

Σύγχρονες ψηφιακές τεχνικές τεκμηρίωσης στην επίγεια φωτογραμμετρία

ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ, Λ. ATM, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ, Εργαστηρ. Συνεργάτης ΤΕΙ-Α
ΚΑΛΗΣΠΕΡΑΚΗΣ, Η. ATM, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ, Εργαστηρ. Συνεργάτης ΤΕΙ-Α
ΚΑΡΡΑΣ, Γ. Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΑΤΜ ΕΜΠ
ΜΑΥΡΟΜΑΤΗ, Δ. ATM, Υποψήφια Διδάκτορας ΕΜΠ, Υπουργείο Πολιτισμού
ΠΕΤΣΑ, Ε. Καθηγήτρια Τμήματος Τοπογραφίας ΤΕΙ-Α

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σήμερα, ιδίως σε επίγειες εφαρμογές, μπορεί κανείς να παράγει εικονιστικά προϊόντα υψηλής γεωμετρικής και οπτικής ποιότητας, συνδυάζοντας νέα τεχνολογία και εμπορικά συστήματα με την ανάπτυξη ίδιου λογισμικού, και μάλιστα με χρήση κοινών μηχανών λήψης. Παρουσιάζονται εδώ πρόσφατες εργασίες, αρχικά με θέμα την ψηφιακή προβολή και οπτικοποίηση αναπτυσσόμενων επιφανειών. Ακόμα, περιγράφονται ορθοαναγωγές με ειδική στρατηγική συλλογής 3D μοντέλου για επιφάνειες με απότομες μεταβολές αναγλύφου. Τέλος, παρουσιάζεται μια γενικότερη τεχνική αυτόματης ορθοπροβολής μέσω πλήρως 3D μοντέλων από laser scanning, η οποία εξασφαλίζει έλεγχο των αποκρύψεων (“αληθής ορθοφωτογραφία”) όσο και παρεμβολή χρώματος από πολλές εικόνες.

ABSTRACT: Today, particularly in close-range projects, it is feasible to generate digital products of high geometric and visual quality, using ordinary amateur cameras, by combining modern technology and commercial systems with the development of own software. We present here recent projects, starting with the digital projection and visualisation of developable surfaces. Further, orthorectifications are described which are based on a special collection strategy for photogrammetric 3D modeling of surfaces with abrupt changes in relief. Finally, a more general technique for automatic orthoprojection based on fully 3D models generated with laser scanning is presented, which allows full control of occlusions (“true ortho”) and colour interpolation from multiple images.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μία από τις σημαντικές αλλαγές που επέφερε η εισαγωγή ψηφιακών τεχνικών στην φωτογραμμετρία είναι ότι σήμερα τα εικονιστικά προϊόντα (συνδυασμός γεωμετρικής ακρίβειας με οπτική πληροφορία) συνιστούν συχνά το τυπικό φωτογραμμετρικό παραδοτέο. Τούτο κυρίως αναφέρεται βέβαια σε ορθοφωτομωσαϊκά, αλλά αφορά και άλλες ψηφιακές προβολές ή 3D μοντέλα με ‘φωτοϋφή’. Γενικά, τα προϊόντα αυτά προϋποθέτουν βέβαια αξιόπιστη 3D πληροφορία για το ανάγλυφο της αποδιδόμενης επιφάνειας.

Συγκρινόμενη όμως με την αεροφωτογραμμετρία, η ορθοαναγωγή για σκοπούς αρχαιολογικής τεκμηρίωσης εμφανίζει σημαντικές ιδιαιτερότητες (Manromati et al., 2002 και 2003). Κατ’ αρχάς, οι μεγάλης κλίμακας εικόνες αρχαιολογικών χώρων πρέπει γενικά να ληφθούν από αέρα (ανασκαφές, αρχαία θέατρα) ή οριζόντια από κάποιο ύψος (κάστρα, πύργοι), πράγμα που θέτει πρόβλημα σχεδιασμού και εκτέλεσης των λήψεων. Ανάλογα με την τοποθεσία (περιοχές

πυκνοδομημένες είτε προσβάσιμες μόνο πεζή) και συχνά υπό ασφυκτικούς οικονομικούς περιορισμούς, καλείται λοιπόν κανείς να επινοεί ευέλικτες και φθηνές πλατφόρμες μηχανής. Αλλά, ακόμα και αν η μηχανή έχει συνδεθεί με οθόνη, τέτοιες εγγενώς ‘ασταθείς’ πλατφόρμες δεν επιτρέπουν πλήρη έλεγχο των στροφών, με σύνηθες αποτέλεσμα μπλοκ εικόνων πολύ ακανόνιστης γεωμετρίας. Ανάλογα ισχύουν για την διακύμανση στην απόσταση λήψης και τις προκύπτουσες διακυμάνσεις κλίμακας, που φυσικά επιτείνονται από το συχνότατο έντονο ανάγλυφο της επιφάνειας (το οποίο έτσι κι αλλιώς προξενεί έντονες διαφορές προοπτικής μεταξύ γειτονικών εικόνων). Πρέπει ακόμα να συνυπολογιστεί η ιδιομορφία ότι – ακριβώς λόγω συνεχών απότομων μεταβολών του αναγλύφου στις αρχαιολογικές εφαρμογές και της ανάγκης να αποφευχθούν ‘νεκρές’ περιοχές – συχνά πρέπει οι λήψεις να γίνουν πολύ πυκνά, λόγος για τον οποίο περιπλέκεται ακόμα περισσότερο η γεωμετρία του μπλοκ των εικόνων.

Μιά άλλη ιδιαιτερότητα αφορά την χρήση α-

πλών, χαμηλού κόστους μη μετρικών μηχανών (μικρού ή μεσαίου φορμάτ), αφού μόνο τέτοιες μηχανές σηκώνουν οι απλές πλατφόρμες. Έτσι η άγνωστη γεωμετρία μηχανής και η έντονη ακτινική διαστροφή (κυρίως των ευρυγώνιων φακών) έρχονται να προστεθούν στις τυπικές δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο φωτοτριγωνισμός στις αρχαιολογικές εφαρμογές. Υπ' αυτή την έννοια πρόκειται τελικά για ένα πρόβλημα που τίθεται στην γενικότερη, ίσως, μορφή του.

