Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ. ΜΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.

ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΔΟΥΚΑΣ[1], ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΡΩΣΣΙΚΟΠΟΥΛΟΣ[2]

[1] ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΑΤΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α.Π.Θ., ΠΑΝ. ΘΥΡΙΔΑ 465, GR-541 24
e-mail: jdoukas@civil.auth.gr

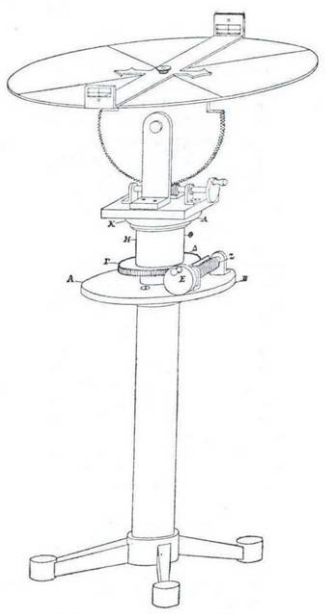
[2] ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Α.Π.Θ.

Η συστηματική ενασχόληση με την αστρονομία, τη γεωδαισία και τη χαρτογραφία από τους αρχαίους χρόνους είχε ως αποτέλεσμα τις εξελίξεις στο σχεδιασμό και την παραγωγή μετρητικών οργάνων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα όργανα μέτρησης των γωνιών, από τη διόπτρα του Ήρωνα ως το «σύγχρονο» θεοδόλιχο. Έμφαση δίνεται στις ακρίβειες μέτρησης των γωνιών, στα συστήματα ανάγνωσης και στους τρόπους βαθμονόμησης του μετρητικού δίσκου των οργάνων αυτών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρώτο όργανο με δίσκους για τη μέτρηση γωνιών που περιγράφεται σε κείμενο είναι η διόπτρα του Ήρωνα του Αλεξανδρέως, σημαντικό όργανο της ελληνιστικής εποχής, ανάλογο με το σημερινό θεοδόλιχο. Η κύκλοι της διόπτρας στις τοπογραφικές εφαρμογές δεν ήταν βαθμονομημένοι. Η χρήση της βασιζόταν στη χάραξη ορθών γωνιών και ευθυγραμμιών και στην κατασκευή ομοίων τριγώνων. Αυτή άλλωστε ήταν η τοπογραφική πρακτική από τα χρόνια του Θαλή και παλαιότερα ίσως, όπως φαίνεται να αναπτύχθηκε στην Αίγυπτο, στη Μεσοποταμία, στις Ινδίες και πιθανότατα στην Κίνα. Πρώτος ο Ίππαρχος κατασκεύασε βαθμολογημένα όργανα, ώστε να αυξήσει την ακρίβεια των παρατηρήσεων. Στα κείμενα του ο Πτολεμαίος περιγράφει επτά όργανα: **τη διόπτρα** (του Ίππαρχου), **τον αστρολάβο**, **την κρικωτή σφαίρα** (ή σφαιρικό αστρολάβο) για τη μέτρηση των θέσεων των αστέρων, **τον παραλλακτικό κανόνα** και **τον τετράντα** (γνωστός και ως τεταρτοκύκλιο ή πλινθίς) για τη μέτρηση κατακόρυφων γωνιών, **τον ισημερινό κύκλο** για τον προσδιορισμό του χρόνου των ισημεριών και **το μεσημβρινό ή τροπικό κύκλο** για τον προσδιορισμό του ύψους του ήλιου κατά τη μεσουράνηση. Από τα όργανα αυτά επινοήθηκαν και κατασκευάστηκαν από τον Πτολεμαίο ο σφαιρικός αστρολάβος και ο παραλλακτικός κανόνας, τα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκαν από τον Ίππαρχο και τους έλληνες αστρονόμους του 3ου π.Χ. αιώνα. Αποτέλεσαν όμως την πτολεμαϊκή παράδοση στην κατασκευή οργάνων που άρχισε τον 7° αι., όταν οι Άραβες ήλθαν σε επαφή με τον Ελληνικό πολιτισμό. Η εν λόγω παράδοση κυριάρχησε μέχρι τα χρόνια του Τύχο Μπράχε αλλά και αργότερα [7], [8], [10], [11].

Βαθμονομημένους δίσκους διέθεταν ο αστρολάβος, η κρικωτή σφαίρα, ο τετράντας, ο μεσημβρινός κύκλος και η διόπτρα του Ήρωνα που προορίζονταν για αστρονομικές μόνο παρατηρήσεις. Η χάραξη των κυκλικών τμημάτων γινόταν στο χέρι με απλές γεωμετρικές κατασκευές. Για παράδειγμα ο κύκλος χωριζόταν σε έξι τμήματα των 60°, στη συνέχεια το κάθε τμήμα σε δύο των 30° με διχοτόμηση, των 30° σε δύο των 15° και κάθε τμήμα των 15° χαρασσόταν με δοκιμές και επαναλήψεις. Η ακρίβεια ήταν ανάλογη της εμπειρίας και της ικανότητας του χαράκτη [3], [4].



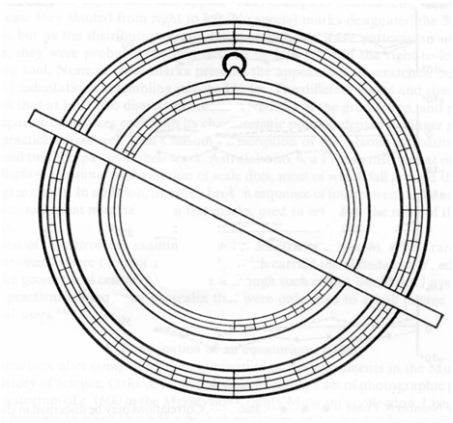
Εικ. 1. Η διόπτρα του Ήρωνος. Σχέδιο του Schöne από την έκδοση της Λειψίας του 1903. Οι δύο δείκτες κάθετοι στο σύστημα σκόπευσης είναι το μοιρογνωμόνιο.

Το διασημότερο όργανο στην ιστορία των οργάνων μέτρησης είναι ο αστρολάβος, όργανο που χρησιμοποιήθηκε έως και τον 17ο αιώνα. Η αρχή της κατασκευής του ανάγεται στον Ίππαρχο και βασίζεται στο ανάλημμα, τη στερεογραφική προβολή, την απεικόνιση σφαίρας πάνω σε επίπεδο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι γωνίες και οι αναλογίες των μηκών. Ήδη από το τέλος του 4ου αιώνα, ο αστρολάβος έχει τη μορφή που πρόκειται να διατηρήσει για την επόμενη χιλιετία, εφοδιασμένος με το τύμπανο, ένα δίσκο που φέρει τη στερεογραφική προβολή και αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο *κλίμα*, με τη δυνατότητα να αλλάζει και να προσαρμόζεται σε άλλα *κλίματα*, και την αράχνη, έναν άλλο δίσκο κομμένο προσεχτικά έτσι που να παρουσιάζει έναν περιστρεφόμενο χάρτη του ουρανού. Οι δύο αυτοί δίσκοι περιστρέφονται γύρω από ένα κοινό άξονα που παριστάνει τον άξονα του κόσμου. Η λειτουργία του οργάνου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, όταν περιστρέφεται ο δίσκος του ουράνιου χάρτη να δείχνει τη θέση οποιουδήποτε σημείου του ουρανού ως προς τη θέση του παρατηρητή. Ταυτόχρονα, ο παρατηρητής έχει την εικόνα του κόσμου και την άμεση γραφική λύση διαφόρων αστρονομικών προβλημάτων, όπως είναι η ανατολή και η δύση του ηλίου σε ορισμένο τόπο ή ορισμένη εποχή του έτους κ.λπ. Στο πίσω μέρος του, ο αστρολάβος φέρει βαθμονομημένους κύκλους και σκόπευτρο, για τη μέτρηση γωνιών, με ακρίβεια της τάξης των 5 έως 10 λεπτών της μοίρας. Αυτή ήταν και η ικανότητα χάραξης ενός κυκλικού δίσκου από τα χρόνια του Πτολεμαίου μέχρι και τα χρόνια του Κοπέρνικου [1], [10].

2. ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΣΤΡΟΛΑΒΟ ΣΤΟ ΘΕΟΔΟΛΙΧΟ

Στα χρόνια της Αναγέννησης ο αστρολάβος χρησιμοποιήθηκε καταρχήν στην αστρολογία. Στην αστρονομία αντικαταστάθηκε αρχικά από τα διάφορα πιο απλοποιημένα όργανα, όπως τα τεταρτημόρια, τους οκτάντες και τους εξάντες, που και αυτά αποσύρθηκαν με τη εμφάνιση του τηλεσκοπίου. Η χρησιμότητά του ως ρολόι έπαψε με την εμφάνιση των εκκρεμών και των μηχανικών ρολογιών. Παρά την "παρακμή" του ως αστρονομικό όργανο, ο αστρολάβος παρέμεινε σημαντικό όργανο για την τοπογραφία και για τη ναυσιπλοΐα καθ' όλη τη διάρκεια της αναγέννησης, καθώς με την εισαγωγή του τριγωνισμού στις αρχές του δέκατου έκτου αιώνα [6], προέκυψε η ανάγκη μέτρησης των "οριζόντιων" γωνιών.

Για τις νέες του εφαρμογές το όργανο υποβλήθηκε βαθμιαία σε αλλαγές, ώστε να γίνει καταλληλότερο, απλούστερο και ακριβέστερο. Τα αστρονομικά εξαρτήματα άρχισαν να εξαφανίζονται, η διάμετρος του δίσκου μεγάλωσε και τα μόνα κοινά μέρη με τους προδρόμους τους ήταν η διάταξη ανάρτησης, η σκοπευτική διάταξη και ο διηρημένος κύκλος. Για την εφαρμογή του στον *τριγωνισμό*, μια τεχνική που ανέπτυξε το 1533 ο Gemma Frisius, καθηγητής μαθηματικών στη Λουβέν, ο αστρολάβος τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση, πάνω σε μια ράβδο και οι παραλλαγές του οδηγήθηκαν βαθμιαία στην διόπτρα του Ήρωνα και στις αρχές των σύγχρονων θεοδόλιχων. Ο Gemma Frisius υπογράμμισε την ανάγκη για ακριβή μέτρηση των γωνιών και τον προσανατολισμό του οργάνου που πρό-



Εικ. 2. Χάραξη των υποδιαιρέσεων ενός αστρολάβου (εσωτερικό όργανο) με τη βοήθεια πρότυπου οργάνου (εξωτερικό όργανο). Η βαθμονόμηση τόξου αποτελούσε δύσκολη εργασία μέχρι τον 18° αι., όταν κατασκευάστηκαν οι πρώτες μηχανές βαθμονόμησης. Μία από τις παλαιότερες αναφορές βρίσκεται στο βιβλίο *Horologiographia; the art of dialing* (Λονδίνο, 1593) κάποιου Thomas Fale: Πρώτα το χωρίζουμε (το τεταρτοκύκλιο) σε τρία ίσα μέρη, και κάθε ένα από αυτά σε τρία ίσα μέρη, έτσι έχουμε εννέα τμήματα σε κάθε τεταρτοκύκλιο, που το κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί σε 10°. Το κάθε ένα από αυτά το χωρίζουμε σε 2 τμήματα και το κάθε τμήμα σε 5.

κειται να χρησιμοποιηθεί, καθώς και την οριζοντίωσή του. Η πρώτη προσθήκη ήταν η πυξίδα, που αρχικά τοποθετήθηκε στην άκρη του οργάνου.

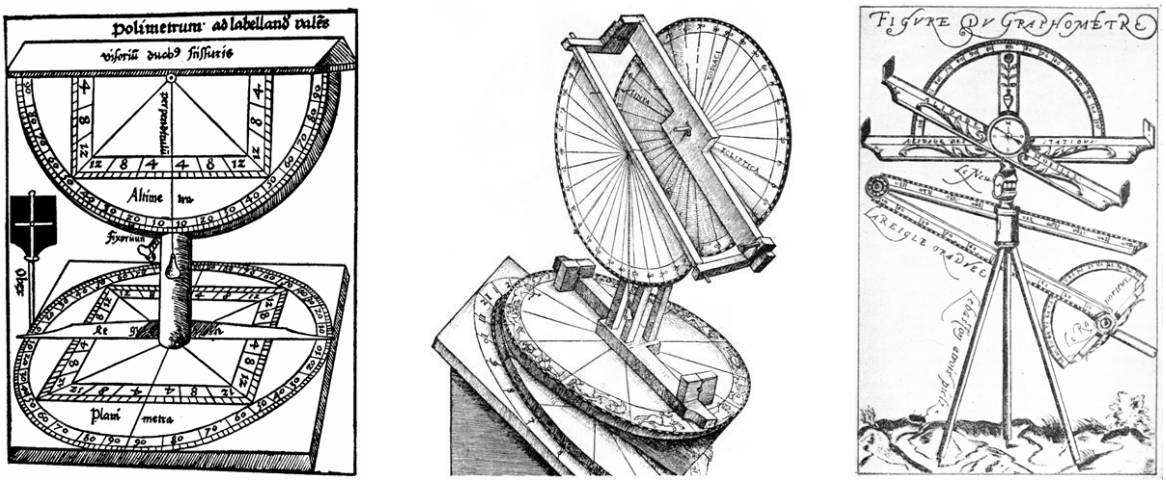
Το *theodelitus* του Leonard Digges, που περιγράφεται πρώτα το 1571, παρουσιάζει σαφώς σχέση με τον αστρολάβο. Μια πυξίδα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα ως βοηθητικό όργανο για τον προσανατολισμό. Παρόμοια όργανα είναι το *circumferentor* και ο *Ολλανδικός κύκλος* δύο κάπως νεότερες μορφές της τοπογραφικής πυξίδας, συνδυασμού δηλαδή του theodolitus, ή του "τοπογραφικού" αστρολάβου, και της πυξίδας.

Η πρώτη όμως εφαρμογή των αρχών του θεοδολίχου, ως οργάνου μέτρησης οριζόντιων και κατακόρυφων γωνιών, στα τοπογραφικά όργανα στην Ευρώπη, μετά από την διόπτρα του Ήρωνα, ήταν το *polymetrum* του Martin Waldseemüller, υπεύθυνου για τις αποτυπώσεις και την κατασκευή χαρτών του Gymnasium Vosagenes, ένα ξύλινο όργανο που περιγράφεται σε μια έκδοση του Margarita Philosophica (1512) του μοναχού Gregor (Gregorius) Reisch (1467-1525) και που επιμελήθηκε ο ίδιος ο Waldseemüller. Προηγήθηκε όμως το *torquetum* ή *turquet*, που θεωρείται επινόηση του Ισπανο-μουσουλμάνου αλ-Μπιτρουτζί προς το τέλος του 12αι, και χρησιμοποιήθηκε από τον Ρεγκιομάντους και τον Απιανό τα χρόνια της αναγέννησης. Το 1542 εμφανίστηκε το *διαφορικό τεταρτημόριο* του Rotz, κατασκευασμένο με τις αρχές του θεοδολίχου για ναυτική χρήση [7], [9], [10].

Το πολύμετρο του Waldseemüller φαίνεται να αγνοείται από τους επόμενους Ευρωπαίους γεωγράφους και τοπογράφους, οι οποίοι προφανώς ικανοποιήθηκαν με τη χρήση των πολυάριθμων παραλλαγών του αστρολάβου από κοινού με την πυξίδα, και αργότερα από τα τριγωνομετρικά όργανα και τη μετροτράπεζα. Το όργανο όμως που επρόκειτο πραγματικά να σημαδέψει τον δρόμο για το σύγχρονο θεοδόλιχο, αν και ήταν σε χρήση πιθανώς μερικά χρόνια προηγουμένως, το περιέγραψε αρχικά ο Digges το 1571 με τον τίτλο *"instrument topographicall"*.

