

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΤΖΙΜΑ
ΛΕΚΤΟΡΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

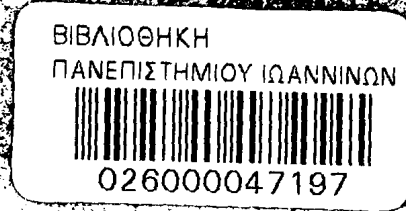
ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
1993



594/98

Φ.Α.



551.51
T21





ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΤΖΙΜΑ
ΛΕΚΤΟΡΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
1993



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

ΟΜΑΔΑ 1

Σελίδα

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

1

1.1 Μέθοδοι μέτρησης θερμοκρασίας

"

1.2 Όργανα μέτρησης της Θερμοκρασίας

3

1.2.1 Υδραργυρικό θερμόμετρο απλής ένδειξης

"

1.2.2 Μεγιστοβάθμιο υδραργυρικό θερμόμετρο

"

1.2.3 Ελαχιστοβάθμιο οινόπνευματικό θερμόμετρο

4

1.2.4 Θερμόμετρα βάθους εδάφους

"

1.2.5 Διμεταλικός θερμογράφος

5

1.2.6 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης

6

1.2.7 Θερμόμετρα θερμοζεύγους

"

1.3 Αιτίες λάθους στη μέτρηση της θερμοκρασίας

"

1.4 Θερμική αδράνεια του στοιχείου

7

1.5 Η επίδραση της ακτινοβολίας στα στοιχεία των οργάνων
μέτρησης θερμοκρασίας

12

1.6 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης

16

ΟΜΑΔΑ 2

ΠΙΕΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΔΡΑΤΜΩΝ

23

2.1 Ατμοσφαιρική πίεση

24

2.2 Βαρόμετρα υγρής στήλης

25

2.2.1 Υδραργυρικό βαρόμετρο Fortin

26

2.2.2 Υδραργυρικό βαρόμετρο Kew

"

2.2.3 Διορθώσεις και αναγωγές της πίεσης

27

2.3 Αναεροειδή (aneroid) ή Μεταλλικά βαρόμετρα

34

2.3.1 Βαρογράφος

35

2.4 Ατμοσφαιρική υγρασία

37

2.5 Παράμετροι προσδιορισμού υγρασίας

37

2.6 Μέτρηση της υγρασίας

40

2.7 Όργανα μέτρησης της υγρασίας

"

2.7.1 Ψυχρόμετρο August

"

2.7.2 Περιστρεφόμενο ψυχρόμετρο

41

2.7.3 Ψυχρόμετρο Assmann

"

2.7.4 Ψυχρόμετρο με ηλεκτροκίνητο ανεμιστήρα

42

2.7.5 Υγρογράφος τριχών

42



	Σελίδα
2.7.6 Ηλεκτρικό υγρόμετρο με πυκνωτή από πολυμερές	42
2.7.7 Ηλεκτρικό υγρόμετρο χλωριούχου λιθίου	"
2.7.8 Συμπυκνωτικό υγρόμετρο τύπου Alluard	43
2.8 Ξηρό και υγρό θερμόμετρο και το ψυχρόμετρο	46

ΟΜΑΔΑ 3

ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΙ ΓΗΙΝΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	53
3.1 Ειδική ένταση και πυκνότητα ακτινοβόλου ροής	"
3.2 Κλίμακες ακτινοβολίας	55
3.3 Οι ροές ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας	56
3.4 Όργανα μέτρησης ακτινοβολίας	60
3.4.1 Πυρηλιόμετρο	65
3.4.2 Πυρανόμετρο	67
3.4.3 Ανακλασίμετρο (Αλμπετόμετρο)	"
3.4.4 Διμεταλλικός ακτινογράφος Robitzsch	"
3.4.5 Ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας (ισοζυγίόμετρο)	"
3.5 Ο Νόμος του Lambert ή του συνημιτόνου	70
3.6 Βαθμονομήσεις ακτινομέτρου για την άμεση και διάχυτη ακτινοβολία	71
3.7 Μετρήσεις ακτινοβολίας επάνω από επίπεδες επιφάνειες ορισμένου εμβαδού	74

ΟΜΑΔΑ 4

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	87
4.1 Μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας ανέμου	"
4.2 Ανεμόμετρα περιστρεφόμενα	"
4.2.1 Ανεμόμετρα ημισφαιρίων (κυπελοφόρα)	89
4.2.2 Διανυσματικό ανεμόμετρο	"
4.3 Ανεμόμετρα πίεσης δίσκου	90
4.4 Ανεμόμετρα σωλήνα πίεσης	91
4.4.1 Ανεμόμετρο πίεσης	"
4.5 Θερμικά ανεμόμετρα	92
4.5.1 Θερμοηλεκτρικό ανεμόμετρο	93
4.6 Ακουστικά ανεμόμετρα	94
4.7 Η κατανομή (profile) της ταχύτητας ανέμου στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα	97



ΟΜΑΔΑ 5**Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ
ΕΔΑΦΟΣ**

	103
5.1	Μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας του εδάφους
5.2	Η θεωρία της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος



Π ρ ό λ ο γ ο ς

Η διδασκαλία του μαθήματος "Φυσική της Ατμόσφαιρας" ολοκληρώνεται στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων με μια σειρά εργαστηριακών ασκήσεων. Σκοπός των ασκήσεων είναι η μελέτη των αρχών φυσικής και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση του μεγέθους των φυσικών παραμέτρων της ατμόσφαιρας και ιδιαίτερα εκείνων που είναι αναγκαίες για τον καθορισμό της συμπεριφοράς της ατμόσφαιρας κοντά στην επιφάνεια της γης.

Το παρόν εγχειρίδιο αποτελεί απαραίτητο διδακτικό βοήθημα για την εκτέλεση αυτών των εργαστηριακών ασκήσεων. Διαφέρει από την προηγούμενη έκδοση κυρίως γιατί προστέθηκε μια αδρή περιγραφή των οργάνων που διαθέτει το Εργαστήριο και χρησιμοποιεί ο φοιτητής στις μετρήσεις.

Οι ασκήσεις είναι κατανεμημένες σε τέσσερες ομάδες (θερμοκρασία, πίεση, ακτινοβολία και άνεμος), ανάλογα με τη φυσική παράμετρο την οποία μελετούν, ενώ η πέμπτη ομάδα έχει σαν αντικείμενο μελέτης τη θερμοκρασία και τη μεταφορά θερμότητας μέσα στο έδαφος. Οι ασκήσεις των δύο πρώτων ομάδων (θερμοκρασία, πίεση) εκτελούνται χωρίς προβλήματα και στο χώρο του εργαστηρίου, πράγμα που δεν είναι εφικτό σήμερα για τις ασκήσεις των τριών τελευταίων ομάδων. Στην περίπτωση όμως που οι καιρικές συνθήκες (π.χ. βροχερός καιρός) δεν επιτρέπουν την εκτέλεση των ασκήσεων στην ύπαιθρο τότε οι ασκήσεις των τριών τελευταίων ομάδων γίνονται στο χώρο του εργαστηρίου και έχουν μόνο ποιοτικό περιεχόμενο.

Θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω τον κ. Κων/νο Τσέφο, Ε.Δ.Τ.Π. του Τμήματος Φυσικής του Παν/μίου Ιωαννίνων για την βοήθεια στο "στήσιμο" των ασκήσεων του εργαστηρίου και την επιμέλεια των σχημάτων και την κ. Βασιλική Χρήστου-Ζώη, Ε.Δ.Τ.Π. όπως παραπάνω, για την επιμελή δακτυλογράφηση.



ΟΜΑΔΑ 1

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων ενός σώματος προκαλεί ροή θερμότητας μεταξύ των δύο αυτών σημείων όπως ακριβώς η διαφορά δυναμικού σ' ένα ηλεκτρικό αγωγό προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Στη Φυσική της Ατμόσφαιρας πολλές από τις παρατηρήσεις αφορούν τη μέτρηση ροής ενέργειας διαφόρων μορφών. Για παράδειγμα, η μεταφορά της αισθητής (sensible) θερμότητας στο έδαφος, η ακτινοβολία του ήλιου και η ενέργεια που απορροφάται στην εξάτμιση (λανθάνουσα θερμότητα) είναι μερικές μόνο περιπτώσεις ροής ενέργειας που μετρά ο μετεωρολόγος. Παρόλη όμως την ανάπτυξη ποικίλων τεχνικών και οργάνων για τη μέτρηση ροών ενέργειας, η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί τη βάση των μετρήσεων ροής ενέργειας, τουλάχιστο για τη βαθμονόμηση των σχετικών οργάνων.

1.1 Μέθοδοι μέτρησης θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας στη Μετεωρολογία, εκτός από τη σπουδαιότητα που έχει για τον καθορισμό αυτής της ίδιας της θερμοκρασίας, αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό και άλλων ποσοτήτων. Γι' αυτό οι μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας που έχουν αναπτυχθεί είναι πολλές. Μερικές χρησιμοποιούν όργανα για την αυτόματη καταγραφή της ενώ άλλες χρησιμοποιούν θερμομετρικά στοιχεία σχεδιασμένα για τη λήψη ανάγνωσης μέσα στο θερμομετρούμενο χώρο.

Οι μέθοδοι, ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που χρησιμοποιούν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

α. Διαστολή. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη θερμική διαστολή των αερίων, υγρών και στερεών. Είναι πασίγνωστα τα υγρά θερμόμετρα, ιδιαίτερα το υδραργυρικό και της αλκοόλης σε γυαλί, καθώς και τα μεταλλικά. Η λειτουργία των στερεών θερμομέτρων βασίζεται συνήθως στις διαφορές της θερμικής διαστολής μεταξύ δύο διαφορετικών συγκολλημένων μετάλλων. Με τη βοήθεια μοχλών και αρθρώσεων η διαστολή ή η στρέψη που υφίσταται το διπλό μεταλλικό θερμομετρικό στοιχείο, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, μεταφέρεται είτε σ' ένα ορατό δείκτη που κινείται επάνω



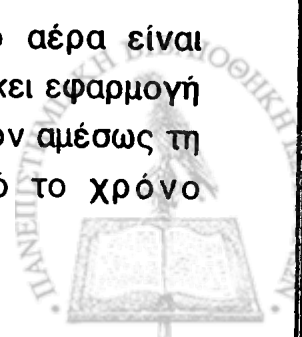
σε μια βαθμολογημένη κλίμακα είτε σε μια πέννα που γράφει επάνω σε μια κινούμενη ταινία χαρτιού. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί την αρχή στην οποία βασίζεται ο γνωστότατος θερμογράφος με ωρολογιακό μηχανισμό.

β. Ηλεκτρική αντίσταση. Στά πραγματικά μέταλλα μια αύξηση της θερμοκρασίας τους έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής τους αντίστασης. Στους ημιαγωγούς, όπως στο γερμάνιο που βρίσκεται στην οριακή περιοχή των μετάλλων και στον αμέταλλο άνθρακα, η αντίσταση ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ένα φαινόμενο που προέρχεται από την αυξανόμενη επικάλυψη ενέργειας των ζωνών ηλεκτρονίων καθώς παρέχεται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Οι ημιαγωγοί, με τον αρνητικό τους θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης, είναι πολύ περισσότερο ευαίσθητοι στις μεταβολές θερμοκρασίας από τα μέταλλα, γεγονός που χρησιμοποιήθηκε στα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (thermistors) που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς σαν το γερμάνιο και το πυρίτιο με μορφή συνήθως σφαίρας ή κυλίνδρου.

