

Μεθοδολογία Διερεύνησης Προσανατολισμού Μνημείων

Γ. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός.
Δρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Δ. Δ. ΜΠΑΛΟΔΗΜΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια γεωδαιτική μεθοδολογία διερεύνησης του προσανατολισμού μνημείων. Σκοπός είναι αφ' ενός η χρονολόγηση ενός μνημείου (ελληνορθόδοξου ναού) με τον ορισμό και την ερμηνεία του προσανατολισμού του και αφ' ετέρου η πρόταση εύχρηστης μεθοδολογίας για τον κατά δυνατόν ορθότερο προσανατολισμό νεοκατασκευαζόμενων ναών. Για την πλήρη διερεύνηση του προσανατολισμού ενός μνημείου απαιτούνται η λεπτομερής αποτύπωσή του, ο γεωμετρικός προσδιορισμός του βασικού άξονα ή άλλης ειδικής διεύθυνσής του (που δεν υλοποιούνται), ο προσδιορισμός του αστρονομικού αξιμονθίου της διεύθυνσης αυτής, η γεωμετρική αποτύπωση της οριογραφίας του αισθητού ορίζοντα που βρίσκεται μπροστά στο μνημείο και ο προσδιορισμός της φαινόμενης πορείας του ουρανίου σώματος, μια συγκεκριμένη ημερομηνία, με το οποίο συνδέεται ο προσανατολισμός του. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται η μέθοδος καθώς και τα συνοπτικά αποτελέσματα της εφαρμογής της σε 16 ναούς στη Μοναστική Πολιτεία των Μετεώρων. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι ο προσανατολισμός των ναών συνδέεται κυρίως με τη θέση ανατολής του ήλιου στον ορίζοντα, την ημέρα εορτής του Αγίου στον οποίο αφιερώνονται, κατά το έτος κτίσης τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μνημεία, με την ευρύτερη έννοια του όρου, αποτελούν την ιστορική και πολιτισμική κληρονομιά ενός έθνους μεταφέροντας στο πέρασμα των αιώνων πολιτισμικές και ιστορικές αξίες. Η κατασκευή και η χωροθέτησή τους συνδέονται άμεσα με τη χρήση, τη λειτουργικότητά τους αλλά και με την τοπογραφία του χώρου, στον οποίο έχουν κατασκευασθεί. Ο προσανατολισμός δηλαδή και η τοποθέτηση των μνημείων στο χώρο δεν είναι τυχαίοι, αλλά αντανακλούν τα έθιμα και τις παραδόσεις που ακολουθούσαν οι προϊστορικοί ή οι ιστορικοί κτίτορες τους [3], [14]. Σε παγκόσμια κλίμακα αλλά και στον ελλαδικό χώρο, στο πλαίσιο της Αρχαιοαστρονομίας, έχουν γίνει ορισμένες συστηματικές προσπάθειες προσδιορισμού και ερμηνείας του προσανατολισμού μνημείων.

Στην Αίγυπτο ο Sir Norman Lockyer το 1891 μετά από μετρήσεις διαπίστωσε ότι αρκετοί ναοί ήταν προσανατολισμένοι στην ίδια ημέρα της Ανατολής. Τον Ιανουάριο του 1900 ο Dr. Ernest Wallis Budge στέλνει στην Βρετανική Ακαδημία την παραπάνω απόμενη σειρά μετρήσεων από 100 ναούς στην Αίγυπτο, στην οποία αναφέρεται ότι οι μετρήσεις έγιναν σε μετρητικά σύστημα της Αρχαίας Αιγυπτίας.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1903, ο Dr. Ernest Wallis Budge στέλνει στην Βρετανική Ακαδημία την παραπάνω απόμενη σειρά μετρήσεων από 100 ναούς στην Αίγυπτο, στην οποία αναφέρεται ότι οι μετρήσεις έγιναν σε μετρητικά σύστημα της Αρχαίας Αιγυπτίας.

Στην Ελλάδα οι τάφοι του Υστερομινωϊκού Νεκροταφείου Αρμένων Ρεθύμνου (1450 π.Χ. - 1190 π.Χ.) έχουν λαξευθεί στο έδαφος έτσι, ώστε να είναι προσανατολισμένα στην ανατολή ή τη δύση του ήλιου κατά το θερινό ή το χειμερινό ηλιοστάσιο και τις ισημερίες με μια ακρίβεια της τάξης των ±2.5° [6].

Στην Ελλάδα οι τάφοι του Υστερομινωϊκού Νεκροταφείου Αρμένων Ρεθύμνου (1450 π.Χ. - 1190 π.Χ.) έχουν λαξευθεί στο έδαφος έτσι, ώστε να είναι προσανατολισμένα στην ανατολή ή τη δύση του ήλιου κατά το θερινό ή το χειμερινό ηλιοστάσιο και τις ισημερίες με μια ακρίβεια της τάξης των ±2.5° [6].

Στην Κέρκυρα δύο αρχαίοι ναοί, ο αρχαϊκός ναός στο Καρδάκι (6^{ος} αι. π.Χ.) και ο ναός της Άρτεμης, ο οποίος βρίσκεται 1Km βορειοδυτικά του πρώτου ναού, καθώς και ο βωμός του Απόλλωνα, ο οποίος κατασκευάστηκε πριν το 500 π.Χ., είναι προσανατολισμένοι στην ανατολή του ήλιου την ισημερία [13].