Από την περιγραφή του Digges φαίνεται ότι το *"instrument topographicall"* ήταν μια σύνθεση προηγουμένων τοπογραφικών οργάνων. Οι οριζόντιες γωνίες καθορίστηκαν από τη θέση της διάταξης σκόπευσης σ' έναν βαθμονομημένο κύκλο (το theodelitus), εγγεγραμμένο σε ένα οριζόντιο τετραγωνιόμετρο. Για τη μέτρηση των κατακόρυφων γωνιών χρησιμοποιήθηκε ένα διπλό τεταρτημόριο, μέσα στο οποίο ήταν εγγεγραμμένο ένα διπλό τετραγωνιόμετρο. Ο προσανατολισμός του οργάνου γινόταν με τη βοήθεια πυξίδας.

Απαριθμώντας τα κύρια τοπογραφικά όργανα αυτής της περιόδου, ο άγγλος κατασκευαστής οργάνων Aaron Rathborne στο βιβλίο του *The Surveyor* (1611) αναφέρει τον θεοδόλιχο, τη μετροτράπεζα, την τοπογραφική πυξίδα, και ένα νέο όργανο που είναι δικής του επινόησης και το ονομάζει *Peractor*. Το όργανο αυτό διαφέρει από το θεοδόλιχο του Digges στο ότι έχει αντικαταστήσει το κατακόρυφο ημικύκλιο με ένα τεταρτοκύκλιο, που εκτός από τη βαθμονόμηση φέρει και τις γραμμές των ημιτόνων για την απευθείας ανα-

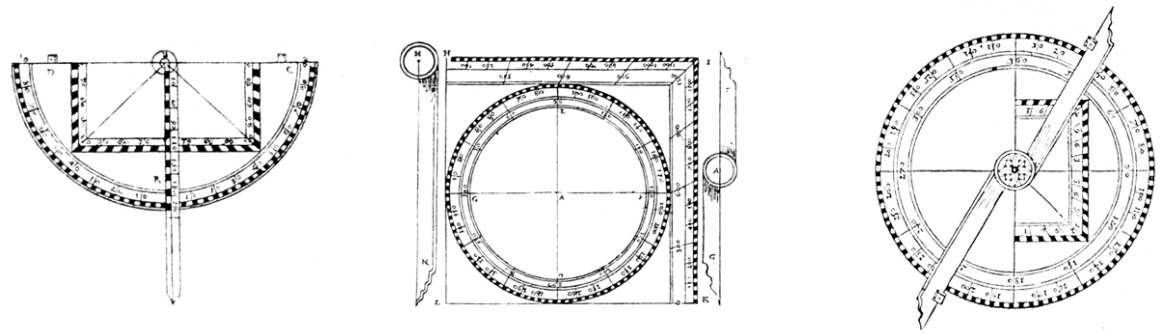


Εικ. 3. Το polymetrum του Waldseemüler, το πρώτο ευρωπαϊκό Torquetum Turquet από τον Apianus το 1540 και το graphometre το σημαντικότερο όργανο της συμμετοχής των γάλλων τοπογράφων του 17^{ου} αι. στην προσπάθεια κατασκευής ενός "universal" οργάνου (μέτρησης οριζοντίων και κατακορύφων γωνιών).

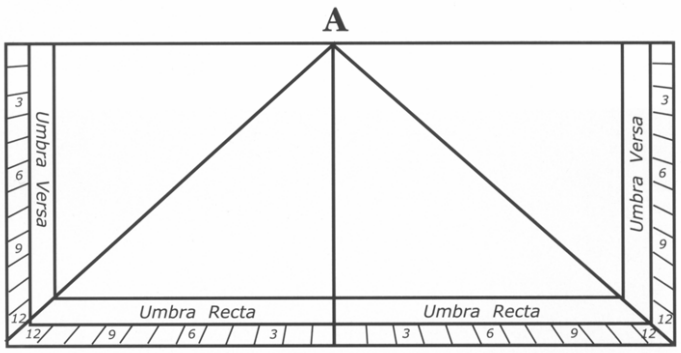
γωγή σε οριζόντιες των κεκλιμένων γραμμών, την απευθείας λήψη των υψών και γενικότερα, την απλοποίηση των σχετικών υπολογισμών.

Λίγα χρόνια αργότερα, ένας άλλος κατασκευαστής, ο Leybourn αναφέρει στο βιβλίο του *The Compleat Surveyor* (1653) και περιγράφει ως πιο συνήθη όργανα της εποχής του τον θεοδόλιχο, την τοπογραφική πυξίδα και τη μετροτράπεζα. Η περιγραφή του θεοδόλιχου αντιστοιχεί ουσιαστικά στο όργανο του Digges, όπου παραλείπεται το "γεωμετρικό τετράγωνο" και προστίθεται μια διαγώνια κλίμακα. Ο Leybourn παρουσιάζει και αυτός ένα δικό του όργανο το *Pandoron*, που θα αντικαταστήσει όπως ισχυρίζεται στο βιβλίο του το θεοδόλιχο, την τοπογραφική πυξίδα και το Peractor. Όμως, ούτε το Pandoron, ούτε το Peractor επέζησαν πολύ, αλλά τόσο στην Αγγλία όσο και στην υπόλοιπη Ευρώπη το τοπογραφικό όργανο του Digges, με διάφορες μικρές παραλλαγές, διαδόθηκε ως Theodolitus, όρος που τελικά χρησιμοποιήθηκε για τα όργανα μέτρησης οριζοντίων και κατακόρυφων γωνιών.

Το σημαντικότερο ίσως γαλλικό παράγωγο του αστρολάβου ήταν το *graphometre* του Danfrie. Σε αυτό το όργανο αντικαταστάθηκε ο οριζόντιος δίσκος από ημικύκλιο και προστέθηκε ένα ακόμη σταθερό σύστημα σκόπευσης. Το graphometre ήταν το κατ΄ εξοχήν τοπογραφικό όργανο στη Γαλλία κατά τη διάρκεια του δέκατου έβδομου αιώνα. Στη Γαλ-



Εικ. 4. Κάτω αριστερά το theodolitus του Diggest και δεξιά το instrument topographicall. Το όνομα theodolitus μεταφέρθηκε στο instrument topographicall και έτσι έχουμε την προέλευση της ονομασίας του θεοδόλιχου που θεωρείται εξέλιξη του instrument topographicall.



Εικ. 5. Το σκιοτετράγωνο, χαραγμένο στο πίσω μέρος του αστρολάβου για τη μέτρηση αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών. Αποτελεί μια διάταξη για την εύρεση της εφαπτομένης για (ζενίθιες) γωνίες μικρότερες των 45° στην κλίμακα *umbra recta* και της συνεφαπτομένης για γωνίες μεγαλύτερες των 45° στην κλίμακα *umbra versa*. Το σημαντικότερο τμήμα, για τις τοπογραφικές εφαρμογές, του αστρολάβου, του τετραγωνιόμετρου και του τετράντα.

λία επίσης εμφανίσθηκε το 1598 ένα άλλο όργανο, κατασκευασμένο από τον Henry de Suberville, το *Henry-metre*, όπου ο κατακόρυφος δίσκος αντικαταστάθηκε από ένα σύστημα ράβδων, εμπνευσμένο πιθανότατα από τον κανόνα του Πτολεμαίου [7], [9], [10].