γ. Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν τα δύο άκρα ενός μεταλλικού αγωγού βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους, γνωστή σαν ηλεκτρεγερτική δύναμη (η.δ.) του Thomson. Επίσης στο σημείο συγκολλήσεως δύο ανόμοιων μετάλλων δημιουργείται μία η.δ., σύμφωνα με το φαινόμενο του Peltier. Σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και οι δύο αυτές η.δ. συνδυάζονται και δίνουν εκείνο που είναι γνωστό σαν η.δ. του Seebeck. Επειδή αυτές οι η.δ. εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το θερμοζεύγος που απαρτίζεται από ένα κύκλωμα με δύο συγκολλήσεις δύο διαφορετικών μετάλλων αποτελεί ένα μέσο για τη μέτρηση διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σημείων συγκόλλησης των μετάλλων.

δ. Ακτινοβολία. Το φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας ενός σώματος έχει άμεση σχέση με τη θερμοκρασία του σώματος. Έτσι, προσδιορίζοντας με κατάλληλους ανιχνευτές ακτινοβολίας το φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας ενός σώματος, μπορούμε έμμεσα να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία του. Στην πράξη οι ανιχνευτές αυτοί ακτινοβολίας αφορούν την υπέρυθρη περιοχή μήκους κύματος ακτινοβολίας και προσιδιάζουν άριστα στις τεχνικές προσδιορισμού της θερμοκρασίας από μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούμενοι συνήθως στις μετρήσεις θερμοκρασίας από τεχνητούς δορυφόρους ή αεροπλάνα.

ε. Ακουστική. Επειδή η ταχύτητα του ήχου στον ξηρό αέρα είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του το γεγονός αυτό βρίσκει εφαρμογή στα ακουστικά θερμόμετρα. Τα θερμόμετρα αυτά δίνουν σχεδόν αμέσως τη μέτρηση, αφού ο χρόνος λήψης της εξαρτάται μόνο από το χρόνο



μεταφοράς ενός ηχητικού κύματος διαμέσου του δείγματος αέρα που η θερμοκρασία του, αν δεν είναι η ίδια σ' όλο το δείγμα, δίνεται σαν η μέση της τιμή.

στ. Συνδυασμός φαινομένων. Ένα παράδειγμα είναι οι ηλεκτρικοί ταλαντωτές από κατάλληλα κομμένους πυριτικούς κρυστάλλους. Η διαστολή ή η συστολή του κρυστάλλου, καθώς η θερμοκρασία αλλάζει, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης. Θερμομετρικά στοιχεία σαν αυτά αποτελούν σήμερα τη βάση για την κατασκευή θερμομέτρων εξαιρετικής ακρίβειας και ευαισθησίας.

1.2 Όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας

1.2.1 Υδραργυρικό θερμόμετρο απλής ένδειξης

Αποτελείται (Σχ. I) από τη λεκάνη (σφαιρικού σχήματος) που είναι πλήρης υδραργύρου και επικοινωνεί με σωλήνα μικρής αλλά σταθερής διαμέτρου καθόλο του το μήκος, κλειστού στο άλλο του άκρο όπου και διευρύνεται για την προστασία του από σπάσιμο. Ανάλογα με τη θερμοκρασία η ελεύθερη επιφάνεια του υδράργυρου κινείται μέσα στο σωλήνα. Η ανάγνωση λαμβάνεται στην κορυφή του μηνίσκου της ελεύθερης επιφάνειας του υδράργυρου. Το σύστημα λεκάνης - σωλήνα που περιέχει υδράργυρο βρίσκεται μέσα σε άλλο γυάλινο σωλήνα. Το θερμόμετρο αυτό μας δείχνει πάντοτε τη θερμοκρασία που επικρατεί στο περιβάλλον του θερμομέτρου τη στιγμή της ανάγνωσης και τοποθετείται κατακόρυφα στον μετεωρολογικό κλωβό με τη λεκάνη του στο κάτω μέρος.

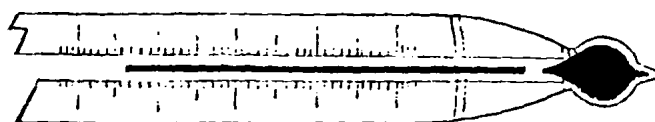


Σχ. I Θερμόμετρο απλής ένδειξης

1.2.2 Μεγιστοβάθμιο υδραργυρικό θερμόμετρο

Διαφέρει από το προηγούμενο επειδή σε κάποιο σημείο κοντά στη λεκάνη ο σωλήνας του στενεύει. Η στένωση αυτή επιτρέπει τη δίοδο του υδράργυρου λόγω διαστολής του ενώ αποκόπτει τον υδράργυρο όταν αυτός συστέλλεται (Σχ. II). Μας δείχνει τη μέγιστη θερμοκρασία κάτω από την οποία πέρασε το θερμόμετρο μέχρι τη στιγμή της ανάγνωσης. Μετά από κάθε ανάγνωση ο υδράργυρος επαναφέρεται στη λεκάνη με τίναγμα όπως στο ιατρικό θερμόμετρο που είναι κι αυτό μεγιστοβάθμιο. Τοποθετείται σχεδόν οριζόντια με τη λεκάνη στο χαμηλότερο σημείο.

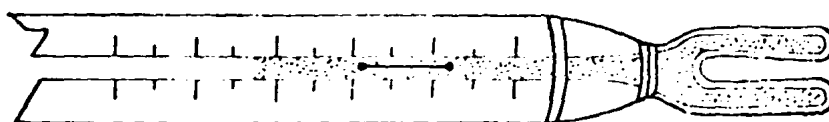




Σχήμα II. Θερμόμετρο μεγιστοβάθμιο

1.2.3. Ελαχιστοβάθμιο οινόπνευματικό θερμόμετρο

Στο θερμόμετρο αυτό το υγρό είναι οινόπνευμα (αλκοόλη). Μέσα στο οινόπνευμα του σωλήνα (Σχ. III) είναι εμβαπτισμένος ένας σκοτεινού χρώματος γυάλινος δείκτης-πλωτήρας. Το οινόπνευμα διαστελλόμενο μπορεί και ρέει μεταξύ του πλωτήρα και των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα. Επίσης συστελλόμενο διέρχεται μεταξύ του πλωτήρα και των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα. Όταν όμως η ελεύθερη επιφάνεια της αλκοόλης του σωλήνα (μηνίσκος αλκοόλης) φθάσει την κεφαλή του πλωτήρα τότε η ελεύθερη επιφάνεια συμπαρασύρει τον πλωτήρα και δεν μπορεί να περάσει διαμέσου του σωλήνα και του πλωτήρα και να αφήσει τον πλωτήρα έξω από την αλκοόλη. Έτσι, αφού το κατώτερο άκρο του μηνίσκου της αλκοόλης μας δείχνει πάντοτε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά το χρόνο της ανάγνωσης, η κεφαλή του πλωτήρα που βρίσκεται προς την πλευρά του μηνίσκου της αλκοόλης μας δείχνει την ελάχιστη θερμοκρασία κάτω από την οποία πέρασε το θερμόμετρο μέχρι τη στιγμή της ανάγνωσης. Το θερμόμετρο τοποθετείται σχεδόν οριζόντια με τη λεκάνη στο χαμηλότερο σημείο. Μετά από κάθε ανάγνωση ο δείκτης-πλωτήρας φέρεται σε επαφή με τον μηνίσκο με ελαφρή κλίση του θερμομέτρου προς την πλευρά του μηνίσκου.

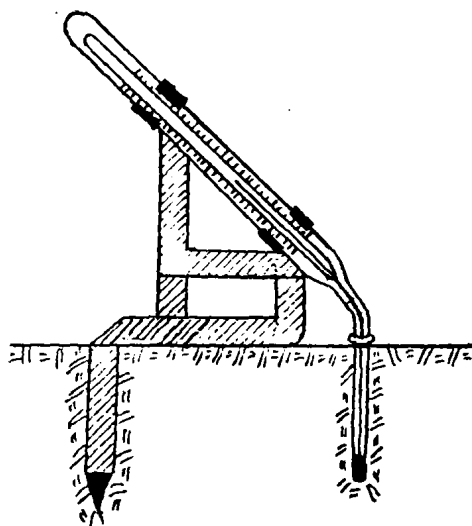


Σχήμα III. Θερμόμετρο αλκοόλης ελαχιστοβάθμιο

1.2.4. Θερμόμετρα βάθους εδάφους

Τα θερμόμετρα αυτά (Σχ. IV) είναι απλής ένδειξης υδραργυρικά, κατασκευασμένα για να μετρούν τη θερμοκρασία του εδάφους σε διάφορα βάθη. Για ευκολία στην ανάγνωση είναι από κατασκευής γωνιασμένα με γωνία μεγαλύτερη των 90° . Άλλος τύπος υδραργυρικών θερμομέτρων

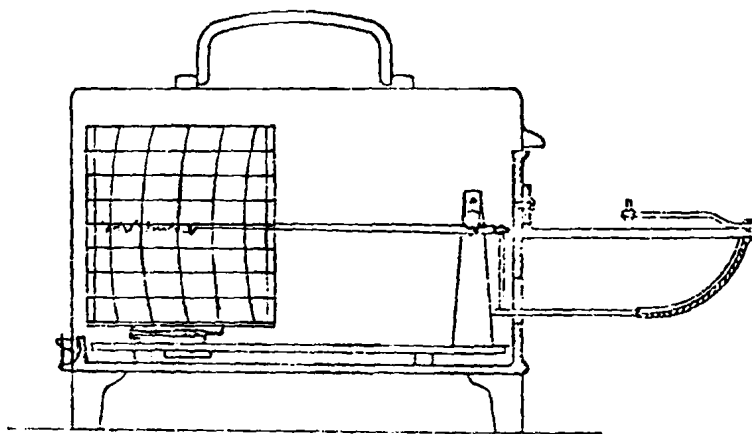
βάθους εδάφους είναι τα Lamont. Αυτά έχουν τη λεκάνη τους καλυμμένη με παχύ στρώμα κηρού και παρουσιάζουν μεγάλη αδράνεια στη μεταβολή της θερμοκρασίας τους όταν, για να πάρουμε μέτρηση, τα ανασύρουμε από την ειδική οπή του εδάφους.



Σχήμα IV. Θερμόμετρο βάθους εδάφους

1.2.5. Διμεταλλικός θερμογράφος

Στο όργανο αυτό (Σχ. V) η θέση της γραφίδας ελέγχεται με τη βοήθεια συνδέσμων και μοχλών που μεταφέρουν την αλλαγή της καμπυλότητας μιας διμεταλλικής πλάκας ή έλικας, το ένα άκρο της οποίας είναι σταθερά στερεωμένο στο σκελετό του οργάνου. Η γραφίδα γράφει συνέχεια επάνω σε ειδικά βαθμολογημένο χαρτί. Το χαρτί είναι προσαρμοσμένο σε κύλινδρο που περιστρέφεται με τη βοήθεια μηχανικού ωρολογιακού μηχανισμού ελατηρίου.



Σχήμα V. Διμεταλλικός θερμογράφος.



1.2.6 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης.

Μια σειρά θερμομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης με αυτόματο καταγραφικό μηχανισμό μας δίνουν την ευκαιρία να φαντασθούμε τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε διαφορετικά ύψη της ατμόσφαιρας (πυλώνες) την ίδια στιγμή ή ακόμη σε διάφορα βάθη εδάφους. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα μέταλλα είναι ο λευκόχρυσος που δεν αλλοιώνεται εύκολα και έχει μεγάλη ειδική αντίσταση, υψηλό σημείο τήξης και μεγάλη ακρίβεια και απλότητα βαθμολόγησης. Επίσης χρησιμοποιείται το νικέλιο και ο χαλκός. Τέλος, οι thermistors είναι κοινότετοι για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στη μετεωρολογία με μορφή συνήθως σφαιριδίου ή ράβδου.

1.2.7 Θερμόμετρα θερμοζεύγους.

Τα θερμομέτρα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις θερμοκρασίας καθώς και διαφορών θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται και η συγκόλλησή τους δύσκολα φαίνονται με γυμνό μάτι.