Η διερεύνηση του προσανατολισμού μέχρι σήμερα γίνεται χρησιμοποιώντας απλά μετρητικά όργανα, κυρίως πυξίδα, και απαιτείται η υλοποίηση του βασικού άξονα του μνημείου με τη χρήση ακοντίων και νήματος [3]. Τα αδύνατα σημεία αυτής της διαδικασίας είναι:

Ο σχετικά ατελής και επομένως όχι ακριβής ορισμός του βασικού κατά μήκος άξονα ή άλλων ειδικών διευθύνσεων του μνημείου.

Η αδυναμία προσδιορισμού του αστρονομικού αξιμονθίου των γραμμών αυτών με την απαραίτητη ακρίβεια.

Η αδυναμία μέτρησης και παρουσίασης της οριογραφίας του αισθητού ορίζοντα, που βρίσκεται "μπροστά" από κάθε μνημείο.

Η γνώση των παραπάνω στοιχείων μπορεί να προκύψει μόνο με την ορθή γεωμετρική τεκμηρίωση της κάτοψης

του μνημείου και της οριογραμμής του ορίζοντα και με την εφαρμογή αστρονομικών παρατηρήσεων.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

h = ωριαία γωνία αστέρα

δ = η απόκλιση του αστέρα

$\alpha = \eta$ ορθή αναφορά του αστέρα

θ = ο αστρικός χρόνος μέτρησης

Φ = το αστρονομικό πλάτος του τόπου παρατήρησης

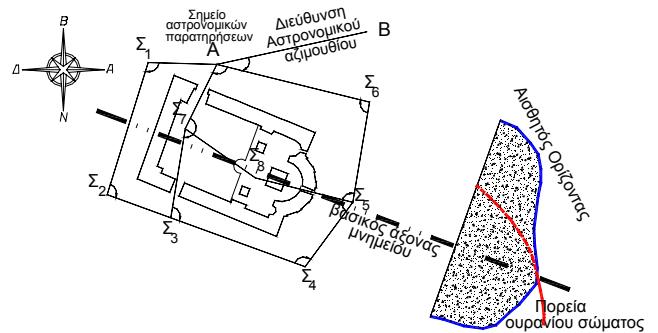
Λ = το αστρονομικό μήκος του τόπου παρατήρησης

$z = \eta$ κατακόρυφη (ζενίθια) γωνία

σ_{Φ} το σφάλμα του αστρονομικού πλάτους

σ_h = το σφάλμα της ωριαίας γωνίας

$A_{A=}$ το αστρονομικό αζιμούθιο



Σχήμα 1: Σχηματική παράσταση της διερεύνησης προσανατολισμού μνημείων.

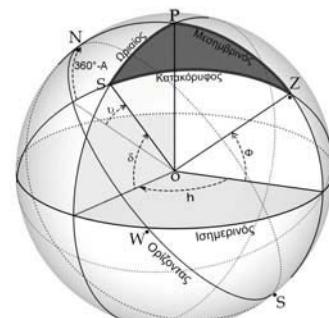
Fig. 1: Setting for the determination of a monument orientation.

Ο προσδιορισμός του αστρονομικού αξιμουθίου μιας διεύθυνσης, για το βόρειο ημισφαίριο και για μέσα πλάτη, γίνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο παρατήρησης του Πολικού Αστέρα, προσδιορίζοντας την ωριαία γωνία h (η μέθοδος αυτή είναι απλή και ακριβής, διότι ο Πολικός Αστέρας αναγνωρίζεται εύκολα, κινείται αργά και έτσι διευκολύνεται η σκόπευσή του, η παρατήρησή του είναι εύκολη λόγω της λαμπρότητάς του, μέγεθος περίπου 2, ενώ η πολική του απόσταση είναι πολύ μικρή). Το μέγεθος, που μετράται στην περίπτωση αυτή, είναι ο χρόνος UTC τη στιγμή της διάβασης του αστέρα από το κατακόρυφο σταυρόνημα του θεοδολίχου. Υπολογίζονται ο αστρικός χρόνος θ και η ωριαία γωνία του αστέρα από τη σχέση:

$$h = \theta + \Lambda - \alpha \quad (2.1)$$

Το αστρονομικό αζυμούθιο A_A του αστέρα S, όπως προσδιορίζεται από το τρίγωνο θέσης (σχήμα 2), δίνεται από τη σχέση [4]:

$$\tan A_A = \frac{-\sinh}{\cos \Phi \cdot \tan \delta - \sin \Phi \cdot \cosh} \quad (2.2)$$



Σχήμα 2: Τρίγωνο θέσης ενός αστέρα S.

Fig. 2: The astronomical triangle of a star S .

Η διαδικασία παρατήρησης είναι απλή και γρήγορη χρησιμοποιώντας σύγχρονους ψηφιακούς γεωδαιτικούς σταθμούς (Total Station). Τα όργανα αυτά έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης και καταγραφής γωνιών και Παγκόσμιου Χρόνου (UTC) τη στιγμή της μέτρησης.

Η παροχή και καταγραφή του χρόνου UTC επιτυγχάνεται με τη σύνδεση και επικοινωνία του ψηφιακού γεωδαιτικού σταθμού με δέκτη του συστήματος GPS (Global Positioning System) [5]. Με πολλές σκοπεύσεις στον αστέρα, μετά από συνόρθωση των παρατηρήσεων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (MET) [1], προσδιορίζεται το αζιμούθιο A_A του αστέρα. Μετρώντας την οριζόντια γωνία, που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης παρατήρησης του αστέρα και μιας επίγειας διεύθυνσης, προσδιορίζεται το αστρονομικό αζιμούθιο της επίγειας διεύθυνσης.

