική εφαρμογή των εικόνων αναγλύφου, και γενικότερα της 3D τεχνολογίας, είναι η χρήση τους σε εικονικές εκθέσεις σε μουσεία, προβάλλοντας στους μαθητές και στους επισκέπτες, με ιδιαίτερα ελκυστικό τρόπο, ευρήματα, μνημεία και αρχαιολογικούς χώρους. Η 3D τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα στο ευρύ κοινό να επισκέπτεται μουσεία και αρχαιολογικούς χώρους εικονικά, χωρίς τη φυσική επίσκεψή τους.

Τα οφέλη της τρισδιάστατης τεχνολογίας και των τρισδιάστατων μοντέλων είναι πολλά. Η δισδιάστατη φωτογραφική απεικόνιση δεν είναι ικανοποιητική σε περιπτώσεις όπου ο ερευνητής, όπως αρχιτέκτονας ή αρχαιολόγος, ενδιαφέρεται είτε να ερμηνεύσει, είτε να ψηφιοποιήσει αντικείμενα με

ιδιαίτερο ανάγλυφο, πολλαπλά επίπεδα με πολλές λεπτομέρειες κοκ. Με την επίτευξη καλής 3D παρατήρησης γίνεται με ακρίβεια η ερμηνεία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και λεπτομερειών που υπάρχουν σε σύνθετα αντικείμενα μελέτης, όπως μνημεία. Για το λόγο αυτό, ένα τρισδιάστατο εικονικό μοντέλο αντικειμένων είναι το πλέον κατάλληλο εργαλείο για την μελέτη τους. Στην Εικόνα 4-1 που ακολουθεί φαίνεται μια εικόνα αναγλύφου ενός γλυπτού, το οποίο βρίσκεται στην Ακρόπολη της Περσέπολης, και τα κατάλληλα γυαλιά με φακούς διαφορετικών χρωμάτων (κόκκινο-κυανό) που επιτρέπουν την στερεοσκοπική αντίληψη και παρατήρηση.



Εικόνα 4-1: Εικόνα Αναγλύφου (γλυπτό στον αρχαιολογικό χώρο της Περσέπολης, [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Persepolis\\_\(By\\_Abdolazim\\_Hasseli\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Persepolis_(By_Abdolazim_Hasseli).jpg)) και γυαλιά με φίλτρα κόκκινο-κυανό

Έχουν αναπτυχθεί πολλά λογισμικά, αναρτημένα ελεύθερα στο διαδίκτυο, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας εικόνων αναγλύφου. Στα συγκεκριμένα λογισμικά γίνεται η εισαγωγή των αρχικών εικόνων, οι οποίες έχουν διαφορετικό σημείο λήψης και εξαλείφοντας τις παραλλάξεις, που οφείλονται στη κεντρική προβολή, επιτυγχάνεται η στερεοσκοπική παρατήρηση. Οι δυνατότητες των συγκεκριμένων προγραμμάτων περιορίζονται στην 3D παρατήρηση, χωρίς όμως τη μετρητική διάσταση. Εξάλλου, οι αρχικές φωτογραφίες που χρησιμοποιούν έχουν παραμορφώσεις, στροφές, διαφορετική κλίμακα σε κάθε σημείο, λόγω της κεντρικής προβολής. Όλα τα παραπάνω δεν επιτρέπουν την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας, παρά μόνο την αίσθηση του τρισδιάστατου χώρου.

Στην Εικόνα 4-2 παρατίθεται εικόνα αναγλύφου μέρους του πάνω τμήματος ενός από τους Πύργους στην είσοδο του Καστέλου της Ρόδου, όπως προέκυψε από τη χρήση του λογισμικού 3D Anaglyph Maker, το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο ([http://www.stereoeye.jp/software/index\\_e.html](http://www.stereoeye.jp/software/index_e.html)). Έγινε εισαγωγή των αρχικών εικόνων στο πρόγραμμα και εξαλείφοντας την x και y παράλλαξη δημιουργείται η εικόνα αναγλύφου. Το λογισμικό 3D Anaglyph Maker, έχει γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++Builder5 και οι δυνατότητές του περιορίζονται στην εξάλειψη της x και y-παράλλαξης, τη διόρθωση της ραδιομετρίας των εικόνων που εισάγονται, τη δημιουργία της εικόνας αναγλύφου και την αποθήκευσή της. Η παρατήρησή της μπορεί να γίνει με γυαλιά φίλτρων κόκκινου-κυανού.



Εικόνα 4-2: Εικόνα Αναγλύφου, από τμήμα του πύργου στην είσοδο του Καστέλου στη Ρόδο

Οι Schuhra and Kanngieserb (2008), προτείνουν τη χρήση των εικόνων αναγλύφου ως ισχυρό εργαλείο στον τομέα της χωρικής οπτικοποίησης δεδομένων, την καταγραφή και τεκμηρίωση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Αναφέρουν ότι δεν υπάρχει μοναδική απάντηση για το βέλτιστο μήκος βάσης λήψης των εικόνων ή του λόγου της βάσης προς την απόσταση από το αντικείμενο ώστε να επιτυγχάνεται η φυσική ή η επαυξημένη πλαστικότητα της αντίληψης του αναγλύφου. Τονίζουν ότι οι άξονες λήψης των εικόνων θα πρέπει να έχουν μέχρι 5 βαθμούς απόκλιση από την κατακόρυφη λήψη, ώστε να επιτυγχάνεται η αντίληψη του τρισδιάστατου χώρου. Τέλος, αναφέρουν ότι αποτελεί θέμα έρευνας η δημιουργία εικόνας mate στην περίπτωση που δεν υπάρχει δεύτερη εικόνα για το συγκεκριμένο αντικείμενο ενδιαφέροντος ή έχει χαθεί.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής της εικόνας αναγλύφου για την 3D παρατήρηση, αλλά και απόδοση (μέτρηση) των γεωμετρικών χαρακτηριστικών πολύπλοκων μνημείων με έντονο ανάγλυφο. Στα αμέσως επόμενα κεφάλαια διερευνάται η δυνατότητα υποστήριξης αυτών των εργασιών από τα ήδη υπάρχοντα εμπορικά και ελεύθερα φωτογραμμετρικά λογισμικά και συστήματα GIS. Συνοπτικά αναφέρεται ότι υποστηρίζεται από κάποια λογισμικά η δημιουργία της εικόνας SOM, χωρίς όμως να υπάρχει δυνατότητα ψηφιοποίησης στο στερεοζεύγος που προκύπτει. Στη συνέχεια περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αποδεσμεύοντας τον αρχιτέκτονα και αρχαιολόγο από τη χρήση ειδικού φωτογραμμετρικού εξοπλισμού και εξειδικευμένων γνώσεων Φωτογραμμετρίας.

## 4.2 Στερεοζεύγος Ορθοεικόνων σε Εμπορικά Λογισμικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύντομη περιγραφή των δυνατοτήτων και παρουσιάζονται-διερευνούνται οι περιορισμοί εμπορικών λογισμικών (ενός GIS και ενός φωτογραμμετρικού) στην υποστήριξη 3D παρατήρησης και ψηφιοποίησης σε στερεοζεύγος ορθοεικόνων.

### 4.2.1 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGIS (ArcMap, ArcScene)

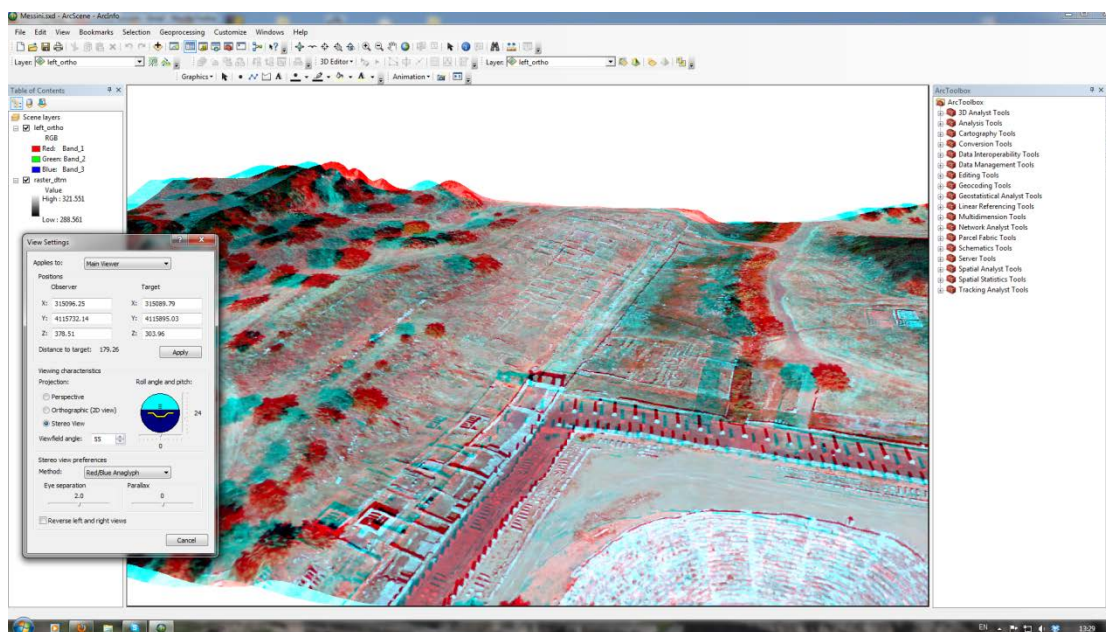
Το λογισμικό ArcGIS μέσω του module 3DAnalyst (στο ArcMap) μπορεί να επεξεργαστεί τρισδιάστατα δεδομένα μεγάλου όγκου. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι 3D διανυσματικά ή εικονιστικά, σε τοπικό περιβάλλον ή στο διαδίκτυο (web εφαρμογές), μέσω των ArcGlobe™ και ArcScene™. Το 3D Analyst



υποστηρίζει όλες τις μορφές δεδομένων, που χρησιμοποιούνται στο ArcGIS, συμπεριλαμβανομένων εικόνων διαφόρων μορφοτύπων (format), shapfiles, γεω-δεδομένων και άλλων δεδομένων CAD.

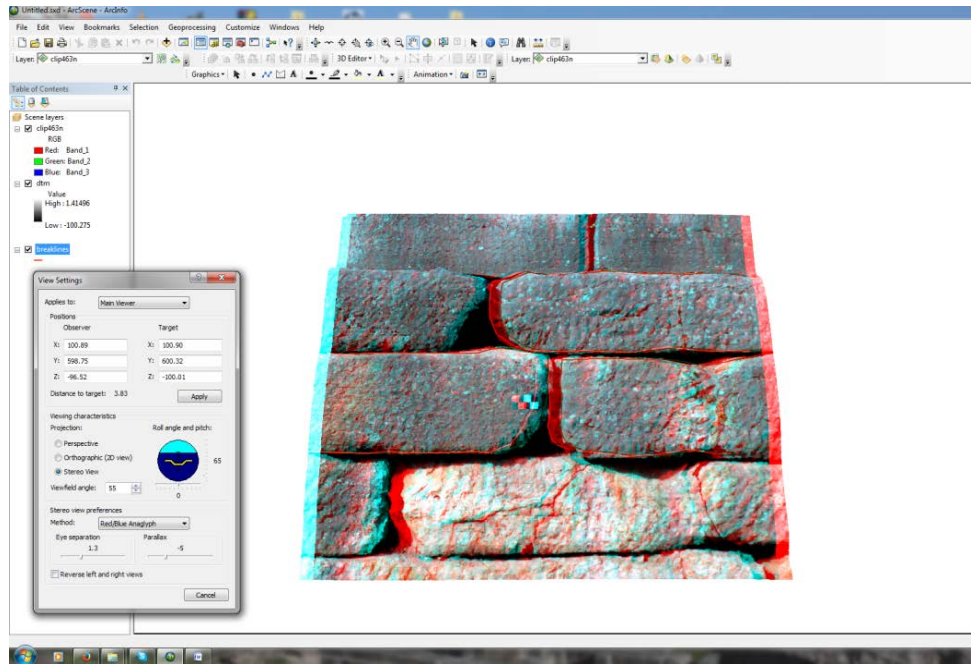
Η στερεοσκοπική παρατήρηση είναι εφικτή μέσω του ArcScene με τη δημιουργία εικόνων αναγλύφου και φορώντας ο χρήστης κόκκινα-κυανά ή κόκκινα-πράσινα γυαλιά, ή shutter glass που απαιτούν όμως επιπλέον εξοπλισμό. Στο ArcScene ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει μία ορθοεικόνα και ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) και, ρυθμίζοντας τις παραμέτρους της θέασης, να επιλέξει τη λειτουργία 'Στερεοσκοπική παρατήρηση'. Έτσι μπορεί να υπάρξει τρισδιάστατη απεικόνιση του DSM με επίθεση της ορθοεικόνας, αλλά, επίσης, να δημιουργηθεί μια εικόνα αναγλύφου, όπου το λογισμικό δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να διορθώσει την x-παράλλαξη, επιτυγχάνοντας καλύτερη παρατήρηση. Επίσης, υπάρχει παράμετρος ρύθμισης της βάσης των ματιών. Από την έκδοση 10 του λογισμικού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ψηφιοποιήσει, παρατηρώντας υπό γωνία την εικόνα αναγλύφου, και να επεξεργασθεί την παραγόμενη τρισδιάστατη πληροφορία. Η 3D ψηφιοποίηση γίνεται με τη χρήση εργαλείων του 3D Graphics toolbar και η επεξεργασία της διανυσματικής πληροφορίας από τα εργαλεία του 3d editor. Για να είναι σωστές οι μετρήσεις θα πρέπει σε κάθε σημείο να εξαλείφεται η παράλλαξη χρησιμοποιώντας τους κέρσορες ως ιπτάμενη μάρκα. Μια αδυναμία του συστήματος είναι ότι, όπως παρατηρήθηκε κατά τους ελέγχους που έγιναν, στα σημεία με μεγάλο ανάγλυφο, δεν είναι επαρκές το εύρος της κίνησης για την εξάλειψη της x-παράλλαξης, που παρέχει το λογισμικό. Τα διανυσματικά δεδομένα που προκύπτουν από τη 3D ψηφιοποίηση της εικόνας αναγλύφου, μπορούν να εξαχθούν σε format shp.

Στην Εικόνα 4-3 φαίνεται τρισδιάστατη άποψη τμήματος του αρχαιολογικού χώρου της Αρχαίας Μεσσήνης, στο περιβάλλον του ArcScene.

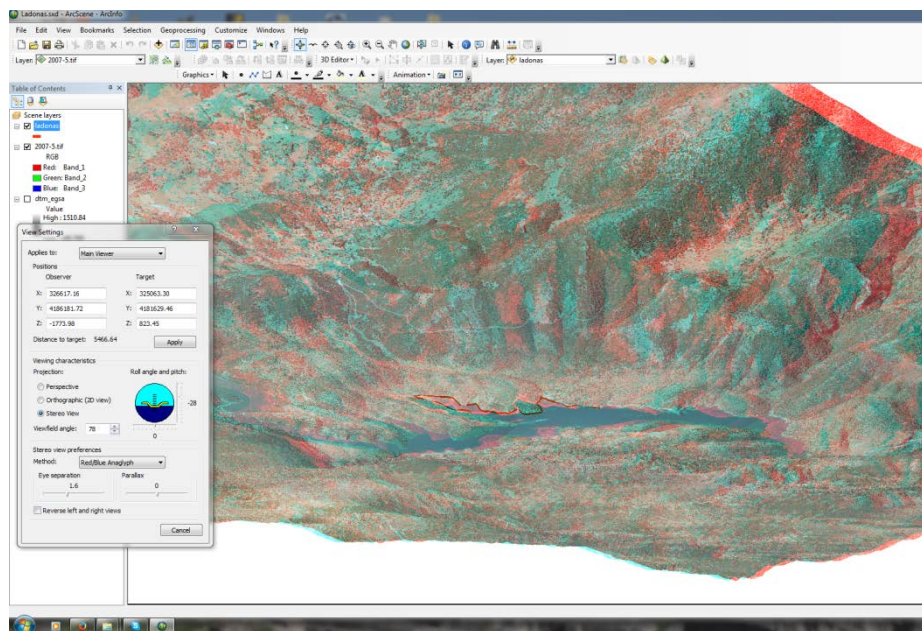


Εικόνα 4-3: Εικόνα αναγλύφου του αρχαιολογικού χώρου της Αρχαίας Μεσσήνης στο Περιβάλλον ArcScene

Στην Εικόνα 4-4 φαίνεται άλλη εφαρμογή, με τμήμα του αναλημματικού τοίχου του αρχαίου θεάτρου των Δελφών και τις τρισδιάστατες γραμμές που ψηφιοποιήθηκαν στο λογισμικό του ArcScene. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 4-5 δίνεται μια εφαρμογή με αεροφωτογραφίες, από την περιοχή ιδιαίτερου φυσικού κάλλους στον ποταμό Λάδωνα, Δήμου Γορτυνίας: φαίνονται οι ψηφιοποιημένες γραμμές στο τρισδιάστατο μοντέλο, που δημιουργήθηκε σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 4-4: 3D ψηφιοποίηση στο ArcScene εικόνας αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου του θεάτρου Δελφών



Εικόνα 4-5: 3D ψηφιοποίηση εικόνας αναγλύφου στην περιοχή ιδιαίτερου φυσικού κάλλους στην τεχνητή λίμνη του Λάδωνα

#### 4.2.2 Φωτογραμμετρικό λογισμικό Earth Resources Data Analysis System (Erdas)

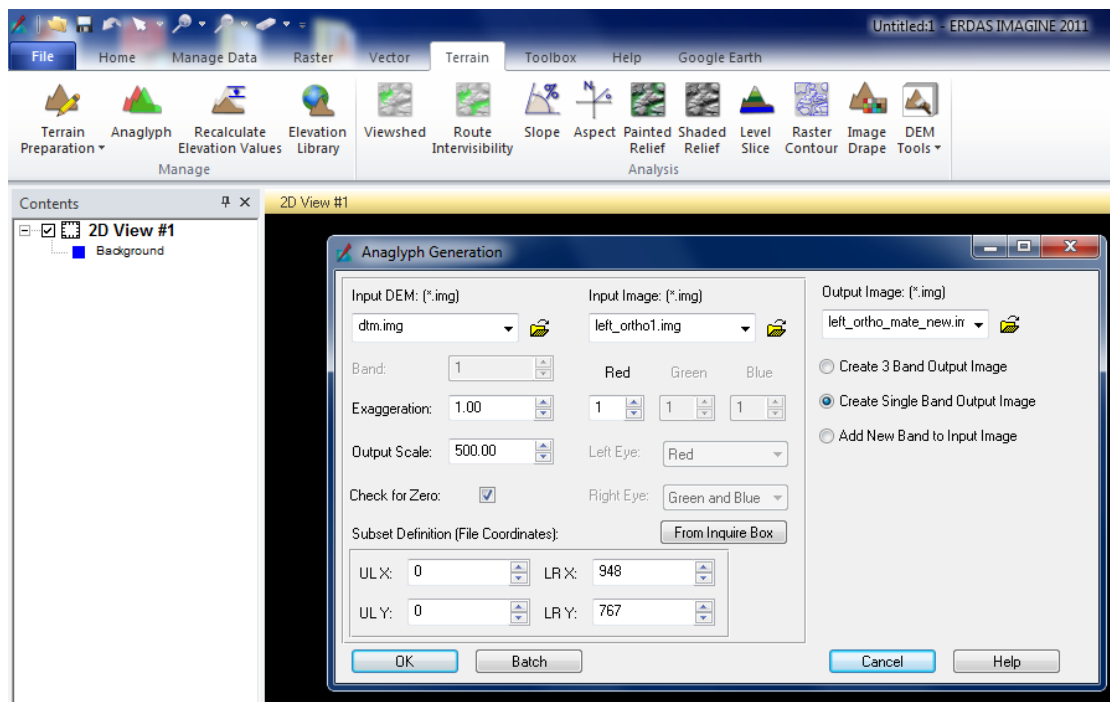
Το λογισμικό ERDAS Imagine με το εργαλείο Anaglyph Generation δημιουργεί με απλό τρόπο έγχρωμη ανάγλυφη προσομοίωση του εδάφους σε 3D, με χρήση του DEM και μιας ορθοεικόνας. Το ανάγλυφο δημιουργείται με τον υπολογισμό και εισαγωγή μιας εκτροπής ('τριγωνομετρικής διαστροφής') ή μετάθεσης των εικονοστοιχείων. Έτσι σχηματίζεται μια εικόνα stereomate, που μαζί με την αρχική ορθοεικόνα αποτελούν το στερεοζεύγος ορθοεικόνων.