Και βέβαια υπάρχει ακόμα το ζήτημα της 3D περιγραφής της επιφάνειας του αντικειμένου, αναγκαίος όρος για προϊόντα υψηλής γεωμετρικής και οπτικής ποιότητας – ένα πρόβλημα που στην αεροφωτογραμμετρία συνήθως υποδηλώνεται με την πλεοναστική έκφραση 'αληθής ορθοφωτογραφία'. Αυτό είναι ακόμα σημαντικότερο εδώ, καθώς το σχήμα ειδικά των αρχαιολογικών αντικειμένων συνήθως είναι σύνθετο, διακρινόμενο από ακανόνιστες μεταβολές στο ανάγλυφο, εσοχές, προεξοχές και συνεχείς ασυνέχειες, εν μέρει οφειλόμενες σε καταστροφές και φθορές. Μεταξύ άλλων, αυτό σημαίνει ότι κατά κανόνα πρέπει να περιγραφούν και τμήματα επιφάνειας κάθετα μεταξύ τους. Ο τριγωνισμός της επιφάνειας συνιστά υπ' αυτές τις συνθήκες ζήτημα ιδιαίτερα κρίσιμο.

Όμως τα συμβατικά λογισμικά ορθοαναγωγής και οι ψηφιακοί φωτογραμμετρικοί σταθμοί δεν είναι σε θέση να χειρίζονται πλήρως ούτε μοντέλα 2.5D, καθώς δεν αναγνωρίζουν τις λόγω προοπτικών παραμορφώσεων αποκρύψεις περιοχών του αντικειμένου στις εικόνες ('νεκρές περιοχές'). Και βέβαια δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν ένα πλήρως 3D μοντέλο επιφάνειας. Αυτό ίσως δεν συνιστά πρόβλημα σε περιπτώσεις αεροφωτογραμμετρίας, αφού για την περιγραφή πχ. αστικών περιοχών επαρκούν, με λίγες εξαιρέσεις (ανισόπεδοι κόμβοι, γέφυρες), τα 2.5D μοντέλα. Σε επίγειες όμως εφαρμογές τα πλήρως 3D μοντέλα είναι πια συχνά αναγκαία αλλά και διαθέσιμα (από laser scanning).

Όντως η τεχνολογία επίγειου laser scanning επιτρέπει ταχεία συλλογή μεγάλου αριθμού σημείων μίας επιφάνειας. Ανεξάρτητα λοιπόν από το κόστος και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει κανείς όταν επεξεργάζεται νέφη σημείων, σε πλείστες περιπτώσεις – αλλι' όχι σε όλες, αφού θέση, διάταξη και μορφολογία του αντικειμένου δεν επιτρέπουν πάντα πρόσβαση στον σαρωτή – η φωτογραμμετρία καλείται να αξιοποιήσει αυτά τα 3D μοντέλα, μεταξύ άλλων και ως υπόβαθρο για παραγωγή ψηφιακών προβολών.

Σε μία τέτοια περίπτωση ανακύπτουν δύο επιπλέον ερωτήματα. Πρώτον, εκείνο του χειρισμού 3D μοντέλων στο περιβάλλον λογισμικού

που επιτρέπει μόνο 2D τριγωνισμό επιφάνειας. Και δεύτερον, ότι εδώ (πέραν των αποκρύψεων στις εικόνες) πρέπει να λάβει κανείς υπόψη και πιθανές αποκρύψεις περιοχών του ίδιου του αντικειμένου στην διεύθυνση της προβολής ('αυτοαπόκρυψη'), γεγονός που καθιστά την διαδικασία ακόμα πιο σύνθετη.

Εδώ συνοψίζονται οι εργασίες των συγγραφέων, δημοσιευμένες την τελευταία 5ετία, που ασχολούνται με όλα τα ζητήματα που προαναφέρθηκαν. Παρουσιάζονται τόσο οι λύσεις που δόθηκαν με την χρήση εμπορικών συστημάτων όσο και εκείνες με ανάπτυξη ίδιου λογισμικού. Αναφορά γίνεται εδώ αποκλειστικά σε αυτές τις εργασίες, στις οποίες παραπέμπεται ο αναγνώστης για περαιτέρω βιβλιογραφικές αναφορές.

2. ΨΗΦΙΑΚΑ ΑΝΑΠΤΥΓΜΑΤΑ

2.1 Γενικά

Σε περιπτώσεις μη επίπεδων αντικειμένων είναι γενικά απαραίτητη η στερεοσκοπική προσέγγιση, με όσα κάτι τέτοιο συνεπάγεται σε εξοπλισμό, εξειδίκευση και εργασία. Υπάρχουν όμως 3D αντικείμενα επιδεχόμενα μονοεικονική αντιμετώπιση, όπως είναι οι ομαλές καμπύλες επιφάνειες που προσεγγίζονται αναλυτικά με μαθηματικές επιφάνειες 2^{ου} βαθμού (κυλινδρικές, κωνικές, σφαιρικές κ.ά.). Αντικείμενα αυτού του τύπου προκύπτουν συχνά σε επίγειες εφαρμογές (αρχαίοι τάφοι, πύργοι, αψίδες, τρούλοι, μύλοι, φάροι, υδραγωγεία). Βασική ιδέα της μονοεικονικής αποτύπωσης είναι ότι η αναλυτική εξίσωση της επιφάνειας συνεισφέρει μία τρίτη εξίσωση, η οποία μπορεί πλέον να 'τμηθεί' στον χώρο από την δέσμη μίας κεντρικής προβολής, ορίζοντας τις 3D συντεταγμένες σημείων της επιφάνειας που έχουν μετρηθεί στην εικόνα.