Η μεταφορά του αστρονομικού αζιμούθιου και η οριζοντιογραφική αποτύπωση του μνημείου απαιτούν την ίδρυση και μέτρηση ενός γεωδαιτικού δικτύου στο χώρο του μνημείου, την επίλυσή του και τον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων του X, Y, Z σε επιλεγμένο σύστημα αναφοράς.

Η αποτύπωση του μνημείου και η δημιουργία του τοπογραφικού διαγράμματος της κάτοψής του γίνονται χρησιμοποιώντας σύγχρονες τοπογραφικές μεθόδους, οι οποίες έχουν βελτιωθεί ως προς την ταχύτητα και την ακρίβεια με τη χρήση ψηφιακών σταθμών μέτρησης αποστάσεων χωρίς πρίσμα.

Ο γεωμετρικός προσδιορισμός του βασικού κατά μήκος άξονα του μνημείου ή άλλων ειδικών διευθύνσεών του. Ως βασικός κατά μήκος άξονας του μνημείου ορίζεται ο άξονας συμμετρίας του μνημείου, ο οποίος διέρχεται από χαρακτηριστικά σημεία του. Στους χριστιανικούς ναούς μια ειδική διεύθυνση είναι αυτή που συνδέει το μέσο της Αγίας Τράπεζας με το παράθυρο της κεντρικής κόγχης ή με κάποιο άλλο άνοιγμα στο χώρο του Ιερού Βήματος, απ' όπου διέρχεται το φως που προσπίπτει στην Τράπεζα κατά τη διάρκεια τέλεσης του μνηστηρίου της Θείας Ευχαριστίας [9]. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιώντας το ψηφιακό διάγραμμα της κάτοψης του μνημείου, χωρίς να χρειάζεται η υλοποίηση των γραμμών αντών.

Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της οριογραμμής του αισθητού ορίζοντα γίνεται, αν από οποιοδήποτε σημείο του γεωδαιτικού δικτύου και με γνωστή μια συγκεκριμένη διεύθυνση γίνουν μετρήσεις οριζόντιων γωνιών και γωνιών ύψους προς τα σημεία που ορίζουν αυτή τη γραμμή. Ως αισθητός ορίζοντας ενός μνημείου ορίζεται η προβολή στην ουράνια σφαίρα του συνόλου των ορεινών όγκων ή των κτισμάτων, που βρίσκονται στη διεύθυνση των χαρακτηριστικών γραμμών του μνημείου και εμποδίζουν την ορατότητα του παρατηρητή προς την ουράνια σφαίρα και τα ουράνια σώματα (ήλιο, αστέρια) [8].

Η οριογραμμή του ορίζοντα προκύπτει από τη γραφική παράσταση του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους για κάθε σημείο του. Ιδιαίτερότητα εμφανίζει η αναγωγή του ορίζοντα υψομετρικά και οριζοντιογραφικά, όπου αυτή είναι απαραίτητη.

Ως οριζοντιογραφική μεταβολή της θέσης του αισθητού ορίζοντα ορίζεται, για κάθε σημείο του, η διαφορά $\Delta Az = Az - Az'$, όπου Az το αζιμούθιο της διεύθυνσης, που ορίζεται μεταξύ του σημείου μέτρησης και κάθε σημείου της

οριογραμμής του ορίζοντα, και Az' το αζιμούθιο της διεύθυνσης μεταξύ του σημείου αναγωγής και κάθε σημείου της οριογραμμής του ορίζοντα. Η μεταβολή αυτή εξαρτάται από:

- Την απόσταση μεταξύ του σημείου μέτρησης και του σημείου αναγωγής.
- Τη σχετική θέση των δύο αυτών σημείων.
- Τη σχετική θέση ορίζοντα, σημείου μέτρησης και σημείου αναγωγής.
- Την απόσταση του ορίζοντα από το μνημείο.

Ως ψυφομετρική μεταβολή της θέσης του ορίζοντα ορίζεται η διαφορά $\Delta u = u - u'$, όπου u είναι η τιμή της γωνίας ύψους μεταξύ του σημείου μέτρησης και κάθε σημείου του αισθητού ορίζοντα και u' είναι η τιμή της γωνίας ύψους μεταξύ του σημείου αναγωγής και κάθε σημείου του ορίζοντα. Η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη της ψυφομετρικής διαφοράς ΔH μεταξύ του σημείου μέτρησης του ορίζοντα και του σημείου αναγωγής, και αντιστρόφως ανάλογη της οριζόντιας απόστασης S του ορίζοντα από το σημείο μέτρησης.

Ο προσδιορισμός της φαινόμενης πορείας του ήλιου ή άλλων αστέρων, με τους οποίους συνδέεται ο προσανατολισμός του μνημείου, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό, με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η ψηφιακή προσδιοριση της ουράνιας σφαίρας για την ημερομηνία που μελετάται [7]. Ετσι η πορεία του ήλιου ή άλλου αστέρα στο χρονικό διάστημα μίας ημέρας μπορεί να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα αζιμουθίου – γωνίας ύψους αντίστοιχο με αυτό των ορίζοντων.

2.1. Ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η τελική ακρίβεια, με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η διερεύνηση του προσανατολισμού ενός μνημείου, όπως περιγράφεται παραπάνω, εξαρτάται από την αβεβαιότητα προσδιορισμού :

- i) του αστρονομικού αζιμουθίου.
- ii) της γωνίας διεύθυνσης του βασικού κατά μήκος άξονα ή άλλης ειδικής διεύθυνσης του μνημείου.
- iii) της θέσης του αισθητού ορίζοντα, όπως αυτός είναι ορατός από συγκεκριμένη θέση στο χώρο του μνημείου.
- iv) της θέσης του ήλιου.