1.3 Αιτίες λάθους στη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Η κύρια αιτία λάθους στη μέτρηση της θερμοκρασίας οποιουδήποτε σώματος είναι η έλλειψη ομοιότητας στις φυσικές ιδιότητες του θερμομετρικού στοιχείου και του θερμομετρούμενου σώματος. Σε όλες τις περιπτώσεις η θερμική αδράνεια του θερμομετρικού στοιχείου έχει σαν αποτέλεσμα κάποια χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που εισάγουμε το θερμομετρικό στοιχείο στο θερμομετρούμενο σώμα μέχρι τη στιγμή που αποκαθίσταται θερμική ισορροπία μεταξύ του στοιχείου και του σώματος. Η θερμική αδράνεια είναι επίσης η αιτία που, στην περίπτωση διακύμανσης της θερμοκρασίας του θερμομετρούμενου σώματος ή περιβάλλοντος, προσδιορίζει την ικανότητα του θερμομετρικού στοιχείου να ακολουθεί την διακύμανση και η οποία καθορίζεται από τη συχνότητα της διακύμανσης και τη θερμική μάζα του στοιχείου. Η θερμική αδράνεια εξαρτάται επομένως και από το θερμομετρικό στοιχείο και από το σώμα που θερμομετρούμε. Για παράδειγμα, ένα υδραργυρικό θερμόμετρο μπορεί να χρειάζεται περισσότερο από ένα λεπτό της ώρας για να φθάσει τη θερμοκρασία ισορροπίας σε ακίνητο αέρα, ενώ δίνει σε λίγα δευτερόλεπτα τη θερμοκρασία νερού.

Ενώ η θερμική αδράνεια καθορίζεται από τις σχετικές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας και της μέσης θερμικής αγωγιμότητας του θερμομετρικού στοιχείου και του θερμομετρούμενου σώματος, η έλλειψη ομοιότητας στις οπτικές ιδιότητες, όπως και στις ιδιότητες ακτινοβολίας

γενικά, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία σοβαρών προβλημάτων για το μετεωρολόγο. Επειδή η τιμή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του στοιχείου και του περιβάλλοντός του μπορεί να μην είναι ικανή σε πολλές περιπτώσεις να εξισορροπήσει τη ροή ακτινοβολίας που απορροφάται από το στοιχείο πρέπει να προσέχεται ιδιαίτερα το γεγονός αυτό για την αποφυγή αναληθών μετρήσεων. Το παραπάνω πρόβλημα εμφανίζεται όταν μετράται η θερμοκρασία οποιουδήποτε διαφανούς ή διαπερατού από το φως σώματος συμπεριλαμβανομένων του πάγου, του χιονιού, του νερού και του αέρα. Με τη διαδικασία θέρμανσης του στοιχείου από ακτινοβολία αυξάνεται η θερμοκρασία του και μειώνεται η δυνατότητα εξισορρόπησης της θερμοκρασίας του στοιχείου και του περιβάλλοντός του, έτσι ώστε στο κενό η θερμοκρασία του θερμομετρικού στοιχείου καθορίζεται μόνο από την κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας.

1.4 Θερμική αδράνεια του στοιχείου

Αν υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του στοιχείου είναι T και εκείνη του περιβάλλοντος, για παράδειγμα του αέρα, είναι T_a τότε, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, θα έχουμε ροή θερμότητας διαμέσου της επιφάνειας του στοιχείου. Όταν μεταφέρεται θερμότητα από τον αέρα προς το θερμόμετρο, η ροή θερμότητας λαμβάνεται σαν θετική και είναι:

$$H = \omega (T_a - T) \quad (1.1)$$

όπου ω είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που εξαρτάται: α) από το σχήμα της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου διαμέσου της οποίας μεταφέρεται η θερμότητα και β) από την ταχύτητα του αέρα ή, με άλλα λόγια, από τη μέση θερμική αγωγιμότητα του μέσου που περιβάλλει το στοιχείο και μεταφέρει την ενέργεια.

Η ροή αισθητής θερμότητας H διαμέσου του αέρα που περιβάλλει το στοιχείο όταν αποκλείσουμε άλλους τρόπους μεταφοράς θερμότητας, όπως με ακτινοβολία, είναι τότε η μόνη αιτία για τη βαθμιαία μεταβολή της θερμοκρασίας του θερμομετρικού στοιχείου. Αν και αυτό είναι σπάνιο το H μπορεί, προς το παρόν, να θεωρηθεί σαν η μόνη αιτία θέρμανσης με αισθητή θερμότητα του αέρα, αγνοώντας την ανταλλαγή ακτινοβολίας με το περιβάλλον. Όταν οι διαφορές θερμοκρασίας δεν είναι πολύ μεγάλες τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ευρίσκει εφαρμογή μια γραμμική σχέση σαν εκείνη που περιγράφει η εξίσωση 1.1. Οπωσδήποτε όμως ο συντελεστής ω δεν μπορεί να θεωρηθεί εντελώς ανεξάρτητος της θερμοκρασίας.



Υποθέτοντας ότι το θερμικό στοιχείο έχει καλή αγωγιμότητα, η απώλεια θερμότητας απ' αυτό μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ροή διαμέσου της επιφάνειας του που δίνεται από τη σχέση

$$H = \frac{c \rho V}{A} \frac{dT}{dt} \quad (1.2)$$

όπου t είναι ο χρόνος, A η επιφάνεια του στοιχείου, V ο όγκος του, ρ η πυκνότητά του και c η ειδική θερμότητα της ύλης του στοιχείου.

Από τις 1.1 και 1.2 προκύπτει:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\omega A}{c \rho V} (T_a - T) \quad (1.3)$$

Ολοκλήρωση της εξίσωσης 1.3 μας δίνει:

$$(T - T_0) = (T_a - T_0) [1 - e^{-(\omega A/c\rho V)t}] \quad (1.4)$$

$$(T - T_a) = (T_0 - T_a) e^{-(\omega A/c\rho V)t} \quad (1.5)$$

όπου T_0 είναι η θερμοκρασία του στοιχείου στο χρόνο $t=0$. Η ποσότητα $c\rho V/\omega A$ μπορεί να γραφεί σαν τ , όπου το τ είναι η σταθερά του χρόνου. Η ταχύτητα με την οποία ένα θερμομετρικό στοιχείο ακολουθεί τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός του εξαρτάται μόνο από το τ . Για μια γρήγορη προσαρμογή της θερμοκρασίας του στοιχείου και επομένως για μια καλή παρακολούθηση των μεταβολών της θερμοκρασίας το τ πρέπει να έχει όσο το δυνατό πιο μικρή τιμή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εκλογή στοιχείων που έχουν μικρή ειδική θερμότητα, μικρή τιμή του λόγου του όγκου προς την επιφάνειά τους και βέβαια να είναι από υλικά που να έχουν μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Οι εξισώσεις 1.2, 1.3 και 1.4 δεν ισχύουν αυστηρά για υλικά στοιχείων με μικρή αγωγιμότητα. Στην πραγματικότητα, ακόμα και για θερμοστοιχεία μεγάλης αγωγιμότητας, οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται με επιτυχία μόνο σ' εκείνα τα θερμοστοιχεία που έχουν τουλάχιστο τη μία από τις τρεις διαστάσεις τους μικρή και για τα οποία μπορεί να υποτεθεί ότι δεν υπάρχει καθυστέρηση λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσα στην ίδια τη μάζα του στοιχείου, έτσι ώστε η θερμοκρασία που μας δείχνει το στοιχείο προσεγγίζει εκείνη της επιφάνειάς του.

Τα θερμόμετρα που σχεδιάζονται να φθάνουν γρήγορα στη θερμοκρασία ισορροπίας, όπως είναι τα θερμόμετρα τύπου υγρού σε γυαλί ή τα μεταλλικά, εφοδιάζονται με στοιχεία μεγάλης επιφάνειας και μικρού

όγκου. Από την άλλη πλευρά ορισμένα θερμόμετρα σχεδιάζονται για τη λήψη μέτρησης με κάποια καθυστέρηση, λόγω του χρόνου που παίρνει η μεταφορά τους από το περιβάλλον που θερμομετρούν μέχρι τη στιγμή της ανάγνωσης όπως συμβαίνει με ορισμένα θερμόμετρα εδάφους και τα θερμόμετρα λήψης της θερμοκρασίας του χιονιού. Τα θερμόμετρα αυτά έχουν μεγάλα θερμομετρικά στοιχεία με μεγάλη ολική θερμοχωρητικότητα και μικρή σχέση επιφάνειας προς όγκο, χαρακτηριστικά που εξασφαλίζονται και με τη βοήθεια κέρινου περιβλήματος του στοιχείου που λειτουργεί επίσης σαν θερμικός μονωτής όταν τα θερμόμετρα μετακινούνται από το περιβάλλον που θερμομετρούν για τη λήψη ανάγνωσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η τεχνική του ρεύματος αέρα που συχνά χρησιμοποιείται σε μεγάλα θερμοστοιχεία για να ελαττώσει το χρόνο θερμικής ισορροπίας αυξάνοντας την τιμή του συντελεστή μεταφοράς ω δεν είναι εφαρμόσιμη γιατί το ρεύμα αέρα μπορεί να αλλοιώσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που θέλουμε να θερμομετρήσουμε. Το πρόβλημα αυτό δεν αντιμετωπίζεται όταν μελετάμε τα κινούμενα με μικρή ταχύτητα οριακά στρώματα του αέρα κοντά στο έδαφος και κοντά στο περιβάλλον των φυτών. Στις περιπτώσεις αυτές τη λύση μας τη δίνουν πολύ μικρά θερμοζεύγη ή θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης με πολύ μεγάλη τιμή του λόγου της επιφάνειας προς τον όγκο των στοιχείων. Κατάλληλο σχήμα για ένα θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης είναι εκείνο του μεγάλου μήκους αλλά εξαιρετικά λεπτού σύρματος.

ΠΕΙΡΑΜΑ Ι. Θερμική αδράνεια θερμομέτρου

Στο πείραμα αυτό εξετάζεται η θερμική αδράνεια μερικών υδραργυρικών θερμομέτρων και καθορίζεται ο συντελεστής μεταφοράς ω , για ακίνητο αέρα στο εργαστήριο. Χρησιμοποιούνται τρία θερμόμετρα που έχουν θερμοστοιχεία διαφορετικών διαστάσεων.

Τα θερμόμετρα τοποθετούνται επάνω σ' ένα τραπέζι, υποστηριζόμενα με ορθοστάτες στους οποίους οι σφυκτήρες καλύπτονται με λάστιχο.

Πρώτα λαμβάνεται ανάγνωση της θερμοκρασίας ισορροπίας του θερμομέτρου, κάτω από τις συνθήκες θερμοκρασίας του αέρα του εργαστηρίου και μετά το θερμόμετρο θερμαίνεται αργά, πάνω από μια ηλεκτρική αντίσταση, έτσι ώστε ο υδράργυρος να αποκτά μια ομοιόμορφη θερμοκρασία και να μη γίνεται μεταφορά θερμότητας κατά μήκος του θερμομέτρου, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στο σώμα του θερμομέτρου.

Όταν το θερμόμετρο αποκτήσει μια ορισμένη θερμοκρασία τοποθετείται στον ορθοστάτη και λαμβάνονται αναγνώσεις της



θερμοκρασίας του σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα. Όσο μικρότερο είναι το θερμόμετρο τόσο μικρότερα πρέπει να είναι τα χρονικά διαστήματα.

Μ' αυτό τον τρόπο λαμβάνεται μια σειρά θερμοκρασιών T , σε συνάρτηση του χρόνου t , με μια αρχική ανάγνωση T_0 στο χρόνο $t=0$ και μέσα σε μια θερμοκρασία του εργαστηρίου T_a . Η τελευταία θα πρέπει να ελεγχθεί πάλι στο τέλος του πειράματος, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη οποιαδήποτε αλλαγή της θερμοκρασίας του εργαστηρίου που έγινε στη διάρκεια του πειράματος.