Το σύστημα προβολής του παραχθέντος ανάγλυφου είναι ίδιο με το σύστημα της εικόνας εισόδου και όχι του DEM, το οποίο μπορεί να είναι σε ένα διαφορετικό σύστημα προβολής. Εάν τα στοιχεία του

συστήματος προβολής δεν είναι γνωστά, τόσο για την ορθοεικόνα όσο και για το DEM, αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία εσφαλμένων αναγλύφων.

Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να κάνει έλεγχο για περιοχές χωρίς στοιχεία-δεδομένα και μέσω κατάλληλου αλγορίθμου (Zero) να εξαλείφονται τυχόν «τρύπες» στα προϊόντα που παράγονται. Γενικώς συνιστάται η ενεργοποίηση αυτής της επιλογής, και στην περίπτωση που υπάρχουν μεγάλα τμήματα της εικόνας με τιμές pixel 0, ο έλεγχος με τον αλγόριθμο Zero αντικαθιστά το μαύρο με μία διαβάθμιση χρώματος, προϊόν που μπορεί, όμως, να είναι ανεπιθύμητο. Σε αυτή την περίπτωση, συνιστάται να γίνει αναδειγματοληψία στα δεδομένα και να αντικατασταθούν οι μηδενικές τιμές των εικονοστοιχείων με τιμές 1.

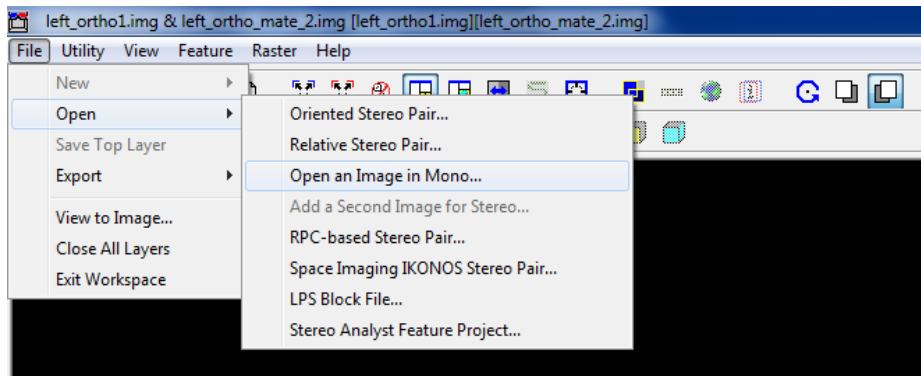
Στην Εικόνα 4-6 φαίνεται το περιβάλλον διεπαφής του χρήστη με το λογισμικό, για την εκτέλεση των παραπάνω περιγραφέντων.



Εικόνα 4-6: Περιβάλλον του Terrain Anaglyph ERDAS

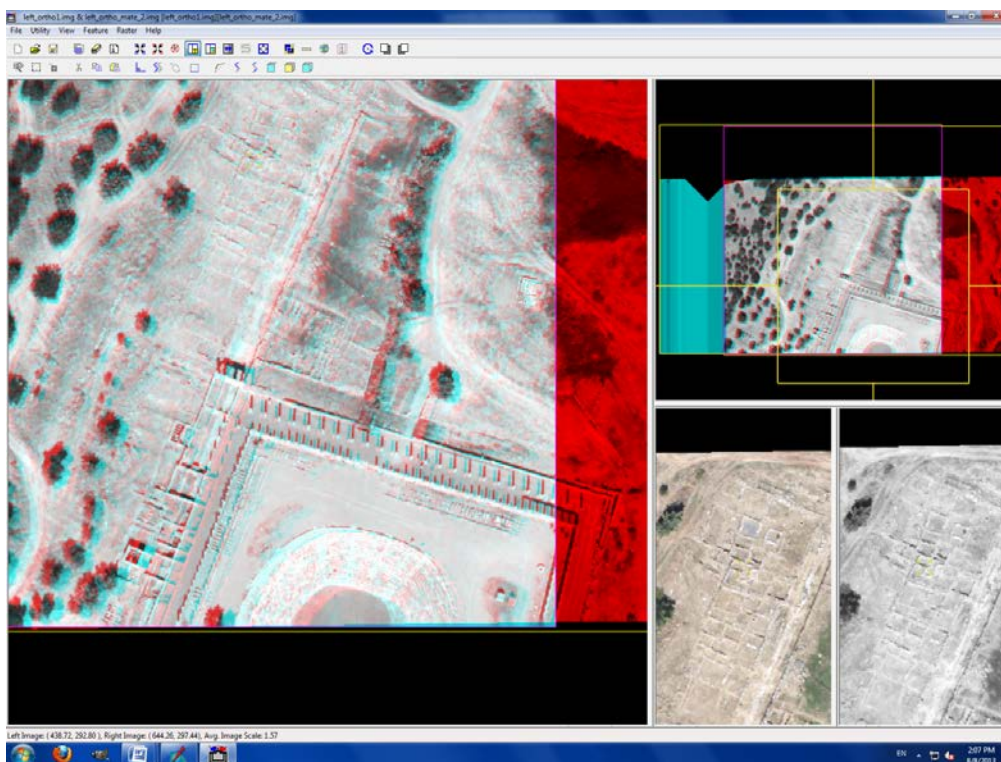
Η εφαρμογή που έγινε στο συγκεκριμένο λογισμικό αφορούσε στον αρχαιολογικό χώρο της Αρχαίας Μεσσήνης. Έγινε εισαγωγή του DTM και της ορθοεικόνας και, στη συνέχεια, η παραγόμενη εικόνα καθώς και η αρχική εισήχθησαν στο Stereo Analyst, το οποίο υποστηρίζει τη συλλογή, τη διαδραστική ανάλυση και 3D απεικόνιση δεδομένων. Στην Εικόνα 4-7 φαίνεται η διαδρομή της εισαγωγής των εικόνων στο λογισμικό.

Αρχικά καλείται η αριστερή εικόνα και στη συνέχεια η παραχθείσα stereomate, η οποία θα αποτελέσει την δεύτερη εικόνα του στερεοζεύγους. Η στερεοσκοπική παρατήρηση και η εικονική περιήγηση στο μοντέλο είναι πλέον εφικτή. Αντιθέτως, δεν λειτουργεί η διαδικασία της ψηφιοποίησης, και έτσι προκύπτει ότι το συγκεκριμένο εργαλείο προσφέρεται μόνο για τη θέαση και περιήγηση στο τρισδιάστατο μοντέλο.



Εικόνα 4-7: Εισαγωγή εικόνων αναγλύφου στο Stereo Anaglyph

Έγιναν διάφορες προσπάθειες υπέρβασης του προβλήματος, για παράδειγμα με άλλον τρόπο εισαγωγής του στερεομοντέλου. Δημιουργήθηκε ένα εικονικό block file από το φωτογραμμετρικό λογισμικό (LPS) του ERDAS, με την επιλογή ενός γεωμετρικού μοντέλου μη μετρητικής κάμερας και την επιλογή σημείων σύνδεσης για την συσχέτιση των δύο εικόνων. Ακολούθησε εισαγωγή του συγκεκριμένου block file στο Stereo Analyst του ERDAS, όπου, όμως, εμφανίστηκε μήνυμα ότι οι εικόνες προέρχονται από το ίδιο σημείο λήψης, με αποτέλεσμα την αδυναμία συνέχισης της λειτουργίας του λογισμικού. Στην Εικόνα 4-8 φαίνονται οι εικόνες αναγλύφου της περιοχής της Αρχαίας Μεσσήνης στο Stereo Analyst του ERDAS.

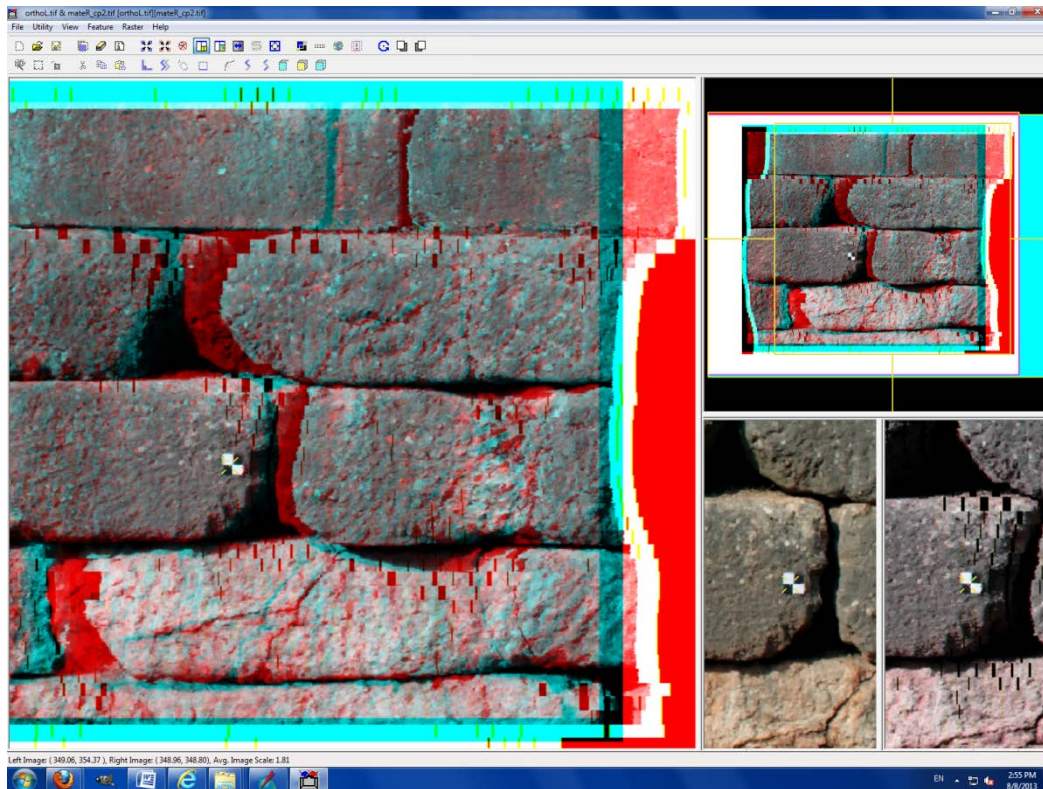


Εικόνα 4-8: Περιβάλλον Stereo Analyst ERDAS

Έγινε διερεύνηση της συγκεκριμένης λειτουργίας του λογισμικού με ορθοεικόνες από επίγειες λήψεις. Χρησιμοποιήθηκε στερεοζεύγος ορθοεικόνων, από αναλημματικό τοίχο του θεάτρου Δελφών, το οποίο δημιουργήθηκε με λογισμικό που αναπτύχθηκε στο MatLab (λεπτομερής ανάλυσή του στο κεφάλαιο 5). Το στερεοζεύγος εισήχθη στο Stereo Analyst, με αριστερή εικόνα την αρχική (αριστερή) ορθοεικόνα και δεύτερη εικόνα την SOM (Εικόνα 4-9). Η στερεοσκοπική παρατήρηση και η περιήγηση στο τρισδιάστατο μοντέλο είναι εφικτή, αλλά και πάλι δεν υπάρχει δυνατότητα ψηφιοποίησης στο

στερεοσκοπικό μοντέλο, άρα απόδοσης των στοιχείων που ενδιαφέρουν τον χρήστη. Πράγματι, το λογισμικό για να λειτουργήσει απαιτεί

- είτε την ύπαρξη project, το οποίο να έχει δημιουργηθεί στο LPS και στο οποίο να περιλαμβάνονται οι παραπάνω εικόνες, στοιχείο που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί
- είτε την εισαγωγή των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού καθεμιάς εικόνας, που, επίσης, δεν έχουν νόημα στη συγκεκριμένη περίπτωση (το σημείο λήψης της ορθοεικόνας είναι στο άπειρο).



Εικόνα 4-9: Στερεοζεύγος ορθοεικόνων στο Stereo Analyst ERDAS

### 4.3 Στερεοζεύγος Ορθοεικόνων σε Ελεύθερα Λογισμικά

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των λογισμικών ανοικτού κώδικα είναι πολύ διαδεδομένη και ιδιαίτερα στο πεδίο των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών έχουν δημιουργηθεί πολύτιμα εργαλεία GIS έχοντας μεγάλο αριθμό χρηστών. Βασικό πλεονέκτημα αυτών των εργαλείων είναι η δυνατότητα εύκολης επέκτασης του ανοικτού κώδικα από άλλους προγραμματιστές, με την προσθήκη εξειδικευμένων plug-ins. Οι Pyka et al (2012) προτείνουν την ανάπτυξη plug-in στο λογισμικό QuantumGIS για την 3D παρατήρηση και μέτρηση, μέσω της τεχνικής της εικόνας αναγλύφου, σε στερεοζεύγος ορθοεικόνων, η οποία όμως δεν έχει ακόμη δημοσιευθεί. Επιλέγουν το QuantumGIS λόγω του ότι είναι ανοικτού κώδικα, το χρησιμοποιούν και το εμπιστεύονται επιστήμονες πολλών ειδικοτήτων.

Στην ενότητα αυτή γίνεται σύντομη ανάλυση των δυνατοτήτων και περιορισμών των ελεύθερων λογισμικών GIS, στην υποστήριξη της τεχνικής της 3D παρατήρησης, ψηφιοποίησης και μέτρησης.

### 4.3.1 QuantumGIS - Grass

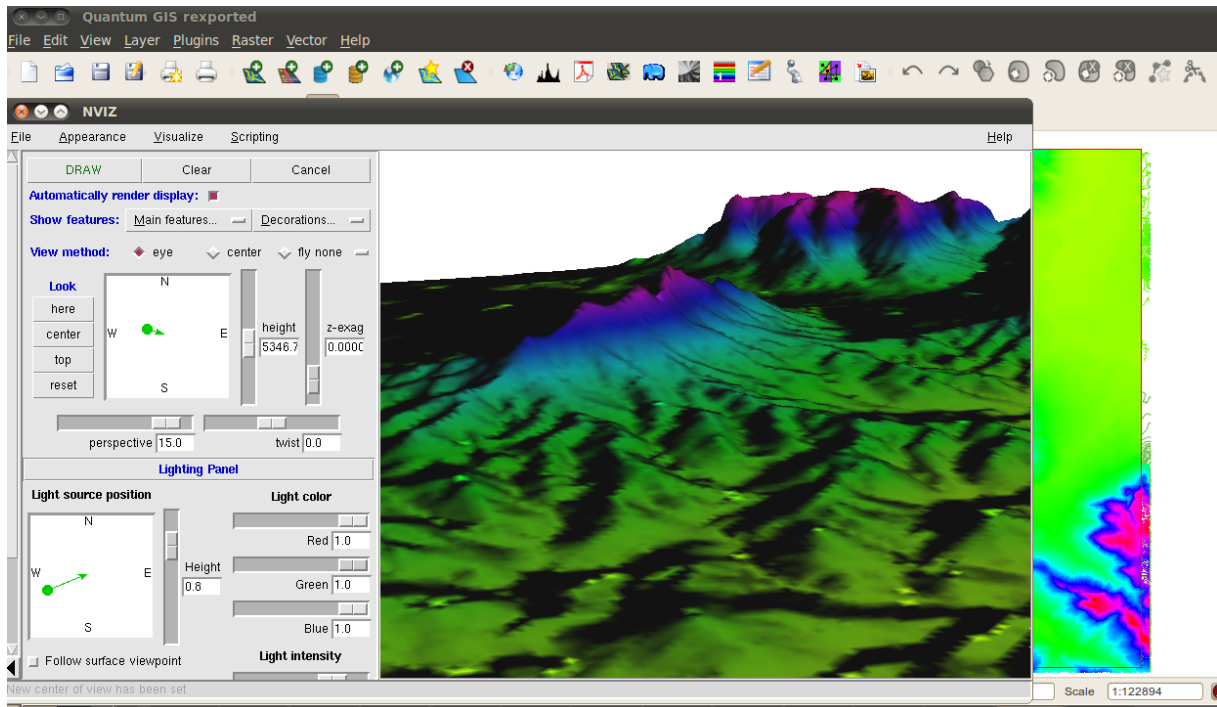
Το QGIS αναπτύχθηκε από το Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) και σχεδιάστηκε ως ένα GIS με την άδεια της GNU General Public. Το λογισμικό QGIS μπορεί να εγκατασταθεί σε πλατφόρμες Microsoft Windows, Mac OS X και Linux, έχοντας τη δυνατότητα επεξεργασίας, ανάλυσης, σύνθεσης και απεικόνισης χωρικών δεδομένων. Επίσης είναι εφικτή η ανάπτυξη εξειδικευμένων εφαρμογών GIS χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες QGIS και γλώσσες προγραμματισμού C++ και Python. Το QGIS έχοντας πρόσβαση στα GRASS plug-in, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την απεικόνιση και επεξεργασία raster δεδομένων, μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας εικόνας αναγλύφου, όπως περιγράφεται παρακάτω. <http://www.qgis.org/>

Το GRASS είναι επίσης ένα Σύστημα Πληροφοριών ανοικτού κώδικα (open source GI-System), που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση, ανάλυση και οπτικοποίηση χωρικών δεδομένων, καθώς και για την επεξεργασία εικόνας και παραγωγή τρισδιάστατου χάρτη. Το λογισμικό GRASS μπορεί να εγκατασταθεί στα λειτουργικά Mac OS X, Microsoft Windows και Linux. Παρότι υπάρχει μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) που διευκολύνει την πραγματοποίηση σημαντικού αριθμού λειτουργιών, ο χρήστης του GRASS πρέπει να χρησιμοποιήσει διάφορους τύπους εντολών για τη λειτουργία βιβλιοθηκών και ενοτήτων που έχουν αναπτυχθεί για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών, με τον καθορισμό κάποιων πρόσθετων παραμέτρων. Υπάρχουν πάνω από 300 βασικές ενότητες πέραν των 100 add-on modules, που αναπτύχθηκε από χρήστες σε C, C++, Python, UNIX shell, Tcl ή άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Το GRASS παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας, απεικόνισης και animation σε 2D και 3D εικονιστικά δεδομένα. Υποστηρίζει περίπου 80 format εικόνων, συμπεριλαμβανομένων των TIFF, BMP, JPEG, JPEG2000, GIF, PNG, και sid (<http://grass.osgeo.org/>).