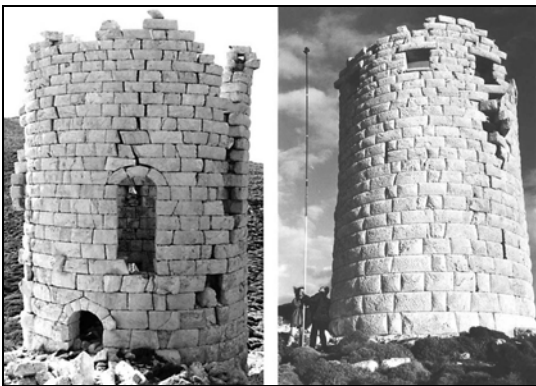
Ακόμα, ζητούμενο σε παρόμοιες περιπτώσεις δεν η ορθή προβολή αλλά αντίθετα το ψηφιακό ανάπτυγμα ή, για μη αναπτυσσόμενες επιφάνειες, η απεικόνιση σε κατάλληλη χαρτογραφική προβολή (Karras et al., 1997). Εδώ γίνεται αναφορά σε αναπτυσσόμενες επιφάνειες. Παρεμβολή μαθηματικού στερεού σε καλά κατανοημένα σημεία της επιφάνειας (μετρημένα γεωδαιτικά) και γνώση του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων επιτρέπουν να αναπτυχθούν ψηφιακά οι εικόνες και να ενωθούν σε μωσαϊκό ανάπτυγματος.

Η σχετική θεωρία και η ανάπτυξη λογισμικού αναλύονται από τους Karras et al. (2001), Petsa (2001), Theodoropoulou et al. (2001). Εδώ θα παρουσιαστούν συνοπτικά δύο σχετικά παράδειγμα εφαρμογής (κύλινδρος και κώνος).

2.2 Παραδείγματα

Από το Υπουργείο Πολιτισμού ζητήθηκε να αναπτυχθούν ψηφιακά οι εξωτερικές επιφάνειες δύο πύργων ελληνιστικής εποχής. Ο κυλινδρικός πύργος (Δρακάνος Ικαρίας) έχει εξωτερική διάμετρο 8.5 m και ύψος 12 m (Εικ. 1). Ο κωνικός πύργος (Αγ. Πέτρος Άνδρου) έχει διάμετρο ~10 m στην βάση και ύψος έως 19 m (Εικ. 2). Ζητήθηκαν αναπτύγματα σε κλίμακα 1:25, και τοι εκτιμήθηκε εξ αρχής ότι δεν θα ήταν δυνατόν να επιτευχθεί η αντίστοιχη ακρίβεια.

Αν και από την προσαρμογή αναλυτικών επιφανειών στα μετρημένα σημεία (που αξιοποιήθηκαν και ως φωτοσταθερά) αποκλείστηκαν όσα απείχαν χονδροειδώς λόγω φθορών, οι μέσες τετραγωνικές αποκλίσεις παρέμειναν μεγάλες (6.8 και 5.2 cm). Μολαταύτα, χάρη στην καλή κατανομή σημείων η ακρίβεια παρεμβολής επιφανειών ήταν ικανοποιητική (πχ. αβεβαιότητα της θέσης αξόνων και ακτίνων ήταν ≤ 1 cm). Η γωνία του κωνικού πύργου ήταν 5.2° .



Εικόνα 1. Ο κυλινδρικός πύργος Δρακάνου.
Figure 1. The cylindrical Drakanos tower.



Εικόνα 2. Ο κωνικός πύργος Αγ. Πέτρου.
Figure 2. The conic Ag. Petros tower.

Το μέγεθος, το σχήμα και ο περιβάλλον χώρος των μνημείων έθεταν σοβαρά προβλήματα

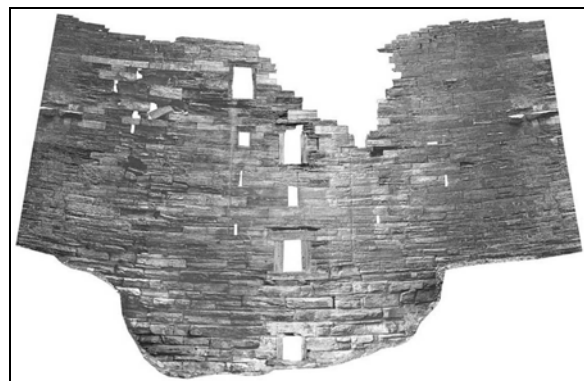
στην λήψη των εικόνων. Οι επιφάνειες απείχαν αρκετά από ιδεατά στερεά, οπότεν έπρεπε να φωτογραφηθούν πυκνά ώστε να αποφευχθούν προοπτικές παραμορφώσεις και αποκρύψεις. Ακόμα, τα μνημεία είχαν μεγάλο ύψος και ήταν προσιτά μόνο με τα πόδια, ενώ οι ισχυροί άνεμοι του χειμώνα απέκλειαν χρήση μπαλλονιού.

Στον Δράκανο (επίπεδο έδαφος) αξιοποιήθηκε το ειδικό τηλεσκοπικό καλάμι ψαρέματος του ΥΠ.ΠΟ. (Εικ. 1 δεξιά) για λήψεις με οριζόντιο άξονα από ύψος έως 9 m. Ο πύργος φωτογραφήθηκε περιμετρικά από 8 θέσεις σε δύο ύψη με μηχανή 35 mm. Ο άλλος πύργος είναι ψηλότερος και βρίσκεται σε έδαφος με απότομη κλίση. Λήψεις έγιναν από σημεία της ανωφέρειας με μηχανή μεσαίου φορμάτ και διαφορετικούς φακούς (ευρυγώνιο, κανονικό, zoom). Αλλά για το πρόσθιο τμήμα μοναδική λύση ήταν λήψεις από απέναντι υψώματα με τηλεφακό και μετατροπείς (μέγιστη εστιακή απόσταση 840 mm). Παρά κάποια οπτική υποβάθμιση, οι εικόνες ήταν ικανοποιητικές. Τελικά ο πύργος καλύφθηκε από 7 θέσεις σε δύο ύψη.