Η εξίσωση 1.5 μπορεί να γραφεί:

$$\tau = t / \ln \frac{T_0 - T_a}{T - T_a} \quad \text{ή} \quad \tau = 0.434 t / \log_{10} \frac{T_0 - T_a}{T - T_a} \quad (1.6)$$

Από την 1.6 φαίνεται ότι, αν χρησιμοποιηθεί ημιλογαριθμική κλίμακα, η συναρτησιακή σχέση μεταξύ του t και του $(T_0 - T_a)/(T - T_a)$ θα εμφανισθεί γραμμική.

Η γραμμή που αντιστοιχεί στα σημεία t , $(T_0 - T_a)/(T - T_a)$, που πρέπει να περνά από το σημείο $t = 0$ και $T = T_0$, έχει καθορισμένη κλίση. Αυτή δίνεται από την:

$$\tau = 0.434 \Delta t / \Delta \log_{10} \frac{T_0 - T_a}{T - T_a} \quad (1.7)$$

όπου τα Δ δείχνουν δύο κατάλληλα εκλεγμένα διαστήματα κατά μήκος των αξόνων, για τα οποία βέβαια πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι πραγματικές τιμές. Στην αρχή της διαδικασίας ψύξης αν εμφανίζεται οποιαδήποτε αξιοσημείωτη απόκλιση από τη θεωρητικά υποδεικνυόμενη από τη συναρτησιακή σχέση, μπορεί να οφείλεται στη μη ομοιόμορφη θέρμανση του θερμομέτρου. Η θέρμανση με εμβάπτιση του θερμομέτρου σε θερμό νερό οδηγεί σε λάθη, λόγω της ψύξης του θερμομέτρου που οφείλεται στην εξάτμιση.

Έχοντας την τιμή του τ για κάθε θερμόμετρο, επειδή $\tau = c \rho V / \omega A$, υπολογίζουμε το ω για καθένα από τα θερμόμετρα. Για τον υδράργυρο, $c = 0.140 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ και $\rho = 13.55 \text{ g cm}^{-3}$, έτσι ώστε με το τ υπολογισμένο σε δευτερόλεπτα λαμβάνουμε το ω σε μονάδες $\text{W cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Μια διαδικασία όμοια μ' αυτή που περιγράφηκε πιο πάνω και που χρησιμοποιεί μεγάλα θερμοστοιχεία θερμομέτρων αλκοόλης σε γυαλί (γύρω στα 10 cm^3) βρίσκει εφαρμογή στη μελέτη της ταχύτητας ψύξης του ανθρώπινου σώματος, αφού εξομοιωθεί μ' αυτή. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι, στις ψυχρές περιοχές του κόσμου, η θερμοκρασία του αέρα μόνη μας δίνει ένα δείκτη άνεσης ή δυσφορίας που

δεν είναι ικανοποιητικός. Αυτός ο δείκτης όμως διορθώνεται όταν συνυπολογισθεί η ταχύτητα αερισμού -αυτή την καθορίζει το ω - που είναι μια σπουδαία επί πλέον παράμετρος.

ΠΕΙΡΑΜΑ II. Μέτρηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για επίπεδη επιφάνεια.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση αυτή είναι δίσκοι αλουμινίου, τοποθετημένοι μέσα σε θερμομονωτικό υλικό έτσι ώστε η ψύξη τους να γίνεται μόνο από την επάνω τους επιφάνεια, που έρχεται σ' επαφή με τον αέρα. Η θερμοκρασία των δίσκων παίρνεται με υδραργυρικά θερμόμετρα που εισάγονται μέχρι το κέντρο τους με τη βοήθεια οπών που υπάρχουν στα πλάγια των δίσκων. Λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, η θερμοκρασία των δίσκων μπορεί να θεωρηθεί, με προσέγγιση, η ίδια σ' όλο τους το σώμα, εκτός από τις περιπτώσεις πολύ γρήγορης ψύξης της επιφάνειας των δίσκων.

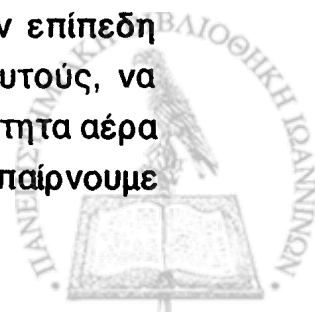
Ένας ηλεκτρικός ανεμιστήρας δημιουργεί ρεύμα αέρα κατά μήκος του τραπεζιού που είναι τοποθετημένοι οι δίσκοι του αλουμινίου. Καθώς το ρεύμα του αέρα δεν περιορίζεται από εμπόδια, η ταχύτητα του αέρα ελαττώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον ανεμιστήρα και μπορεί να μετρείται επάνω από κάθε δίσκο μ' ένα κατάλληλο ανεμόμετρο.

Οι δίσκοι θερμαίνονται αργά με μια ηλεκτρικά θερμαινόμενη μεταλλική πλάκα στις θέσεις τους στο θερμομονωτικό υλικό έτσι ώστε μόνο οι επάνω τους επιφάνειες να είναι εκτεθειμένες στο ρεύμα αέρα που δημιουργεί ο ανεμιστήρας. Σύμφωνα μ' όσα αναφέρονται στο πείραμα I η τιμή $t = c\rho V/\omega A$ και επομένως το ω μπορεί να καθορισθεί για διαφορετικές ταχύτητες του αέρα.

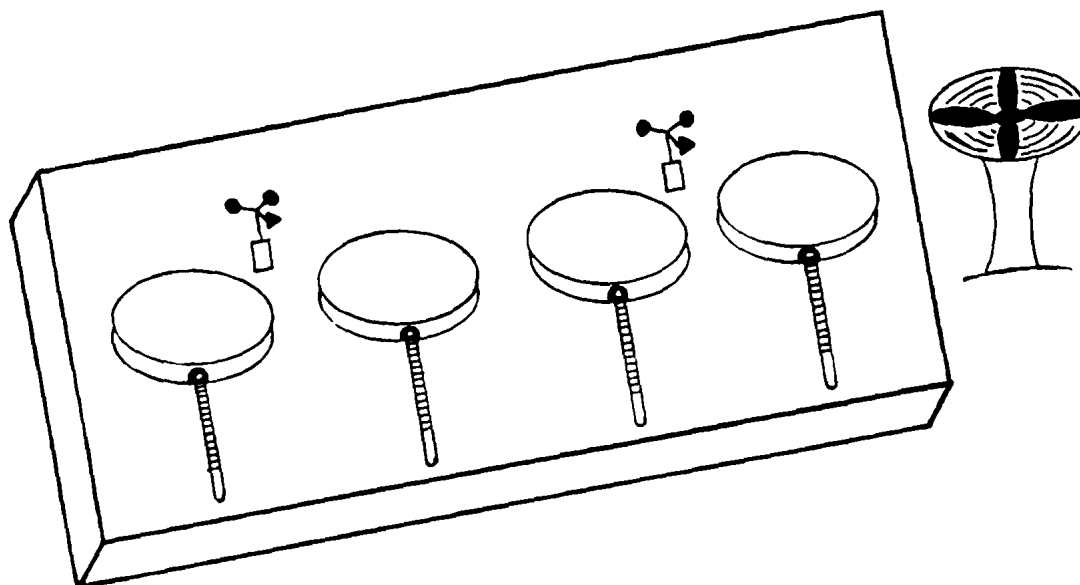
Επειδή ο λόγος του όγκου προς την επιφάνεια των δίσκων που εκτίθεται στον αέρα είναι $V/A=h$, το πάχος του κυλινδρικού δίσκου, μόνο αυτό χρειάζεται να μετρηθεί. Η οπή που δέχεται το θερμόμετρο μπορεί να θεωρηθεί σαν μη υπάρχουσα, αφού καλύπτεται όλη από τη μάζα του θερμομέτρου. Ο εξοπλισμός του πειράματος φαίνεται στο σχήμα 1.1.

Η ειδική θερμότητα και η πυκνότητα του αλουμινίου μπορεί να ληφθεί ίση με $0.88 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ και 2.7 g cm^{-3} , αντίστοιχα.

Αφού βρεθεί η συναρτησιακή σχέση μεταξύ του ω για την επίπεδη επιφάνεια των δίσκων και της ταχύτητας του αέρα επάνω απ' αυτούς, να τοποθετηθεί σε διάγραμμα η σχέση και να βρεθεί το ω για την ταχύτητα αέρα μηδέν. Η τελευταία αυτή τιμή να συγκριθεί με την τιμή του ω που παίρνουμε



για την επιφάνεια του δίσκου αλουμινίου σε ακίνητο αέρα, σύμφωνα με το πείραμα I.



Σχήμα 1.1 Όργανα για τη μέτρηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για μια επίπεδη επιφάνεια. Τεμάχια πολυουραιθάνης απομονώνουν όλες, εκτός από τις επάνω, τις επιφάνειες των δίσκων αλουμινίου που οι θερμοκρασίες τους δίνονται από υδραγυρικά θερμομέτρα. Στα πλάγια φαίνεται το ανεμόμετρο χειρός, ενώ στο βάθος ο ηλεκτρικός ανεμιστήρας.

1.5 Η επίδραση της ακτινοβολίας στα στοιχεία των οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας.

Ένα θερμομετρικό στοιχείο επηρεάζεται, γενικά, από την ακτινοβολία. Ακόμη κι αν το στοιχείο έχει προστατευθεί από την άμεση ακτινοβολία του ήλιου και τη διάχυτη που είναι κυρίως στο ορατό μέρος του φάσματος, παραμένει η υπέρυθρη ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται και το υπόλοιπο ανακλάται ή διαχέεται. Η ίδια η επιφάνεια του στοιχείου θερμομέτρησης εκπέμπει ακτινοβολία που ποσοτικά καθορίζεται από το νόμο Stefan-Boltzmann και από την αφεπικότητα της επιφάνειας ε:

$$F = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.8)$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{K}$. Η τιμή το σ που χρησιμοποιούμε είναι $5.67 \times 10^{-9} \text{ m W cm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-4}$.

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης μπορεί να χωρισθεί σε δύο κύριες περιοχές μήκους κύματος. Ο ήλιος, που μπορεί να θεωρηθεί σαν "μαύρο σώμα" σε θερμοκρασία περίπου 6000 K, είναι η πηγή της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που περιλαμβάνει την υπεριώδη και την ορατή ακτινοβολία, μέρος της οποίας διαχέεται και ανακλάται από την ατμόσφαιρα και τις επιφάνειες της γης. Μεγάλου μήκους κύματος ή υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται από τη γη και την ατμόσφαιρά της που

ευρίσκονται σε πολύ μικρότερη θερμοκρασία στην περιοχή $270 \pm 50^\circ\text{K}$. Επειδή τα περισσότερα σώματα που ακτινοβολούν δεν είναι τέλεια "μαύρα σώματα" και ακτινοβολούν σε ποικίλα μήκη κύματος, αναγκαζόμαστε να θεωρούμε μέσες ιδιότητες ακτινοβολίας των επιφανειών στην ορατή και στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος χωριστά. Έτσι η ορατή ή μικρού μήκους κύματος απορροφητικότητα δίνεται από το A_μ και η υπέρυθρη από το ϵ . Και οι δύο αυτές ποσότητες είναι μικρότερες ή το πολύ ίσες με 1 για τα τέλεια "μαύρα σώματα".

Αν ένα στοιχείο θερμομέτρου ή οποιοδήποτε σώμα, γενικά, εκτεθεί στην ορατή και την υπέρυθρη ροή ακτινοβολίας S_i και L_i αντίστοιχα, τότε το καθαρό κέρδος σε ενέργεια από ακτινοβολία είναι:

$$A_N = A_\mu S_i + \epsilon(L_i - \sigma T^4) \quad (1.9)$$

όπως μπορούμε να το δούμε από το σχήμα 1.2.