Το module NVIZ animation χρησιμοποιείται για την απεικόνιση εικόνων και διανυσματικών δεδομένων για την απόδοση 3D επιφανειών, έχοντας δυνατότητα ελέγχου του χρώματος και του φωτισμού του τελικού προϊόντος. Οι χρήστες έχουν, επίσης, τη δυνατότητα βελτίωσης της ταχύτητας απόδοσης και του επιπέδου λεπτομέρειας της επεξεργασίας. Η διασύνδεση tcl / tk σχεδιάζεται να ξαναγραφεί για να επιτρέπει στους προγραμματιστές να προσθέσουν περισσότερες λειτουργίες στο module NVIZ. Με τη χρήση των εντολών "ppmtorgb3" και "rgb3toppm", είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια εικόνα αναγλύφου στο NVIZ.

Η διαδικασία έχει ως εξής: Έχοντας ως δεδομένα το DEM της περιοχής ενδιαφέροντος, μέσω του module NVIZ, βρίσκεται η κατάλληλη γωνία θέασης και αποθηκεύεται σαν εικόνα σε format ppm (*left.ppm*). Στη συνέχεια γίνεται μετακίνηση της εικόνας δεξιότερα, αλλάζοντας έτσι τη γωνία θέασης του αντικείμενου καθώς και την απόσταση-βάση και αποθηκεύεται η νέα εικόνα (*right.ppm*). Με αυτό τον τρόπο και κάνοντας δοκιμές προσδιορίζεται η κατάλληλη βάση μεταξύ των δύο εικόνων, που θα δημιουργήσουν την εικόνα αναγλύφου. Αν η εικόνα που προκύπτει έχει επαυξημένη 3D αντίληψη θα πρέπει να μεγαλώσει η διαφορά μεταξύ των γωνιών θέασης, ενώ στην περίπτωση που η στερεοσκοπική παρατήρηση γίνεται με δυσκολία είναι απαραίτητο να μείωση η βάση. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, χρησιμοποιώντας την εντολή "ppmtorgb3 left.ppm" δημιουργούνται τα τρία κανάλια της αριστερής εικόνας (*left.red, left.green, left.blue*) και αντίστοιχα με την εντολή "ppmtorgb3 right.ppm" δημιουργούνται τα τρία κανάλια της δεξιάς (*right.red, right.green, right.blue*). Τέλος, η εικόνα αναγλύφου δημιουργείται με την εντολή "rgb3toppm left.red right.green right.blue > myfirstanaglyph.ppm" και ο χρήστης μπορεί να την παρατηρήσει στερεοσκοπικά φορώντας γυαλιά με φίλτρα κόκκινο-κυανό. [http://grasswiki.osgeo.org/wiki/Stereo\\_anaglyphs](http://grasswiki.osgeo.org/wiki/Stereo_anaglyphs).

Στην Εικόνα 4-10 φαίνεται η δημιουργία της εικόνας αναγλύφου στο περιβάλλον του QGIS χρησιμοποιώντας το module NVIZ του GRASS ([http://linfiniti.com/wp-content/uploads/2010/12/nviz-3dview\\_in\\_QGIS.png](http://linfiniti.com/wp-content/uploads/2010/12/nviz-3dview_in_QGIS.png)).



Εικόνα 4-10: Δημιουργία εικόνας αναγλύφου στο περιβάλλον του NVIZ

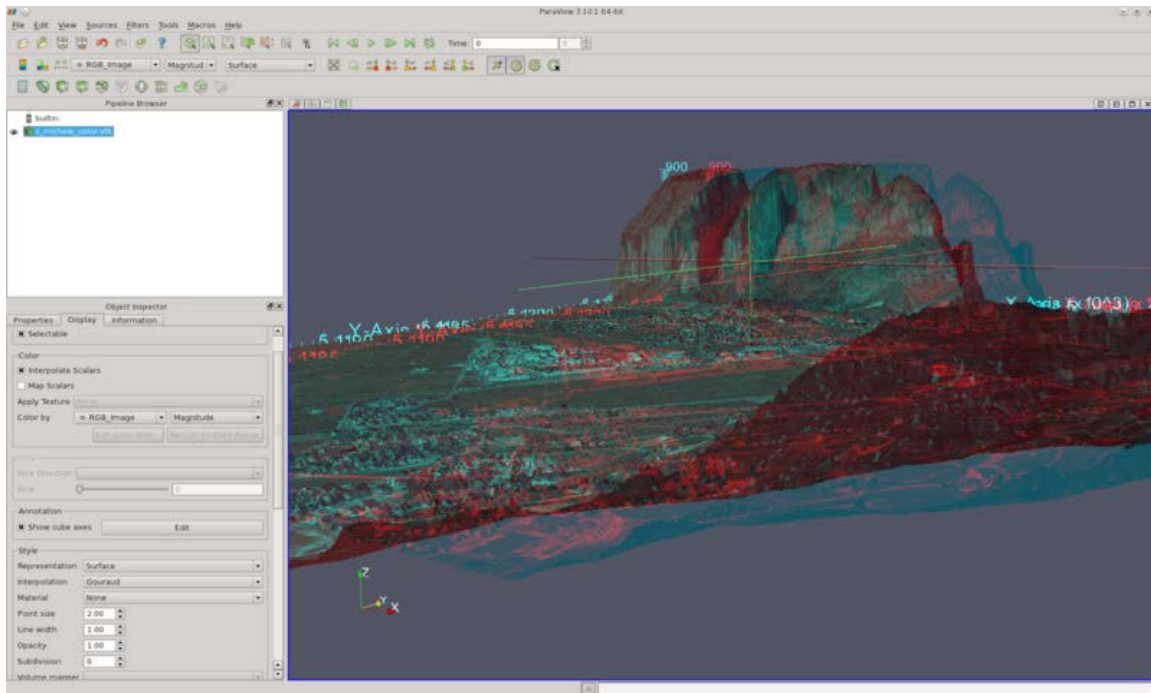
### 4.3.2 Paraview

Το Paraview είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα, που σχεδιάστηκε για τη διαχείριση, ανάλυση και οπτικοποίηση μεγάλων συνόλων δεδομένων. Έχει ανοικτό, ευέλικτο και έξυπνο περιβάλλον εργασίας και, επιπλέον, το Paraview είναι χτισμένο με επεκτάσιμη αρχιτεκτονική, που βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα. Το Paraview έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε λειτουργικά Windows, Linux, Mac OS X, IBM Blue Gene, Cray XT3 και σε διάφορους σταθμούς εργασίας Unix.

Στο λογισμικό ParaView παρέχεται η δυνατότητα διαχείρισης εικονιστικών δεδομένων, μέσω του Visualization Toolkit. Σε αυτό υπάρχουν λειτουργίες rendering, οπτικοποίησης των δεδομένων αλλά και δημιουργίας εικόνων αναγλύφου. Επίσης, υπάρχει ειδικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη, γραμμένο στο Qt cross-platform application framework.

Εκτός της αυτόνομης λειτουργίας του, το Paraview συνεργάζεται με το λογισμικό GRASS, που διαθέτει εξειδικευμένες λειτουργίες επεξεργασίας εικονιστικών δεδομένων. Η εξαγωγή των δεδομένων από το Paraview γίνεται με τις εντολές *r.out.vtk*, *r3.out.vtk* και *v.out.vtk*. <http://www.paraview.org/Wiki/ParaView>

Στην Εικόνα 4-11 φαίνεται το περιβάλλον του Paraview στο οποίο δημιουργείται η εικόνα αναγλύφου ([http://grasswiki.osgeo.org/wiki/File:Paraview\\_fondazione\\_mach\\_ortho\\_3D.png](http://grasswiki.osgeo.org/wiki/File:Paraview_fondazione_mach_ortho_3D.png)).



Εικόνα 4-11: Εικόνα αναγλύφου στο περιβάλλον Paraview

Συμπερασματικά, από τη διενεργηθείσα έρευνα διαπιστώνεται ότι έχουν αναπτυχθεί, σε διάφορα λογισμικά, εργαλεία για την επεξεργασία τρισδιάστατων διανυσματικών και εικονιστικών δεδομένων, τα οποία συνεχώς εμπλουτίζονται και εξειδικεύονται, ακολουθώντας τις ανάγκες των επιστημονικών πεδίων που εξυπηρετούν. Τα λογισμικά ανοικτού κώδικα δίνουν την ευκαιρία σε προγραμματιστές είτε να χρησιμοποιήσουν ήδη έτοιμα modules, είτε να τα τροποποιήσουν καταλλήλως βοηθώντας έτσι την εξέλιξή τους. Μέχρι σήμερα παρέχουν υποστήριξη για 3D στερεοσκοπική απεικόνιση, είτε χρησιμοποιώντας module από άλλα λογισμικά, όπως το Quantum GIS, το οποίο χρησιμοποιεί εργαλεία του GRASS, είτε το λογισμικό παρέχει από μόνο του τη δυνατότητα 3D απεικόνισης. Το γεγονός ότι τα συστήματα GIS έχουν ενσωματώσει στα εργαλεία τους και την 3D στερεοσκοπική απεικόνιση, σημαίνει ότι υπάρχει ζήτηση και ενδιαφέρον για τη λειτουργία αυτή από τους χρήστες. Όμως, δεν παρέχεται, σε κανένα από αυτά, η δυνατότητα 3D ψηφιοποίησης και απόδοσης χαρακτηριστικών. Το κρίσιμο κενό αυτό, για τις λειτουργίες και εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν, καλύπτεται από την ανάπτυξη, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ειδικού λογισμικού, σε περιβάλλον MatLab, που περιγράφεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.



## 5 Ανάπτυξη Λογισμικού OrthoStereoPair (OSP)

---

### 5.1 Ανάπτυξη Λογισμικού Ορθοφωτογραφίας και SOM

Βασική ιδέα της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός λογισμικού για τη 3D παρατήρηση στερεο-ορθοεικόνων και τη 3D ψηφιοποίηση – απόδοση των χαρακτηριστικών του αντικειμένου από έναν μη φωτογραμμέτη χρήστη (Αρχιτέκτονα, Αρχαιολόγο). Η ανάπτυξη του λογισμικού αυτού έγινε στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού MatLab, έκδοση 2013a. Η γλώσσα αυτή προσφέρει μεγάλη ευκολία στη δημιουργία πινάκων, ενώ οι πράξεις μεταξύ αυτών εκτελούνται γρήγορα. Οι τυπικές απαιτήσεις του συστήματος για τη χρήση του λογισμικού MatLab 2013a είναι: 3-4 GB χώρος στο δίσκο και 1 GB RAM. Επίσης, το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να είναι νεότερο των Windows XP Service Pack 3.

Οι πρώτες, και βασικές, λειτουργίες του λογισμικού είναι η σύνταξη της ορθοεικόνας και η δημιουργία της εικόνας SOM. Για το σκοπό αυτό συντάχθηκαν νέες και αξιοποιήθηκαν υπάρχουσες συναρτήσεις. Στη συνέχεια περιγράφονται τα δεδομένα εισόδου (ορίσματα) και τα στοιχεία εξόδου, καθώς και η λειτουργία της κάθε συνάρτησης.

Για τη σύνταξη της ορθοεικόνας, τα αρχικά δεδομένα είναι η αρχική εικόνα ή οι εικόνες του αρχικού στερεοζεύγους, τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) της περιοχής ενδιαφέροντος. Η συνάρτηση *“Create\_Ortho.m”* δημιουργεί την ορθοεικόνα, καλώντας συναρτήσεις για τον υπολογισμό του πίνακα στροφής, την εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού, την παρεμβολή στο DSM και την επανασύστασης της εικόνας.

Για τη δημιουργία της εικόνας SOM, που θα αποτελέσει τη δεύτερη εικόνα του στερεοζεύγους των ορθοεικόνων, αναπτύχθηκαν ή χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω συναρτήσεις:

- Η συνάρτηση *“read\_tfw.m”*, διαβάζει το αρχείο της γεωαναφοράς που ακολουθεί την ορθοεικόνα.
- Η συνάρτηση *“computeXY\_ortho.m”*, υπολογίζει τα διανύσματα των τετμημένων και τεταγμένων για κάθε εικονοστοιχείο της ορθοεικόνας από τα στοιχεία της γεωαναφοράς της.
- Η συνάρτηση *“paremvoli.m”*, εκτελεί διγραμμική παρεμβολή και επιστρέφει την τιμή του μεγέθους που παρεμβάλεται στο σημείο αυτό. Τα δεδομένα εισαγωγής είναι οι συντεταγμένες του σημείου.
- Η συνάρτηση *“computeZ\_ortho.m”*, υπολογίζει το υψόμετρο για κάθε εικονοστοιχείο της ορθοεικόνας, με δεδομένα εισαγωγής το DSM και τα διανύσματα των τετμημένων και τεταγμένων που εξήχθησαν από την προηγούμενη συνάρτηση *computeXY\_ortho.m*.
- Η συνάρτηση *“computeParallax\_ortho.m”*, υπολογίζει τον πίνακα της τεχνητής x-παράλλαξης της SOM, με δεδομένα τα υψόμετρα για κάθε εικονοστοιχείο της ορθοεικόνας και τις δύο βασικές παραμέτρους: τη βάση και το ύψος πτήσης.
- Η συνάρτηση *“computeXmate.m”*, υπολογίζει τον πίνακα της τετμημένης της εικόνας SOM, με δεδομένα την τετμημένη της ορθοεικόνας και την τιμή της τεχνητής x-παράλλαξης για το αντίστοιχο εικονοστοιχείο.
- Η συνάρτηση με το όνομα *“findInRange.m”* αποθηκεύει τη θέση στην οποία βρισκόταν κάθε στοιχείο του διανύσματος, πριν από την ταξινόμηση του. Δεδομένο εισαγωγής της συνάρτησης

είναι τα  $m$  διανύσματα των τεμημένων της 'βοηθητικής εικόνας' SOM, επομένως η συνάρτηση εκτελείται ανά γραμμή.

- Η συνάρτηση "*create\_mate.m*", αποδίδει τόνους και δημιουργεί την εικόνα SOM με ορίσματα την τεμημένη της SOM, τα υπόμετρα και τους τόνους του γκρι της ορθοεικόνας από την οποία θα παραχθεί η SOM. Στα κελιά που δεν καταχωρείται τόνος, λόγω παράλλαξης, δίδεται σταθερή τιμή τόνου.
- Η συνάρτηση "*create\_mate\_cp.m*", αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση της συνάρτησης "*create\_mate.m*", που συντομεύει σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης<sup>1</sup>.

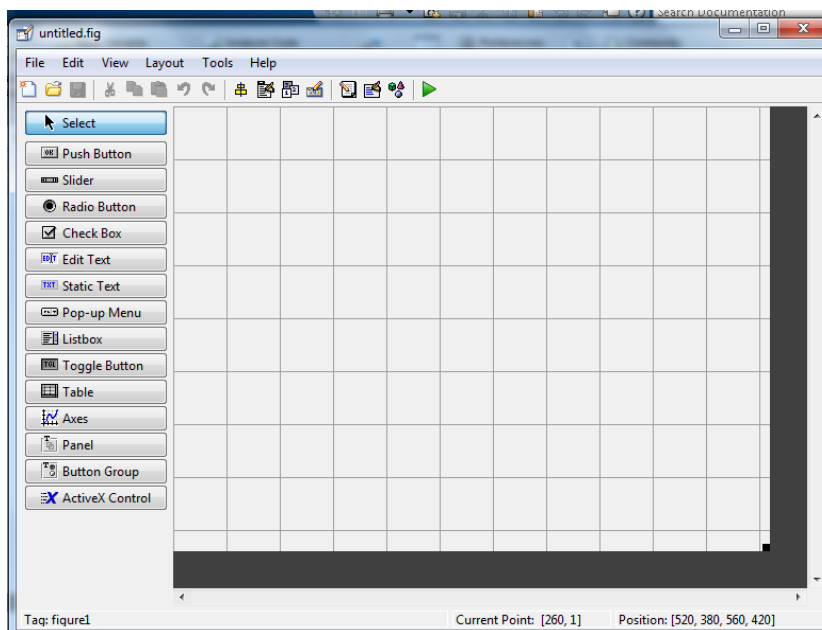
Οι παραπάνω συναρτήσεις κατάλληλα προσαρμοσμένες, καλούνται κατά την εκτέλεση της γραφικής διεπαφής OrthoStereoPair. Στη βασική συνάρτηση της διεπαφής προστέθηκαν και νέες συναρτήσεις, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

## 5.2 Γραφική Διεπαφή OrthoStereoPair

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του λογισμικού γραφικής διεπαφής του χρήστη, που αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού MatLab. Το λογισμικό αυτό, που ονομάστηκε OrthoStereoPair, υλοποιεί τη δημιουργία ενός στερεοζεύγους ορθοεικόνων, ενώ τα αποτελέσματα των διεργασιών που εκτελεί παρουσιάζονται στο χρήστη μέσω του γραφικού περιβάλλοντος.

Το MatLab δίνει την ευχέρεια στο χρήστη να επεκτείνει τις δυνατότητές του βασικού προγράμματος, επιτρέποντας προγραμματισμό σε αρχεία script με κατάληξη \*.m, δυνατότητα δημιουργίας αρχείων \*.exe με χρήση compiler, γραφικό προγραμματισμό (GUI) με δυνατότητα σχεδιασμού παραθύρων, κουμπιών, μενού κ.α., βιβλιοθήκες και πλήρες εργαλείο βοήθειας Help.

Για την κατασκευή της γραφικής διεπαφής OrthoStereoPair χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη GUIDE (Graphical User Interface Design Environment), με την κλήση της ομώνυμης συνάρτησης από το παράθυρο εντολών του MatLab.



Εικόνα 5-1: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία γραφικής διεπιφάνειας

<sup>1</sup> Η συνάρτηση "*create\_mate\_cp.m*" συντάχθηκε από τον Χρήστο Παπαγεωργάκη.

Στην Εικόνα 5-1, τα στοιχεία ελέγχου στην αριστερή στήλη εισάγονται και αποτελούν τις μετέπειτα επιλογές (κουμπιά) της εφαρμογής. Τα αντικείμενα *push button*, *radio button*, *slider*, *edit text*, *static text*, *list box*, *pop-up menu*, *check box* και *toggle button* ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols). Κάθε αντικείμενο (στοιχείο ελέγχου) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσες φορές είναι απαραίτητο σε κάθε εφαρμογή και με διαφορετικό τρόπο. Χρησιμοποιώντας το *property inspector* καθορίζονται οι ιδιότητες των αντικειμένων, όπως το χρώμα του φόντου, η γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό, ενεργό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα εμφανίζεται πάνω του, κ.α. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές βασικές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως.

Σε κάθε αντικείμενο αντιστοιχεί ένας δείκτης (handles). Κάποιοι χρήσιμοι αυτόματοι δείκτες είναι οι παρακάτω:

- gcf            δείκτης στο τρέχον figure
- gco            δείκτης στο τρέχον object. Τρέχον αντικείμενο είναι αυτό το οποίο έχει επιλέξει ο χρήστης με το ποντίκι
- gca            δείκτης στο τρέχον axes
- gcbo          δείκτης στο object του οποίου εκτελείται η συνάρτηση callback.

Τα περισσότερα στοιχεία ελέγχου συνοδεύονται από μία συνάρτηση callback, στην οποία είναι δυνατή η προσθήκη εντολών, που θα εκτελεί η ενεργοποίηση του συγκεκριμένου στοιχείου ελέγχου. Κάτω από κάθε συνάρτηση τοποθετείται ο κώδικας που προγραμματίζει τη λειτουργία που ακολουθεί το GUI με την επιλογή του αντίστοιχου στοιχείου ελέγχου και που μπορεί να περιλαμβάνει m-αρχεία συναρτήσεων, που αναπτύχθηκαν ξεχωριστά από το γραφικό περιβάλλον. Όποιες μεταβλητές χρησιμοποιηθούν εντός συνάρτησης είναι τοπικές, τύπου local, κατ' επέκταση δεν αναγνωρίζονται από συναρτήσεις που εκτελούνται εκτός της συγκεκριμένης. Στην περίπτωση όπου είναι απαραίτητη η αποθήκευση και η χρήση μεταβλητών σε μετέπειτα συναρτήσεις, αυτές πρέπει να είναι καθολικές, τύπου global.