Στα επόμενα χρόνια, το όργανο εξελίχθηκε με την εισαγωγή του τηλεσκοπίου, των ακριβέστερων διηρημένων κύκλων και των πιο εξελιγμένων συστημάτων ανάγνωσης, όπως το μικρόμετρο και ο βερνιέρος. Ο θεοδόλιχος, στη σύγχρονή του μορφή, αναπτύχθηκε βαθμιαία από την αρχική κατασκευή του Jonathan Sissons, ενός άγγλου κατασκευαστή μαθηματικών οργάνων, το 1730. Περί το 1775, ο Άγγλος εφευρέτης και κατασκευαστής οργάνων Jesse Ramsden (1735-1800) κατασκευάζει τον πρώτο θεοδόλιχο υψηλής ακριβείας που χρησιμοποιείται για την τριγωνομετρική ένωση της Αγγλίας με την ευρωπαϊκή ήπειρο [6]. Τον 19ο αι. εφαρμόζονται πολλές καινοτομίες, όπως εξελιγμένα συστήματα ανάγνωσης, οπτικά συστήματα κέντρωσης, συστήματα που επιτρέπουν την επανάληψη της μέτρησης σε διαφορετική περιοχή του οριζόντιου δίσκου, η δυνατότητα του τηλεσκοπίου να περιστρέφεται γύρω από τον οριζόντιο άξονα και να σκοπεύει σε κάθε διεύθυνση, κ.λπ. Στις αρχές του 20ου αιώνα ο Heinrich Wild ελάττωσε το μήκος του τηλεσκοπίου εισάγοντας έναν αρνητικό φακό μεταξύ του προσοφθάλμιου και του αντικειμενικού συστήματος, επινόησε τους γυάλινους βαθμολογημένους δίσκους με το οπτικό μικρόμετρο για την ανάγνωσή τους και σχεδίασε το σύγχρονο θεοδόλιχο. Ο σχεδιασμός του συστήματος ανάγνωσης των αντιδιαμετρικών ενδείξεων των δίσκων αρχίζει το 1907 από τον Wild, δεν υλοποιείται όμως μέχρι το 1920. Το 1923 κατασκευάστηκε ο πρώτος θεοδόλιχος, το Wild Th1 που αργότερα ονομάσθηκε Wild T2, με το ελαφρύτερο και το ισχυρότερο τηλεσκόπιο, με τους γυάλινους δίσκους, με το μικροσκόπιο με μικρόμετρο στο σύστημα ανάγνωσης, με το σύστημα αντιδιαμετρικών αναγνώσεων και με τις φυσαλίδες που έπρεπε να έλθουν σε σύμπτωση στον κατακόρυφο δίσκο [5], [8].

Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο κυριαρχούν στην Ευρώπη τα Γερμανικά, Ελβετικά και Ιαπωνικά τοπογραφικά όργανα. Οι θεοδόλιχοι στην περίοδο 1950-1980 παραμένουν οι ίδιοι, στα πρότυπα του θεοδολίχου του Wild, με μικρές βελτιώσεις στο σύστημα ανάγνωσης και με σημαντικότερη αλλαγή, το σύστημα αυτόματης κατακορύφωσης. Οι σημαντικές αλλαγές σχετίζονται με την ψηφιακή περίοδο των τοπογραφικών οργάνων, μετά το 1980, όπου οι λεγόμενοι πλέον **γεωδαιτικοί σταθμοί**, ενιαία ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης γωνιών και αποστάσεων, αγγίζουν την τελειότητα από την άποψη της ακριβείας, της ευκολίας χειρισμών καθώς και του κόστους.

3. ΤΟ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΟ ΩΣ ΣΚΟΠΕΥΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΑ ΓΩΝΙΟΜΕΤΡΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

Η επινόηση του τριγωνισμού, η επιστροφή στη γεωδαισία και η συστηματική ενασχόληση με την αστρονομία είχαν ως αποτέλεσμα τις εξελίξεις στο σχεδιασμό και την παραγωγή

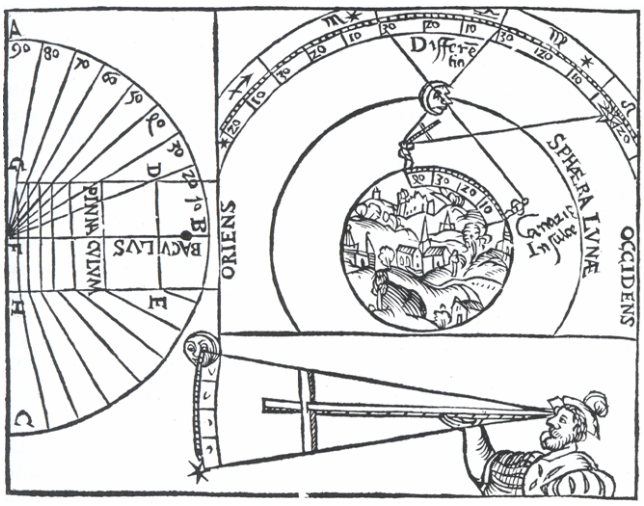
συνεχώς ακριβέστερων μετρητικών οργάνων. Οι εξελίξεις αυτές κατέστησαν αναπόφευκτη την τελική εφεύρεση του τηλεσκοπίου και την ευρύτατη διάδοση της χρήσης του. Ο όρος "τηλεσκόπιο" προτάθηκε το 1612 από τον Έλληνα μαθηματικό Ιωάννη Διμιζιάνη, γραμματέα Ιταλού Καρδιναλίου, αλλά καθιερώθηκε ύστερα από πολλά χρόνια. Ως τότε ονομάζονταν "οπτικός σωλήνας".

Το σύγχρονο διοπτρικό τηλεσκόπιο στηρίζεται στο τηλεσκόπιο τού Γαλιλαίου, τροποποιημένο όμως κατά τις υποδείξεις τού συγχρόνου του Johannes Kepler (1571-1630). Στο τηλεσκόπιο του Kepler το είδωλο έπεφτε στο κοινό εστιακό επίπεδο των δύο φακών και μπορούσε να παρατηρηθεί από τον προσοφθάλμιο φακό, που λειτουργούσε ως μικροσκόπιο. Η ιδιότητα αυτή ήταν πολύ σημαντική για την εφαρμογή του στη συνέχεια ως σκοπευτική διάταξη στα γεωδαιτικά και αστρονομικά όργανα με την τοποθέτηση σταυρονήματος πάνω στο εστιακό επίπεδο. Με την επακριβή ταύτιση του παρατηρούμενου ειδώλου του στόχου μέσω του προσοφθαλμίου προς το ταυτόχρονα ορατό σημείο τομής των νημάτων του σταυρονήματος, ο παρατηρητής προσδιορίζοντας τη διεύθυνση του τηλεσκοπίου, προσδιορίζει και τη θέση του στόχου με μεγάλη ακρίβεια.

Γύρω στα 1640 ένας Άγγλος ερασιτέχνης αστρονόμος ο William Gascoigne (1612-1644) παρατήρησε μια αράχνη που είχε γνέσει τον ιστό της πάνω στο εστιακό επίπεδο του τηλεσκοπίου του και ο ιστός αυτός εμφανίστηκε πάνω στην εικόνα των άστρων. Αντιλήφθηκε πως ένα σημείο ή ένα σταυρόνημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ορίζει το κέντρο του οπτικού πεδίου, έτσι ώστε το τηλεσκόπιο να μπορεί να ευθυγραμμιστεί ακριβώς προς το στόχο και να χρησιμοποιηθεί ως σκοπευτική διάταξη σε ένα οποιοδήποτε από τα παραδοσιακά αστρονομικά όργανα. Επιπλέον, μια μετρητική συσκευή, ένα μικρόμετρο, θα μπορούσε να εισαχθεί στο εστιακό επίπεδο και να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση μικρών γωνιακών αποστάσεων και των φαινόμενων διαμέτρων των πλανητών. Ο ίδιος ο Gascoigne κατασκεύασε και τα δύο συστήματα. Το προσοφθάλμιο μικρόμετρό του ήταν ένα περίπλοκο όργανο, αποτελούμενο από παράλληλες κόγχες κινητές με τη βοήθεια δύο αντιταγμένων βιδών, των οποίων η μετατόπιση καταγραφόταν από έναν δείκτη κινητό πάνω σε έναν βαθμολογημένο δίσκο [1], [2], [10].