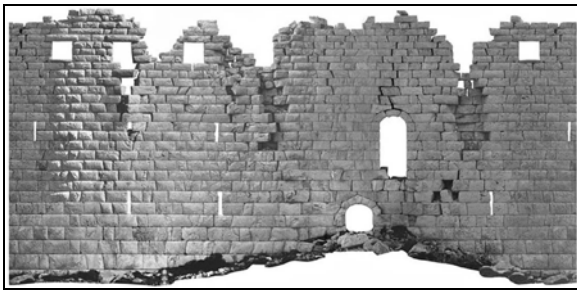
Για τα δύο μωσαϊκά (ψηφίδα αναπτύγματος 2.5 mm) ενώθηκαν 17 και 14 ανεπτυγμένες εικόνες. Λόγω και της χρήσης zoom, οι εσωτερικοί προσανατολισμοί των εικόνων ήταν άγνωστοι (εκτός από την ακτινική διαστροφή των ευρυγώνιων φακών που διορθώθηκε). Έτσι, για τον αλγόριθμο επανασύστασης προτιμήθηκε η γενική 2D-3D προβολική σχέση (DLT) με >15 φωτοσταθερά ανά εικόνα. Περιοχές με μεταθέσεις λόγω αναγλύφου ή αποκρύψεις συμπληρώθηκαν από κοντινές μετωπικές εικόνες.

Τελικά μωσαϊκά φαίνονται στις Εικ. 3 και 4. Η μέση ακρίβειά τους εκτιμήθηκε βάσει των φωτοσταθερών περί τα 3-4 cm, και κρίθηκε ως απολύτως ικανοποιητική απο τους χρήστες.

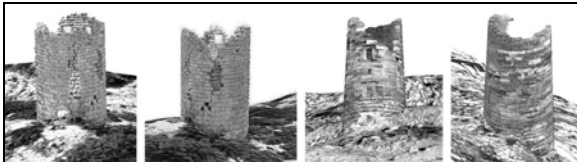
Οι προβολές αυτές προσφέρονται για να επενδυθούν τα στερεά με 'φωτοϋφή'. Στην Εικ. 5 παρουσιάζονται εικόνες από μοντέλα VRML.



Εικόνα 3. Ανάπτυγμα κωνικού πύργου.
Figure 3. Development of conic tower.



Εικόνα 4. Ανάπτυγμα κυλινδρικού πύργου.
Figure 4. Development of cylindrical tower.



Εικόνα 5. Εικόνες από μοντέλο VRML.
Figure 5. Frames from a VRML model.

3. ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ

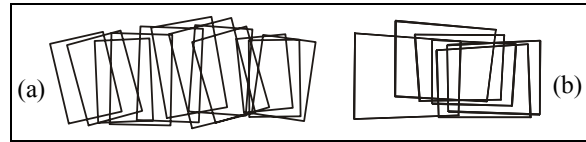
Στην τυπική περίπτωση, όμως, πραγματοποιείται η 3D 'μοντελοποίηση' της επιφάνειας, κατά κανόνα σε φωτογραμμετρικό ψηφιακό σταθμό, και ακολουθεί η ορθοαναγωγή και η παραγωγή ορθοφωτομωσαϊκού. Για όσα έπονται εδώ βλ. αναλυτικά Manromati et al. (2002 και 2003).

3.1 Φωτοτριγωνισμός

Ο φωτοτριγωνισμός με την μέθοδο της δέσμης είναι απαραίτητος για την συλλογή της 3D πληροφορίας όσο και για την ορθοαναγωγή (έστω και αν η 3D συλλογή γίνεται με laser scanning, αφού η υφή από διαδοχικές εικόνες πρέπει να ταιριάζει). Ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων καλό είναι να εκτιμάται με αυτοβαθονόμηση (που όμως δεν είναι πάντα δυνατή, πχ. λόγω περιορισμένου αναγλύφου ή μη ευνοϊκής γεωμετρίας του μπλοκ). Ωστόσο, έχει δειχτεί ότι για ανάγλυφο όχι ιδιαίτερα έντονο μπορεί γενικά να χρησιμοποιείται (για εστίαση στο άπειρο) η ονομαστική τιμή της εστιακής απόστασης και να αγνοείται το πρωτεύον σημείο της μηχανής. Η ακτινική διαστολή (ιδίως των ευρυγώνιων φακών), που έχει σοβαρή επίδραση, μπορεί να εκτιμάται ανεξάρτητα με απλές τεχνικές, πχ. από εικόνες ευθειών. Αυτό έχει εφαρμοστεί στα παραδείγματα της παρούσας ενότητας.

Όπως έχει αναφερθεί, σε εφαρμογές αυτού του τύπου τα προβλήματα στον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού είναι εξίσου σημαντικά. Μη πλήρως ελέγξιμες πλατφόρμες δεν επιτρέπουν πάντα να τηρείται ο προγραμματισμός της λήψης, γεγονός που συχνά συνε-

πάγεται δύσκολες γεωμετρίες. Τόσο σε κατακόρυφες λήψεις (συνήθως με μπαλλόνι) όσο και σε οριζόντιες (με μπαλλόνι ή καλάμι) κυριότερο πρόβλημα είναι στροφές των εικόνων περί την κατακόρυφο, οι οποίες μπορεί να ξεπερνούν ακόμα και τις 15°. Η Εικ. 6 δείχνει κατακόρυφες (a) και οριζόντιες (b) λωρίδες από εφαρμογές που αναφέρονται στην συνέχεια.



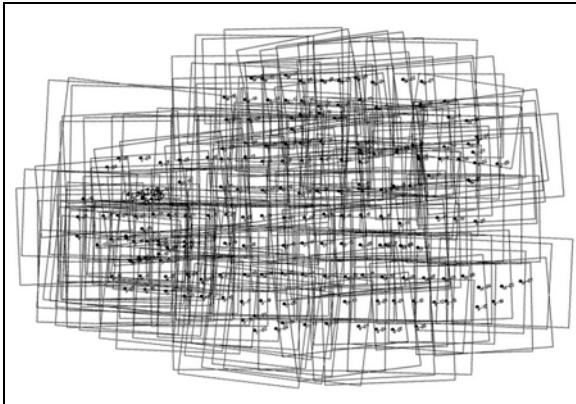
Εικόνα 6. Γεωμετρίες λωρίδων.
Figure 6. Strip configurations.