2.1.1. Σφάλμα στον προσδιορισμό του αστρονομικού αζιμουθίου

Το σφάλμα προσδιορισμού του αστρονομικού αζιμουθίου μιας επίγειας διεύθυνσης παρατήρησης εξαρτάται από:

- το σφάλμα προσδιορισμού του αζιμουθίου, όπως αυτό προκύπτει από τη σχέση 2.2 [1]. Αυτό εξαρτάται από το σφάλμα γνώσης και την τιμή του αστρονομικού πλάτους Φ του τόπου παρατήρησης και από το σφάλμα της ωριαίας γωνίας h και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_A = \pm \sqrt{(\sin A \cdot \cot z)^2 \sigma_\phi^2 + (\cos \Phi \cdot (\tan \Phi - \cos A \cdot \cot z))^2 \sigma_h^2} \quad (2.3)$$

- το σφάλμα μέτρησης της αντίστοιχης οριζόντιας γωνίας προς την επίγεια διεύθυνση παρατήρησης.

Για την Ελλάδα και πραγματοποιώντας περίπου 40 σκοπεύσεις στον Πολικό Αστέρα, το σφάλμα προσδιορισμού του αστρονομικού αζιμουθίου μιας επίγειας διεύθυνσης παρατήρησης είναι της τάξης των $\pm 2^{\circ}$ [5].

2.1.2. Σφάλμα στον προσδιορισμό της γωνίας διευθύνσης του βασικού κατά μήκος άξονα ή άλλων ειδικών διευθύνσεων

Το σφάλμα προσδιορισμού της γωνίας διεύθυνσης μιας γραμμής (π.χ. βασικός άξονας) είναι:

- ανάλογο του σφάλματος, το οποίο φέρουν οι συντεταγμένες των σημείων, τα οποία την ορίζουν.
 - αντιστρόφως ανάλογο προς την απόσταση μεταξύ των σημείων, από τα οποία προσδιορίζεται.

Για αποστάσεις μεταξύ των σημείων, που κυμαίνονται από 10m έως 50m, θεωρώντας ως μέσο σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων την τιμή $\pm 0.003m$, προκύπτει ότι το σφάλμα υπολογισμού του αζυμουθίου κυμαίνεται από $\pm 0.5^\circ$ έως $\pm 3^\circ$.

2.1.3. Σφάλμα στον προσδιορισμό της οριογραμμής του αισθητού ορίζοντα

Το σφάλμα προσδιορισμού των σημείων, που ορίζουν την οριογραμμή των αισθητού ορίζοντα, εξαρτάται από:

- το σφάλμα προσδιορισμού της γωνίας διεύθυνσης μεταξύ του σημείου μέτρησης του ορίζοντα και του σημείου μηδενισμού (αναφοράς).
 - το σφάλμα μέτρησης των στοιχείων που ορίζουν κάθε σημείο της οριογραμμής του ορίζοντα (ορίζόντια γωνία, γωνία ύψους). Αυτό εξαρτάται από τα όργανα μέτρησης γωνιών που χρησιμοποιούνται.
 - την αβεβαιότητα ορισμού των σημείων της οριογραμμής του ορίζοντα, εφόσον αυτά δεν είναι επισημασμένα.
 - το σφάλμα λόγω αναγωγής του, όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.
 - την απόσταση από το μνημείο.

Η τελική αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης των σημείων του ορίζοντα είναι της τάξης των $\pm 2^c$ [10].

2.1.4. Σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου

Το σφάλμα προσδιορισμού της θέσης του ήλιου εξαρτάται από την ακρίβεια γνώσης των αστρονομικών συντεταγμένων του τόπου στον οποίο βρίσκεται το μνημείο και από την ακρίβεια των ουρανογραφικών συντεταγμένων του α , δ , η οποία είναι $\sigma_{\alpha} = \pm 0.001\text{sec}$ και $\sigma_{\delta} = \pm 0''.01 = \pm 0.03^{\text{ee}}$ [2]

Αν η αβεβαιότητα, με την οποία είναι γνωστές οι αστρονομικές συντεταγμένες (Φ , Λ), είναι $\sigma_{\phi} = \sigma_{\Lambda} = \pm 30^{\text{cc}}$, τότε το

σφάλμα προσδιορισμού της θέσης ή της πορείας του ήλιου είναι περίπου $\pm 6^{\circ}$ [8].

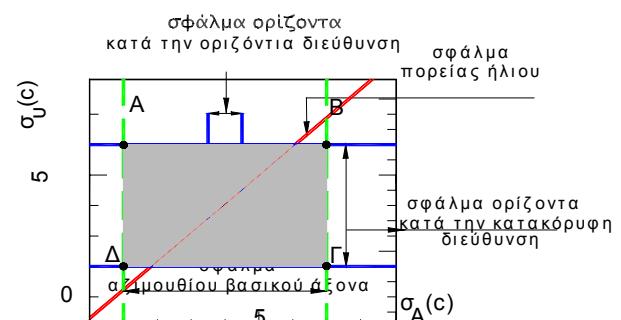
2.1.5. Τελική ακρίβεια

Η τελική αβεβαιότητα, με την οποία μπορεί να επιτευχθεί ο υπολογισμός του προσανατολισμού μνημείων, είναι συνάρτηση των σφαλμάτων, που φέρουν οι επιμέρους γεωμετρικές ενέργειες. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα σφάλματα των επιμέρους γεωμετρικών ενεργειών, που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του προσανατολισμού ενός μνημείου.