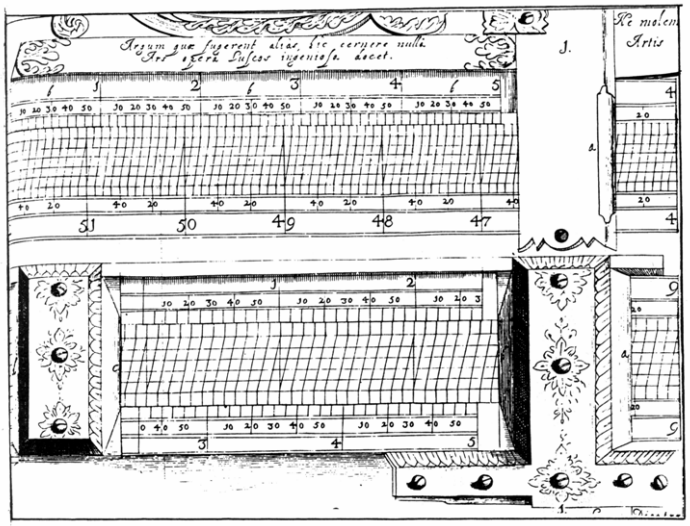
Δυστυχώς ο Gascoigne σκοτώθηκε στη μάχη της Μάρστον Μουρ, κατά τον εμφύλιο πόλεμο στην Αγγλία, η εργασία του όμως ήταν ήδη γνωστή στον κύκλο των συναδέλφων του. Η τεχνική του εφαρμόστηκε στην Αγγλία το 1650 από τον Christopher Wren και τον φυσικό, αστρονόμο και κατασκευαστή οργάνων, γνωστό από τη διατύπωση του φερώνυμου νόμου της ελαστικότητας, Robert Hooke.

Στο μεταξύ, το 1659 ο Huygens παρουσίασε στο βιβλίο του *Systema Saturnium* μια νέα μορφή προσοφθάλμιου μικρομέτρου. Εισήγαγε μια λεπτή, μεταλλική πλάκα σχήματος τραπεζίου στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού, και το ποικίλο πλάτος της χρησιμοποιήθηκε ως μετρητής της φαινόμενης γωνιακής απόστασης.



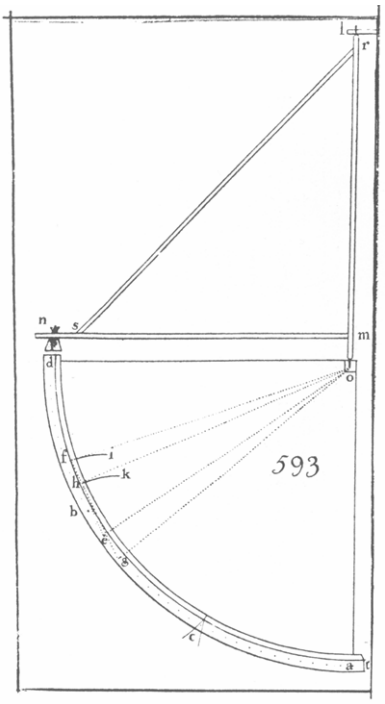
Εικ. 6. Ο εγκάρσιος πήχης σε αστρονομικές (radius astronomikus) και σε τοπογραφικές εφαρμογές (radius geometricus) για τη μέτρηση αποστάσεων και υψομετρικών διαφορών. Από το εξώφυλλο του βιβλίου *Introductio Geographico Petri Apiani in Doctissimas Vermeri* (1533). Η μέτρηση της απόστασης μεταξύ της σελήνης και ενός αστέρα σχετίζεται με το πρόβλημα του προσδιορισμού του γεωγραφικού μήκους.

Άλλες μορφές προσοφθαλμίου μικρομέτρου αναπτύχθηκαν στο Παρίσι από γάλλους κατασκευαστές οργάνων, ανάμεσά τους και ο Jean Picard. Ο Picard εκτός από την κατασκευή του μικρομέτρου, τοποθέτησε και το σταυρόνημα στο τηλεσκόπιο και ήταν ο πρώ-



Εικ. 7. Αριστερά: Η κλίμακες και συστήματα ανάγνωσης των αστρονομικών οργάνων του Hevelius. Από το βιβλίο του, Machina Coelestis (1674).

Εικ. 8. Κάτω: Τετράντας του Graham υπό κατασκευή στον πάγκο βαθμονόμησης, από το βιβλίο του R. Smith, *Compleat System of Optics* (Κέμπριτζ, 1738). Το εξάρτημα "P" στην άκρη του περιστρεφόμενου περί το κέντρο βραχίονα m-n, γυαλίζει το κυκλικό τόξο του τετράντα. Αμέσως μετά την βαθμονόμηση. Ο κατακόρυφος άξονας m-r αγκυρώνεται στην οροφή του δωματίου.

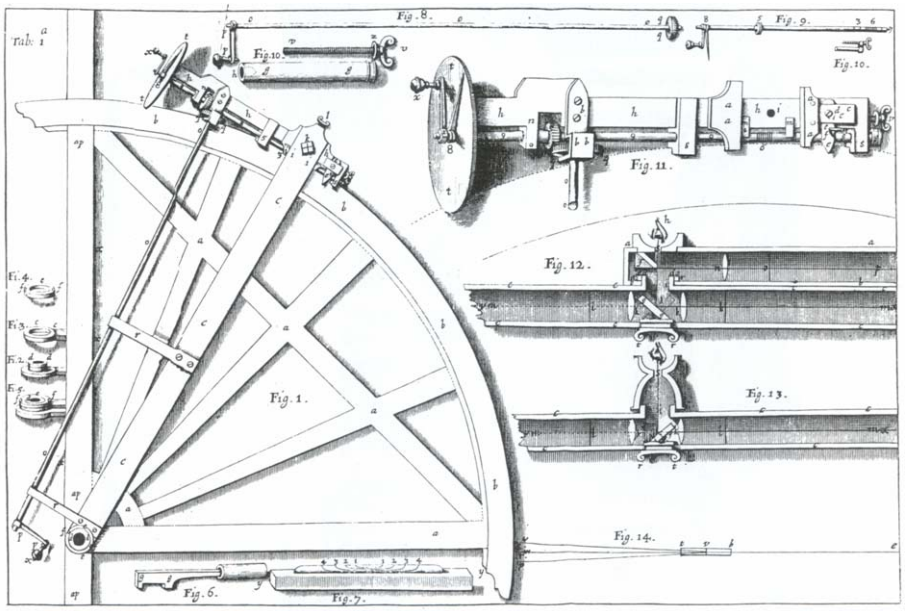


τος που το εφάρμοσε σε αστρονομικό γωνιομετρικό όργανο ως σκοπευτική διάταξη. Η ημερομηνία της πρώτης αυτής εφαρμογής δεν είναι ακριβώς ορισμένη, όλοι όμως οι ιστορικοί συμφωνούν για το έτος 1667. Ακολούθησε η εφαρμογή του σε φορητούς τετράντες για γεωδαιτικές παρατηρήσεις. Με την προσθήκη του σταυρονήματος το τηλεσκόπιο έγινε το σημαντικότερο μετρητικό όργανο. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν μικροσκόπιο εφοδιασμένα με προσοφθάλμια μικρόμετρα για τη λήψη αναγνώσεων από τη μετρητική κλίμακα των οργάνων.

Η πρώτη σημαντική πρόοδος στο σχεδιασμό του γεωδαιτικού τηλεσκοπίου έγινε το 1758 με την εισαγωγή από τον Άγγλο κατασκευαστή John Dollond του αχρωματικού στόχου, επιτρέποντας κατά συνέπεια την κατασκευή μικρότερων κατοπτρικών τηλεσκοπίων.

Πριν από την εισαγωγή της εσωτερικής εστίασης, τα τηλεσκόπια των γεωδαιτικών οργάνων εστίαζαν μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του διαφράγματος, μετακινώντας το ένα ή το άλλο ή και τα δύο συστήματα. Αυτό το σύστημα είχε σημαντικά μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα κακή εστίαση σε κοντινές σκοπεύσεις, κακή ισορροπία του οργάνου εξαιτίας της μεταβολής του μήκους του τηλεσκοπίου και η δυσκολία να προφυλαχτεί από την υγρασία και τη σκόνη το εσωτερικό του τηλεσκοπίου.