Αυτό έχει άμεση επίπτωση τόσο στην επικάλυψη όσο και στην δυνατότητα να επιλυθεί ο φωτοτριγωνισμός με το λογισμικό φωτογραμμετρικών σταθμών. Για να αντιμετωπιστεί το πρώτο ζήτημα γενικά χρειάζεται κανείς πυκνές λήψεις, προκειμένου να εξασφαλίζεται ικανοποιητική επικάλυψη και επαρκής αριθμός αλληλοτομιών (πολύ δε περισσότερο που αυτό συνήθως είναι ούτως ή άλλως απαραίτητο για να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρχουν περιοχές που θα 'κρύβονται' εξαιτίας της προοπτικής). Ακόμα, κρίσιμη είναι η ύπαρξη επαρκούς αριθμού φωτοσταθερών (αλλά και σημείων ελέγχου) και η επιλογή πολλών κατάλληλων σημείων σύνδεσης, μετρούμενων κατά το δυνατόν σε όλες τις εικόνες όπου εμφανίζονται. Όλα τα σημεία, που συνήθως δεν είναι προσημασμένα, πρέπει να αναγνωρίζονται πολύ προσεκτικά λόγω της φύσης του αντικειμένου, αλλά και των συχνά έντονων (λόγω αναγλύφου και κλίσης των εικόνων) διαφορών προοπτικής. Υπό τις προϋποθέσεις αυτές είναι, τελικά, δυνατόν να εξασφαλίζεται η ακρίβεια που είναι αναγκαία, αφού η ποιότητα του φωτοτριγωνισμού είναι προφανώς το αρχικό κρίσιμο στάδιο για την συλλογή αξιόπιστων 3D δεδομένων και την ψηφιακή ορθοαναγωγή. Αυτό αφορά ακόμα και πολύ μεγάλα μπλοκ εικόνων. Για παράδειγμα, σε υπό εξέλιξη ερευνητικό πρόγραμμα στον αρχαιολογικό χώρο της Έπαιυλης του Ηρώδου Αττικού στην Κυνουρία, η συνεχής διακύμανση του αναγλύφου και η έκταση του μνημείου υπαγόρευσαν μεγάλο αριθμό πολύ πυκνών λήψεων από μπαλλόνι (Εικ. 7). Ο φωτοτριγωνισμός με 194 εικόνες μεσαίου φορμάτ μέσης κλίμακας 1:600 επιλύθηκε με μέση απόκλιση στα φωτοσταθερά 1.5 cm.

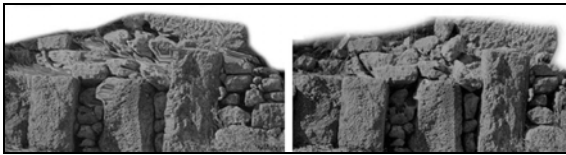
3.2 Παραγωγή 3D μοντέλου

Η πληρότητα και πιστότητα του 3D μοντέλου έ-

χει καθοριστική σημασία για το παράγωγο εικονιστικό προϊόν, αφού η ελλιπής περιγραφή επιφανειών προξενεί παραμορφώσεις (Εικ. 8).



Εικόνα 7. Μπλοκ εικόνων από μπαλόνι.
Figure 7. Image block taken with balloon.

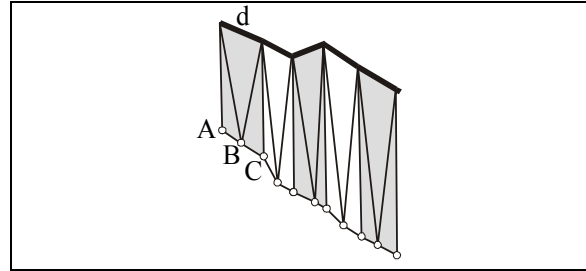


Εικόνα 8. Παραμόρφωση ορθοφωτογραφίας.
Figure 8. Orthophoto deformation.

Γενικά, τα εμπορικά λογισμικά ‘μοντελοποιούν’ πρωτογενή 3D δεδομένα – είτε φωτογραμμετρικά έχουν συλλεγεί αυτά είτε με laser scanning – με 2D τριγωνισμό Delaunay, δηλαδή περιγράφουν τις επιφάνειες με μοντέλα 2.5D (ένα μόνο υψόμετρο σε κάθε οριζοντιογραφική θέση). Συνεπώς χρειάζεται προσοχή (αλλά και εμπειρία) κατά την φάση της συλλογής ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι ασυνέχειες της επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να έχει κανείς εκ των προτέρων σαφή εικόνα για τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί το μοντέλο επιφάνειας για την ορθοαναγωγή.

Συνηθέστερο πρόβλημα στις ορθοπροβολές αρχαιολογικών αντικειμένων είναι η περιγραφή επιφανειών που είναι κάθετες μεταξύ τους, ειδικότερα δε ο σχηματισμός ‘κατακόρυφων τριγώνων’. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο αλγόριθμος τριγωνισμού πρέπει να ‘υποβοηθηθεί’ με κατάλληλη τεχνική συλλογής. Γενικά, η 3D πληροφορία σε κατακόρυφες επιφάνειες συλλέγεται ως συνδυασμός γραμμών ασυνέχειας επάνω και σημείων κάτω. Αυτό όμως δεν αποκλείει απαραίτητως έναν ‘αυθαίρετο’ τριγωνισμό, με άμεση επίπτωση στην ορθοαναγωγή. Στην υπό εκπόνηση διδακτορική διατριβή της, η Δ. Μαυρομάτη έχει αναπτύξει την ακόλουθη τεχνική συλλογής. Το πάνω χείλος μιάς κατακόρυφης επιφάνειας

ορίζεται με γραμμή ασυνέχειας. Για κάθε ευθύγραμμο τμήμα (d) αυτής της πολυγωνικής γραμμής συλλέγονται τρία σημεία στο κάτω μέρος, όπως φαίνεται και στην Εικ. 9, δηλαδή δύο που αντιστοιχούν στα δύο άκρα της (A και C), και ένα (B) προσεγγιστικά στο μέσον της.



Εικόνα 9. Τεχνική 3D συλλογής.
Figure 9. Technique for 3D collection.

Καίτοι επίπονη, αυτή η τεχνική 3D συλλογής επιτρέπει να ελέγχεται ο σχηματισμός τριγώνων αφού τα ‘εξαναγκάζει’ να ακολουθούν την μορφή της επιφάνειας, και άρα εξασφαλίζει κατά το δυνατόν πιστή περιγραφή. Προφανώς, η τεχνική υιοθετείται μόνο σε ορισμένες ‘δύσκολες’ περιοχές και όχι σε ολόκληρη την επιφάνεια.