Στο πρώτο μέρος του κώδικα, που αποτελεί το GUI, δημιουργούνται δύο callbacks συναρτήσεις: η *opening function* και η *output function*. Η πρώτη εκτελείται πριν η εικόνα του GUI (figure) γίνει ορατή στο χρήστη, αλλά αφού δημιουργήσει όλα τα αντικείμενα που θέλει, και η δεύτερη επιστρέφει δεδομένα στο παράθυρο εντολών. Και στις δύο συναρτήσεις, μπορεί ο προγραμματιστής να προσθέσει δικό του κώδικα, όπως πχ. στην *opening function* συνηθίζεται να αρχικοποιούνται δεδομένα. Κάθε φορά που εισάγεται ένα στοιχείο ελέγχου (π.χ. push button) με το GUIDE, παράγεται το αντίστοιχο callback στο \*.m αρχείο κάτω από τις δύο παραπάνω βασικές συναρτήσεις.

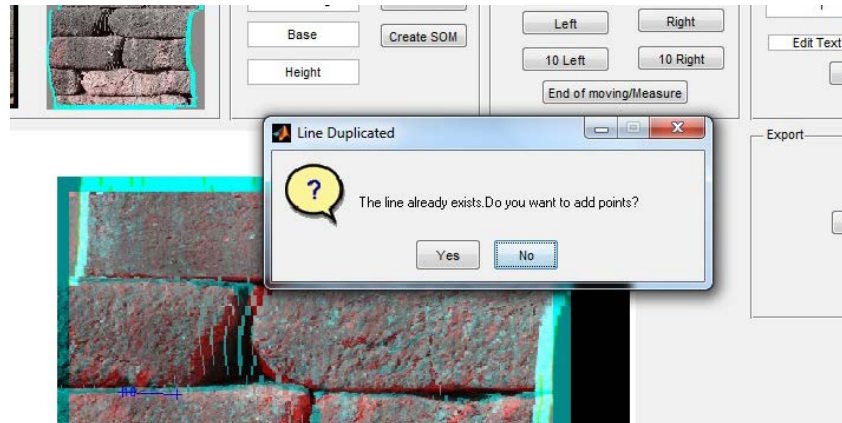
Το GUI δημιουργεί για κάθε παράθυρο δύο αρχεία:

- το αρχείο \*.m (OrthoStereoPair.m), που είναι το αρχείο στο οποίο γράφεται ο κώδικας που θα ενσωματωθεί στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελέσουν τις επιθυμητές εντολές-λειτουργίες. Αναφέρεται και σαν GUI m-file.
- το αρχείο \*.fig (OrthoStereoPair.fig), που είναι το αρχείο στο οποίο το MatLab αποθηκεύει όλα τα στοιχεία ελέγχου που έχουν εισαχθεί, την ακριβή τους θέση καθώς και όλες τις τιμές των ιδιοτήτων τους, που μπορεί να έχουν καταχωρηθεί. Στο αρχείο αυτό σχεδιάζεται η εμφάνιση της εφαρμογής.

Κάθε αρχείο \*.fig πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο \*.m με το ίδιο όνομα. Κάθε φορά που δημιουργείται ένα νέο παράθυρο (figure), το GUI δημιουργεί αυτόματα και τους δύο τύπους αρχείων.

Δύο χρήσιμες ιδιότητες για τον προγραμματισμό του \*.m αρχείου και την κατανόηση της γενικότερης αρχής την οποία διέπει η δημιουργία ενός GUI, είναι οι: string και value. Με την ιδιότητα string μπορεί να εισάγει κείμενο, το οποίο εμφανίζεται πάνω στο αντικείμενο με την εντολή set ή να πάρει κείμενο με την εντολή get. Η ιδιότητα value δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ή να πάρει κάποια τιμή από

ένα στοιχείο ελέγχου. Τέλος, το MatLab προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας dialogs. Τα dialogs είναι ειδικού τύπου παράθυρα τα οποία χρησιμοποιούνται για να επιστρέψουν πληροφορίες στο χρήστη ή να ζητήσουν την εισαγωγή πληροφορίας (Εικόνα 5-2).



Εικόνα 5-2: Ειδικού τύπου παράθυρο - dialog

Αφού ολοκληρωθεί ο κώδικας που θα εκτελείται μετά από κάθε γεγονός και κατασκευαστούν τα αντίστοιχα στοιχεία ελέγχου, η εφαρμογή 'τρέχει' πατώντας το κουμπί «Run». Το GUI ζητά ένα όνομα για την αποθήκευση της εφαρμογής, ώστε να δημιουργήσει τα δύο αρχεία OrthoStereoPair.fig και OrthoStereoPair.m (<http://www.mathworks.com/products/computer-vision/examples.html?file=%2Fproducts%2Fdemos%2Fshipping%2Fvision%2Fvideostereo.html#1>).

Το λογισμικό OrthoStereoPair αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Windows 7 στην έκδοση 2013a της γλώσσας προγραμματισμού MatLab. Το υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για το έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Λογισμικό Windows 7, 64-bit.
- Επεξεργαστή Intel Core i7, 3.67 GHz.
- Μνήμη RAM ίση με 8 GB.
- Ελεύθερο χώρο στο σκληρό δίσκο 250GB.

Το γραφικό περιβάλλον OrthoStereoPair, που αναπτύχθηκε, χωρίζεται εννοιολογικά σε τέσσερις φάσεις:

- η πρώτη φάση ολοκληρώνεται με την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων για την παραγωγή των ορθοεικόνων από τις αρχικές εικόνες,
- η δεύτερη φάση είναι η παραγωγή των ορθοεικόνων,
- η τρίτη φάση είναι η δημιουργία της εικόνας StereoOrthoMate (SOM)
- στην τέταρτη φάση υλοποιείται το περιβάλλον όπου καλείται το στερεοζεύγος των ορθοεικόνων, επιτρέποντας τη στερεοσκοπική παρατήρηση, την ακριβή μέτρηση και την απόδοση σημειακών και γραμμικών οντοτήτων.

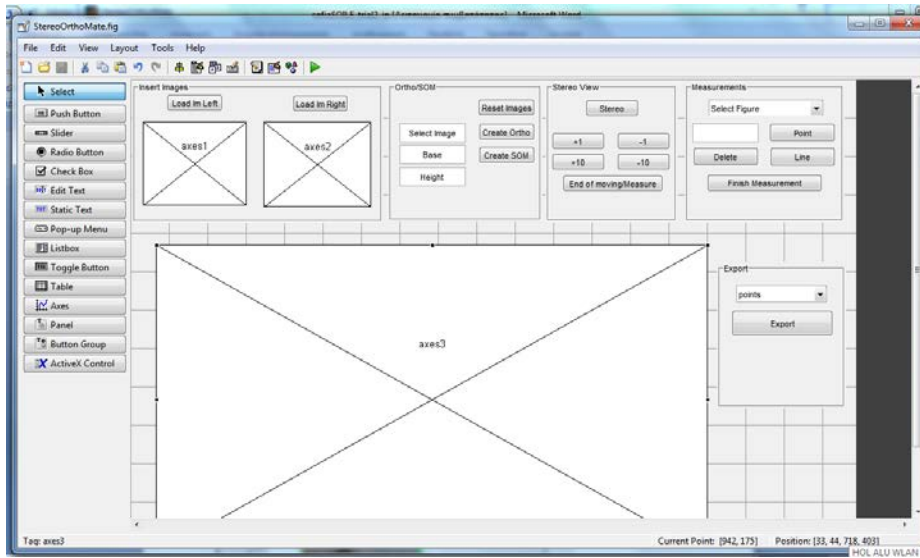
Είναι δυνατόν η εκτέλεση της εφαρμογής OrthoStereoPair να ξεκινά και από άλλο εκτός του πρώτου σταδίου, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε αποτελείται από:

- 16 push buttons, για την εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό δεδομένων, εξαγωγή μετρήσεων και έξοδο από το πρόγραμμα
- 1 static text, για εισαγωγή τίτλων και αποτελεσμάτων
- 4 edit texts, για εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη

- 5 panels, τα οποία δεν επηρεάζουν το πρόγραμμα αλλά χρησιμοποιούνται για αισθητικούς λόγους
- 1 pop – up menu, όπου ο χρήστης επιλέγει την εικόνα στην οποία θα κάνει τις μετρήσεις, η διαδικασία είναι απαραίτητη για τυπικούς λόγους ελέγχου κατά την εκτέλεση των απαραίτητων συναρτήσεων
- 3 axes, για παρουσίαση των εικόνων γραφικά, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα λάθη
- 1 ειδικού τύπου παράθυρο, στο οποίο ενημερώνεται ο χρήστης και καλείται να πάρει αποφάσεις για το επόμενο στάδιο.

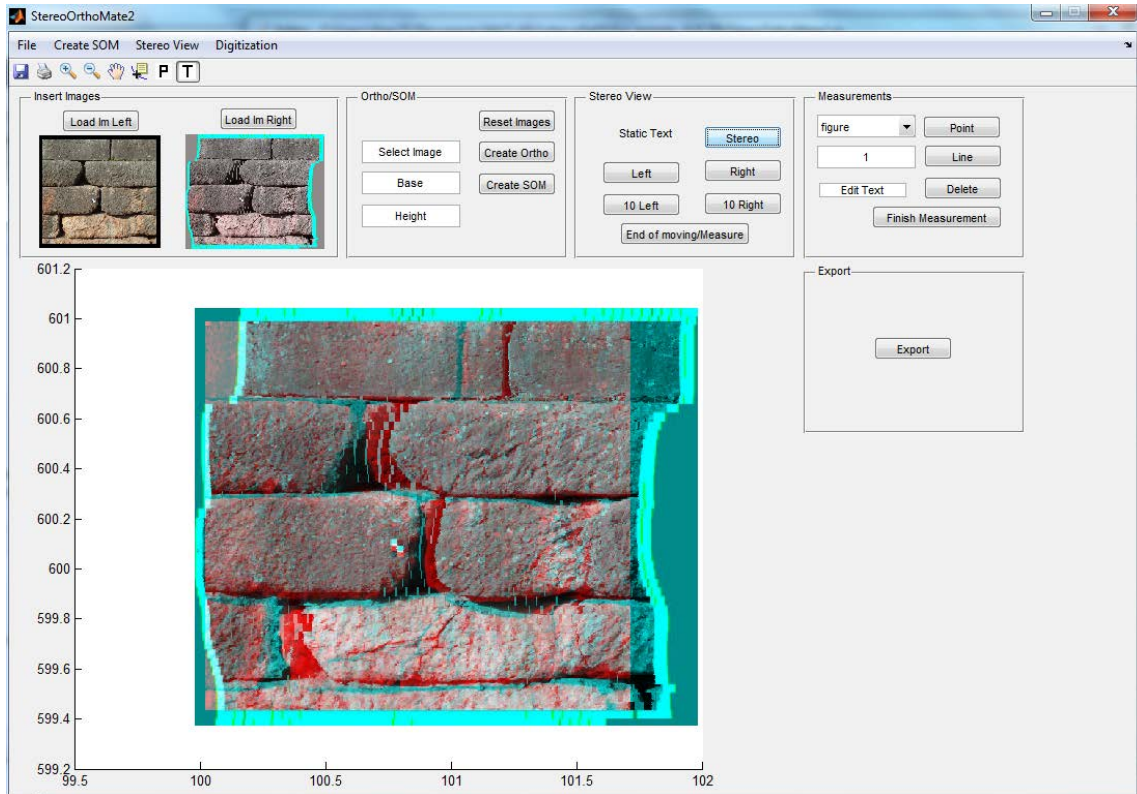
Η Εικόνα 5-3 παρουσιάζει το γραφικό περιβάλλον OrthoStereoPair κατά τη διαδικασία του προγραμματισμού και μέσα από το περιβάλλον σχεδιασμού του προγράμματος MatLab.



Εικόνα 5-3: Το γραφικό περιβάλλον του OrthoStereoPair

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, ο χρήστης επιλέγει το αρχείο \*.fig, με το οποίο εκτελείται η εφαρμογή του OrthoStereoPair. Το γραφικό περιβάλλον στο οποίο εκτελούνται οι εντολές και έχει στη διάθεση του ο χρήστης φαίνεται στην Εικόνα 5-4. Η δομή του είναι απλή και η σειρά εκτέλεσης όλων των εντολών είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά.

Στην πάνω αριστερή γωνία του γραφικού περιβάλλοντος εμφανίζονται η (αριστερή) ορθοεικόνα και η εικόνα SOM, που έχει προκύψει από την εισαγωγή της x-παράλλαξης στη δεξιά ορθοεικόνα. Στο κάτω (αριστερό) τμήμα του γραφικού περιβάλλοντος απεικονίζεται η εικόνα αναγλύφου, που προκύπτει από τη σύνθεση του στερεοζεύγους ορθοεικόνων. Χρησιμοποιώντας ο χρήστης τα εργαλεία που υπάρχουν στο πάνελ measurement μπορεί να αποδώσει τα χαρακτηριστικά που τον ενδιαφέρουν, έχοντας τη δυνατότητα να εξαλείψει τη x-παράλλαξη με τα εργαλεία του πάνελ Stereo View.



Εικόνα 5-4: Γραφική διεπαφή OrthoStereoPair

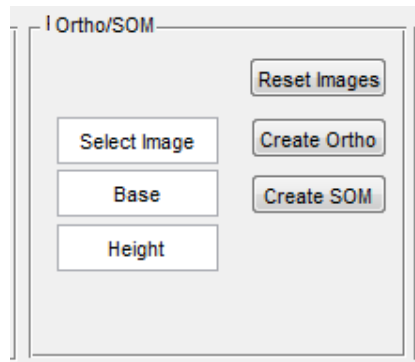
Στο πρώτο panel, που ονομάζεται *Insert Images* γίνεται η εισαγωγή είτε των αρχικών εικόνων είτε των ορθοεικόνων, από τις οποίες πρόκειται να δημιουργηθεί το στερεοζεύγος ορθοεικόνων με την τεχνική της εικόνας αναγλύφου. Με την επιλογή του push button που ονομάζεται 'Load Im Left', εισάγεται η αριστερή εικόνα που ταυτόχρονα εμφανίζεται στον πρώτο παράθυρο (axes 1). Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία εισάγεται και η δεύτερη εικόνα (δεξιά) με τη χρήση του push button που ονομάζεται 'Load Im Right'. Οι εικόνες παρουσιάζονται στα δύο παράθυρα (axes1, axes2) για έλεγχο και προς αποφυγή σφαλμάτων. Μετά από αυτό το στάδιο και για όλες τις μετέπειτα διαδικασίες που εκτελούνται, οι δύο αυτές εικόνες θεωρούνται ως αρχικά δεδομένα, οπότε εισάγονται ως input (Εικόνα 5-5).



Εικόνα 5-5: Εισαγωγή Ορθοεικόνας και εικόνας SOM

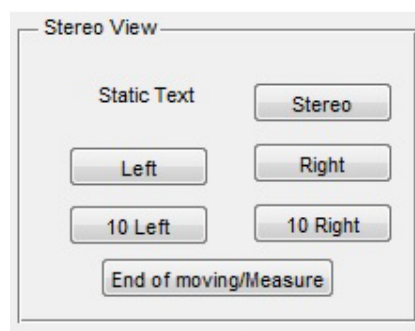
Στο δεύτερο panel, το οποίο ονομάζεται *Ortho/SOM*, εκτελούνται τρεις εντολές:

- Με τη χρήση του push button που ονομάζεται '*Reset Images*', επανέρχεται η εισαγωγή των δύο αρχικών εικόνων αυτόματα. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση λάθους εισαγωγής δεδομένων ή σφαλμάτων κατά τις μετέπειτα διαδικασίες.
- Με τη χρήση του push button που ονομάζεται '*Create Ortho*' δημιουργείται η ορθοεικόνα, από μια αρχική εικόνα,. Στο στάδιο αυτό, είναι απαραίτητα επιπλέον δεδομένα, εκτός των αρχικών εικόνων και του DSM. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται από το χρήστη βήμα βήμα κατά την εκτέλεση της εντολής ή μέσω ενός συγκεντρωτικού αρχείου κειμένου .txt. Στο edit text, που βρίσκεται αριστερά του push button '*Create Ortho*', και ονομάζεται '*Select Image*', ο χρήστης επιλέγει την αρχική εικόνα από την οποία θα δημιουργηθεί η ορθοεικόνα (Εικόνα 5-6).
- Με τη χρήση του push button που ονομάζεται '*Create SOM*' πραγματοποιείται η παραγωγή της εικόνας SOM. Στα δύο αριστερά edit texts εισάγονται, σε m, οι τιμές της βάσης και του υψομέτρου πτήσης – απόστασης από το αντικείμενο, που αποτελούν δεδομένα απαραίτητα και καθοριστικά για την παραγωγή της εικόνας SOM.



Εικόνα 5-6: Εντολές για δημιουργία Ορθοεικόνας και SOM

Στο τρίτο panel, πραγματοποιείται η εξάλειψη της τεχνητής x-παράλλαξης για την επίτευξη της σωστής στερεοσκοπικής παρατήρησης σε συγκεκριμένο σημείο και κατ' επέκταση η ορθή μέτρηση ή απόδοση αυτού του σημείου (Εικόνα 5-7).



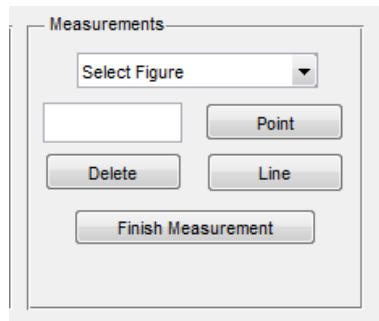
Εικόνα 5-7: Εντολές για την εξάλειψη της x-παράλλαξης

Με τη χρήση του push button '*Stereo*' εφαρμόζεται η τεχνική των ανάγλυφων εικόνων: η αριστερή εικόνα βάφεται κόκκινη και η δεξιά κυανή. Η σύνθεση αυτών των δύο αποτελεί την εικόνα αναγλύφου και παρουσιάζεται στον κεντρικό παράθυρο 3 (axes 3). Η δύο αυτές εικόνες μετά την πρόσθεση, είναι μετατοπισμένες κατά σχετική απόσταση τόση ώστε να επιτρέπεται η στερεοσκοπική παρατήρηση σε όλη την έκταση του αντικειμένου. Για την σωστή στερεοσκοπική παρατήρηση κάθε σημείου (περιοχής) πρέπει να εξαλείφεται τοπικά η τεχνητή x-παράλλαξη. Με τη χρήση των push button '*Left*', '*Right*', '*10*

*Left* και *'10 Right* μετακινείται ανάλογα η δεξιά εικόνα ως προς τη, σταθερή, αριστερή εικόνα ώστε να επιτευχθεί η εξάλειψη της τεχνητής x-παράλλαξης. Αναλυτικότερα αναφέρεται ότι με τη χρήση του push button *'Left*, η δεξιά SOM εικόνα μετακινείται κατά ένα pixel αριστερότερα, πλησιάζοντας την αριστερή ορθοεικόνα. Το push button *'10 Left* προκαλεί δεκαπλάσια μετακίνηση.