Λίγο πριν από το θάνατό του το 1800, ο Jesse Ramsden βελτίωσε πολύ το τηλεσκόπιο εξωτερικής εστίασης για τα τοπογραφικά όργανα, όπως έκανε και ο Short και ο Adams. Ο Gravatt το 1835 είχε μια περαιτέρω συμβολή με τον υπολογισμό ενός οπτικού συστήματος που επέτρεψε να κατασκευαστούν πολύ μικρότερα σε μήκος τηλεσκόπια. Το 1823 ο Ιταλός Porro εισήγαγε στο τηλεσκόπιο ειδικό φακό, καταφέρνοντας να φέρει σε σύμπτωση το ανάλλακτο σημείο του με τον άξονα περιστροφής. Η κατασκευή του πρώτου τηλεσκοπίου εσωτερικής εστίασης έγινε από τον Heinrich Wild, ο οποίος το 1908 ελάττωσε το



Εικ. 9. Τετράντας κατασκευασμένος από τον Robert Hooke με μικροβατικό κοχλία για τη βαθμονόμηση του τόξου. Στις επιμέρους εικόνες δίνονται σε πιο αναλυτικά σχήματα όλα τα εξαρτήματα του τετράντα.

μήκος του τηλεσκοπίου εισάγοντας έναν αρνητικό κινητό φακό μεταξύ του προσοφθάλμιου και του αντικειμενικού συστήματος. Κατ' αυτό τον τρόπο το τηλεσκόπιο πήρε τη σύγχρονή του μορφή, μικρού μήκους, και ολόκληρο το σύστημα έγινε αναλλατικό, αδιάβροχο και προστατευμένο από τη σκόνη [3], [5], [10].

4. ΟΙ ΜΗΧΑΝΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Η πρώτη μηχανή βαθμονόμησης κατασκευάστηκε το 1674 από Robert Hooke για τη χάραξη των υποδιαιρέσεων της κλίμακας ενός μεγάλου αστρονομικού τετράντα. Στη μηχανή του ο Hooke χρησιμοποίησε τον κοχλία ακριβείας, που αποτέλεσε τεχνολογική επανάσταση στην εποχή του, για να προωθήσει τον γραφέα της μηχανής από μια γραμμή της κλίμακας του οργάνου στην επόμενη. Η πρώτη μηχανική συσκευή χάραξης ολόκληρης της περιφέρειας του κύκλου, που ήταν στην ουσία μια βελτίωση της μηχανής του Hooke, κατασκευάστηκε από τον ωρολογοποιό Henry Hindley το 1738. Στη συνέχεια, διαιρετικές μηχανές κατασκευάστηκαν το 1750 από τον Daniel Ekstrom στη Στοκχόλμη και από τον Georg Brander στο Άουσμπουργκ. Ο Due de Chaulnes έφτιαξε διάφορες μηχανές από το 1760, με χαρακτηριστικό στοιχείο ένα μικροσκόπιο για την αντιγραφή των υποδιαιρέσεων ενός πρότυπου κύκλου πάνω στο κύκλο που χάρασσε. Ο Bird, αναγνωρισμένος τεχνίτης βαθμονόμησης τόξων δια χειρός, χρησιμοποιούσε πρότυπο κύκλο και διαβήτη. Το 1767 δημοσίευσε μια εργασία για ένα σύστημα βαθμονόμησης οργάνων.

Αν και οι μηχανές βαθμονόμησης προήλθαν από τις μηχανές κοπής γραναζιών των ωρολογοποιών, για την ανάπτυξή τους το κυρίαρχο ρόλο έπαιξαν τα μυθικά βραβεία που προσφέρθηκαν από τις ευρωπαϊκές κυβερνήσεις στις αρχές του δέκατου όγδοου αιώνα για τη λύση του προβλήματος του προσδιορισμού το γεωγραφικού μήκους στα ταξίδια προς τις αποικίες. Αυτά τα βραβεία υποκίνησαν και την κατασκευή των θαλασσίων χρονομέτρων από τον John Harrison (1736, 1759) και τους Pierre LeRoy και Ferdinand Berthoud (1763). Μετά τον προσδιορισμό του μήκους, οι κατασκευαστές οργάνων συνειδητοποίησαν ότι οι νέες τεχνικές πλοήγησης απαιτούσαν εξάντες ή οκτάντες υψηλής ακριβείας στο σύστημα ανάγνωσης, και ότι διαιρέσεις κύκλων υψηλής ακριβείας θα μπορούσαν να γί-

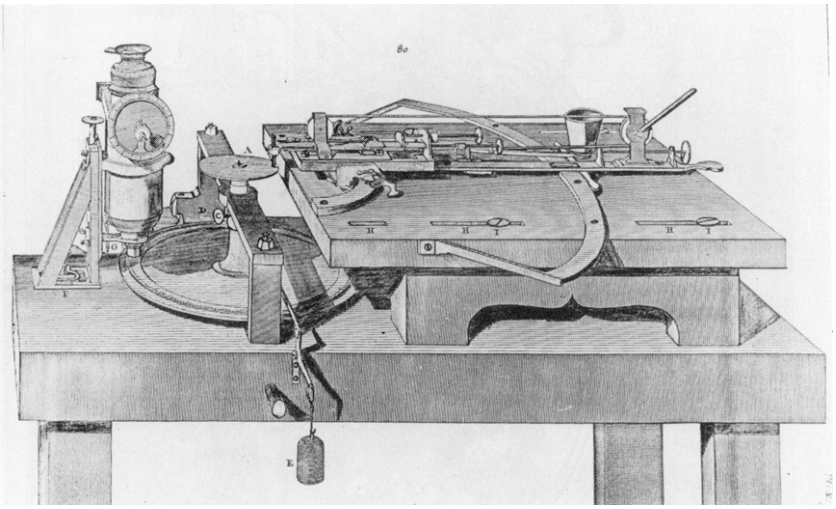
νουν σε ένα λογικό χρόνο μόνο με μηχανικά μέσα. Παρόλα αυτά, οι κύκλοι των μεγάλων οργάνων των αστεροσκοπείων συνέχιζαν να διαιρούνται με το χέρι μέχρι τα μέσα του 19ου αι., όταν αντικαταστάθηκαν με κύκλους μικρότερης διαμέτρου [1], [2], [10].

Η πρώτη μηχανή του Jesse Ramsden ολοκληρώθηκε το 1766. Το 1777 ο Ramsden επανασχεδίασε τη μηχανή αυτή με πιο αυστηρά κριτήρια, χρησιμοποιώντας τα τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής του και κέρδισε το βραβείο των 6,000 λιρών της Επιτροπής του Γεωγραφικού Μήκους καθώς και το δικαίωμα να χαράζει τα τόξα των ναυτικών οργάνων των Άγγλων κατασκευαστών. Η νέα μηχανή, με δίσκο διαμέτρου 45 ιντσών, αποτέλεσε σταθμό στην ιστορία χάραξης των διηρημένων κύκλων των θεοδόλιχων και των άλλων αστρονομικών και ναυτικών οργάνων. Ο John Troughton κατασκεύασε παρόμοια μηχανή το 1778 και ο αδελφός του Edward μια βελτιωμένη μηχανή το 1783, χρησιμοποιώντας την αρχή του Chaulnes.

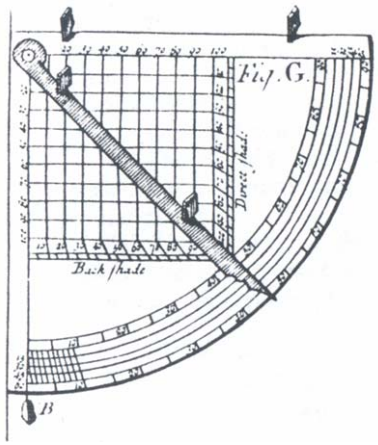
Μέχρι και το πρώτο μισό του 19ου αι. κατασκευάστηκαν περίπου 60 μηχανές βαθμονόμησης, με υψηλότερη ακρίβεια ενός δευτερολέπτου. Στο διάστημα αυτό μελετήθηκαν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του βαθμονομημένου κύκλου, όπως το μέταλλο του δίσκου ανάγνωσης, η θερμοκρασία της μηχανής και του δίσκου, η φθορά των γραναζιών, σφάλματα εκκεντρότητας κ.λπ.