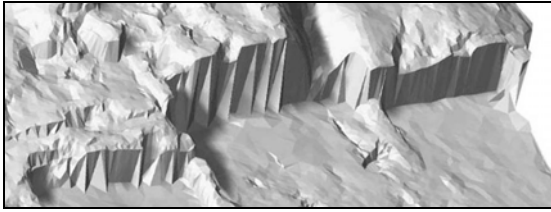
3.3 Παραδείγματα

Δίδονται εδώ ορισμένα επιμέρους δείγματα λεπτομερειών από τρεις περιπτώσεις παραγωγής ορθοφωτομωσαϊκού σε μνημεία. Το πρώτο αφορά αρχαϊκό μνημείο (Θησείο). Οι 12 κατακόρυφες λήψεις, κλίμακας 1:1100, είχαν γίνει από μπαλόνι με μηχανή μικρού φορμάτ (μέση απόκλιση σε 100 φωτοσταθερά 3.7 cm). Ένα τμήμα των παρόδων του αρχαίου θεάτρου Σπάρτης αποδόθηκε με 6 οριζόντιες λήψεις κλίμακας 1:250 που είχαν γίνει με καλάμι και μηχανή μεσαίου φορμάτ (μέση απόκλιση σε 44 φωτοσταθερά 1.6 cm). Σε τμήμα όψης του Κάστρου Αιγιοσθένων χρησιμοποιήθηκαν, τέλος, 6 οριζόντιες εικόνες κλίμακας 1:300 από μπαλόνι που είχαν ληφθεί με μηχανή μεσαίου φορμάτ (μέση απόκλιση σε 68 φωτοσταθερά 1.3 cm).

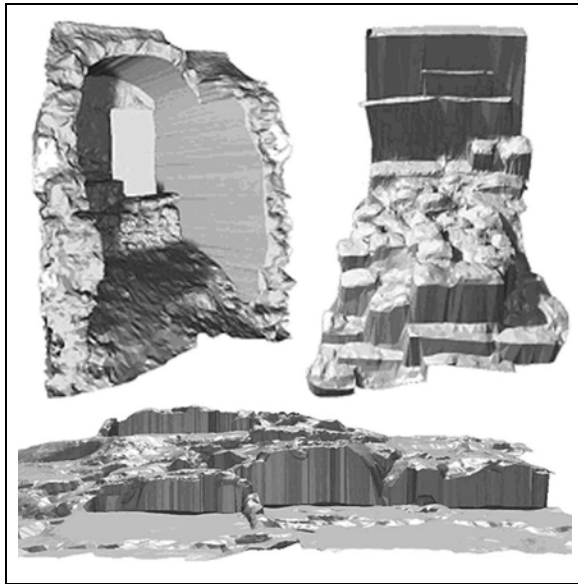
Η Εικ. 10 δείχνει την διαφορά (αριστερά και δεξιά) σε κατακόρυφες επιφάνειες από τυχαία και από ελεγχόμενη συλλογή. Στην Εικ. 11 φαίνονται λεπτομέρειες σκιασμένων 3D μοντέλων και από τις τρεις εργασίες, όπου διακρίνεται η απόδοση επιφανειών κάθετων μεταξύ τους.

Η κατάλληλη συλλογή και ‘μοντελοποίηση’ επιφανειών εξασφαλίζει ορθοφωτομωσαϊκά υψηλής γεωμετρικής όσο και οπτικής ποιότητας. Στην Εικ. 12 φαίνεται μέρος του 3D μοντέλου επιφάνειας με έντονο ανάγλυφο και το αντίστοι-

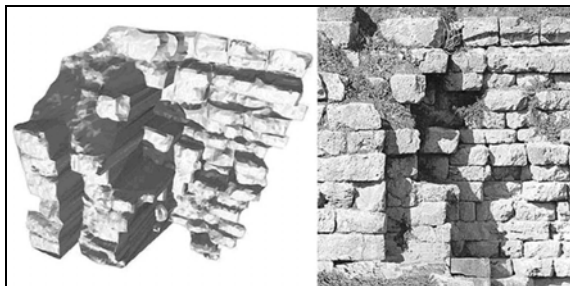
χο ορθοφωτομωσαϊκό. Στην ορθοπροβολή της Εικ. 13 φαίνεται πώς έχουν εξαλειφθεί οι εκτροπές λόγω αναγλύφου της αρχικής εικόνας.



Εικόνα 10. Κατακόρυφες επιφάνειες.
Figure 10. Vertical surfaces.



Εικόνα 11. Σκιασμένα μοντέλα επιφανείας.
Figure 11. Shaded surface models.



Εικόνα 12. 3D μοντέλο και ορθοφωτομωσαϊκό.
Figure 12. 3D model and orthomosaic.

4. ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΠΟΛΥΕΙΚΟΝΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ

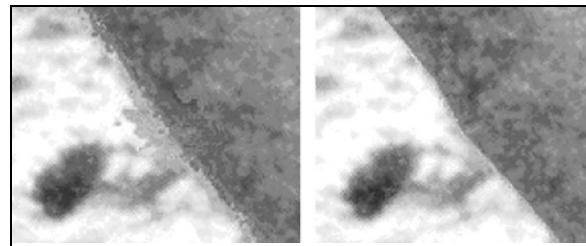
Μιλώντας γενικότερα, οι βασικές πηγές γεωμετρικών παραμορφώσεων σε μία ορθοαναγωγή είναι δύο: η περιγραφή της 3D επιφάνειας και ο αλγόριθμος ορθοπροβολής. Σε ό,τι αφορά την πρώτη, σήμερα υπάρχει πλέον και η δυνατότητα του laser scanning, του οποίου το πλήρως 3D προϊόν μπορεί να αξιοποιείται σε επίγειες ε-

φαρμογές και ως υπόβαθρο ορθοαναγωγής. Όμως ένα τυπικό λογισμικό ορθοπροβολής δεν δέχεται πλήρως 3D μοντέλα. Αν τα 3D δεδομένα απλώς τριγωνιστούν στο επίπεδο (μοντέλα 2.5D), τα προαναφερθέντα προβλήματα παραμένουν. Στην Εικ. 14 φαίνεται λεπτομέρεια ακμής σε ορθοαναγωγή μίας τέτοιας περίπτωσης, δίπλα σε άλλη που έγινε όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Αλλά στην πραγματικότητα, όπως αναφέρθηκε, τα συμβατικά λογισμικά ορθοαναγωγής δεν μπορούν να χειριστούν, αυστηρά μιλώντας, ούτε καν μοντέλα 2.5D αφού δεν εντοπίζουν αυτόματα τις αποκρύψεις στην εικόνα.