Το κέρδος ενέργειας του στοιχείου από ακτινοβολία πρέπει να εξισορροπείται από την απώλεια θερμότητας διαμέσου της οριακής επιφάνειας του στοιχείου. Έτσι η εξίσωση 1.2 γίνεται:

$$H + A_N = \frac{c \rho V}{A} \frac{dT}{dt} \quad (1.10)$$

Όταν το θερμομέτρο φθάνει στη θερμοκρασία ισορροπίας, $dT/dt=0$, τότε

$$H + A_N = 0$$

έτσι ώστε

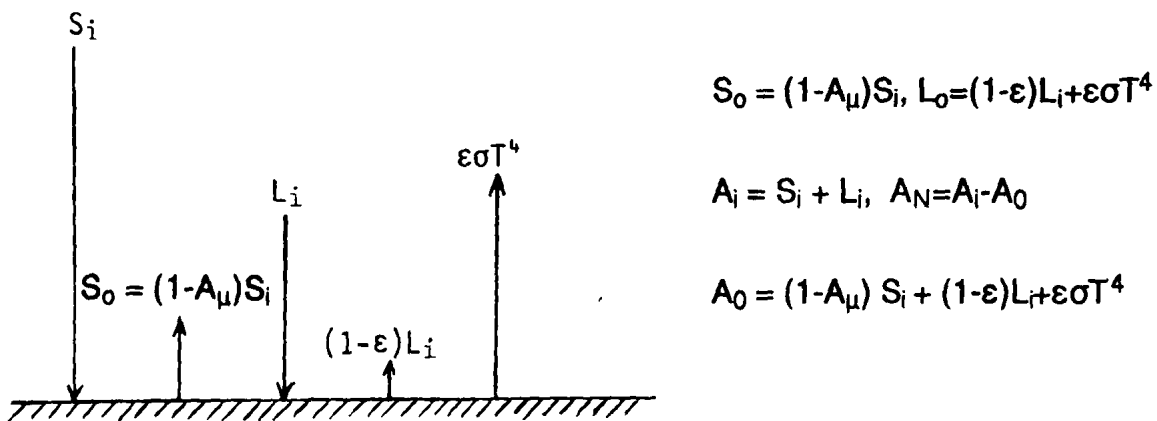
$$\omega(T - T_a) = A_N \quad (1.11)$$

Επομένως από τις 1.9 και 1.11 η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στοιχείου και αέρα, αν όλες οι θερμοκρασίες είναι σε $^\circ\text{K}$, είναι:

$$\Delta T = (T - T_a) = A_N / \omega = \frac{1}{\omega} [A_\mu S_i + \epsilon(L_i - \sigma T^4)] \quad (1.12)$$

Αν το θερμομέτρο προφυλάσσεται με γυαλιστερό μεταλλικό θώρακα τα μεγέθη A_μ και ϵ μπορεί να ελαττωθούν περίπου στο 0.1. Συνήθως, με την προϋπόθεση ότι τα L_i και σT^4 είναι του ίδιου μεγέθους, θεωρείται πολύ σημαντικό το να κρατούμε ιδιαίτερα το A_μ πολύ μικρό. Επειδή το A_μ είναι μικρότερο για μια λευκού χρώματος επιφάνεια (ας πούμε 0.05) από μια επιφάνεια χρώμιου ή αλουμίνιου ο κλωβός Stevenson, που είναι η πρότυπη μορφή μετεωρολογικού κλωβού, κατασκευάζεται με λευκά χρωματισμένες

περσίδες που πρέπει να διατηρούνται καθαρές για να ελαττώνουν την απορρόφηση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος στο ελάχιστο. Οι περσίδες σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν το φυσικό αερισμό των θερμομέτρων εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα καλή σκίαση. Είναι δυνατό όμως να γίνουν σοβαρά λάθη στη θερμοκρασία σε περιπτώσεις νηνεμίας, όταν ο αερισμός του κλωβού δεν είναι πλήρης. Το ψυχρόμετρο Assmannεγκλωβίζει τα δύο θερμομέτρά του σε μεγάλης ανακλαστικότητας διπλούς μεταλλικούς κυλινδρικούς σωλήνες και λειτουργεί με ρεύμα αέρα που αναπτύσσεται από μηχανικά κινούμενο ανεμιστήρα. Ο πίνακας 1.1 δίνει τιμές ροής ακτινοβολίας $F = \sigma T^4$ για την περιοχή θερμοκρασιών που συναντάμε στη Μετεωρολογία.



Σχήμα 1.2: Οι ροές ακτινοβολίας σε μια επίπεδη, αδιαφανή επιφάνεια, όπου οι δείκτες "i" και "o" δηλώνουν διευθύνσεις προς τα μέσα και προς τα έξω της γης, αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1

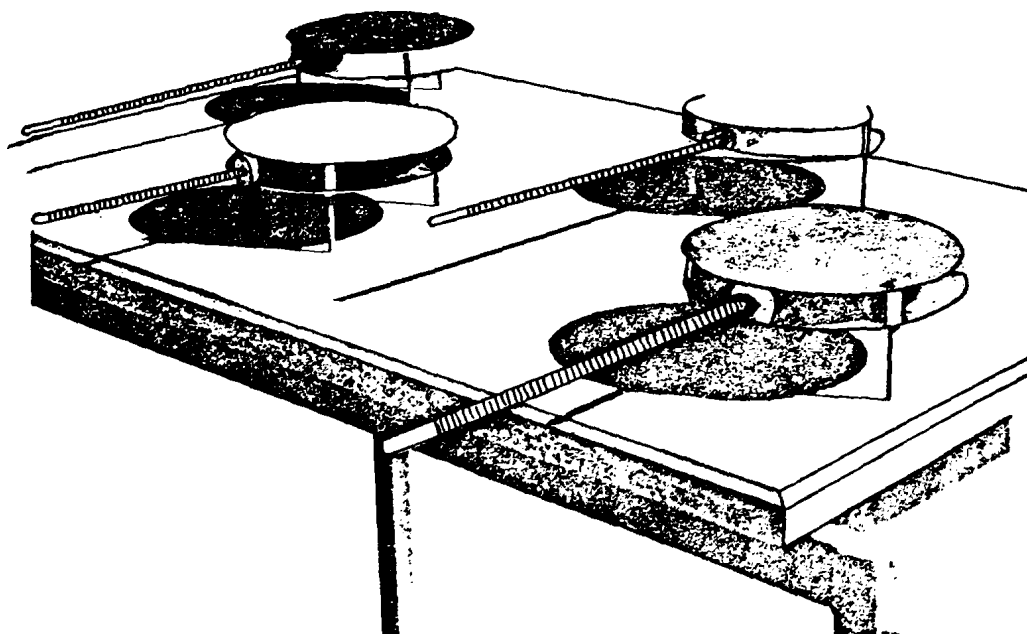
Ροές ακτινοβολίας $F = \sigma T^4$ (mWcm^{-2})

T(K)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
240	18.81	19.13	19.45	19.77	20.10	20.43	20.76	21.10	21.45	21.80
250	22.15	22.50	22.87	23.23	23.60	23.97	24.35	24.74	25.12	25.51
260	25.91	26.31	26.72	27.13	27.54	27.96	28.39	28.82	29.25	29.69
270	30.13	30.58	31.04	31.49	31.96	32.43	32.90	33.38	33.87	34.36
280	34.85	35.35	35.86	36.37	36.89	37.41	37.94	38.47	39.01	39.55
290	40.10	40.66	41.22	41.79	42.36	42.94	43.53	44.12	44.71	45.32
300	45.93	46.54	47.16	47.79	48.43	49.07	49.71	50.37	51.03	51.69
310	52.36	53.04	53.73	54.42	55.12	55.82	56.54	57.26	57.98	58.71
320	59.45	60.20	60.95	61.72	62.48	63.26	64.04	64.83	65.63	66.43
330	67.24	68.06	68.89	69.72	70.56	71.41	72.27	73.13	74.00	74.88

ΠΕΙΡΑΜΑ III. Επίδραση της ακτινοβολίας σε εγκλωβισμένα θερμόμετρα

Τέσσερα όμοια θερμόμετρα είναι τοποθετημένα σε τέσσερα διαφορετικού χρώματος μεταλλικά περιβλήματα. Τα περιβλήματα αποτελούν δύο παράλληλοι δίσκοι που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες των περιβλημάτων είναι χρώματος λευκού ή μαύρου. Έτσι έχουμε τέσσαρες μόνο συνδυασμούς χρωμάτων. Οι μαύρες επιφάνειες μπορεί να θεωρηθεί ότι απορροφούν όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτές και είναι έτσι τέλεια "μαύρα σώματα". Αφού οι δίσκοι βρίσκονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (θερμοκρασία περίπου του περιβάλλοντος), μόνο η υπέρυθρη ή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία θα εκπέμπεται. Οι λευκές επιφάνειες μπορεί να θεωρηθεί ότι ανακλούν όλη την μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, αλλά απορροφούν την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτές. Οποσδήποτε, όλη η εκπεμπόμενη από τους δίσκους ακτινοβολία είναι στην περιοχή μεγάλου μήκους κύματος.

Εύκολα κατανοούμε ότι η απώλεια θερμότητας από τα θερμόμετρα λόγω ανωμεταφοράς (ο αέρας κινείται κατακόρυφα μεταξύ των δίσκων) είναι δύσκολο να εκτιμηθεί έτσι ώστε το πείραμα, σ' αυτή την απλή μορφή του, είναι μόνο ποιοτικό. Είναι όμως ενδιαφέρον να συγκρίνουμε την επίδραση των λευκών και μαύρων επιφανειών στα θερμόμετρα που αντίστοιχα εγκλωβίζουν.



Σχήμα 1.3 Συνδυασμοί μαύρου και άσπρου χρώματος δίσκων για υδραργυρικά θερμόμετρα, που το στοιχείο τους βρίσκεται στο κέντρο και σε ίση απόσταση από τους δίσκους, με τη βοήθεια λαστιχένιων παωμάτων.

Τα τέσσερα θερμόμετρα, εγκλωβισμένα στους τέσσερες διαφορετικούς συνδυασμούς χρωμάτων, εκτίθενται στην ακτινοβολία του ήλιου και σημειώνεται η θερμοκρασία τους ύστερα από ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστο 10 λεπτών της ώρας. Τα καλύτερα αποτελέσματα τα παίρνουμε όταν η περιοχή που εκτίθενται τα εγκλωβισμένα θερμόμετρα προστατεύεται από τον άνεμο.

Να σχολιασθούν οι αναγνώσεις των τεσσάρων θερμομέτρων και ενός όμοιου, που αερίζεται κανονικά.

Το σχήμα 1.3 δείχνει την έτοιμη διάταξη του πειράματος με τα λαστιχένια πώματα που χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση των θερμομέτρων στη θέση τους, ώστε το στοιχείο τους να βρίσκεται σε ίση απόσταση μεταξύ των κέντρων των δίσκων. Τα ανοίγματα στα πλάγια μεταξύ των δίσκων θα έχουν σαν αποτέλεσμα οι διαφορές θερμοκρασίας των θερμομέτρων να ελαττώνονται, λόγω της επίδρασης αερισμού, όταν πνέει άνεμος.

1.6 Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται και ηλεκτρικές αντιστάσεις αφού είναι γνωστή η σχέση μεταξύ του μεγέθους της ηλεκτρικής αντίστασης και της θερμοκρασίας. Τα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης απαρτίζονται συνήθως από ένα κατάλληλο μεταλλικό αγωγό του οποίου η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει και με βάση τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ημιαγωγών γνωστών σαν thermistors που η ηλεκτρική τους αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας μπορεί να γραφεί σαν δυναμοσειρά:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots) \quad (1.13)$$

Για τις περιοχές θερμοκρασιών που συναντάμε στη Μετεωρολογία είναι συνήθως ικανοποιητική η προσέγγιση της ηλεκτρικής αντίστασης από τη γραμμική σχέση μεταξύ αντίστασης και θερμοκρασίας της μορφής:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (1.14)$$

Ο πίνακας 1.2 δείχνει την τιμή του α για έναν αριθμό αγωγών.



ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2

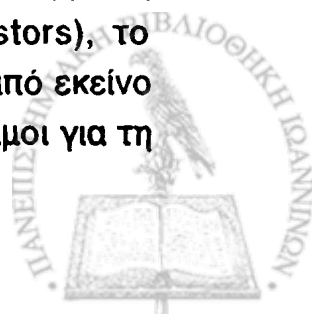
**Θερμοκρασιακός συντελεστής ηλεκτρικής αντίστασης (α)
διάφορων υλικών**

Υλικά	$\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$
<u>Μέταλλα</u>	
Αλουμίνιο	0.0039
Χαλκός	0.0039
Σίδηρος	0.0062
Πλατίνα	0.0037
Άργυρος	0.0038
Μαγγανίνη	0.000000
<u>Αμέταλλα</u>	
Άνθρακας	- 0.0005

Η εκλογή ενός ορισμένου μετάλλου για τη χρησιμοποίησή του σαν θερμομέτρου ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται κυρίως στην αντοχή του στο χρόνο, αφού τα περισσότερα μέταλλα έχουν την ίδια τάξη μεγέθους ευαισθησίας στην αλλαγή της θερμοκρασίας εκτός από ειδικά κράματα, όπως η μαγγανίνη, που χρησιμοποιείται για ακριβείς και σταθερούς στις μεταβολές της θερμοκρασίας resistors. Επειδή η πλατίνα δεν οξειδώνεται και δεν διαβρώνεται χρησιμοποιείται πιο συχνά από τα άλλα μέταλλα.

Οι thermistors γίνονται από κατάλληλους ημιαγωγούς, όπως για παράδειγμα από άνθρακα ή από οριακά στο περιοδικό σύστημα μέταλλα, όπως το γερμάνιο.

Σ' αυτά τα σώματα τα ηλεκτρόνια του πλέγματος δεν έχουν την ίδια ελευθερία όπως στα μέταλλα, αλλά η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα να αποκτηθεί αρκετό ποσό ενέργειας από ένα ικανοποιητικό αριθμό αυτών των ηλεκτρονίων για να γίνουν ελεύθερα κι έτσι να αυξηθεί η αγωγιμότητα. Στην πραγματικότητα, στους ημιαγωγούς (thermistors), το μέγεθος του θερμοκρασιακού συντελεστή α είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των μεταλλικών αγωγών (resistors). Οι thermistors είναι πιο πολύτιμοι για τη



μέτρηση μικρών διαφορών θερμοκρασίας, αν και χρειάζονται περισσότερο συχνές βαθμονομήσεις από όσες ένα θερμόμετρο πλατίνας.

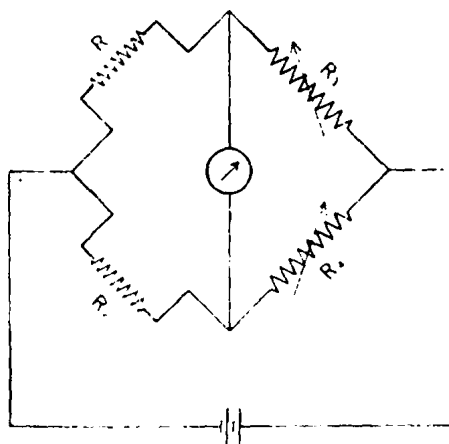
**ΠΕΙΡΑΜΑ IV. Η εκλυόμενη θερμότητα από θερμόμετρο
ηλεκτρικής αντίστασης και η μέτρηση
της θερμοκρασίας του αέρα**

Τα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης, συμπεριλαμβανομένων και των thermistors, ευρίσκουν συχνά εφαρμογή στη Μετεωρολογία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα και ιδιαίτερα διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων της ατμόσφαιρας. Τόσο οι διαφορές της θερμοκρασίας όσο και οι προσωρινές μεταβολές της πρέπει να είναι γνωστές, για να μπορούμε να καθορίσουμε τη ροή αισθητής θερμότητας στην ατμόσφαιρα.

Η απλούστερη μέθοδος μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης με ακρίβεια κάνει χρήση της γέφυρας Wheatstone, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.4. Λέμε ότι η γέφυρα ισορροπεί όταν η σχέση μεταξύ των τιμών των αντιστάσεων, που φαίνονται στο διάγραμμα, είναι:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{ή} \quad R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (1.15)$$

Είναι πρόδηλο ότι μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας θα μετατρέπεται σε θερμότητα σε όλες τις αντιστάσεις συμπεριλαμβανομένης και της αντίστασης του στοιχείου R_1 και θα ανυψώνει τη θερμοκρασία του πάνω απ' εκείνη του αέρα που το περιβάλλει και του οποίου δίνει τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.4: Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone για θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης.



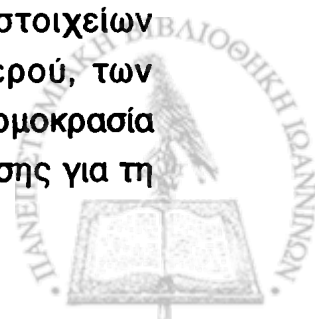
Αυξάνοντας την αντίσταση των ρυθμιζομένων R_3 και R_4 της γέφυρας ελαττώνεται το ρεύμα που περνάει από το στοιχείο R_1 , αλλά ταυτόχρονα ελαττώνεται και η ευαισθησία του συστήματος της γέφυρας.

Επειδή η τιμή απώλειας θερμότητας από ένα θερμαινόμενο στοιχείο αυξάνεται με τον αερισμό, ένας από τους σκοπούς αυτού του πειράματος θα ήταν να καθορισθεί η ελάχιστη ταχύτητα του ρεύματος αέρα σε σχέση με μια ορισμένη απαίτηση ακρίβειας στη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα. Για να ελαττωθεί το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας του στοιχείου που οφείλεται στα "πακέτα" του αέρα που κινούνται με τυρβώδη ροή πρέπει να διασφαλίζεται ικανοποιητική θερμική αδράνεια του στοιχείου. Έτσι, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται ενσωματωμένοι σε γυαλί thermistors που περιβάλλονται από μεταλλικό θώρακα μορφής κυλίνδρου για την ανάκλαση των ακτινοβολιών και τη διέλευση ρεύματος αέρα σταθερής ταχύτητας.

Η απλούστερη διαδικασία είναι εκείνη της εκλογής μιας αντίστασης R_2 που να είναι ίση με του στοιχείου R_1 . Αρχικά και οι δύο αντιστάσεις θα πρέπει να τοποθετηθούν μαζί σε ρεύμα αέρα σχετικά μεγάλης ταχύτητας. Ο αέρας αυτού του ρεύματος θα πρέπει να έχει βέβαια τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Μετά ένα από τα δύο στοιχεία αφήνεται στο ρεύμα αέρα για να λειτουργήσει σαν θερμόμετρο αναφοράς ενώ το άλλο μεταφέρεται σε άλλη θέση, όπου υποβάλλεται σε ρεύματα αέρα μικρότερης ταχύτητας ροής. Σε κάθε διαφορετική ταχύτητα του ρεύματος αέρα σημειώνεται η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο στοιχείων. Η διαφορά θερμοκρασίας των δύο στοιχείων, σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ρεύματος αέρα που μεταβάλλεται, μεταφέρεται σε διάγραμμα.

Επειδή η ευαισθησία της γέφυρας αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις, το πείραμα θα πρέπει να επαναληφθεί με διαφορετικές εντάσεις ρεύματος, οι οποίες επιτυγχάνονται με κατάλληλη μεταβολή της εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού. Μ' αυτό τον τρόπο μπορεί να καθορισθεί η βέλτιστη ένταση ρεύματος για γνωστές συνθήκες αερισμού (ταχύτητας ρεύματος αέρα).

Στην προετοιμασία του πειράματος είναι προτιμότερο να ισορροπηθεί η γέφυρα με τα δύο στοιχεία R_1 και R_2 σε καλή θερμική επαφή με τον αέρα που τα περιβάλλει ώστε να έχουν τη θερμοκρασία του και με προσαρμογή της τιμής της R_3 είτε της R_4 . Το σύστημα πρέπει επίσης να βαθμονομηθεί, προκειμένου να δείχνει με ακρίβεια τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών των δύο στοιχείων. Αυτό μπορεί να γίνει με εμβάπτιση των στοιχείων ξεχωριστά σε θερμικά καλά μονωμένες μάζες αναδευόμενου νερού, των οποίων οι θερμοκρασίες δεν πρέπει να διαφέρουν πολύ από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος, λόγω της μη γραμμικότητας της σχέσης για τη



γέφυρα. Για τη λήψη της θερμοκρασίας του νερού χρησιμοποιούνται κοινά υδραργυρικά θερμόμετρα με ακρίβεια 0.1°C και πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε τα ηλεκτρικά στοιχεία που εξετάζουμε να είναι **ηλεκτρικά και όχι θερμικά μονωμένα** στο νερό.

Αν η ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμική σ' ένα θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης είναι W , τότε η ροή θερμότητας που δημιουργείται στο εσωτερικό της αντίστασης και μεταφέρεται στον αέρα διαμέσου της επιφάνειας του στοιχείου A δίνεται από το W/A . Έτσι, για ένα θερμόμετρο αντίστασης, η εξίσωση 1.2 πρέπει να τροποποιηθεί για να συμπεριλαμβάνει αυτόν τον επιπλέον όρο και γίνεται:

$$\omega(T-T_a) = A_N + \frac{W}{A} \quad (1.16)$$

ενώ τώρα η εξίσωση για το λάθος στη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα γίνεται:

$$\Delta T = \frac{1}{\omega} \left(A_N + \frac{W}{A} \right) \quad (1.17)$$

Πάλι καταφαίνεται ότι εξασφαλίζοντας μια υψηλή τιμή ταχύτητας του ρεύματος αέρα -μεγάλη τιμή του ω - το λάθος ΔT στην ανάγνωση της θερμοκρασίας μπορεί να ελαττωθεί στο απαιτούμενο επίπεδο.

Υποθέτοντας ότι το στοιχείο μπορεί να προστατευθεί, έτσι ώστε ο όρος της ακτινοβολίας να μπορεί να μηδενισθεί, όπως έγινε στην πραγματικότητα στο πείραμα I, τότε

$$\Delta T = W/\omega A \quad (1.18)$$

Αφού τα W , A και ΔT μπορούν να μετρηθούν, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην πράξη τις τιμές του ω που πήραμε στο πείραμα II. Όμως, επειδή η επίδραση των ποικίλων σχημάτων του στοιχείου απαιτεί συνυπολογισμό σ' αυτή την εκτίμηση, μια περισσότερο πρακτική προσέγγιση θα ήταν η θεώρηση της εξίσωσης 1.18 σαν βάσης μιας εναλλακτικής και απλής μεθόδου για τον καθορισμό του ίδιου του ω .

Εύκολα δείχνεται ότι, όταν το κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 1.4 ισορροπεί, η ισχύς του ρεύματος που μετατρέπεται σε θερμότητα στο στοιχείο αντίστασης R_1 δίνεται από τη σχέση:

$$W = R_1 \left(\frac{V}{R_1 + R_3} \right)^2 \quad (1.19)$$



όπου V είναι το ηλεκτρικό δυναμικό που εφαρμόζεται στη γέφυρα.