Η λειτουργία των μηχανών αυτών βασίζεται σ' ένα σύνολο οδοντωτών τροχών, οι οποίοι ορίζουν το βήμα της μηχανής ανάλογα με την ακτίνα του κύκλου που πρόκειται να υποδιαιρεθεί. Ο κυκλικός δακτύλιος που επρόκειτο να χαραχθεί, συνήθως από ασήμι ή λευκόχρυσο, ήταν τοποθετημένος πάνω σε οριζόντιο δίσκο από ορείχαλκο, που στρεφόταν γύρω από κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε η επιφάνεια που κυκλικού δακτυλίου να βρίσκεται μπροστά από ειδική ακίδα από σκληρό μέταλλο. Ο κύκλος περιστρέφεται σταματώντας περιοδικά σε σταθερούς χρόνους και τότε η ακίδα που κινείται στη διεύθυνση της ακτίνας του κύκλου χαράζει τη γραμμή της κλίμακας. Το 1848 ο William Simms αυτοματοποίησε την περιστροφή του δίσκου και την κίνηση της ακίδας. Σύμφωνα με τον Simms *"η αντιγραφή των διαιρέσεων ενός κύκλου μεγάλης διαμέτρου, που έχει βαθμονομηθεί με ειδική επιμέλεια, πάνω σε κύκλο μικρότερης διαμέτρου, έχει καλύτερα αποτελέσματα από την πρωτότυπη βαθμονόμησή του"*.

Η ιδιαίτερη δυσκολία στη διαίρεση ενός ολόκληρου κύκλου σε ίσα τόξα βρίσκεται στο γεγονός ότι το οποιοδήποτε μικρό σφάλμα στο βήμα της μηχανής εξαιτίας της φθοράς των δοντιών του οδηγού δίσκου και των γραναζιών συσσωρεύεται στο τελευταίο διάστημα. Η δυσκολία αυτή καθιστούσε τις μηχανές ακατάλληλες να βαθμονομήσουν τους δίσκους των μικρών οργάνων. Το πρόβλημα των κατασκευαστών ήταν να κατανείμουν το σφάλμα του βήματος σε όλη την περιφέρεια. Το 1803 ο Γερμανός Reichenbach κατασκεύασε στο



Εικ. 10. Εικόνα της πρώτης μηχανής βαθμονόμησης τόξου από το βιβλίο του Duc du Chaulnes, *Nouvelle méthode pour diviser*, 1768.



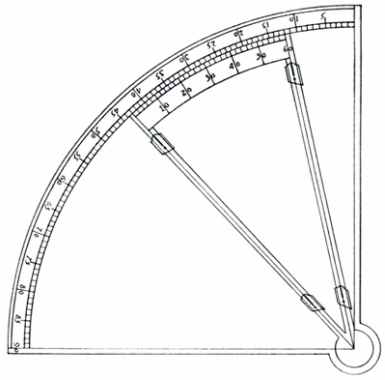
Εκ. 11. Τετράντας με διπλό σύστημα σκόπευσης, από το βιβλίο του Nicholas Bion *Traite de la construction et des principaux usages des instrumens de mathematique*, Στην άκρη του βαθμολογημένου κύκλου φαίνεται και το σύστημα των εγκάρσιων γραμμών του Tycho Brahe.

Μόναχο μια μηχανή βαθμονόμησης κύκλων βασισμένη στην αρχή της αντιγραφής του Chaulnes. Το 1830 ο Andrew Ross σχεδίασε μια μηχανή βασισμένη σε μια εξ ολοκλήρου νέα αρχή, πετυχαίνοντας τη χάραξη με ακρίβεια τετάρτου του δευτερολέπτου.

5. ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΣΚΩΝ

Στις αρχές του 18ου αι. δύο διαφορετικά συστήματα ανάγνωσης των κύκλων των οργάνων που επιτρέπουν αυξημένες ακρίβειες ήταν ήδη γνωστά: ο βερνιέρος και το μικροσκόπιο με προσοφθάλμιο μικρόμετρο. Ο βερνιέρος είχε εφευρεθεί όπως έχουμε δει από τον Pierre Vernier το 1631, αλλά δεν εφαρμόσθηκε στα γεωδαιτικά όργανα πριν από τον 18 αι. [1], [3], [6], [10].

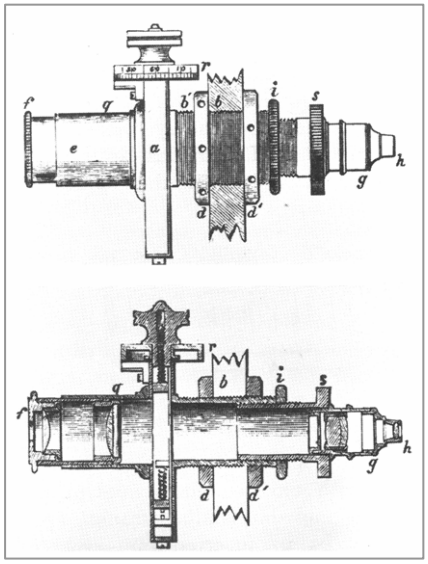
Το πιο ενδιαφέρον ίσως στοιχείο στην ιστορία του τετράντα είναι το γεγονός ότι ήταν το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ως βάση δοκιμής των διαφόρων συσκευών που επινοήθηκαν για να διευκολύνουν την ανάγνωση με ακρίβεια της γωνιομετρικής κλίμακας. Ο πρώτος στην προσπάθεια για τη λύση αυτού του σημαντικού προβλήματος είναι ο μαθηματικός, αστρονόμος και γεωγράφος (καλούμενος και «κοσμογράφος») Pedro Nunez (1502-1578 ή 1492-1577), η σημαντικότερη μορφή στην ιστορία της ναυτικής τεχνολογίας στην Πορτογαλία, γνωστός για τις μελέτες τις σχετικές με τη χαρτογράφηση των Ωκεανών. Στο έργο του De Crepusculis, (Λισσαβόνα 1542), η λύση του αναφέρεται στις αναγνώσεις ενός ναυτικού αστρολάβου, χρησιμοποίησε όμως μόνο το πάνω αριστερό τεταρτοκύκλιο του οργάνου αυτού. Το σύστημα ανάγνωσης που περιγράφει ο Nunez (που αργότερα ονομάσθηκε nonius από το λατινικό όνομα του Nunez, Nonius) είναι αρκετά πολύπλοκο. Αποτελείται από 45 ομόκεντρα τεταρτοκύκλια/κλίμακες, από τα οποία το πρώτο (ξεκινώντας από τη μικρότερη ακτίνα) είναι βαθμολογημένο σε 46 μέρη, το δεύτερο 47, κ.λπ., το τελευταίο σε 90. Γενικά, εάν m είναι η ένδειξη της σκόπευσης στο q τεταρτοκύκλιο (που διαιρείται σε q μέρη), τότε η γωνία ύψους δίνεται σε βαθμούς από τη σχέση 90 m/q.



Αν και η χρήση του nonius είναι απλή, το σύστημα αυτό
μοφιλές, λόγω της δυσκολίας στη χάραξη τόσων πολλών τ
μόνος που κατασκεύασε τετράντα με το σύστημα nonius, το
μέθοδος nonius είναι ανεπαρκής στην πράξη, και η εμπειρία
βεια δεν εξασφαλίζεται στην πραγματικότητα". Ο Brahe εφ
των οργάνων του στο Ουράνιμποργκ τη διαγώνια ή εγκάρσ
ότι την είδε για πρώτη φορά σε όργανο το 1564 και αποδ
Homelius και Scultetius, αν και ο Robert Hooke αναφέρει ό
Cantzlar. Η πατρότητα όμως της τεχνικής αυτής είναι άγνω

Instituto e Museo di Storia della Scienza υπάρχει αστρολάβος ο οποίος είναι κατασκευασμένος το 1483 και βαθμολογημένος με τη μέθοδο των εγκάρσιων βαθμών.