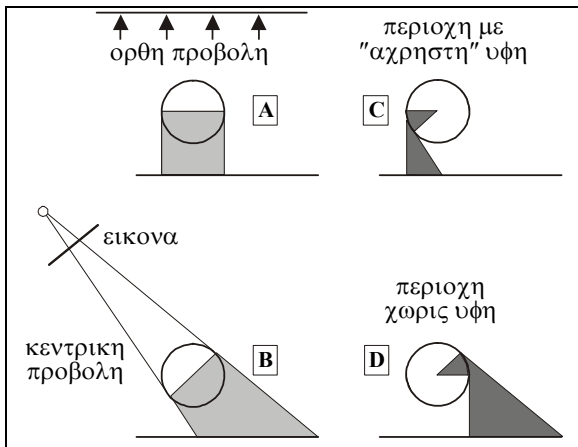


Εικόνα 13. Αρχική εικόνα και ορθοφωγραφία.
Figure 13. Source image and orthomosaic.

Το διπλό πρόβλημα αποκρύψεων που τελικά καλείται να αντιμετωπίσει ένα λογισμικό παραγωγής εικονιστικών προϊόντων από πλήρως 3D μοντέλα φαίνεται στην Εικ. 15: αποκρύψεις της ίδιας της επιφάνειας στην διεύθυνση προβολής, δηλαδή 'αυτοαποκρύψεις' (Α), και αποκρύψεις στην εικόνα (Β). Ή αλλιώς: το λογισμικό οφείλει να 'αντιλαμβάνεται' ποιές περιοχές φαίνονται μεν στην εικόνα αλλά πρέπει να μην φαίνονται στην προβολή (C) και ποιές περιοχές πρέπει μεν να φαίνονται στην προβολή αλλά δεν φαίνονται στην εικόνα (D). Η προσέγγιση αυτή υπερβαίνει βέβαια την απλή περίπτωση ορθής προβολής και ουσιαστικά αφορά κάθε προβολή, αλλά και το γενικότερο ζήτημα της απόδοσης 'φωτοϋφής' σε 3D μοντέλα.



Εικόνα 14. Προβολή από διαφορετικά μοντέλα.
Figure 14. Projection from different models.



Εικόνα 15. Το διπλό πρόβλημα αποκρύψεων.
Figure 15. The twofold occlusion problem.

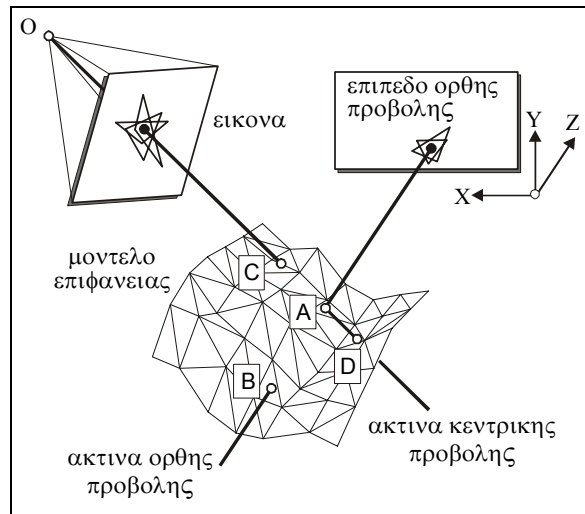
Παράλληλα, είναι προτιμότερο η τιμή χρώματος που αποδίδεται σε κάθε ψηφίδα μιάς τελικής εικόνας να προέρχεται από παρεμβολή σε όλες τις εικόνες που 'βλέπουν' το συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική εξομάλυνση της υφής και αποφεύγονται οι ραδιομετρικές ασυνέχειες.

Οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει έναν τέτοιο αλγόριθμο για παραγωγή ορθής ή προοπτικής προβολής από πλήρως 3D μοντέλα με αυτόματο έλεγχο αποκρύψεων και πολυεικονική απόδοση υφής. Εδώ θα δοθεί το αδρό περιγράμμα του αλγορίθμου (αναλυτική παρουσίαση έχουν κάνει οι Grammatikopoulos et al., 2004, 2005).

Προϋποτίθεται ότι υπάρχει τριγωνισμένο 3D μοντέλο της επιφάνειας, η οποία απεικονίζεται σε σειρά εικόνων με πολλαπλή επικάλυψη και με προσανατολισμούς γνωστούς από συνροθώσεις δέσμης. Εδώ τα παραδείγματα αναφέρονται στην εκκλησία της Καπνικαρέας. Το 3D μοντέλο και οι 7 εικόνες (από ψηφιακή μηχανή 5 Megapixel) φαίνονται στην Εικ. 16.



Εικόνα 16. 3D μοντέλο και εικόνες.
Figure 16. 3D model and images.



Εικόνα 17. Εύρεση των αποκρύψεων.
Figure 17. Detection of occlusions.

Η βασική λογική του αλγορίθμου για αυτόματο εντοπισμό αποκρύψεων φαίνεται στην Εικ. 17. Όλα τα τρίγωνα του 3D μοντέλου προβάλλονται ορθά στο επίπεδο προβολής και κεντρικά στην κάθε εικόνα. Τούτο επιτρέπει να βρεθεί σε ποιά σημεία η ακτίνα ορθής προβολής τέμνει το μοντέλο (εδώ A, B). Από αυτά, μόνο το κοντινότερο (A) πρέπει να φανεί στην προβολή. Έτσι σε κάθε σημείο της προβολής αντιστοιχίζεται ένα μοναδικό σημείο της επιφάνειας. Ελέγχεται κατόπιν κατά πόσον το σημείο αυτό όντως φαίνεται και στην εικόνα. Για παράδειγμα, η ακτίνα διά του A απεικονίζει εδώ το σημείο C, άρα η εικόνα αυτή δεν 'δικαιούται' να συνεισφέρει υφή για την εν λόγω ψηφίδα της ορθοαναγωγής. Τελικά, με αυτόν τον τρόπο ορίζεται ποιά σημεία πρέπει να φαίνονται στην ορθοπροβολή και σε ποιά από αυτά επιτρέπεται η συμμετοχή κάθε εικόνας στην απόδοση χρώματος. Παράδειγμα για μία εικόνα φαίνεται στην Εικ. 18.