Πίνακας 1: Σφάλματα υπολογισμού του προσανατολισμού μνημείων.
 Table 1: Computation errors of the monument orientation.

<i>Γεωμετρική ενέργεια</i>	<i>Τιμή σφάλματος</i>
Προσδιορισμός αστρονομικού αξιμουθίου	$\pm 2^{\text{cc}}$
Προσδιορισμός γωνίας διεύθυνσης βασικού άξονα	$\pm 0.5^{\text{c}} - \pm 3^{\text{c}}$
Προσδιορισμός οριογραμμής αισθητού ορίζοντα	$\pm 20^{\text{cc}} - \pm 2^{\text{c}}$
Προσδιορισμός της θέσης ή της πορείας του ήλιου	$\pm 6^{\text{cc}}$

Η τελική αβεβαιότητα κυμαίνεται συνήθως από $\pm 55^{\circ}$ έως $\pm 3.5^{\circ}$ για μνημεία, όπου η γραμμή διερεύνησης έχει μήκος που κυμαίνεται από 10m έως 50m. Στο σχήμα 3 η γραμμοσκιασμένη περιοχή ΑΒΓΔ παριστάνει γραφικά το τελικό σφάλμα του υπολογισμού του προσανατολισμού ενός μνημείου.



Σχήμα 3: Σφάλμα υπολογισμού του προσανατολισμού μνημείων.
Fig. 3: Computation error of the monument orientation.

Οι παράμετροι, από τις οποίες εξαρτάται η ακρίβεια προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός μνημείου, όπως αναφέρθηκε, διαφοροποιούνται ανάλογα με το εξεταζόμενο μνημείο. Ετσι κάθε μνημείο είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση και πρέπει να αναφέρεται το σφάλμα της διερεύνησης του προσανατολισμού του ξεχωριστά.

3. ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

Η διαδικασία διερεύνησης του προσανατολισμού μνημείων, όπως αναλόθηκε στα προηγούμενα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό της χρονολογίας κτίσης τους, η οποία βασίζεται κυρίως στη μεταβολή της θέσης ή της πορείας του ήλιου ή άλλων ουρανίων σωμάτων στο πέρασμα των χρόνων. Από την ψηφιακή σχεδίαση προκύπτει το σημείο τομής της οριογραμμής του ορίζοντα και του βασικού κατά μήκος άξονα του μνημείου (σχήμα 1). Ως έτος κτίσης του μνημείου ορίζεται το έτος, στο οποίο αντιστοιχεί η γραμμή που υλοποιεί την πορεία του ήλιου ή άλλου ουράνιου σώματος και η οποία διέρχεται από το σημείο αυτό.

Η αβεβαιότητα χρονολόγησης μνημείων εξαρτάται από:

- Το σφάλμα προσδιορισμού του προσανατολισμού του μνημείου που, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κυμαίνεται συνήθως από $\pm 55^{\circ}$ έως $\pm 3.5^{\circ}$.
- Την τιμή της μεταβολής της πορείας του ήλιου για τη συγκεκριμένη ημερομηνία που κάθε φορά εξετάζεται. Η τιμή αυτή διαφοροποιείται μεταξύ ηλιοστασίων και ισημεριών, περίπου από $9^{\circ}/\text{έτος}$ (ελάχιστη τιμή) έως $33^{\circ}/\text{έτος}$ (μέγιστη τιμή).

Η αβεβαιότητα της χρονολόγησης ενός μνημείου προκύπτει ως το πηλίκο του σφάλματος προσδιορισμού του προσανατολισμού του και της ετήσιας μεταβολής της θέσης του ήλιου.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω τιμές προκύπτουν η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της αβεβαιότητας χρονολόγησης ενός μνημείου, οι οποίες είναι αντίστοιχα ± 2 έτη ($55^{\circ}/33^{\circ}$) και ± 40 έτη ($350^{\circ}/9^{\circ}$) [10].

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στους 16 ναούς και στα παρεκκλήσια της Μοναστικής Πολιτείας των Μετεώρων. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εφαρμογής.

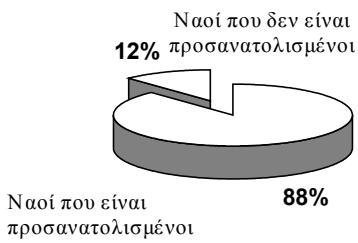
Από τον πίνακα 2 προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

- Για την πλειοψηφία του δείγματος (88%), υπάρχει σαφής απόδειξη συγκεκριμένου προσανατολισμού τους.

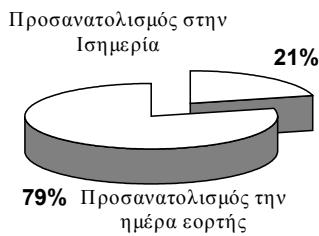
Πίνακας 2: Αποτελέσματα της διερεύνησης του προσανατολισμού των ναών των μονών των Μετεώρων.

Table 2: Results of the investigation of the churches orientation at Meteora.