Το push button *'End of moving/Measure* είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, όταν ο χρήστης, έχοντας διορθώσει την τεχνητή x-παράλλαξη, θέλει πλέον να μεταβεί στο στάδιο της απόδοσης και των μετρήσεων. Μετά την επιλογή του push button *'End of moving/Measure*, μπορεί να επιλέξει αν θέλει να μετρήσει σημείο ή να αποδώσει γραμμές από το panel Measurements και με την εναλλαγή των διαδικασιών διόρθωση παράλλαξης – μέτρηση σημείου – διόρθωση παράλλαξης να στοχεύσει τα σημεία που χρειάζεται.

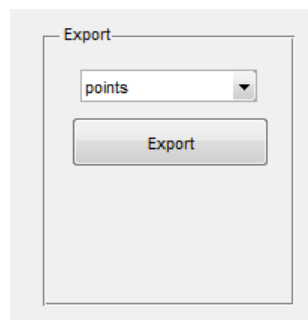
Από το pop – up menu που εμφανίζεται στο panel *Measurements*, επιλέγεται η εικόνα η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των μετρήσεων, διαδικασία που είναι τυπική (όχι ουσιώδης) για την εκτέλεση συναρτήσεων που εκτελούνται κατά τη φάση των μετρήσεων. Ουσιαστικά είναι δυνατόν να επιλεγεί μόνον η αριστερή εικόνα, καθώς σε αυτή γίνονται οι μετρήσεις (Εικόνα 5-8).



Εικόνα 5-8: Εντολές για απόδοση σημείων και γραμμών

Στο edit text που βρίσκεται αριστερά του push button που ονομάζεται *'point'* εισάγεται ο κωδικός του σημείου ή της γραμμής που πρόκειται να μετρηθεί/αποδοθεί από το χρήστη. Στο πεδίο αυτό επιτρέπεται μόνο η εισαγωγή αριθμών ως κωδικός. Στην περίπτωση εισαγωγής γραμμάτων ή άλλων συμβόλων δεν εκτελείται η διαδικασία της μέτρησης.

Απαραίτητο για την εναλλαγή των διαδικασιών της εξάλειψης της τεχνητής x-παράλλαξης με αυτή της μέτρησης είναι η χρήση του push button που ονομάζεται *'Finish Measurement*'. Η χρήση του επιτρέπει την παρεμβολή άλλης εντολής κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Για την ολοκληρωτική διακοπή και αποθήκευση των μετρήσεων, ανεξάρτητα αν είναι σημεία ή γραμμές απαιτείται η χρήση του push button *'Finish Measurement*'.



Εικόνα 5-9: Εντολή για εξαγωγή γραμμών και σημείων σε format DXF και SHP



Τέλος, στο πέμπτο panel που ονομάζεται 'Export' γίνεται η εξαγωγή των σημείων ή των γραμμών, από την αντίστοιχη επιλογή από το pop – up menu, είτε σε αρχείο τύπου CAD (.dxf) είτε σε αρχείο συμβατό με συστήματα GIS (.shp) (Εικόνα 5-9).

Κατά το σχεδιασμό της γραφικής διεπαφής OrthoStereoPair (GUI) έχει προβλεφθεί η δυνατότητα ενεργοποίησης εντολών με τη χρήση πλήκτρων από το πληκτρολόγιο του υπολογιστή. Ο συνδυασμός των πλήκτρων με τις επιλογές της χρήσης του ποντικιού, δίνει ευελιξία στο χρήστη, ελαχιστοποιώντας κινήσεις και χρόνο. Έτσι, εκτός από τα στοιχεία ελέγχου (push buttons) που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης, μπορεί να επιλέξει το αντίστοιχο πλήκτρο που έχει οριστεί. Συγκεκριμένα έχουν προβλεφθεί οι παρακάτω δυνατότητες:

- Κατά τη διαδικασία εξάλειψης της τεχνητής x-παράλλαξης, από το panel *Stereo View*, τα στοιχεία ελέγχου '10 Left' και '10 Right' μπορούν να ενεργοποιηθούν και με τη χρήση των πλήκτρων 'αριστερό βέλος (left arrow)' και 'δεξί βέλος (right arrow)', όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-10.



Εικόνα 5-10: Πλήκτρα για την εξάλειψη της x-παράλλαξης

- Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, από το panel *Measurements*, πριν την επιλογή του σημείου είναι δυνατή η μεγέθυνση της εικόνας. Αυτό επιτυγχάνεται:
  - για *Zoom In* στην περιοχή όπου είναι ο κέρσορας, με πάτημα του μεσαίου πλήκτρου του ποντικιού ή με το πλήκτρο 'i' του πληκτρολογίου,
  - για *Zoom Out*, με πάτημα του δεξιού πλήκτρου του ποντικιού ή με το πλήκτρο 'o' του πληκτρολογίου,
  - για *Zoom Extend*, με το πλήκτρο 'e' από το πληκτρολόγιο.
- Η ολοκλήρωση των μετρήσεων γίνεται είτε επιλέγοντας 'Finish Measurement' είτε με το συνδυασμό των πλήκτρων 'Esc' και 'Enter'.
- Σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να διορθώσει την τελευταία μέτρηση, δίνεται η δυνατότητα αναιρέσεως (undo) με τη χρήση των πλήκτρων 'u' ή 'U'.
- Η διαγραφή ενός σημείου ή γραμμής μετά τον καθορισμό του κωδικού του, στο edit text, επιτυγχάνεται είτε με το στοιχείο ελέγχου 'Delete' είτε με το πλήκτρο 'Delete' του πληκτρολογίου.
- Η περιήγηση στην εικόνα επιτυγχάνεται με Pan, που ενεργοποιείται με τη χρήση του πλήκτρου 'p' από το πληκτρολόγιο.

Για τον προγραμματισμό των πλήκτρων, ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες εντολές, χρησιμοποιήθηκε ο αντίστοιχος κωδικός του πλήκτρου στο δεκαδικό σύστημα, καθώς ο υπολογιστής μπορεί να καταλάβει μόνο αριθμούς και όχι χαρακτήρες (<http://www.asciitable.com/>).

### 5.2.1 Συναρτήσεις του OrthoStereoPair

Σε αυτήν την ενότητα παραθέτονται οι συναρτήσεις, από τις οποίες αποτελείται το λογισμικό OSP, έτσι ώστε να μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει αυτοτελώς όποια συνάρτηση επιθυμεί σε κάποια άλλη εφαρμογή.

Λόγω της πολυπλοκότητας του αντικειμένου, αρχικώς κρίθηκε σκόπιμο να γίνει έρευνα σε λογισμικά ανοικτού κώδικα (παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο) και να χρησιμοποιηθούν όσες υπάρχουν συναρτήσεις αντιμετώπιζαν επιμέρους λειτουργίες του προς ανάπτυξη λογισμικού.

Πρωταρχικής σημασίας για τη διεξαγωγή των 3D μετρήσεων σε στερεοσκοπικό περιβάλλον (απόδοση) είναι η είσοδος δεύτερου δείκτη (cursor) στο γραφικό περιβάλλον, το οποίο, όμως, αποδείχθηκε ότι δεν είναι εφικτό. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόδοσης, απαιτείται η παρεμβολή της συνάρτησης για τη διόρθωση της x-παράλλαξης όσο εκτελείται η συνάρτηση της απόδοσης-ψηφιοποίησης των χαρακτηριστικών γραμμών ενδιαφέροντος.

Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού OrthoStereoPair μέσα από το GUIDE, είναι απαραίτητη η κλήση συναρτήσεων (functions) ή αρχείων εντολών MatLab (scripts) που αποθηκεύονται σε μορφή m-file. Επισημαίνεται ότι βασικά αρχεία της εφαρμογής OrthoStereoPair είναι ένα m-file και ένα fig-file με το ίδιο όνομα. Πολλά από τα ενδιαμέσα τμήματα της διαδικασίας διαιρέθηκαν σε μικρότερα τμήματα (scripts ή functions).

Στη συνέχεια αναφέρονται οι επιπλέον συναρτήσεις, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του λογισμικού, μαζί με τα στοιχεία που αποτελούν δεδομένα εισόδου και εξόδου:

- Η συνάρτηση "*my\_anaglyph.m*", δημιουργεί τη σύνθεση της εικόνας αναγλύφου από την ορθοεικόνα και την εικόνας SOM. Ως ορίσματα λαμβάνει τις δύο προηγούμενες εικόνες και επιστρέφει την ανάγλυφη εικόνα.
- Η συνάρτηση "*movelimage.m*", πραγματοποιεί τη μετακίνηση της δεξιάς εικόνας σε σχέση με τη σταθερά ορισμένη αριστερή, με δεδομένο εισαγωγής το πλήθος των κελιών κατά τα οποία πρέπει να γίνει η μετακίνηση.
- Η συνάρτηση "*movelimage\_cp.m*", αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση της συνάρτησης "*movelimage.m*" ως προς τον χρόνο εκτέλεσης της λειτουργίας.
- Η συνάρτηση "*measure\_lines.m*", επιτρέπει τη μέτρηση γραμμών.
- Η συνάρτηση "*measure\_points.m*", επιτρέπει τη μέτρηση σημείων.
- Η συνάρτηση "*plot\_lines\_matrix\_cp.m*", επιτρέπει την εμφάνιση στη γραφική διεπαφή των μετρημένων γραμμών, με την προηγούμενη συνάρτηση.
- Η συνάρτηση "*plot\_points\_matrix.m*", επιτρέπει την εμφάνιση των μετρημένων σημείων.
- Η συνάρτηση "*make\_dxf\_points\_lines.m*", εξάγει τον πίνακα στον οποίο έχουν αποθηκευθεί οι κόμβοι των γραμμών ή τα σημεία σε αρχείο dxf.
- Η συνάρτηση "*ginput\_cross.m*", επιτρέπει τη μέτρηση των συντεταγμένων σημείων που επιλέγονται σε περιοχή γραφήματος, όπως figures και axes με τη χρήση κέρσορα.
- Η συνάρτηση "*ginput\_for\_lines.m*", επιτρέπει τη μέτρηση των συντεταγμένων γραμμών που επιλέγονται σε περιοχή γραφήματος, όπως figures και axes.

Από τις παραπάνω συναρτήσεις, οι "*movelimage\_cp.m*" και "*plot\_lines\_matrix\_cp.m*" έχουν συνταχθεί από τον Χ. Παπαγεωργάκη (2013), ενώ οι "*measure\_lines.m*", "*measure\_points.m*", "*plot\_points\_matrix.m*", "*make\_dxf\_points\_lines.m*", "*ginput\_cross.m*" και "*ginput\_for\_lines.m*"

περιλαμβάνονται και έχουν ληφθεί από το λογισμικό PCVG των Λ. Γραμματικόπουλου και Η. Καλησπεράκη (2003) ([http://photogram.tj.teiath.gr/?page\\_id=122](http://photogram.tj.teiath.gr/?page_id=122)).

### 5.3 Στερεοσκοπική Παρατήρηση στο OrthoStereoPair

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι διαδικασίες με τις οποίες επιτυγχάνεται η στερεοσκοπική παρατήρηση και η 3D απόδοση στο λογισμικό OrthoStereoPair. Η στερεοσκοπική παρατήρηση σε ένα σημείο ορατό στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων, επιτυγχάνεται με την εξάλειψη της τεχνητής x-παράλλαξης στο σημείο αυτό. Στη συνέχεια η καταγραφή των σημείων και η άντληση της οριζοντιογραφικής πληροφορίας κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης και των μετρήσεων γίνεται από την ορθοεικόνα, με αποτέλεσμα ο, μεν, εντοπισμός του σημείου να είναι καλύτερος και πλέον αξιόπιστος, λόγω της στερεοσκοπικής παρατήρησής του, η ακρίβεια, δε, των μετρήσεων να είναι η ακρίβεια της ορθοεικόνας.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στη συνάρτηση που υπολογίζει τα στοιχεία (pixel) της SOM και την επιτυχή επανασύσταση αυτής, ακολουθούν διαδικασίες για την επίτευξη της στερεοσκοπικής παρατήρησης στο στερεοζεύγος της ορθοεικόνας και της παραχθείσας SOM. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία σύνθεσης της εικόνας αναγλύφου, και με την προϋπόθεση ότι οι εικόνες είναι έγχρωμες, από την ορθοεικόνα μηδενίζονται το κανάλι του πράσινου και του μπλε χρώματος ενώ αντίστοιχα από την εικόνα SOM μηδενίζεται το κανάλι του κόκκινου χρώματος. Η αλγεβρική πρόσθεση των δύο εικόνων αποτελεί την εικόνα αναγλύφου. Με την εισαγωγή της τεχνητής x-παράλλαξης, η εικόνα αναγλύφου δίνει την αίσθηση της 3D παρατήρησης του αντικειμένου, που απεικονίζεται στο μοντέλο. Όμως, για να επιτευχθεί αυτό, κατά τη δημιουργία της εικόνας αναγλύφου είναι απαραίτητο η SOM να μετακινηθεί (κατά x), ώστε ο χρήστης να έχει την αίσθηση του αναγλύφου σε όλο το μοντέλο. Η πρώτη αυτή μετακίνηση, που γίνεται πριν την απεικόνιση της εικόνας αναγλύφου στο παράθυρο διεπαφής (GUI), υπολογίζεται από μια μέση παράλλαξη στο μοντέλο.

Στη συνέχεια, για να επιτευχθεί η ακριβής στερεοσκοπική παρατήρηση σε κάποια θέση/σημείο,, είναι αναγκαία η διόρθωση-μετακίνηση της εικόνας SOM, έτσι ώστε να εξαλειφθεί η τεχνητή x-παράλλαξη στη συγκεκριμένη θέση. Έτσι, σε κάθε επόμενο σημείο, πέραν του πρώτου, το μέγεθος της μετακίνησης της εικόνας SOM είναι το άθροισμα της αρχικής μετακίνησης και της διαφοράς της x-παράλλαξης από το προηγούμενο σημείο, όπου υπήρξε στερεοσκοπική παρατήρηση/εξάλειψη της παράλλαξης (άρα πρέπει να καταγράφεται-κρατείται κάθε φορά το μέγεθος της παράλλαξης του σημείου που ψηφιοποιήθηκε). Οι δύο εικόνες (ορθοεικόνα και SOM) ταυτίζονται στο συγκεκριμένο σημείο (και σε όλα τα σημεία με το ίδιο υψόμετρο) με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η σωστή 3D παρατήρηση των σημείων και η απόδοσή τους. Άρα, η στερεοσκοπική παρατήρηση σε ένα σημείο του στερεοζεύγους επιτυγχάνεται όταν η SOM εικόνα, μετακινηθεί τόσο όσο είναι η τεχνητή x-παράλλαξη που προστέθηκε στη τεταγμένη του σημείου στην ορθοεικόνα.

Επισημαίνεται ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν είναι προγραμματιστικά δυνατή (στο περιβάλλον του MatLab) η εμφάνιση δύο δεικτών (cursors) στην εικόνα αναγλύφου, έτσι ώστε να αντιστοιχεί ένας σε κάθε εικόνα του στερεοζεύγους και να είναι δυνατή η υλοποίηση της αρχής της ιπτάμενης μάρκας στο μοντέλο. Αντ' αυτού, γίνεται η εξάλειψη της (τεχνητής) x-παράλλαξης από τον χρήστη στο σημείο ενδιαφέροντος (με τις διαδικασίες και τα πλήκτρα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα), φροντίζοντας να έχει την καλύτερη δυνατή στερεοσκοπική παρατήρηση. Τότε, με τη βοήθεια του ενός δείκτη (cursor), που υπάρχει στην εικόνα αναγλύφου και η (οριζοντιογραφική) θέση του αντιστοιχεί στην ορθοεικόνα, καταγράφονται/ψηφιοποιούνται οι συντεταγμένες του, που αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων της ορθοεικόνας.

## 6 Εφαρμογές με πραγματικά δεδομένα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού OrthoStereoPair (OSP). Κατά τον έλεγχο της λειτουργίας του λογισμικού χρησιμοποιήθηκαν διάφορα δεδομένα, τόσο από εναέριες όσο και από επίγειες λήψεις, με αντικείμενα, πάντοτε, αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Εδώ περιγράφεται η εφαρμογή με δεδομένα εικόνες από τον ανατολικό αναλημματικό τοίχο του Αρχαίου Θεάτρου των Δελφών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από επίγειες λήψεις, με τη φωτομηχανή Canon EOS 5 Mark II, φακό 24mm και κλίμακα εικόνων, περίπου, 1:250. Οι εικόνες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν δύο περιοχές του τοίχου:

- Για την πρώτη (περιοχή I) διατίθεται ένα στερεοζεύγος εικόνων και το αντικείμενο, που απεικονίζεται στο επικαλυπτόμενο μέρος του, παρουσιάζει μικρό ανάγλυφο, της τάξης των 0.40 m.
- Για τη δεύτερη (περιοχή II) διατίθεται μία (μόνον) εικόνα, ενώ το αντικείμενο που απεικονίζεται έχει μεγάλο ανάγλυφο, της τάξης των 1.5 m.

Τα δεδομένα συμπληρώνονται από τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της φωτομηχανής (βαθμονομημένη), του εξωτερικού προσανατολισμός των εικόνων και το Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) των δύο περιοχών, με βήμα κανάβου 3.5 cm.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των διαδικασιών για την παραγωγή ορθοεικόνας και SOM, η σύνθεση της εικόνας αναγλύφου και τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης/απόδοσης στο περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη OSP. Τέλος, γίνεται σύγκριση των προϊόντων της ψηφιοποίησης με τα αντίστοιχα αφενός της στερεο-απόδοσης στο φωτογραμμετρικό σταθμό SSK Intergraph από τα στερεοζεύγη των αρχικών εικόνων και αφετέρου της μονοεικονικής ψηφιοποίησης από τις ορθοεικόνες των δύο περιοχών.

### 6.1 Περιοχή I

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού και παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του στα δεδομένα της περιοχής I.

Η πρώτη λειτουργία του λογισμικού OrthoStereoPair (OSP) αφορά στην παραγωγή των ορθοεικόνων. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5, για τη σύνταξη της ορθοεικόνας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση 'CreateOrtho.m', η οποία καλεί συναρτήσεις για τη διεξαγωγή διαδικασιών, όπως η διγραμμική παρεμβολή στο διαθέσιμο DSM για τον προσδιορισμό του υψομέτρου, ο υπολογισμός του πίνακα στροφής, η αντίστροφη εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας, η υλοποίηση του αντίστροφου του αφινικού μετασχηματισμού και η συνάρτηση για τη ραδιομετρική παρεμβολή.

Η ορθοεικόνα που δημιουργήθηκε έχει διαστάσεις 557x598 και διάσταση εικονοστοιχείου στο έδαφος 3 mm, ενώ οι γεωδαιτικές συντεταγμένες της αναφέρονται σε τοπικό σύστημα. Τα στοιχεία αυτά αποθηκεύονται στο αρχείο της γεωαναφοράς, που συνοδεύει την ορθοεικόνα και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη διαδικασία παραγωγής της εικόνας SOM. Στην Εικόνα 6-1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η μια ορθοεικόνα που δημιουργήθηκε για τα δεδομένα της περιοχής I.

Στη συνέχεια έγινε η παραγωγή της εικόνας SOM, που αποτελεί βασική λειτουργία του αναπτυχθέντος λογισμικού. Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του λογισμικού, μέσω της εφαρμογής του κώδικα

σε πραγματικά δεδομένα, επιλέχθηκαν οι ορθοεικόνες, που παρήχθησαν στο προηγούμενο στάδιο. Στο αρχείο γεωαναφοράς της ορθοεικόνας είναι αποθηκευμένες πληροφορίες για το μέγεθος του εικονοστοιχείου της και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες της πάνω αριστερής γωνίας. Η εικόνα SOM συντάχθηκε από την ορθοεικόνα που είχε προκύψει από τη δεξιά εικόνα του αρχικού στερεοζεύγους.