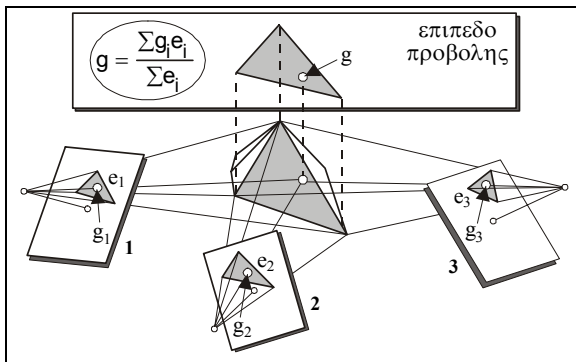


Εικόνα 18. 'Αληθής' ορθοαναγωγή εικόνας.
Figure 18. 'True' orthoprojection of an image.

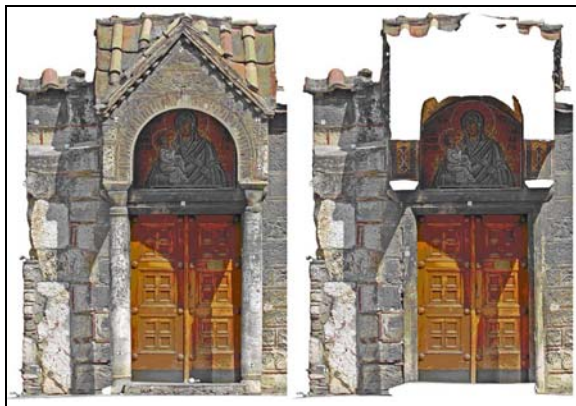
Σε αντίθεση με τα εμπορικά λογισμικά, όπου το χρώμα σε κάθε ψηφίδα της ορθοφωτογραφίας προέρχεται από μία κάθε φορά εικόνα, ο αλγό-

ριθμος που περιγράφεται εδώ συγκεράζει υφή από όλες τις εικόνες που 'βλέπουν' το σημείο του μοντέλου. Η τιμή χρώματος g_i από κάθε εικόνα συμμετέχει με βάρος αναλογο με το εμβαδόν e_i της προβολής του αντίστοιχου τριγώνου, όπως δείχνει η Εικ. 19. Έτσι λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα της εικόνας, η ανάλυσή της και η γωνία υπό την οποία έχει απεικονιστεί το τρίγωνο. Αυτή η συγχώνευση υφής από περισσότερες εικόνες εξασφαλίζει ομαλότερη ραδιομετρία, χωρίς 'άλματα' και δευτερογενή θόρυβο.

Η τελική ορθοφωτογραφία, που έχει παραχθεί με την περιγραφείσα διαδικασία, βρίσκεται στην Εικ. 20. Εκεί παρουσιάζεται ακόμα μία κατακόρυφη τομή, που έχει δημιουργηθεί με τον απλό αποκλεισμό των σημείων που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση.



Εικόνα 19. Πολυεικονική απόδοση χρώματος.
Figure 19. Multi-image colour blending.



Εικόνα 20. Ορθοαναγωγή και τομή.
Figure 20. Orthophoto and cross-section.

Ο χώρος δεν επιτρέπει να επεκταθεί κανείς σε άλλες δυνατότητες του αλγορίθμου, όπως είναι ο αποκλεισμός χονδροειδώς αποκλινουσών τιμών χρώματος με στατιστικό έλεγχο, η χρήση του 'χάρτη βάθους' των εικόνων (Εικ. 21) ή και η παραγωγή προοπτικών απεικονίσεων. Η επέκταση του αλγορίθμου αποτελεί αντικείμενο ενός υπό εξέλιξη ερευνητικού προγράμματος.



Εικόνα 21. Χάρτης βάθους εικόνας.
Figure 19. Image depth map.

Ένα μέρος αυτής της έρευνας έχει χρηματοδοτηθεί κατά 75% από την ΕΕ στο πλαίσιο του ΕΠΕΑΕΚ 'Αρχιμήδης ΙΙ' και κατά 25% από το Ελληνικό Δημόσιο.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., Kokkinos T., Petsa E. (2004). On automatic orthoprojection and texture-mapping of 3D surface models. *Int. Archives Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(5), pp. 360-5.
- Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., Petsa E. (2004). Data fusion from multiple sources for the production of orthographic and perspective views with automatic visibility checking. *Proc. XX CIPA Int. Symposium*, Torino, pp. 819-824.
- Karras G., Petsa E., Dimarogona A., Kouroupis S. (2001). Photo-textured rendering of developable surfaces in architectural photogrammetry. *Virtual & Augmented Architecture*, Springer Verlag, pp. 147-158.
- Karras G., Patias P., Petsa E., Ketipis K., 1997. Raster projection and development of curved surfaces. *Int. Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 32(5C1B), pp. 179-185.
- Mavromati D., Petsa E., Karras G. (2002). Theoretical and practical aspects of archaeological orthoimaging. *Int. Archives Photogrammetry & Remote Sensing*, 34(B5), pp. 413-8.
- Mavromati D., Petsa E., Karras G. (2003). Experiences in photogrammetric archaeological recording. *Proc. XIX CIPA Int. Symposium*, Antalya, pp. 666-669.
- Petsa E. (2001). Zur digitalen Projektion und Visualisierung von Türmen. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, Nr. 4, pp. 283-288.
- Theodoropoulou I., Petsa E., Karras G. (2001). Digital surface development of large cylindrical and conic structures with a single image technique. *Photogrammetric Record*, 17(97), pp. 25-37.