Οι σημαντικές όμως εξελίξεις, που συνεχίστηκαν από τον γερμανούς μαθηματικούς Cristopher Clavius και Johannes Curtius οδήγησαν τελικά στην ανάπτυξη του βερνιέρου στη μορφή που υπάρχει και σήμερα. Προσπάθησαν να απλοποιήσουν το σύστημα ανάγνωσης nonius μειώνοντας τον αριθμό των ομόκεντρων ημικυκλίων, αλλά και διαιρώντας τα σε αριθμό ίσων μερών τέτοιον, ώστε η διαίρεση να προκύψει με την εφαρμογή συνεχών διχοτομήσεων (όπως ο αριθμός 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1). Ο Clavius τελικά πρότεινε να σχεδιασθεί η αναλογική κλίμακα σε ένα βοηθητικό τεταρτοκύκλιο με ακτίνα ίση με αυτήν της κύριας κλίμακας του τετράντα, και τέτοια ώστε το εύρος των 61 βαθμών να τη διαιρεί σε 60 ίσα μέρη, όπου θα διαβάζονται τα υπόλοιπα λεπτά με τη βοήθεια ενός διαβήτη. Το τελικό βήμα το έκανε ο Γάλλος μαθηματικός Pierre Vernier (1580-1637) και δημιούργησε το 1631 τον βερνιέρο, ενώνοντας τη βοηθητική κλίμακα του Clavius με το σκοπευτικό κανόνα του τετράντα, έτσι ώστε οι δύο κλίμακες να μπορούν να διαβαστούν ταυτόχρονα, η μια σε σχέση με την άλλη [1], [2], [10].



Εκ. 12. Το προσοφθάλμιο μικρόμετρο του μικροσκοπίου ανάγνωσης του Edward Troughton, (1791).

Ο βερνιέρος αγνοείται όλον τον 17ο αι. και ο πρώτος μεγάλος αστρονόμος που τον χρησιμοποίησε ήταν ο Hevelius, περίπου το δεύτερο τέταρτο του 18ου αι., εποχή που αρχίζει να αναπτύσσεται η τεχνολογία κατασκευής οργάνων. Από το 1786 ο John Smeaton υποστηρίζει την εγκατάλειψη του βερνιέρου και την αντικατάστασή του από το μικρόμετρο. Το 1805, ο Άγγλος εφευρέτης και κατασκευαστής μηχανών Henry Maundsley (1771-1831) κατασκευάζει το πρώτο μικρόμετρο με αναγνώσιμη ακρίβεια 1/10,000 της ίντσας [6].

Τα μειονεκτήματα του βερνιέρου ήταν το απαιτούμενο μεγάλο τόξο και η χαμηλή ακρίβεια στην ανάγνωση του δίσκου εξαιτίας της δυσκολίας στη σύμπτωση και της διαφοράς φωτισμού στα δύο όρια της χαραγής. Όταν αυξήθηκαν οι απαιτήσεις ακριβείας στο σύστημα ανάγνωσης, μετά το τηλεσκόπιο και την ανάπτυξη των μηχανών βαθμονόμησης, ο βερνιέρος δεν χρησιμοποιήθηκε τόσο ως μέσο μέτρησης των κλασματικών μερών ενός κύκλου. Διατηρήθηκε μόνο στα όργανα χαμηλότερης τάξης, εξαιτίας του χαμηλού σχετικά κόστους.

Η απάντηση στις μετρήσεις ακριβείας ήταν η επαναληπτική μέθοδος, η κατασκευή του επαναληπτικού κύκλου του Borda τον 17ο αι. και του πρώτου επαναληπτικού θεοδολίχου, που κατασκευάστηκε από τον Γερμανό Reichenbach. Τόσο ο επαναληπτικός κύκλος, όσο και ο επαναληπτικός θεοδόλιχος, χρησιμοποιούν βερνιέρο στο σύστημα ανάγνωσης, οι μετρήσεις όμως δεν παύουν να είναι επηρεασμένες από το σφάλμα χάραξης και από το σφάλμα εκκεντρότητας του δίσκου.

Οι επιδράσεις των σφαλμάτων αυτών μειώθηκαν στους μεγάλους θεοδολίχους του Ramsden, όπου χρησιμοποιεί μικροσκόπια με μικρομετρικό προσοφθάλμιο σύστημα που επιτρέπουν την ανάγνωση της κλίμακας του δίσκου με ακρίβεια της τάξης του δευτερολέπτου. Στον πρώτο θεοδόλιχο του 1787 τα μικροσκόπια ανάγνωσης είναι δύο, σε αντιδιαμετρικές θέσεις του δίσκου. Στο δεύτερο θεοδόλιχο, του 1790, τα μικροσκόπια είναι τέσσερα. Όπως ο βερνιέρος, το μικροσκόπιο ως σύστημα ανάγνωσης χρησιμοποιήθηκε αρχι-

κά στα αστρονομικά όργανα, κατόπιν στα γεωδαιτικά, και καθιερώθηκε τελικά ως το σύστημα ανάγνωσης των οργάνων υψηλής ακριβείας.

Το σύστημα αυτό ανάγνωσης του Ramsden βελτιώθηκε από τον Edward Troughton το 1791. Το μικροσκόπιο με μικρομετρικό προσοφθάλμιο του Troughton βασίζεται στη μέτρηση του μήκους της διαδρομής ενός δείκτη μέχρι αυτός να συμπέσει με την προηγούμενη χαραγή του δίσκου. Ο δείκτης, αποτελείται από δύο παράλληλα νήματα και βρίσκεται πάνω σ' έναν φορέα, που μετακινείται με τη βοήθεια ενός τυμπάνου. Με μια πλήρη περιστροφή του τυμπάνου ο δείκτης μετακινείται κατά μήκος μιας υποδιαίρεσης της κλίμακας. Η περιστροφή του τυμπάνου καταγράφεται σε ειδική κλίμακα, και έτσι προκύπτει η ανάγνωση του κλασματικού μέρους μεταξύ δύο χαραγών του δίσκου [3], [5], [8].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Bennett, J.A. (1987): *The Divided Circle. A History of Instruments for Astronomy, Navigation and Surveying*. Phaidon-Christie's.

[2] Brooks, Randall C. (1991): The development of the Micrometer in the Seventeeth, Eighteenth and Nineteenth Centuries. *Journal of the History of Astronomy 22*, pp. 127-73.

[3] Chapman, A. (1995): *Dividing the Circle: The Development of Critical Angular Measurement in Astronomy 1500-1850*. 2nd ed. New York: Horwood.

[4] Chapman, A. (1996): *Astronomical Instruments and Their Users*. Variorum,

[5] Cox, R. C. (1986): The Development of Surveying Instrumentation 1780-1980. *Survey Review*, No. 219, pp. 234-255 (Part 1), No. 220, pp 283-303 (Part 2).

[6] Δούκας, Ι.Δ. (2005): Η Ιστορική Εξέλιξη της Επιστήμης της Μετρολογίας, Συνέδριο: Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα, σελ. 133-156, 15-16/4/2005, Θεσσαλονίκη.

[7] Hoskold, H. D. (1893): Historical notes upon ancient and modern Surveying Instruments. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 639, pp. 135-156.

[8] Καλτσίκης, Χ. και Δ. Ρωσσικόπουλος (2003): Η εξέλιξη των γεωδαιτικών οργάνων μέχρι τις αρχές του 20ου αι. *Φύλλα Χάρτη Βόρειας Ελλάδας. Η πρώτη απεικόνιση*. Επιμ. Ε. Λιβιεράτος, Εθνική Χαρτοθήκη.

[9] Kiely, E. (1947): *Surveying Instruments. Their History*. Carben Surveying Reprints.

[10] Ρωσσικόπουλος, Δ. (2006): *Μέτρον Γεωμετρικόν. Η ιστορία των επιστημών της αποτύπωσης*. Εκδόσεις Ζήτη.

[11] Σώκος, Α (1968): *Γεωδαισία και Γεωμετρογραφία*. Γεωμετρογραφικαί μελέται – Εκδόσεις.