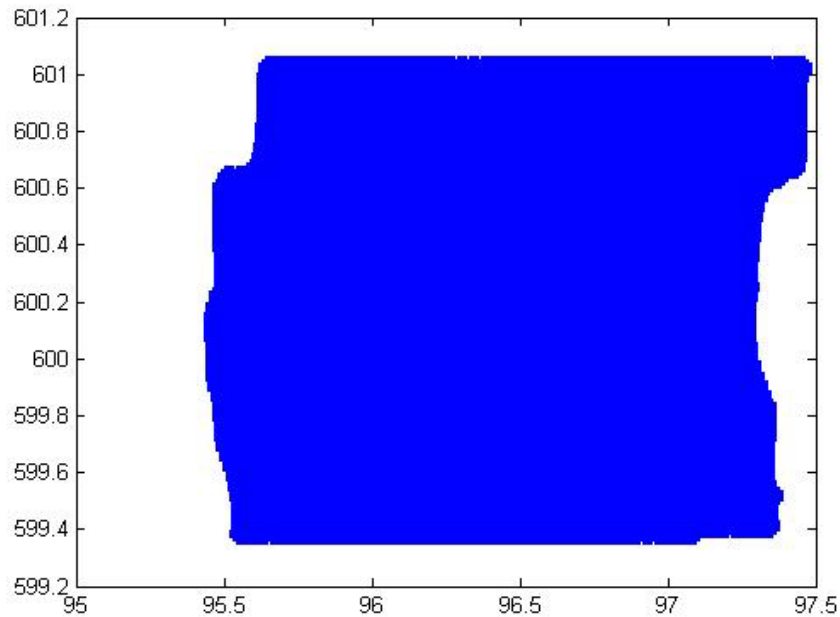


Εικόνα 6-1: Ορθοεικόνα τμήματος αναλημματικού τοίχου του Θεάτρου Δελφών (περιοχή Ι)

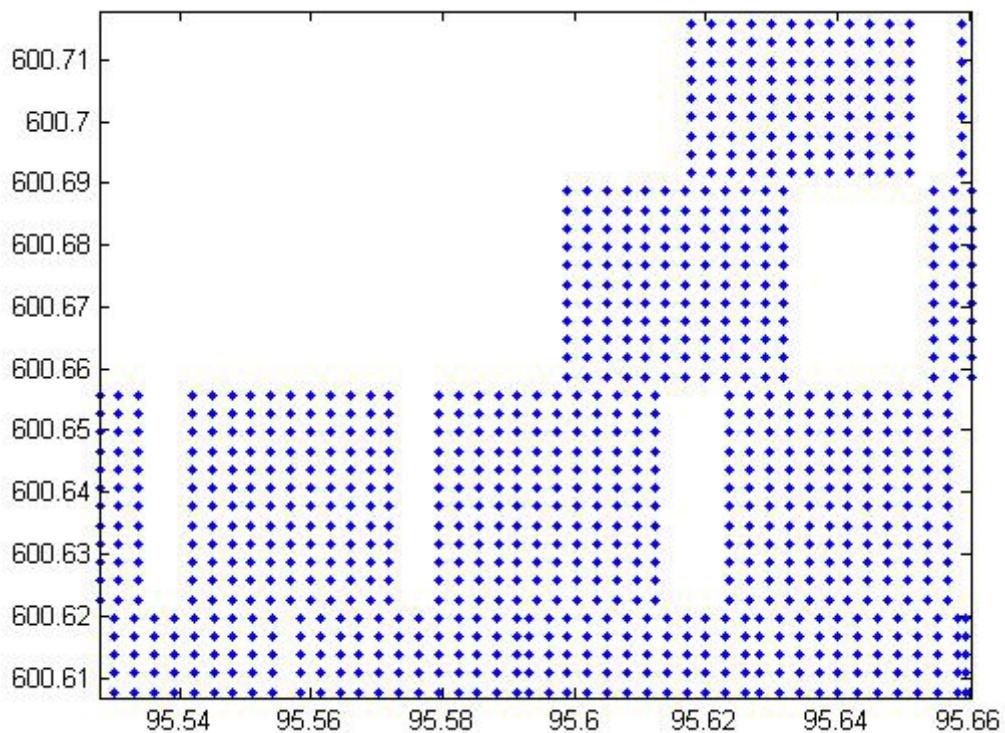
Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναπτύσσεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.2, υπολογίζονται τα διανύσματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων  $X (1 \times n)$  και  $Y (m \times 1)$  από τα στοιχεία της γεωαναφοράς για κάθε γραμμή και στήλη της ορθοεικόνας. Με παρεμβολή στο DSM υπολογίζονται τα υψόμετρα κάθε κελιού της ορθοεικόνας και καταχωρούνται σε ένα πίνακα επίσης διαστάσεων  $m \times n$ . Για την απόδοση υψομέτρου σε κάθε κελί της εικόνας χρησιμοποιείται η διγραμμική παρεμβολή, με βάρη τα αντίστροφα των τετραγώνων των αποστάσεων στα τεσσάρων κοντινότερα κελιά του DSM.

Με δεδομένα τον πίνακα των υψομέτρων, υπολογίζεται για κάθε κελί η τεχνητή  $x$ -παράλλαξη, με τη μέθοδο της Μη Παράλληλης Προβολής των οπτικών ακτίνων ως προς τον άξονα  $Z$ , σύμφωνα με τη σχέση 2.7. Οι τιμές της παράλλαξης αποθηκεύονται σε πίνακα διαστάσεων  $m \times n$  και υπολογίζονται ο μέσος όρος και η μέγιστη τιμή, που προκύπτουν 4.45 m και 4.54 m αντιστοίχως. Επιπλέον υπολογίζεται η σχετική  $x$ -παράλλαξη ( $\Delta P_x$ ), με τον μέσο όρο του  $\Delta P_x$  να είναι 2.5 mm.

Στο επόμενο στάδιο, υπολογίζονται οι νέες θέσεις, στις οποίες έχουν μετακινηθεί τα γεωδαιτικά  $X$  της ορθοεικόνας, λόγω της εισαγωγής της τεχνητής  $x$ -παράλλαξης, και κατ' επέκταση γίνεται ο προσδιορισμός των τετμημένων της εικόνας SOM, σύμφωνα με τη σχέση 3.1 Στην Εικόνα 6-2 φαίνεται η διάταξη και το εύρος των τιμών που καταλαμβάνουν οι γεωδαιτικές τετμημένες της εικόνας SOM, ενώ στην Εικόνα 6-3 απεικονίζεται λεπτομέρεια των παραπάνω σημείων. Λόγω της δεκαπλάσιας, περίπου, αναλογίας που έχουν τα κελιά της ορθοεικόνας έναντι του κανάβου του DSM παρατηρείται η ομαδοποίηση των σημείων σε ομάδες  $10 \times 10$ . Η ομαδοποίηση αυτή δεν ισχύει στην περίπτωση που τα κελιά αυτά αντιστοιχούν σε περιοχές έντονου αναγλύφου.

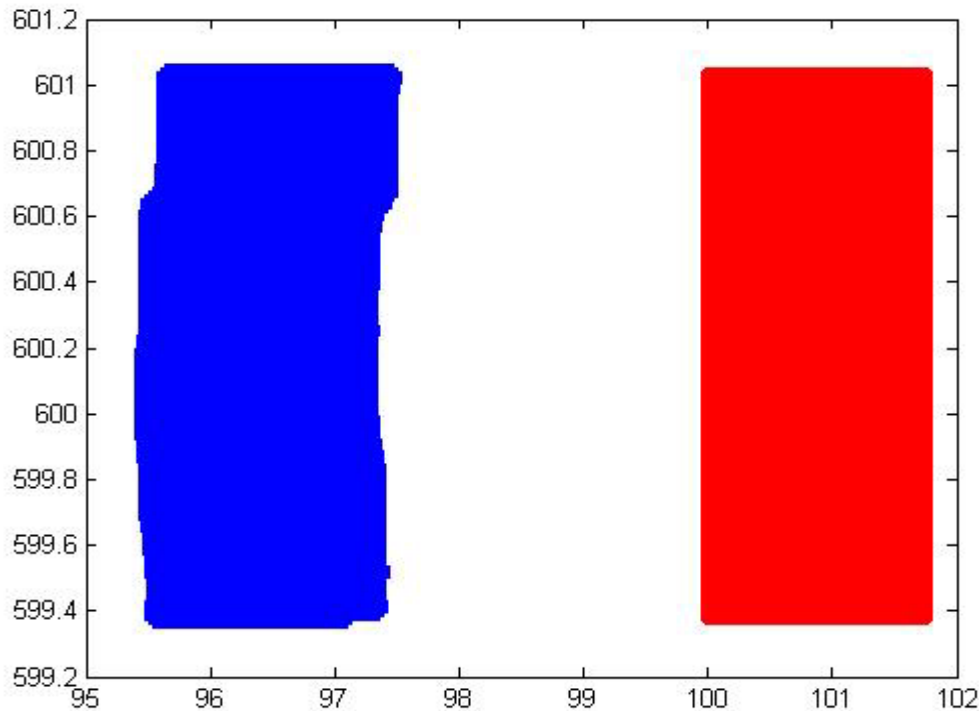


Εικόνα 6-2: Γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων της SOM



Εικόνα 6-3: Λεπτομέρεια του πίνακα γεωδαιτικών συντεταγμένων της SOM

Με βάση τις τιμές του μεγέθους της παράλλαξης, που αναφέρθηκαν παραπάνω, ακολουθεί σχηματική απεικόνιση (Εικόνα 6-4) της μετακίνησης των αρχικών θέσεων των εικονοστοιχείων της ορθοεικόνας στις νέες θέσεις. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι θέσεις στην ορθοεικόνα και με μπλε χρώμα οι νέες θέσεις.



Εικόνα 6-4: Θέσεις εικονοστοιχείων της ορθοεικόνας (με κόκκινο) και των αντίστοιχων της SOM (με μπλε)

Για τον προσδιορισμό των τόνων που θα έχει κάθε κελί της εικόνας SOM ακολουθείται διαδικασία επανασύστασης, όπως περιγράφεται παρακάτω. Με την εισαγωγή (*imread*) της ορθοεικόνας στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab, δημιουργείται ένας πίνακας διαστάσεων  $m \times n \times 3$ , όπου αποθηκεύονται οι τόνοι για κάθε χρώμα.

Οι τόνοι της ορθοεικόνας μεταφέρονται στις νέες θέσεις που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, και καταλαμβάνουν χώρο ίσο με το μέγεθος του εικονοστοιχείου της ορθοεικόνας. Απώτερος στόχος, της διαδικασίας για τη δημιουργία στερεοζεύγους ορθοεικόνων, είναι η επίτευξη στερεοσκοπικής παρατήρησης, επομένως ο σχηματισμός της εικόνας SOM διέπεται από προϋποθέσεις. Βασικός περιορισμός είναι το μέγεθος του εικονοστοιχείου της νέας εικόνας να είναι ίσο με αυτό της ορθοεικόνας (Baltsavias, 1996)..

Στην συνέχεια ακολουθεί ο προσδιορισμός της περιοχής όπου θα υπάρξει στερεοσκοπική παρατήρηση. Η περιοχή αυτή υπολογίσθηκε με δύο τρόπους:

- Στον πρώτο τρόπο, ο οποίος τελικώς δεν επιλέχθηκε, υπολογίζεται για κάθε γραμμή η ελάχιστη τιμή των τετμημένων των σημείων μετά την εισαγωγή της  $x$ -παράλλαξης, και από το σύνολο αυτών των ελαχίστων τιμών, για όλες τις γραμμές του πίνακα των τετμημένων της SOM, επιλέγεται η μέγιστη τιμή. Με το ίδιο σκεπτικό υπολογίζεται η μέγιστη τιμή για κάθε γραμμή και επιλέγεται αντίστοιχα η ελάχιστη τιμή αυτών. Τα δύο αυτά σημεία (το μέγιστο των ελαχίστων των τετμημένων της εικόνας SOM και το ελάχιστο των μεγίστων) καθορίζουν την περιοχή όπου θα γίνει η επανασύσταση της εικόνας SOM. Τα σημεία που έχουν μικρότερη τετμημένη από το πρώτο σημείο ( $X < X_{\min}$ ) και μεγαλύτερη τετμημένη από το δεύτερο σημείο ( $X > X_{\max}$ ) δεν επηρεάζουν τον προσδιορισμό των τόνων και κατ' επέκταση τα κελιά των συγκεκριμένων περιοχών αποκτούν τιμή τόνου μηδέν και απεικονίζονται στην επανασυσταθείσα εικόνα SOM με μαύρο χρώμα. Η επανασύσταση ξεκινά από το κελί με  $X$  ίσο με του πρώτου σημείου και, με βήμα ίσο με το μέγεθος του κελιού της ορθοεικόνας, καταλήγει στο κελί με  $X$  ίσο με του δεύτερου σημείου, αποδίδοντας τόνους.

- Ο δεύτερος τρόπος, που αποτελεί τη διαδικασία που τελικά επιλέχθηκε, είναι η επανασύσταση της εικόνας SOM για όλο το εύρος των τιμών των τετμημένων των νέων σημείων (μετά την εισαγωγή της τεχνητής x-παράλλαξης). Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση και σε περιοχές, οι οποίες είχαν αφαιρεθεί από το πεδίο στερεοσκοπικής παρατήρησης με τον πρώτο τρόπο.

Η απόδοση των τόνων γίνεται με βάση τους κανόνες, που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3. Κατά τη διαδικασία της επανασύστασης εκτιμάται, ανά γραμμή, το πλήθος των γειτονικών κελιών με μαύρο τόνο και στην περίπτωση όπου είναι ένα ή δύο, αυτά παίρνουν τον τόνο του πλησιέστερου εικονοστοιχείου της εικόνας SOM, που έχει προκύψει από το προηγούμενο βήμα (πρώτη προσέγγιση της επανασύστασης). Όταν, ανά γραμμή, τα γειτονικά εικονοστοιχεία χωρίς τόνο είναι παραπάνω από δύο, αυτά παίρνουν γκρι τόνο, με στόχο το βέλτιστο οπτικό αποτέλεσμα κατά τη διαδικασία της στερεοσκοπικής παρατήρησης.

Η βασική συνάρτηση για τη δημιουργία της εικόνας SOM είναι η *"create\_mate\_cp.m"*, η οποία καλεί τις επιμέρους συναρτήσεις που περιγράφονται, αναλυτικά, στο κεφάλαιο 5.1.

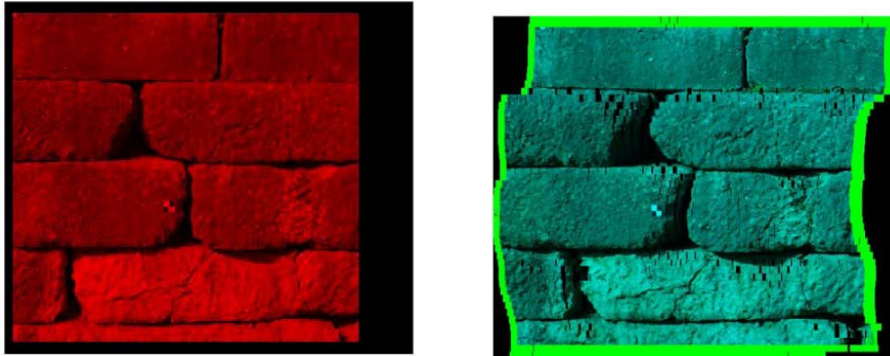
Στην Εικόνα 6-5 φαίνεται το αποτέλεσμα της δημιουργίας της SOM, από τη δεξιά ορθοεικόνα.



Εικόνα 6-5: Η εικόνα SOM της περιοχής I

Το επόμενο στάδιο της διαδικασίας του λογισμικού είναι η σύνθεση της εικόνας αναγλύφου, διαστάσεων  $m \times n \times 3$ . Προκύπτει μηδενίζοντας τις τιμές των τόνων του πράσινου και του μπλε της ορθοεικόνας, και μηδενίζοντας τις τιμές των τόνων του κόκκινου χρώματος της εικόνας SOM. Η αλγεβρική πρόσθεση των δύο εικόνων αποτελεί την εικόνα αναγλύφου, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6-7. Κατά την αλγεβρική πρόσθεση των παραπάνω εικόνων μπορεί να παρουσιαστούν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι, η παραγόμενη εικόνα SOM να είναι μεγαλύτερη κατά τη διάσταση των στηλών από την ορθοεικόνα, ενώ η δεύτερη περίπτωση να είναι μικρότερη. Οι παραπάνω δύο περιπτώσεις εμφανίζονται λόγω του ότι η SOM προκύπτει από την εισαγωγή της τεχνητής x-παράλλαξης, η οποία είναι μέγεθος που εξαρτάται από το ανάγλυφο του αντικειμένου. Για την εκτέλεση της αλγεβρικής πρόσθεσης των δύο εικόνων, είναι απαραίτητο να έχουν το ίδιο πλήθος γραμμών και στηλών. Επομένως, είναι αναγκαία η δημιουργία μιας κενής ενδιάμεσης εικόνας, μεγέθους ίσου με της μεγαλύτερης των δύο εικόνων (ορθοεικόνα και SOM), στην οποία ενσωματώνεται η μικρότερη από τις δύο. Στην πρώτη περίπτωση, η ορθοεικόνα ενσωματώνεται στην κενή ενδιάμεση εικόνα, με αποτέλεσμα να αποκτήσει διαστάσεις ίδιες με της SOM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-6.