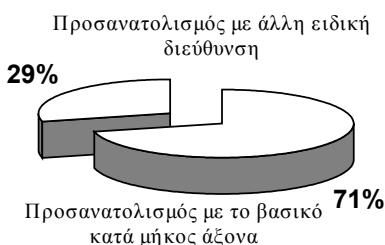
ΜΝΗΜΕΣ	ΝΑΟΙ	ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ ΓΡΑΜΜΗΣ (g)	ΕΙΔΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΟΡΕΙΑΣ ΗΛΙΟΥ Για το έτος κτίσης	ΤΕΛ. ΑΒΕ ΒΑΙΟ ΤΗΤΑ
ΜΕΓΑΛΟΜΕΤΕΩΡΟ	ΙΩΑΝΝΟΥ ΠΡΟΔΡΟΜΟΥ	132.86	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ (7/1/1360)	$\pm 4.7^{\circ}$
	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩ ΣΕΩΣ	132.86	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	(7/1/1360) ΕΟΡΤΗ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΟΥ	$\pm 2.3^{\circ}$
		78.42	ΓΡΑΜΜΗ ΣΤΟ ΠΑΤΩΜΑ	ΕΟΡΤΗ (6/8/1388)	$\pm 38.7^{\circ}$
ΒΑΡΛΑΑΜ	ΚΩΝ/ΝΟΥ & ΕΛΕΝΗΣ	121.32	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ 21/5/1789 (Τρίτη Ήρα)	$\pm 10.4^{\circ}$
	ΑΓΙΟΙ ΠΑΝΤΕΣ	90.24	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΠΑΣΧΑ 1542	$\pm 1.8^{\circ}$
ΡΟΥΣΑΝΟΥ	ΤΡΕΙΣ ΙΕΡΑΡΧΕΣ	126.49	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ 30/1/1350	$\pm 4.7^{\circ}$
	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩ ΣΕΩΣ	110.40	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΙΕΡΟΥ - ΑΓΙΑ ΤΡΑΠΕΖΑ	ΙΣΗΜΕΡΙΑ 1528	$\pm 16.0^{\circ}$
ΑΝΑΠΑΤΑΣ	ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	64.42	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	-	-
	ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	144.69	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΙΕΡΟΥ - ΑΓΙΑ ΤΡΑΠΕΖΑ	ΕΟΡΤΗ 6/12/1527	$\pm 21.1^{\circ}$
	ΑΓΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	125.14	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΙΣΗΜΕΡΙΑ 1350 (Τρίτη Ήρα)	$\pm 8.5^{\circ}$
ΑΓΙΑ ΤΡΙΔΑΔΑ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ	128.08	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΙΣΗΜΕΡΙΑ 1600 (Τρίτη Ήρα)	$\pm 5.6^{\circ}$
	ΑΓΙΑ ΤΡΙΔΑΔΑ	64.80	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ 22/5/1458	$\pm 3.7^{\circ}$
ΑΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ	130.73	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΙΕΡΟΥ - ΑΓΙΑ ΤΡΑΠΕΖΑ	ΕΟΡΤΗ 07/01/1682	$\pm 18.1^{\circ}$
	ΑΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	132.29	ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΙΕΡΟΥ - ΑΓΙΑ ΤΡΑΠΕΖΑ	ΕΟΡΤΗ 27/12/1350	$\pm 12.7^{\circ}$
ΔΟΥΤΙΑΝΗ	ΑΓΙΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ	138.70	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ 10/2/1398 (Τρίτη Ήρα)	$\pm 1.5^{\circ}$
ΠΑΝΑΓΙΑ	ΖΩΟΔΟΧΟΣ ΠΗΓΗ	58.73	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	-	-
	ΠΑΝΑΓΙΑ	100.18	ΒΑΣΙΚΟΣ ΑΞΩΝΑΣ	ΕΟΡΤΗ 15/8/1000	$\pm 2.2^{\circ}$



- Οι ναοί στην πλειοψηφία τους (79%) έχουν κατασκευαστεί προσανατολισμένοι στη διεύθυνση της ανατολής του ήλιου την ημέρα εορτής του Αγίου, στον οποίο είναι αφιερωμένοι.



- Σε μικρότερο ποσοστό (21%) ο προσανατολισμός τους σχετίζεται με την ημέρα της ισημερίας.
- Για την πλειοψηφία των ναών ισχύει ότι ο βασικός κατά μήκος άξονάς τους είναι στραμμένος σε συγκεκριμένη διεύθυνση (71%), ενώ σε μικρότερο ποσοστό (29%) προσανατολισμένη είναι μια άλλη ειδική διεύθυνση. Συγκεκριμένα η διεύθυνση της γραμμής, που ορίζεται από το μέσο του ανοίγματος που υπάρχει στο Ιερό Βήμα και το μέσο της Αγίας Τράπεζας, είναι στραμμένη σε συγκεκριμένο αξιούθιο.



- Ο προσανατολισμός όλων των ναών εξαρτάται άμεσα από τη θέση του αισθητού ορίζοντα που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του ναού, στη διεύθυνση του βασικού κατά μήκος άξονα ή της ειδικής διεύθυνσης.
- Σε δύο από τους ναούς, για τους οποίους δεν υπήρχαν συγκεκριμένα ιστορικά στοιχεία για το έτος κτίσης, έγινε χρονολόγηση, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία κατέληξε στον προσδιορισμό του έτους κτίσης, με αβεβαιότητες που κυμαίνονται από ±13 έως ±17 έτη, ενώ στους υπόλοιπους ναούς επιβεβαιώθηκε το έτος κτίσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εργασία αυτή αναδεικνύεται η συμβολή της Γεωδαισίας και της Αστρονομίας στη μελέτη του προσανατολισμού μνημείων. Διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι, που είναι απαραίτητες για τη διερεύνηση του προσανατολισμού μνημείων, είναι:

- ① Ο γεωμετρικός προσδιορισμός του βασικού κατά μήκος άξονα ή άλλης ειδικής διεύθυνσης.
- ② Ο προσδιορισμός του αστρονομικού αξιμουθίου του βασικού κατά μήκος άξονα ή της ειδικής διεύθυνσης.
- ③ Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της γραμμής του αισθητού ορίζοντα, ο οποίος βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του μνημείου ή του ναού.
- ④ Το αστρονομικό πλάτος (Φ) και το αστρονομικό μήκος (Λ) του τόπου με μια ακρίβεια $\pm 1'$ της μοίρας.
- ⑤ Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της πορείας του ήλιου ή οποιουδήποτε άλλου αστέρα σε κάποια χρονική περίοδο.
- ⑥ Η ημερομηνία εορτής της θεότητας στην οποία είναι αφιερωμένο το μνημείο.
- ⑦ Η χρονική περίοδος κτίσης του μνημείου.
- ⑧ Το ουράνιο σώμα σε σχέση με το οποίο είναι προσ-ανατολισμένο το μνημείο.