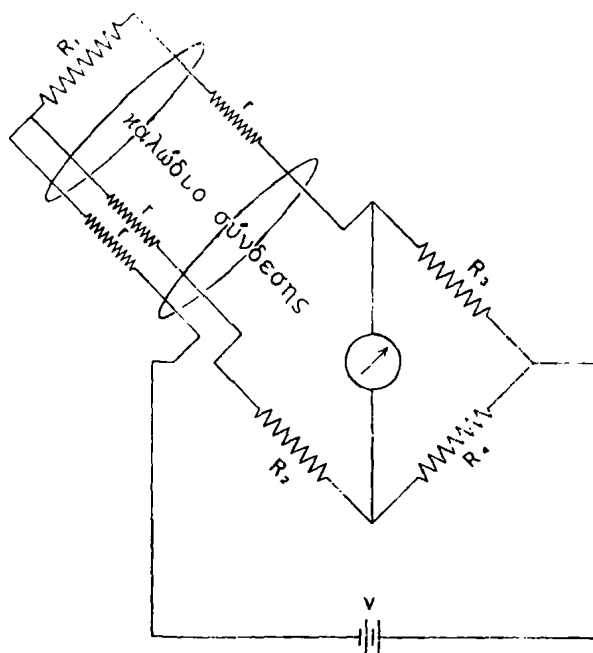
Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης R_1 τοποθετείται σε μετεωρολογικό πυλώνα, μακριά από τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος της γέφυρας. Για να αποφύγουμε την επίδρασή της θερμοκρασίας των αντιστάσεων των στοιχείων και γενικά των διαφόρων αντιστάσεων των καλωδίων υιοθετούμε τη διευθέτηση του κυκλώματος του σχήματος 1.5.

Η συνθήκη ισορροπίας τότε γίνεται:

$$\frac{R_1+r}{R_2+r} = \frac{R_3}{R_4} \quad R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} + r \left(\frac{R_3}{R_4} - 1 \right) \quad (1.20)$$

όπου τα τρία μεγάλοι μήκους καλώδια υποτίθεται ότι έχουν την ίδια αντίσταση r . Η εξίσωση 1.20 δείχνει, ότι αν η γέφυρα είναι σχεδιασμένη να είναι συμμετρική, έτσι ώστε $R_1=R_2$ και επομένως $R_3=R_4$, τότε η πραγματική τιμή του r δεν παίζει κανένα ρόλο.

Η επίδραση της αντίστασης των καλωδίων στην ισχύ που χάνεται σαν θερμότητα στο στοιχείο καλύπτεται από το δεύτερο μέλος της εξίσωσης 1.19, που γίνεται $R_1[V/(R_1+R_3+2r)]^2$ και από το οποίο φαίνεται ότι, αν $(R_1+R_3) \gg 2r$, η επίδραση των καλωδίων είναι αμελητέα.



Σχήμα 1.5 Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone για σύνδεση θερμόμετρου ηλεκτρικής αντίστασης σε μεγάλη απόσταση



ΠΙΕΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΔΡΑΤΜΩΝ

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μείγμα αρκετών αερίων συστατικών τα οποία απαντούν σαν μονοατομικά ή πολυατομικά μόρια. Τα περισσότερα από αυτά ευρίσκονται σε σταθερή αναλογία, όπως για παράδειγμα το άζωτο και το οξυγόνο, επειδή δεν υπάρχουν σημαντικές πηγές παραγωγής τους ή καταστροφής τους ούτε υγρή ή στερεά φάση των αερίων αυτών στο γήινο σύστημα. Παρότι τα φυτά και τα ζώα παίρνουν μέρος στον κύκλο του οξυγόνου οι ποσότητες που χρησιμοποιούν είναι αμελητέες όταν συγκρίνονται με εκείνες που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Οι υδρατμοί, από την άλλη πλευρά, επειδή συνυπάρχουν με το υγρό νερό και τον πάγο που συναντάμε ευρύτατα επάνω στη γη και μέσα στην ατμόσφαιρα, περνούν από μεγάλες μεταβολές της συγκέντρωσής τους μέσα στην ατμόσφαιρα.

Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται με τις καύσεις φυσικών προϊόντων ή τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τις συγκοινωνίες όπως επίσης και με τη φωτοσύνθεση περνά από σημαντικές μεταβολές της συγκέντρωσης του στην ατμόσφαιρα τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Σε κάθε ημισφαίριο μπορεί να παρατηρήσουμε τη σχέση μεταξύ της εποχιακής μεταβολής του και των λειτουργιών των φυτών. Όμως, το διοξείδιο του άνθρακα με μια μερική πίεση περίπου 0.3 mbar, είναι ένα συστατικό της ατμόσφαιρας με πολύ λιγότερη μάζα από τους υδρατμούς που η πίεσή τους όταν είναι κορεσμένοι στους 25°C είναι με προσέγγιση 100 φορές μεγαλύτερη.

Το διοξείδιο του άνθρακα, εκτός ίσως ευκαιριακά στις πολικές περιοχές, δεν περνά από αλλαγές φάσης επάνω στη γη. Δεν υπάρχει απόθεμα υγρής ή στερεάς φάσης του για τροφοδότηση της αέριας όπως στην περίπτωση του νερού που η πίεσή του μέσα στην ατμόσφαιρα, ακόμα και κάτω από συνθήκες κορεσμού, εξαρτάται πάρα πολύ από τη θερμοκρασία. Τα πλεονάσματα του διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται ότι διαλύονται μέσα στις θάλασσες και τους ωκεανούς με αποτέλεσμα να διατηρείται μια συνολική ισορροπία του στη φύση, που είναι δυνατό να αλλάξει αλλά με πολύ αργούς ρυθμούς.



2.1 Ατμοσφαιρική πίεση

Η μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι πολύ σημαντική στη Μετεωρολογία και αποτελεί τη βάση του ημερήσιου μετεωρολογικού χάρτη. Η πίεση ορίζεται σαν η δύναμη που ασκείται στη μονάδα της επιφάνειας ενός μέσου και καθώς αυτή είναι ιστροπική δεν χρειάζεται εξειδίκευση του προσανατολισμού της. Αν η επιτάχυνση της βαρύτητας g είναι η μόνη επιτάχυνση που υπάρχει και αν m είναι η ολική μάζα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται επάνω από μια επιφάνεια A , τότε η πίεση p δίνεται από την εξίσωση

$$p = m g/A \quad (2.1)$$

Στο σύστημα μονάδων C.G.S. η πίεση εκφράζεται σε dyne cm^{-2} . Επειδή η κανονική ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι, με προσέγγιση, $10^6 \text{ dyne cm}^{-2}$ η ποσότητα αυτή ορίζεται σαν 1 bar. Η συνήθης μετεωρολογική μονάδα είναι το millibar (mb) που είναι ίσο με $10^3 \text{ dyne cm}^{-2}$.

Το κύριο ενδιαφέρον στη μετεωρολογία συγκεντρώνεται στις κλίσεις (gradients) πίεσης, είτε με τη μορφή διαφορών πίεσης στον ίδιο τόπο και σε διαφορετική χρονική στιγμή είτε στην ίδια χρονική στιγμή αλλά σε διαφορετικούς τόπους. Υπάρχει βέβαια αρκετό ενδιαφέρον στις μικρές διαφορές που μπορεί να οφείλονται σε διαφορές της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε διαφορετικούς τόπους. Αυτές ποικίλουν με το γεωγραφικό πλάτος και το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και επηρεάζονται επίσης από τις μάζες των ορεινών όγκων. Με διεθνή συμφωνία κάνουμε αναγωγή των παρατηρήσεων στην κανονική βαρύτητα που έχει την τιμή $980.62 \text{ cm sec}^{-2}$ στην επιφάνεια της θάλασσας και σε γεωγρ. πλάτος 45° . Στους περισσότερους σταθμούς η διόρθωση της βαρύτητας είναι πολύ μικρή και μας επιτρέπει να τη θεωρήσουμε σαν μια σταθερή τιμή, που την προσθέτουμε σε όλες τις αναγνώσεις του βαρομέτρου.

Με σκοπό να είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε αναγνώσεις σε σταθμούς που έχουν διαφορετικό υψόμετρο είναι αναγκαίο να κάνουμε αναγωγή όλων των παρατηρήσεων σ' ένα κοινό επίπεδο, συνήθως αυτό της μέσης στάθμης της θάλασσας, αν και αυτή η πρακτική δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μεγάλων ηπειρωτικών υψιπέδων. Όταν η μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος έχει χαρακτηριστικά που δεν μπορούμε να τα δούμε, όπως συμβαίνει όταν σε κοιλάδες λιμνάζουν στρώματα αέρα πιο κρύα από εκείνα των βουνών που τις περιβάλλουν, η αναγωγή της πίεσης που είναι αναγκαία για τους μετεωρολογικούς χάρτες γίνεται μια εξαιρετικά ανακριβής διαδικασία. Αυτό είναι και το μοναδικό μειονέκτημα σήμερα που

έχουμε στη διάθεσή μας όργανα για πολύ ακριβείς μετρήσεις της πίεσης.

Η ατμοσφαιρική πίεση μετρείται με τη βοήθεια οργάνων που ονομάζονται βαρόμετρα. Οι ποικίλες μορφές των βαρομέτρων στηρίζονται συνήθως σ' ένα υγρό ή στερεό στοιχείο που αντιδρά στη δύναμη που εφαρμόζεται σ' ένα αεροστεγές υλικό, το οποίο διαχωρίζει την ατμοσφαιρική πίεση από μια άλλη πίεση αναφοράς. Στην περίπτωση του υδραργυρικού βαρομέτρου η πίεση αναφοράς είναι εκείνη του σχεδόν κενού του αναστραμμένου σωλήνα Torricelli. Σε ειδικές περιπτώσεις παρακολουθούμε μια φυσική ιδιότητα που εξαρτάται από την πίεση, όπως για παράδειγμα το σημείο βρασμού ενός κατάλληλου υγρού.

2.2 Βαρόμετρα υγρής στήλης

Η εξισορρόπηση της πίεσης της ατμόσφαιρας από στήλη υδράργυρου έχει γίνει μια τόσο κοινή διαδικασία που το μήκος της υποστηριζόμενης στήλης υδράργυρου έχει αποτελέσει μονάδα μέτρησης της πίεσης που χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Βασικά αυτή η αρχή ανακαλύφθηκε από τον Torricelli το 1643. Το εμβαδό διατομής της στήλης δεν επηρεάζει την ανάγνωση, εκτός κι αν η διατομή του σωλήνα είναι τόσο μικρή που αποκτούν σπουδαιότητα οι τριχοειδείς δυνάμεις. Ο υδράργυρος επίσης υφίσταται θερμική διαστολή δηλ. αλλαγές πυκνότητας. Επειδή το βάρος του υδράργυρου επάνω στη μονάδα της επιφάνειας είναι η μετρούμενη ποσότητα, εκλέγεται η κανονική θερμοκρασία 0°C για τις αναγωγές όλων των αναγνώσεων.

Αν ρ_T είναι η πυκνότητα του υδράργυρου στη θερμοκρασία T , τότε η πίεση που ασκείται από μια στήλη υδράργυρου ύψους h , με ομοιόμορφο εμβαδό A και μάζας m , είναι:

$$\rho = m g/A = \rho_T g h \quad (2.2)$$

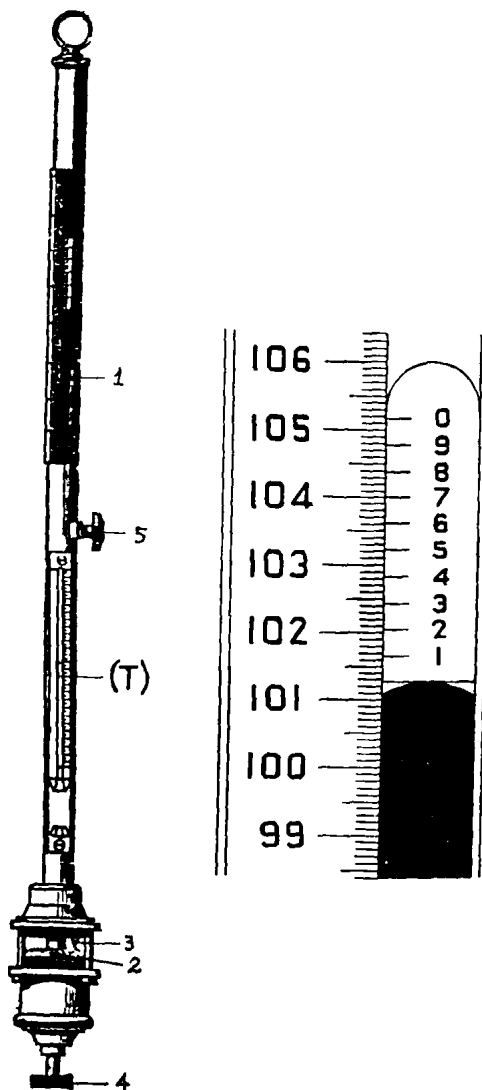
Παίρνοντας $g = 980.6 \text{ cm sec}^{-2}$ και $\rho_0 = 13.60 \text{ g cm}^{-3}$ φαίνεται ότι τα 760mm υδράργυρου στους 0°C είναι ισοδύναμα με 1013.5 mbar.