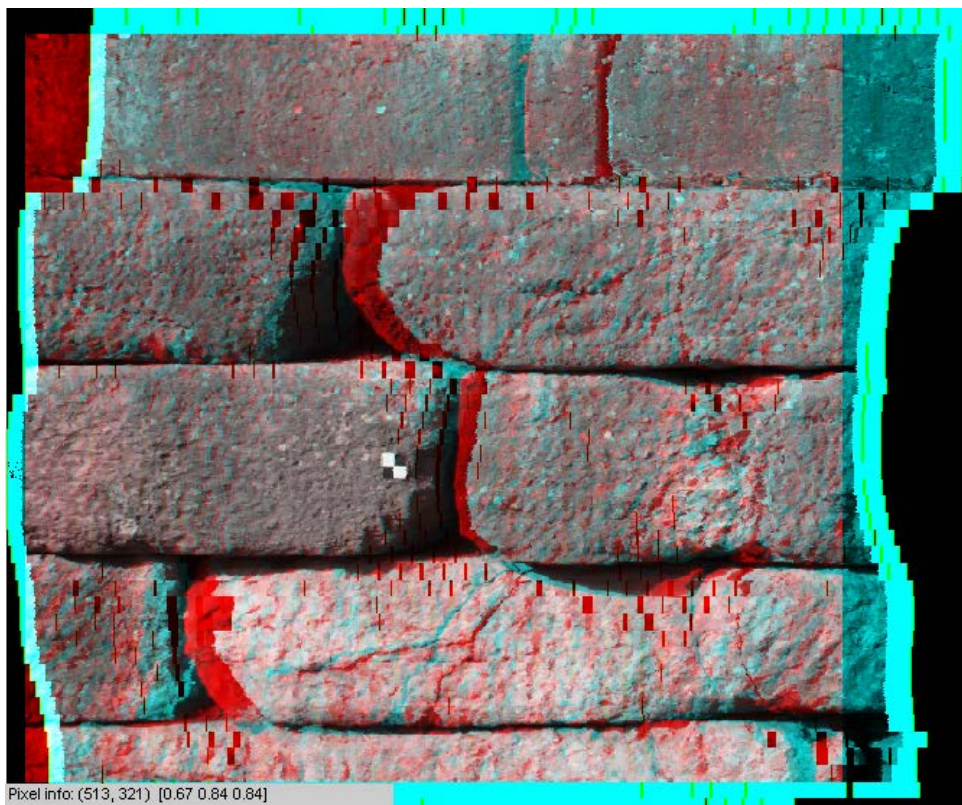




Εικόνα 6-6: Ορθοεικόνα και SOM ίδιων διαστάσεων

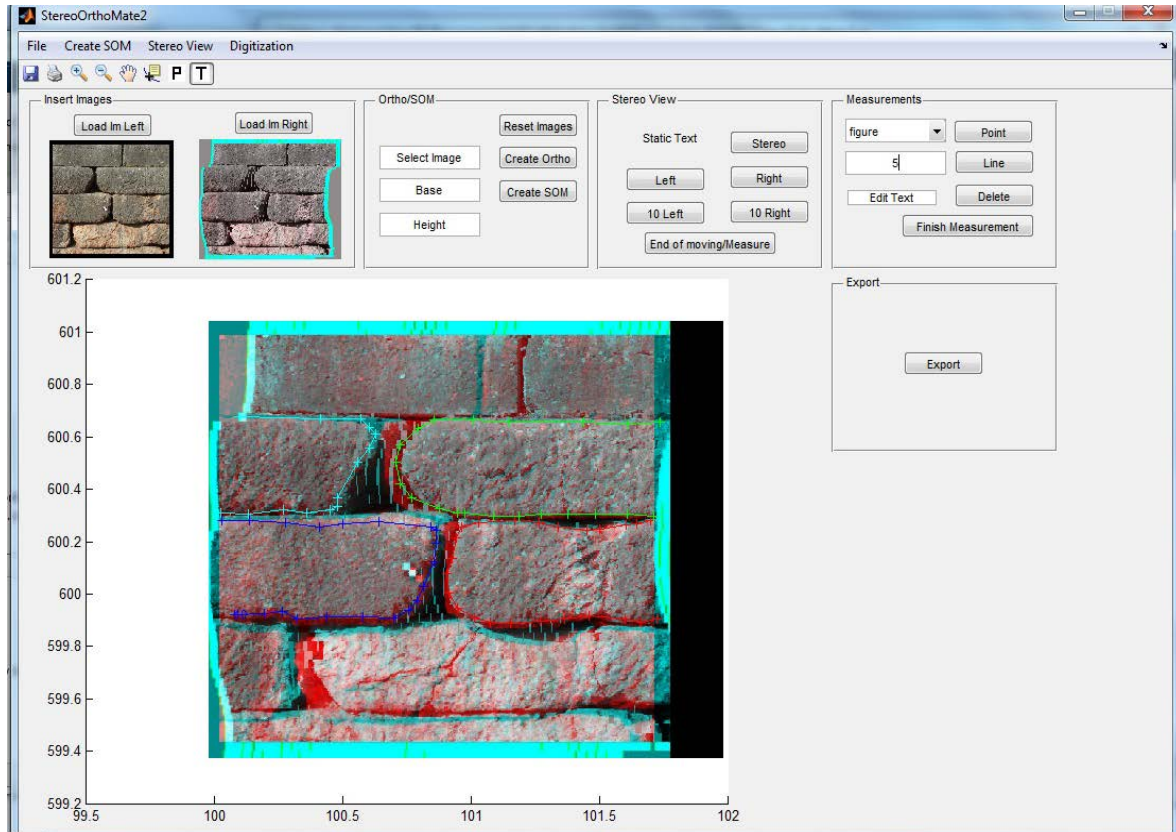
Ακολουθεί η Εικόνα 6-7, που αποτελεί την εικόνα αναγλύφου όπως προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία. Γίνεται αντιληπτό ότι, σε αυτή την εικόνα, είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση, με γυαλιά φίλτρων κόκκινου-κυανού. Η ακριβής μέτρηση και ψηφιοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της περιοχής, που απεικονίζονται στο στερεοζεύγος ορθοεικόνων, πραγματοποιείται με το λογισμικό OSP, σε επόμενο στάδιο. Η διαδικασία της ψηφιοποίησης, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.2, είναι απλή και εύχρηστη. Χρησιμοποιώντας πλήκτρα, που εκτελούν συγκεκριμένες εντολές, παρέχεται η δυνατότητα για:

- σχεδίαση γραμμών και ψηφιοποίηση σημείων
- μεγέθυνση και σμίκρυνση του περιεχομένου του παραθύρου σχεδίασης (zoom in, zoom out, zoom extent)
- αναίρεση μέτρησης (undo).



Εικόνα 6-7: Εικόνα αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου (περιοχή I)

Στην Εικόνα 6-8 φαίνεται το περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη SOP, έχοντας αποδώσει τα περιγράμματα των λίθων. Η κάθε γραμμή που αποδίδεται έχει διαφορετικό κωδικό και διαφορετικό χρώμα από τις υπόλοιπες. Μετά την ολοκλήρωση της ψηφιοποίησης παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής των διανυσματικών στοιχείων που αποδόθηκαν, σε format .shp.



Εικόνα 6-8: Διαδικασία ψηφιοποίησης στο περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη SOP (περιοχή I)

## 6.2 Περιοχή II

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εφαρμογή και λειτουργία του αναπτυχθέντος λογισμικού στην περιοχή II. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, δύο είναι οι βασικές διαφορές αυτού του ελέγχου από τον αντίστοιχο στην περιοχή I:

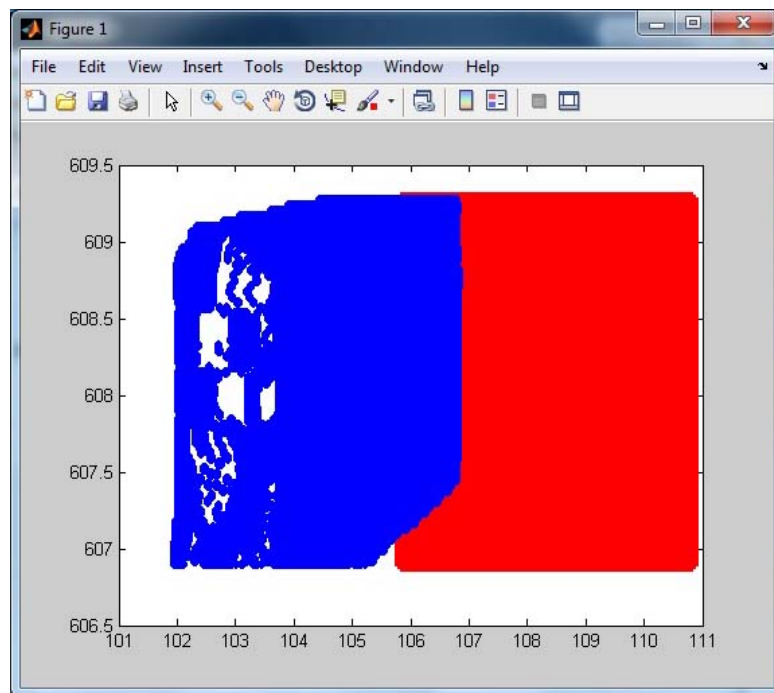
- για την περιοχή II διατίθεται μόνον μία (αρχική) εικόνα
- τα στοιχεία (λίθοι) που απαρτίζουν την περιοχή II σχηματίζουν μεγάλο ανάγλυφο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-9, το αντικείμενο απαρτίζεται από δύο βασικά επίπεδα, που απέχουν μεταξύ τους περίπου 1.5 m, και ορισμένους ενδιάμεσους λίθους στα άκρα αυτών των επιπέδων.

Στην Εικόνα 6-9 παρουσιάζεται η ορθοεικόνα, που δημιουργήθηκε από το λογισμικό OSP, έχοντας στα δεδομένα ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) με βήμα 3.5 cm (που έχει προκύψει από στερεοαπόδοση στερεοζεύγους αρχικών εικόνων σε Ψηφιακό Φωτογραμμετρικό Σταθμό). Η ορθοεικόνα έχει διαστάσεις 481×1002×3, ενώ το μέγεθος του εικονοστοιχείου της στο έδαφος αντιστοιχεί σε 5 mm.



Εικόνα 6-9: Ορθοεικόνα τμήματος του αναλημματικού τοίχου του Θεάτρου Δελφών (περιοχή II)

Στο στάδιο υπολογισμού της τεχνητής x-παράλλαξης έγιναν διάφορες δοκιμές για την επιλογή του λόγου βάσης προς απόσταση λήψης, με στόχο τις μικρότερες αποκρύψεις και την βέλτιστη στερεοσκοπική παρατήρηση. Τελικώς επιλέχθηκε βάση ίση με 1.5 m και απόσταση λήψης 5 m. Στην Εικόνα 6-10 φαίνεται η μετακίνηση των αρχικών θέσεων των εικοστοιχείων της ορθοεικόνας (κόκκινο χρώμα) στις νέες θέσεις (μπλε χρώμα) λόγω της τεχνητής x-παράλλαξης.



Εικόνα 6-10: Αρχικές και μετακινημένες θέσεις εικοστοιχείων της ορθοεικόνας (περιοχή II)

Στην Εικόνα 6-11 φαίνεται η παραχθείσα εικόνα SOM. Παρατηρείται το φαινόμενο της απόκρυψης τμήματος του πίσω επιπέδου του αντικειμένου, λόγω της μετακίνησης προς τα αριστερά των εικονοστοιχείων του αντικειμένου που βρίσκεται στο μπροστά επίπεδο. Επιπλέον στην εικόνα υπάρχουν εικονοστοιχεία με μαύρο χρώμα, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν υπήρχε ραδιομετρική

και υψομετρική πληροφορία στα σημεία αυτά. Επισημαίνεται ότι για μεγαλύτερο λόγο Β/Η αυξάνονταν οι αποκρύψεις και τα εικονοστοιχεία χωρίς πληροφορία (μαύρο χρώμα).



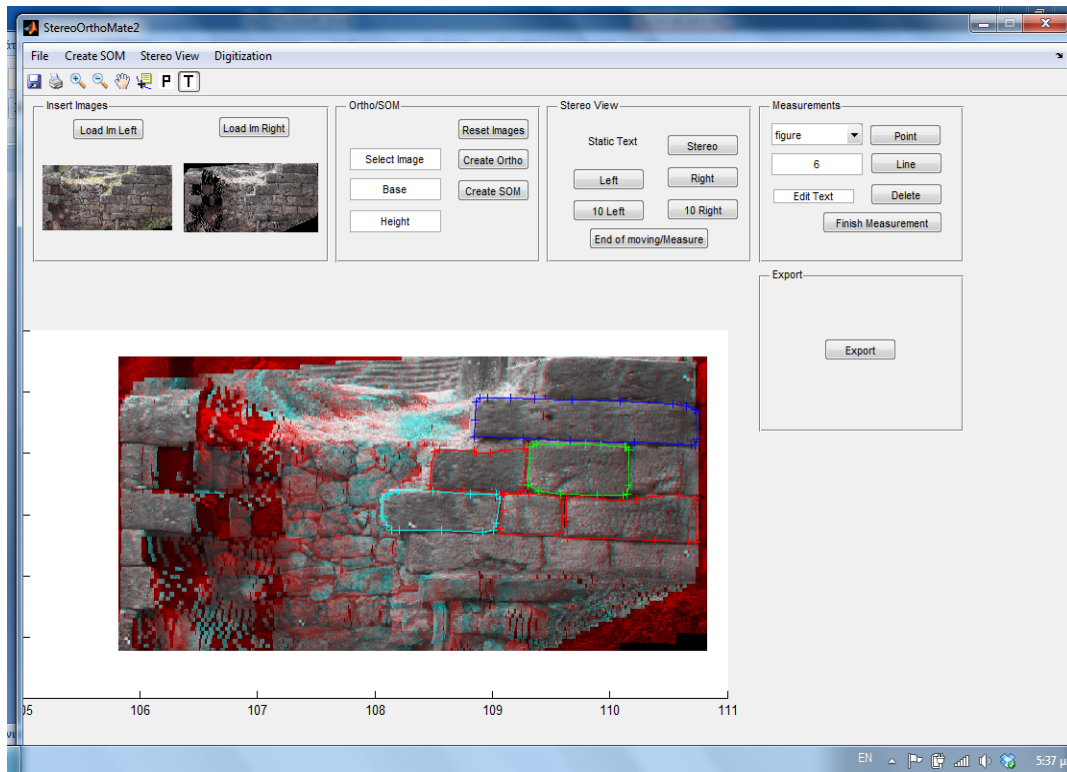
Εικόνα 6-11: Εικόνα SOM της περιοχής II

Στην Εικόνα 6-12 φαίνεται η εικόνα αναγλύφου για την περιοχή II, στην οποία εμφανίζεται με εντυπωσιακό τρόπο η επίπτωση της εισαγωγής της τεχνητής x-παράλλαξης.



Εικόνα 6-12: Εικόνα αναγλύφου τμήματος του αναλημματικού τοίχου (περιοχή II)

Στην Εικόνα 6-13 απεικονίζεται το στάδιο της ψηφιοποίησης των λίθων, μέσα από τα εργαλεία της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη OSP.



Εικόνα 6-13: Διαδικασία ψηφιοποίησης στο περιβάλλον της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη OSP για την περιοχή II

Τέλος, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης του περιγράμματος των λίθων, στο στερεοζεύγος ορθοεικόνων της περιοχής II, στο περιβάλλον OSP με:

- την στερεο-απόδοση των ίδιων λίθων στο φωτογραμμετρικό σταθμό SSK Intergraph από στερεοζεύγος εικόνων, η μια εκ των οποίων είναι αυτή που αποτέλεσε την αρχική εικόνα για τη λειτουργία του OSP
- το προϊόν της μονοσκοπικής ψηφιοποίησης των λίθων στην ορθοεικόνα, σε περιβάλλον CAD. Η ορθοεικόνα που χρησιμοποιήθηκε είχε προέλθει από την αντίστοιχη λειτουργία του OSP.

Στις Εικόνα 6-14 και Εικόνα 6-15 φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των τριών προϊόντων ψηφιοποίησης. Θεωρώντας ως δεδομένα αναφοράς (σωστή γεωμετρική τεκμηρίωση των λίθων) τα προϊόντα της στερεο-απόδοσης στο SSK (από το στερεομοντέλο των αρχικών εικόνων), είναι προφανές ότι η ψηφιοποίηση στο περιβάλλον OSP δίνει ακριβέστερα και πιο λεπτομερή προϊόντα από την απλή ψηφιοποίηση στην ορθοεικόνα.

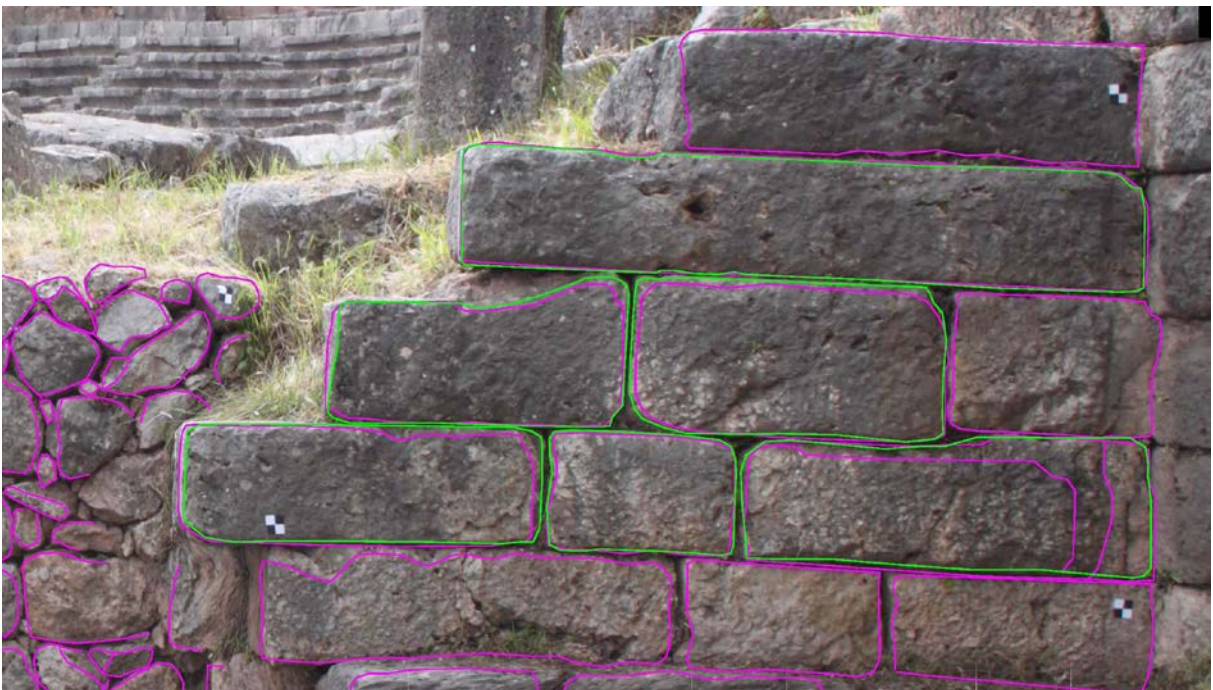
Οι διαφορές των αποδόσεων στο SSK και στο περιβάλλον OSP είναι της τάξης των 1.5 cm, δηλαδή εντός των ορίων της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί με τα υπάρχοντα δεδομένα (κλίμακα αρχικών εικόνων, κ.α.) Συνεπώς, το αποτέλεσμα από τη χρήση του OSP κρίνεται απολύτως ικανοποιητικό, καθώς:

- παρέχει προϊόντα ψηφιοποίησης αποδεκτής ακρίβειας, και
- δίνει τη δυνατότητα απόδοσης λεπτομερειών του αντικειμένου αντίστοιχων της στερεο-απόδοσης από τις αρχικές εικόνες,

και όλα αυτά, χωρίς την ανάγκη φωτογραμμετρικού εξοπλισμού ή την εκτέλεση λειτουργιών που απαιτούν φωτογραμμετρικές γνώσεις, και με αποτελέσματα (διαγράμματα) στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων που αναφέρονται τα δεδομένα του χρήστη.



Εικόνα 6-14: Σύγκριση απόδοσης γεωμετρικών στοιχείων για την περιοχή II



Εικόνα 6-15: Σύγκριση απόδοσης γεωμετρικών στοιχείων για την περιοχή II στο SSK και στην αρχική Ορθοεικόνα

Με μωβ χρώμα περιγράφονται οι πέτρες που αποδόθηκαν με τη κλασική διαδικασία της στερεο-απόδοσης στο φωτογραμμετρικό σταθμό SSK Intergraph, με μπλε χρώμα οι πέτρες που ψηφιοποιήθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού OSP και με πράσινο χρώμα οι πέτρες που προέκυψαν από τη μονοσκοπική ψηφιοποίηση στην ορθοεικόνα.