Γνωρίζοντας τις παραμέτρους ①, ②, ③, ④, ⑤, οι οποίες μπορούν να προκύψουν μόνο με την εφαρμογή γεωδαιτικών και αστρονομικών μετρήσεων, είναι δυνατόν:

- Αν είναι γνωστές οι παράμετροι ① και ②, μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια της τάξης των $\pm 50''$ ο προσανατολισμός του μνημείου.

- Αν είναι γνωστές οι παράμετροι ⑥ και ⑦, μπορεί να προσδιοριστεί το ουράνιο σώμα (⑧), σε σχέση με το οποίο είναι προσανατολισμένο το μνημείο.

- Αν είναι γνωστές οι παράμετροι ⑦ και ⑧, μπορεί να βρεθεί η θεότητα (ή ο άγιος) στην οποία είναι αφιερωμένο το μνημείο (⑥).

- Αν είναι γνωστές οι παράμετροι † και ^, μπορεί να προσδιοριστεί η χρονική περίοδος κτίσης (‡) του μνημείου.

Η τελική ακρίβεια, με την οποία μπορεί να επιτευχθεί η διερεύνηση του προσανατολισμού ενός μνημείου, κυμαίνεται από $\pm 55''$ έως $\pm 3.5''$. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η διαδικασία είναι ορθότερη και ακριβέστερη από αυτή που μέχρι σήμερα εφαρμοζόταν με τη χρήση τοπογραφικής πυξίδας, κλισμέτρου και ακοντίων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί επίσης να καλύψει και τις ανάγκες χρονολόγησης μνημείων, με αβεβαιότητα που κυμαίνεται θεωρητικά από ± 2 έτη έως ± 40 έτη και εξαρτάται καθοριστικά από τις διαστάσεις του μνημείου και το μέγεθος της μεταβολής της πορείας του ουράνιου σώματος που σχετίζεται με το μνημείο [10].

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στους ναούς της Μοναστικής Πολιτείας των Μετεώρων απέδειξε ότι οι ναοί αυτοί κατασκευάστηκαν κατά τη διαδικασία θεμελίωσής τους προσανατολισμένοι στην ανατολή του ήλιου στον ορίζοντα, την ημέρα εορτής του Αγίου στον οποίο αφιερώνονταν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγατάκη-Μπαλοδήμου Α.-Μ., «Θεωρία σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ», Αθήνα 2000, Διδακτικές σημειώσεις.
2. ESA, «The Hipparcos and Tycho Catalogues», ESA SP-1200, 1997.
3. Hoskin Michael, «Tombs, Temples and their orientations. A new perspective on Mediterranean Prehistory», Ocarina Books Ltd. 2001.
4. Κορακίτης Ρ., «Σημειώσεις Γεωδαιτικής Αστρονομίας», Ε.Μ.Π. Αθήνα 2000, Διδακτικές σημειώσεις.
5. Λάμπρου Ε., «Ανάπτυξη μεθοδολογίας αστρο-γεωδαιτικών προσδιορισμών με ψηφιακά γεωδαιτικά όργανα», Ε.Μ.Π. Αθήνα 2003, Διδακτορική διατριβή.
6. Liller Wm., «The Megalithic Astronomy of Easter Island: Orientations of AHU and MOAI», Archaeoastronomy, Τεύχος 13, JHA, xx, 1989, σελ. 21-48.
7. Marriot Chris, «Skymap Pro Version8», 1992-2001.
8. Meeus Jean, «Astronomical Algorithms», 1991.
9. Migne P.J. «Πατρολογία GRAECA», τόμος 1, σελ. 724-737, 1863.
10. Παντζής Γ., «Διερεύνηση του προσανατολισμού μνημείων με Γεωδαιτικές και Αστρονομικές μεθόδους. Εφαρμογή στα Μετέωρα.», Ε.Μ.Π. Αθήνα 2002, Διδακτορική διατριβή.
11. Papathanassiou Maria, Hoskin Michael, Papadopoulou Helen, «Orientations of tombs in the Late-Minoan Cemetery at Armenoi, Crete», Archaeoastronomy, Τεύχος 17, (JHA, xxiii), 1992, σελ. 43-55.
12. Papathanassiou Maria, «Archaeoastronomy in Greece: Data, problems and perspectives», 1994, In Trends in the Historiography of Science (eds) Kostas Gavroglu et al., σελ. 433-443.
13. Papathanassiou Maria, Hoskin Michael, «Orientations of the Greek Temples on Corfu», Archaeoastronomy, JHA, xxv, 1994, σελ. 111-114.
14. Σοφιανός Δ. «Η διαθήκη (έτους 1545) των κτιτόρων της Μονής Ρουσάνου εφοριονάχων Ιωάσαφ και Μαξίμου», Τρικαλινά 12, 1992.
15. Spence Kate, «Ancient Egyptian chronology and the astronomical orientation of pyramids», Nature, vol. 408, November 2000.