## 7 Συμπεράσματα

---

### 7.1 Γενικά συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εισαγωγή της τεχνικής της στερεο-ορθοεικόνας στην απόδοση και ψηφιοποίηση πολύπλοκων επιφανειών μνημείων, για τη γεωμετρική τεκμηρίωση αντικειμένων σε μεγάλη κλίμακα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων από τη διενεργηθείσα έρευνα και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η χρήση της τεχνικής της στερεο-ορθοεικόνας προτείνεται ως μία πολύ ελκυστική λύση για Αρχιτέκτονες και Αρχαιολόγους, που δεν διαθέτουν εξειδικευμένες γνώσεις Φωτογραμμετρίας, δίνοντας τη δυνατότητα 3D παρατήρησης του αντικειμένου μελέτης τους, με αποτέλεσμα την καλύτερη ερμηνεία των στοιχείων του και την ακριβέστερη ψηφιοποίηση ακμών, φθορών κ.α. Η δισδιάστατη εικονιστική απεικόνιση, για παράδειγμα η ορθοεικόνα, που αποτελεί το σύνθηδες υπόβαθρο ψηφιοποίησης για τους αρχιτέκτονες και αρχαιολόγους δεν είναι ικανοποιητική σε περιπτώσεις που ενδιαφέρονται είτε να ερμηνεύσουν (εντοπισμός ακμών), είτε να ψηφιοποιήσουν αντικείμενα με πολύπλοκο ανάγλυφο, ιδιαίτερες λεπτομέρειες και φθορές. Με τη δυνατότητα της 3D παρατήρησης, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξειδικευμένου ή ακριβού εξοπλισμού, και ταυτόχρονα της ψηφιοποίησης στο σύστημα συντεταγμένων που ενδιαφέρει τον χρήστη (το σύστημα της ορθοεικόνας), διευκολύνεται σημαντικά η εργασία του και βελτιώνεται η αξιοπιστία των προϊόντων (διανυσματικού σχεδίου), καθώς μπορεί να γίνει με ακρίβεια η ερμηνεία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (ακμών κ.α.) και των λεπτομερειών που περιέχονται σε αντικείμενα μελέτης όπως τα μνημεία. Έτσι, η δημιουργία του τρισδιάστατου εικονιστικού μοντέλου των αντικειμένων μπορεί να αποτελέσει το πλέον κατάλληλο εργαλείο για την μελέτη τους.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, στην παρούσα εργασία, δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ορθοεικόνας, έχοντας ως αρχικά δεδομένα τις εικόνες του στερεοζεύγους, τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού τους και ένα Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας 'βοηθητικής εικόνας', της SOM, η οποία θα αποτελέσει τη μία εκ των δύο του στερεοζεύγους των ορθοεικόνων. Για την παραγωγή της εικόνας SOM, εισάγεται, σε κάθε εικονοστοιχείο της ορθοεικόνας, μια τεχνητή x-παράλλαξη, το μέγεθος της οποίας υπολογίζεται με τη Μη Παράλληλη Μέθοδο Προβολής, που αποτελεί την ακριβέστερη προσέγγιση. Στη συνέχεια, γίνεται εισαγωγή της x-παράλλαξη στα στοιχεία της ορθοεικόνας και ακολουθεί επανασύσταση της προκύπτουσας εικόνας, ώστε να σχηματισθεί η SOM. Το στερεοζεύγος ορθοεικόνων προκύπτει από την πρόσθεση δύο πινάκων (διαστάσεων  $m \cdot n \cdot 3$ ), της αριστερής εικόνας (που είναι η ορθοεικόνα) και περιλαμβάνει τόνους του κόκκινου και μηδενικές τιμές για τα υπόλοιπα χρώματα, και της δεξιάς εικόνας με μηδενικές τιμές τόνου για το κόκκινο και τόνους του πράσινου και του μπλε. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η δημιουργία της εικόνας αναγλύφου, που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κάνει τρισδιάστατη παρατήρηση και περιήγηση στο αντικείμενο, που καλείται να μελετήσει και ψηφιοποιήσει.

Στην έρευνα που διεξήχθη για την ανάπτυξη του αλγορίθμου σύνταξης της SOM, κατέστη δυνατή η μείωση του χρόνου εκτέλεσης σε επίπεδα που επιτρέπουν την εφαρμογή της τεχνικής σε πραγματικό χρόνο, και η παραμετροποίησή του ώστε να προκύψει οπτικό αποτέλεσμα για το στερεομοντέλο ανάλογο με τα αρχικά δεδομένα.

Η επόμενη ενότητα του αλγορίθμου, που αναπτύχθηκε, είναι η Γραφική Διεπαφή Χρήστη (OrthoStereoPair), στο περιβάλλον της οποίας προσαρμόστηκαν όλες οι επιμέρους συναρτήσεις, με στόχο η εκτέλεσή τους να είναι φιλική και εύκολη για τον χρήστη. Επιπλέον, με την εισαγωγή κατάλληλων συναρτήσεων, είναι εφικτή η ψηφιοποίηση σε τρισδιάστατο περιβάλλον των χαρακτηριστικών, που απεικονίζονται στο στερεοζεύγος ορθοεικόνων. Η ψηφιοποίηση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός δείκτη (cursor), λόγω των περιορισμών από τη γλώσσα προγραμματισμού (MatLab), με αποτέλεσμα την εξαγωγή δισδιάστατων γραμμών. Το γεγονός αυτό δεν αντιβαίνει στην υλοποίηση του στόχου της έρευνας ούτε επηρεάζει την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου, καθώς αυτό που ενδιαφέρει τον τελικό χρήστη δεν είναι η τρίτη διάσταση (η οποία είναι γνωστή από το υπάρχον DSM), αλλά η τρισδιάστατη παρατήρηση και η επακόλουθη σωστή ερμηνεία και ακριβέστερη ψηφιοποίηση των λεπτομερειών. Κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εξαλείψει την x-παράλλαξη, χρησιμοποιώντας buttons, τα οποία δίνονται στο γραφικό περιβάλλον διεπαφής, είτε πλήκτρα (τα βελάκια) του πληκτρολογίου. Έχει δυνατότητα ανάιρεσης κάποιας μέτρησης, αποθήκευσης και εξαγωγής σε μορφή dxf ή shp (για περιβάλλοντα CAD ή GIS).

Τα προϊόντα της (οριζοντιογραφική) απόδοση που πραγματοποιήθηκε, ως εφαρμογή της παρούσας εργασίας, με την τεχνική του στερεοζεύγους ορθοεικόνων, είναι απολύτως ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, από τους διενεργηθέντες ελέγχους, προέκυψε ότι τόσο η ακρίβεια όσο και η δυνατότητα απόδοσης λεπτομερειών που παρέχει το αναπτυχθέν λογισμικό είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα της κλασικής διαδικασίας στερεοαπόδοσης των (αρχικών) εικόνων σε Ψηφιακό Φωτογραμμετρικό Σταθμό, και σαφώς καλύτερα από τα αποτελέσματα μονοσκοπικής ψηφιοποίησης στην ορθοεικόνα.

Πρέπει να τονιστεί ότι η ποιότητα της εικόνας SOM, και εν τέλει η σωστή στερεοσκοπική παρατήρηση, εξαρτάται από την ποιότητα της ορθοεικόνας, από την οποία προκύπτει η SOM και από την πυκνότητα (και ακρίβεια) του DSM:

- Στην περίπτωση, όπου η ορθοεικόνα προέρχεται από τη μια (αρχική) εικόνα και το αντικείμενο έχει έντονο ανάγλυφο, ακόμη και αν διατίθεται πολύ πυκνό και αξιόπιστο DSM, η ορθοεικόνα θα έχει ατέλειες (διπλές απεικονίσεις, φλουταρισμένες περιοχές) που μεταφέρονται (και επιδεινώνονται λόγω 'νεκρών' περιοχών) στην εικόνα SOM.
- Αν το DSM δεν είναι αρκετά πυκνό, ώστε να αποδίδει γεωμετρικά σωστά τις ακμές του αντικειμένου, το αποτέλεσμα είναι λανθασμένος υπολογισμός του μεγέθους της τεχνητής x-παράλλαξης, άρα μειωμένης ποιότητας εικόνα SOM, και μάλιστα στις θέσεις (περιγράμματα ακμών) με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της μεθόδου της στερεο-ορθοεικόνας στις αρχαιολογικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Η επιλογή των κατάλληλων δεδομένων, έχει άμεσα αντίκτυπο στην ακρίβεια και στην πιστότητα των αποτελεσμάτων, πάντα, βεβαίως συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα του κόστους. Συνεπώς, για να υπάρχουν τα βέλτιστα αποτελέσματα, η παραγωγή της SOM πρέπει να γίνεται, με την προσθήκη τεχνητής παράλλαξης, σε 'αληθή' ορθοεικόνα (true orthoimage) και να είναι διαθέσιμο πυκνό DSM.

Ως παράπλευρη έρευνα στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκε η επίδραση πιθανού σφάλματος του (υπάρχοντος) DSM στο μέγεθος της τεχνητής παράλλαξης (σφάλμα παράλλαξης), η οποία εισάγεται στην αρχική ορθοεικόνα για τη σύνταξη της SOM. Στόχος είναι να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο είναι δυνατόν με την τρισδιάστατη μέτρηση σημείων στο στερεοζεύγος των ορθοεικόνων (στερεοσκοπική μέτρηση συντεταγμένων σημείων και εφαρμογή εμπροσθοτομίας) μπορούν να προσδιορισθούν υψόμετρα με καλύτερη ακρίβεια από αυτήν του υπάρχοντος DSM. Τα γενικά συμπεράσματα από τη διερεύνηση είναι ότι:

- **μεγαλύτερο** σφάλμα στο DSM έχει ως αποτέλεσμα **την αύξηση** του σφάλματος στην προσδιοριζόμενη τεχνητή παράλλαξη



- **αύξηση** της βάσης **B** των εικόνων, **αυξάνει** το μέγεθος του σφάλματος της παράλλαξης
- **αύξηση της απόστασης του σημείου λήψης των αρχικών εικόνων** από το αντικείμενο οδηγεί σε **μείωση** του σφάλματος της παράλλαξης.

## 7.2 Προτάσεις επέκτασης της έρευνας

Οι προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη του συστήματος που αναπτύχθηκε περιλαμβάνουν:

- Περαιτέρω βελτίωση του λογισμικού της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη και επαύξηση των λειτουργιών του, με στόχο να γίνει πιο λειτουργική και φιλική στον χρήστη.
- Προσθήκη παραθύρων μικρότερων διαστάσεων, που να καλύπτουν τοπικά την περιοχή ενδιαφέροντος, για πιο γρήγορη εκτέλεση του αλγορίθμου δημιουργίας των εικόνων αναγλύφου κάθε φορά που εξαλείφεται η παράλλαξη κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης. Ίδανικό θα ήταν η διάσταση του παραθύρου να ακολουθεί τις ανάγκες ψηφιοποίησης του εκάστοτε αντικειμένου, δηλαδή να δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίζει τις διαστάσεις του παραθύρου.
- Ανάπτυξη του λογισμικού της Γραφικής Διεπαφής Χρήστη σε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, όπως C++ ή Python, που παρέχουν τη δυνατότητα εμφάνισης διπλού δείκτη (cursors) στην διαδικασία της 3D ψηφιοποίησης.

Ακόμη, ουσιαστική μελλοντική επέκταση της εφαρμογής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αποτελεί η ενσωμάτωση της τεχνικής του στερεοζεύγους ορθοεικόνων σε συστήματα GIS ανοικτού κώδικα, μέσω ανάπτυξης κατάλληλου plug-in. Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα θα παρέχει στους χρήστες των συστημάτων GIS ανοικτού κώδικα, οι οποίοι είναι πολλοί και διαφορετικών ειδικοτήτων (αρχιτέκτονες, αρχαιολόγοι, γεωλόγοι, δασοπόνοι κ.α.), τη δυνατότητα να διενεργούν ακριβείς τρισδιάστατες μετρήσεις, σωστή φωτοερμηνεία και ενημέρωση υπαρχόντων δεδομένων.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο, πέραν αυτών που διενεργήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, να γίνει περαιτέρω έλεγχος και διερεύνηση των δυνατοτήτων, της λειτουργικότητας και της αποτελεσματικότητας του αναπτυχθέντος αλγορίθμου, σε ποικιλία περιπτώσεων αρχιτεκτονικών και αρχαιολογικών εφαρμογών, διαφορετικής ποιότητας και ακρίβειας αρχικά δεδομένα. Για παράδειγμα, παραγωγή εικόνας SOM, έχοντας σαν δεδομένα 'αληθή' ορθοεικόνα και πυκνό DSM, χρήση του συστήματος από αρχιτέκτονες και αρχαιολόγους, κ.α. Έτσι, τα συμπεράσματα για τις δυνατότητες και τη χρησιμότητα της αναπτυχθείσας τεχνικής, μπορούν να γίνουν πιο ασφαλή και αξιόπιστα.

# Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

## Στην ελληνική γλώσσα

- Ιωαννίδης, Χ., 2010. Φωτογραμμετρία II, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Σχολή Αγρ. Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Πέτσα, Ε., 2000. Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας
- Πέτσα, Ε., Γραμματικόπουλος, Λ., Καλησπεράκης, Η., Παγούνης, Β., Πανταζής, Δ., Καρράς, Γ., Λιαπάκης, Χ., Μπαλλής, Β., Μπίνας, Γ., 2007. *Ανάπτυξη αλγορίθμων για την αυτόματη παραγωγή φωτορρεαλιστικών μοντέλων ακριβείας με συνδυασμό τεχνικών φωτογραμμετρίας, επεξεργασίας εικόνας και laser scanning – Εφαρμογή σε θέματα Πολιτιστικής Κληρονομιάς*. Τελική Τεχνική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος ΕΠΕΑΕΚ 'Αρχιμήδης II'-Μέτρο 2.2, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΤ Αθηνών, 51 σελ.
- Πατιάς, Π., 1994. Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία, Εκδόσεις Ζήση

## Ξενόγλωσσες

- Amhar, F., Jansa J., Ries C., 1998. The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 4, pp. 16-22.
- Baltsavias, E., 1993. Integration of Ortho-Images in GIS, *Published in: SPIE, Aerospace and Remote Sensing*, Orlando, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.7.2429&rep=rep1&type=pdf>
- Baltsavias, E., 1996. Digital Ortho-Images a powerful tool for the extraction of spatial-and geo-information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 51, pp. 63-67.
- Bektaş, K., Çöltekin, A., 2009. A Survey of Stereoscopic Visualization Support in Mainstream Geographic Information Systems. *Proceedings of True 3d in Cartography, 1st International Conference on 3D Maps*, Dresden, Germany.
- Blachut, T.J., 1971. *Mapping and Photointerpretation System Based on Stereo-Orthophotos*. Mitteilungen aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule ZÜRICH Herausgegeben von Prof. Dr. F. Kobold, ETH, Zurich, Switzerland..
- Blachut, T.J., 1976. Results of the International Orthophoto Experiment 1972-1976. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. XLII (12), pp. 1483-1498.
- Chang, H., Yu, K., Joo, H., Kim, Y., Kim, H., Choi, J., Han, D. Y., Eo, Y.D., 2008. Stereo-Mate Generation of High Resolution Satellite Imagery Using a Parallel Projection Model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol 34(2), pp. 57-67.
- Collins, S., 1972. The Stereorthophoto Pair. *Photogrammetric Engineering*, Vol. XXXVIII (12), pp. 1195-1202.
- Damen, M.C.J., Smit, G., Sicco, Verstacken, H.T., 1986. Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*, ISPRS Commission VII I, Enschede.

- Domik, G., Leberl, F., Cimino, J, 1986. Multiple Incidence Angle SIR-B Experiment Over Argentina: Generation of Secondary Image Products. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol GE-24, No 4.
- Hoffman G. R., 2004. Product generation using ADS-40 digital imagery. *Proceedings (CD) of the ASPRS Annual Conference*, Denver, Colorado.
- Jáuregui, M., Jáuregui, L., Chacón, L., Vilchez, J., 2004. Digital Stereo-Orthophotos of Archaeological Sites from Small Format Aerial Photographs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Commission V, WG VI/4, pp. 461-466.
- Kraus, K., Otepka, G., Lottsc, J. and Haitzmann, H., 1979. Digitally Controlled Production of Orthopotos and Stereo-Orthopotos. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 45 (10), pp. 1353-1362.
- Kraus, K., 1984. Photogrammetrie. Band2, F. Duemmlers Verlag, Bonn.
- Kuzmin, Y. P., Korytnik S. A., Long O., 2004. Polygon-based true orthophoto generation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Vol. 35, Part 3, pp. 529-531.
- Li, D., Wang, M., Gong, J., 2002. Principle of Seamless Stereo Orthoimage Database and its Measurement Accuracy. *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision PCV*, ISPRS Commission III, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3.
- Pyka, K., Słota, M., Twardowski, I.M., 2012. Usage of Stereo Orthoimage in GIS: Old Concept, Modern Solution. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B4, pp 379-383.
- Rau, J., Chen N., Chen L., 2002. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68(6), pp. 581-588.
- Rau, J. Y., Chen L. C., 2004. Geometrical building modeling and its application to the ortho-rectification for aerial images. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 9(1), pp. 53-76.
- Schuhr, W., Kanngieser, E., 2004. 3D Geo-Imagery Bridging Continents. *Proceedings of the ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,, Vol. XXXV, Part B5.
- Schuhr, W., Kanngieser, E., 2008. Recording, Documentation and Application of Stereo Views in Cultural Heritage. *Proceedings of the ISPRS Congress*, Beijing, China, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVII, Part B5, pp. 1029-1036.
- Sheng, Y., Gong P., Biging G.S., 2003. True orthoimage production for forested areas from large-scale aerial photographs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 69(3), pp. 259-266.
- Wang, M., 2004. A New Approach for Denerating a Measurable Seamless Stereo Model Based on Mosaic Orthoimage and Stereomate. *Proceedings of the ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B1.
- Zhou, G., Schickler W., Thorpe A., Song, P., Chen W., Song C., 2004. True orthoimage generation in urban areas with very tall buildings. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, pp. 5163–5180.

## Ιστοσελίδες

- <http://www.mathworks.com> "MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing," Ιούλιος 2013
- [http://www.lewysjones.com/blog/2013/01/23/how-to-create-view-3d-graphs-in-matlab-with-3d-glasses/?qoback=gde\\_37629\\_member\\_207516706](http://www.lewysjones.com/blog/2013/01/23/how-to-create-view-3d-graphs-in-matlab-with-3d-glasses/?qoback=gde_37629_member_207516706)

<http://www.mathworks.com/products/computer-vision/examples.html?file=%2Fproducts%2Fdemocs%2Fshipping%2Fvision%2Fvideostereo.html#1>

[http://photogram.tg.teiath.gr/?page\\_id=122](http://photogram.tg.teiath.gr/?page_id=122)

<http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/anaglyphs.pdf>

<http://anaglyph-3d.software.informer.com/>

[file:///C:/ERDAS/ERDAS%20Desktop%202011/help/html/ii\\_terrain/anaglyph.html#right\\_eye](file:///C:/ERDAS/ERDAS%20Desktop%202011/help/html/ii_terrain/anaglyph.html#right_eye)

<http://trioviz.com/en/>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph\\_3D](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaglyph_3D)

[http://www.stereoeye.jp/software/index\\_e.html](http://www.stereoeye.jp/software/index_e.html)

<http://www.qgis.org/>

<http://grass.osgeo.org/>

<http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r3.out.vtk.html>

<http://www.paraview.org/Wiki/ParaView>

[http://www.paraview.org/Wiki/ParaView/Users\\_Guide/Command\\_line\\_arguments](http://www.paraview.org/Wiki/ParaView/Users_Guide/Command_line_arguments)

[http://geospatial.intergraph.com/Libraries/White\\_Papers/Sensor\\_to\\_GIS\\_An\\_Example\\_Workflow.sflb.ashx](http://geospatial.intergraph.com/Libraries/White_Papers/Sensor_to_GIS_An_Example_Workflow.sflb.ashx)

<http://infiniti.com/2010/12/3d-visualisation-and-dem-creation-in-qgis-with-the-grass-plugin/>

[http://grasswiki.osgeo.org/wiki/Stereo\\_anaglyphs](http://grasswiki.osgeo.org/wiki/Stereo_anaglyphs)