Δ. Δ. Μπαλοδήμος,

Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη, Ζωγράφου.

Γ. Παντζής,

Διδάκτορας Μηχανικός Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Τοπογραφίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Πολυτεχνειούπολη, Ζωγράφου.

Extended summary

Methodology for Investigating the Orientation of Monuments

G. PANTAZIS

Rural & Surveying Engineer N.T.U.A.
Dr Eng. N.T.U.A.

D. D. BALODIMOS

Professor N.T.U.A.

Abstract

The present paper deals with an astrogeodetic method for the determination of the orientation of monuments. The method allows for the dating of existing monuments (Greek Orthodox churches), by determining their orientation and correlating it with the date of their erection, as well as for the fast and accurate orientation of new churches. For the full investigation of the orientation of a monument a detailed Topographic Survey of the monument and the surrounding area must be produced and its main axis or any other specific axis must be traced and their Astronomic azimuth determined. Also for the dating of the monument it is necessary to determine the perceptible horizon in front of the monument and the apparent transit of the sun or some other star on a specific date related to the erection of the monument. The method is presented as well as the results obtained after its application to 16 churches in the "Meteora monastic community". The results prove that the orientation of these churches is related to the sunrise position on the horizon, on their celebration day of the year of their erection.

1. INTRODUCTION

The construction and positioning of a monument depends on its use, its function and the topography of the site.

Greek Orthodox churches are traditionally orientated in the East-West direction. More specifically, their main axis or some other important axes have this direction on the day of celebration of the saint to whom they are dedicated during the year of their erection.

Thus, the dating of a Greek Orthodox Church is closely related to the Sun's transit above the perceptible horizon in front of its altar on a specific date.

All over the world systematic efforts have been made for the determination and the interpretation of monuments orientation as some Egyptian temples, the Pyramids, megalithic monuments Ahu and Moai at Easter Island, tombs in Crete, ancient Greek temples on Corfu and many others.

The detection of a monument's orientation is currently carried out using simple metrical instruments, mainly a compass for the determination of the azimuth of its main

axis, without a full survey and a precise tracing of this axis. This procedure has the following weaknesses.

The main axis is not accurately traced

The azimuths are not accurate enough and definitely not Astronomic

The perceptible horizon in front of the altar is not surveyed.

The proposed procedure takes into account all the above mentioned parameters.

2. PROCEDURE

The setting for the investigation of a monument's orientation is depicted in figure 1.

The basic steps for the solution of the problem are the following:

Determination of the Astronomic azimuth of a direction AB. For the Greek latitudes, Astronomic azimuths may be determined with an uncertainty of $\pm 2^\circ$ by observations of Polaris, using a Total Station combined with a GPS receiver for the simultaneous recording of angles and UTC time.

Full Topographic Surveying of the site and monument. Drawing of its ground plan and transfer of the Astronomic azimuth to the monument's site. For this purpose a Geodetic Network should be installed and measured while all the detail points determined by precise Topographic methods in Cartesian coordinates. Measurements may be carried out using digital instruments (Total Station).

Determination of the Astronomic azimuth of the monument's main axis or some other specific axis. For this purpose it is not necessary to setup the axis on the ground as it may be carried out analytically from the coordinates of the ground plan with an uncertainty ranging from $\pm 0.5^\circ$ to $\pm 3^\circ$ depending on the length of the line whose orientation is determined.

Geodetic determination of the boundary line of the perceptible horizon in front of the altar (outline of mountains,

buildings etc). It may be achieved by measuring bearings and vertical angles from a point of the network to points of the line and reduction of these measurements to a point on the extension of the axis whose azimuth is being determined. The graphic representation of the reduced angles depicts the boundary line of the perceptible horizon in front of the altar. The uncertainty of the definition of a point on the perceptible horizon is of the order of $\pm 2^\circ$.

Tracing of the sun's or some other star's apparent transit from the site for the day of the celebration of the saint to whom the church is dedicated at several periods of time. It may be achieved, using the appropriate software, by digital simulation of the celestial sphere for the specific day and for the suspected years.

The dating eventually results from the common point of the boundary line of the perceptible horizon, the Sun's apparent transit and the vertical plane in the azimuth of the main axis or some other specific axis of the monument. The uncertainty of the dating of a Sun oriented monument may be expressed as the rate of the orientation error to the annual change of the sun's position, and ranges from ± 2 years to ± 40 years.

3. RESULTS - CONCLUSIONS

The contribution of Geodesy and Astronomy to the study of orientations of monuments is obvious, while by the proposed method it is possible:

To determine the orientation of a monument with an uncertainty of $\pm 50^\circ$.

To detect the celestial body used for the orientation of the monument.

To detect the divinity to whom the monument is dedicated.

To detect the period of time the monument was erected.

The total orientation error of a monument (table 1) ranges from $\pm 55^\circ$ to $\pm 3.5^\circ$. This error mainly depends on the size of the monument and on the position (distance) of the perceptible horizon in front of it.

The application of the method to 16 churches and chapels of the "Meteora Monastic Community" confirmed the theoretical analysis.

D. D. Balodimos,

Professor N.T.U.A., School of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of General Geodesy, 9, Heroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografou, Athens.

G. Pantazis,

Dr Eng. N.T.U.A., School of Rural and Surveying Engineering, Section of Topography, Laboratory of General Geodesy, 9, Heroon Polytechniou str., 157 80, N.T.U.A. Campus, Zografou, Athens.