Όλα τα υδραργυρικά βαρόμετρα κάνουν μετρήσεις ακριβείας και γι' αυτό έχουν στη στήλη τους βερνιέρο που ολισθαίνει για να δίνει το ύψος της στήλης με ακρίβεια τουλάχιστο ενός δέκατου του χιλιοστού. Η κλίμακα είναι κατασκευασμένη για αναγνώσεις στο υψηλότερο σημείο του μηνίσκου του υδράργυρου της στήλης.



2.2.1. Υδραργυρικό βαρόμετρο Fortin

Το βαρόμετρο τύπου Fortin (σχ. 1) αποτελείται από τον σωλήνα (1) που περιέχει μέχρι κάποιο ύψος υδράργυρο και την λεκάνη (2) στην οποία είναι βυθισμένος ο σωλήνας. Στο επάνω μέρος της λεκάνης υπάρχει μια ακίδα (3) που η αιχμή της αντιστοιχεί στο μηδέν της κλίμακας ύψους της υδραργυρικής στήλης. Ο πυθμένας της λεκάνης είναι από δέρμα. Περιστρέφοντας τον κοχλία της βάσης της λεκάνης του βαρομέτρου (4) ανυψώνεται ή κατεβαίνει η ελεύθερη επιφάνεια του υδράργυρου της λεκάνης που την φέρνουμε να εφάπτεται της ακίδας. Στην κλίμακα μετρούμε το ύψος της στήλης υδράργυρου με τη βοήθεια κινητού βερνιέρου (5), φέρνοντας το μηδέν του βερνιέρου να εφάπτεται του μηνίσκου της ελεύθερης επιφάνειας του υδράργυρου, με τη βοήθεια του κοχλία του βερνιέρου. Το βαρόμετρο είναι εφοδιασμένο με κοινό υδραργυρικό θερμόμετρο (Τ) για την αναγωγή της στήλης στην κανονική θερμοκρασία (0°C).



Σχ. 1. Βαρόμετρο Fortin

2.2.2. Υδραργυρικό βαρόμετρο Kew

Η λεκάνη του βαρομέτρου αυτού είναι σταθερή και δεν ρυθμίζεται η ελεύθερη επιφάνεια του υδράργυρου σ' αυτή. Στο βαρόμετρο αυτό για τη μέση πίεση στην μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας η ελεύθερη επιφάνεια του υδράργυρου της λεκάνης βρίσκεται στο μηδέν της κλίμακας ενώ η ελεύθερη επιφάνεια του υδράργυρου στη στήλη βρίσκεται στο λεγόμενο ουδέτερο σημείο. Όταν αυξηθεί η πίεση ο υδράργυρος στη λεκάνη κατεβαίνει κάτω από το μηδέν ενώ στον σωλήνα ανεβαίνει επάνω από το ουδέτερο σημείο. Αν η διατομή του σωλήνα είναι 1cm^2 και η διατομή της επιφάνειας της λεκάνης 100cm^2 τότε μια αύξηση της πίεσης που θα

ανέβαζε τον υδράργυρο στο σωλήνα κατά 1cm θα είχε σαν αποτέλεσμα την πτώση του υδράργυρου στη λεκάνη κατά 1/100 cm. Το συνολικό επομένως μήκος της στήλης του υδράργυρου θα ήταν 1.01 cm. Έτσι λοιπόν εκεί που θα έπρεπε να σημειώσουμε στην κλίμακα 1 cm σημειώνουμε 1.01 cm και έχουμε απ' ευθείας την κλίμακα της πραγματικής αύξησης της πίεσης. Με αυτή τη διαδικασία χαράζεται η κλίμακα και οι πιέσεις που διαβάζουμε σ' αυτή είναι οι πραγματικές ενώ δεν είναι πραγματική η κλίμακα μήκους της στήλης.

2.2.3 Διορθώσεις και αναγωγές της πίεσης

Η τιμή της πίεσης που διαβάζεται στο υδραργυρικό βαρόμετρο διορθώνεται και ανάγεται σε κανονικές τιμές ως εξής:

α) Διορθώνεται με τον συνυπολογισμό του σταθερού σφάλματος του οργάνου που δίνει το ύψος της στήλης B.

β) Ανάγεται στους 0°C, λόγω του συντελεστή διαστολής του υδραργύρου. Η διόρθωση, λόγω θερμοκρασίας, του ύψους B της στήλης δίνεται από τη σχέση

$$C = B \frac{(m-n)t}{1+m t}$$

όπου $m=0.0001818$ ο συντελεστής διαστολής του υδραργύρου, $n=0.0000184$ ο συντελεστής διαστολής του χαλκού και t η θερμοκρασία σε °C. Για $t>0$ το C αφαιρείται από το B ενώ για $t<0$ το C προστίθεται στο B.

γ) Ανάγεται στην κανονική βαρύτητα, λόγω μεταβολής του g στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη. Η διόρθωση στην κανονική βαρύτητα του ύψους της στήλης B δίνεται από τη σχέση

$$C = \frac{g_{\Phi} - g_0}{g_0} B$$

όπου $g_0=980.616 \text{ cm/sec}^2$ η πρότυπη τιμή επιτάχυνσης της βαρύτητας στις 45° γεωγρ. πλάτους και στη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας και g_{Φ} η τοπική τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που δίνεται από τη σχέση

$$g_{\Phi} = (1 - 0.0026373 \cos^2 \Phi + 0.0000059 \cos^2 2\Phi) g_0$$

όπου Φ το γεωγρ. πλάτος του τόπου.

δ) Αναγωγή στη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας. Αυτή γίνεται με τη διόρθωση Δp (σε mbars) που δίνεται από τη σχέση (απλοποιημένη μορφή του τύπου του Laplace):



$$\Delta p = \frac{z_p p_s}{7991 + 29.271 t_s - 0.411 z_p}$$

όπου p_s είναι η πίεση του σταθμού, z_p το υψόμετρο του σταθμού σε μέτρα και t_s η θερμοκρασία του αέρα (κλωβού) σε °C.

Γιά τις αναγωγές της πίεσης και για την αποφυγή υπολογισμών έχουν συνταχθεί πίνακες που δίνουν αμέσως την ανηγμένη πίεση. Οι πίνακες 2.1 και 2.2 δίνουν τους όρους διόρθωσης που προσθέτονται αλγεβρικά στη μετρούμενη πίεση για την αναγωγή της στους 0°C και την κανονική βαρύτητα, αντίστοιχα.

ΠΕΙΡΑΜΑ V. Ένα μικρού μήκους στήλης υδάτινο βαρόμετρο

Η ευαισθησία ενός βαρόμετρου με υγρό είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την πυκνότητα του υγρού της στήλης. Αυτό σημαίνει ότι ένα υδάτινο βαρόμετρο θα ήταν χρήσιμο για την μελέτη των μεταβολών της πίεσης μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα στον ίδιο τόπο, αφού το εύρος της διακύμανσης της πίεσης, σαν πολύ μικρό, θα ήταν αδύνατο να παρατηρηθεί με τα συνήθη υδραργυρικά βαρόμετρα. Όμως, επειδή η ισοδύναμη πίεση των 760 mm υδραργύρου είναι 10.34 m νερού, είναι προφανές ότι θα χρειαζόταν ένα όργανο πολύ μεγάλου όγκου. Έτσι, χρησιμοποιώντας πλαστικό διαφανή σωλήνα με παχύ τοίχωμα σ' ένα κτίριο με ύψος τουλάχιστο 10.5 m η ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να καθορισθεί με τη μέτρηση του κατακόρυφου ύψους της στήλης του νερού. Η μεταβολή της πυκνότητας του νερού με τη θερμοκρασία πρέπει να ληφθεί υπόψη για μεγάλη ακρίβεια καθορισμού της πίεσης, καθώς και η μερική πίεση των κορεσμένων υδρατμών.

Ένα λιγότερο ογκώδες υδάτινο βαρόμετρο χρησιμοποιεί ένα μικρότερου μήκους σωλήνα που συνδέεται μ' ένα αεροστεγή μεταλλικό θάλαμο στο επάνω του μέρος και με μια κατάλληλη λεκάνη στο κάτω του άκρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Θερμαίνοντας προσεκτικά το μεταλλικό θάλαμο μιά μικρή ποσότητα μάζας αέρα μπορεί να εκδιωχθεί από το θάλαμο διαμέσου του σωλήνα και του νερού της λεκάνης στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Έτσι όταν ο μεταλλικός θάλαμος και το όλο σύστημα αποκτήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μια στήλη νερού θα εμφανιστεί μέσα στο σωλήνα. Το ύψος της στήλης νερού που εμφανίζεται μας δίνει μια ένδειξη της διαφοράς μεταξύ της ατμοσφαιρικής πίεσης p_A και εκείνης του αέρα του θαλάμου p_d συν την πίεση των κορεσμένων υδρατμών e_s μέσα στο θάλαμο, δηλ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

Αναγωγή βαρομετρικής ανάγνωσης στη θερμοκρασία 0°C
Όρος διόρθωσης της ανάγνωσης

Θερμοκρασία όργάνου	Ανάγνωση Βαρομέτρου (mb)						
°C	920	940	960	980	1000	1020	1040
	<i>millibars</i>						
	+	+	+	+	+	+	+
-2	0.32	0.32	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36
-1	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18
2	0.32	0.32	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36
3	0.48	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53
4	0.63	0.64	0.65	0.67	0.68	0.70	0.71
5	0.79	0.80	0.82	0.84	0.85	0.87	0.89
6	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07
7	1.11	1.13	1.15	1.18	1.20	1.22	1.25
8	1.26	1.29	1.32	1.35	1.38	1.40	1.43
9	1.42	1.45	1.48	1.52	1.55	1.57	1.60
10	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71	1.74	1.77
11	1.74	1.77	1.81	1.84	1.88	1.91	1.95
12	1.89	1.93	1.97	2.01	2.05	2.09	2.13
13	2.05	2.09	2.13	2.18	2.22	2.26	2.30
14	2.21	2.25	2.30	2.34	2.39	2.44	2.48
15	2.36	2.41	2.46	2.51	2.56	2.61	2.66
16	2.52	2.57	2.63	2.68	2.73	2.78	2.83
17	2.68	2.73	2.79	2.84	2.90	2.96	3.01
18	2.84	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13	3.19
19	2.99	3.05	3.12	3.18	3.24	3.30	3.36
20	3.15	3.22	3.28	3.35	3.41	3.48	3.54
21	3.31	3.38	3.44	3.51	3.58	3.65	3.72
22	3.46	3.54	3.61	3.68	3.75	3.82	3.89
23	3.62	3.70	3.77	3.84	3.92	3.99	4.07
24	3.78	3.86	3.93	4.01	4.09	4.17	4.25
25	3.93	4.02	4.10	4.18	4.26	4.34	4.42
26	4.09	4.18	4.26	4.34	4.43	4.51	4.60
27	4.25	4.34	4.42	4.51	4.60	4.69	4.77
28	4.40	4.49	4.59	4.68	4.77	4.86	4.95
29	4.56	4.65	4.75	4.84	4.94	5.03	5.13
30	4.72	4.81	4.91	5.01	5.11	5.20	5.30
31	4.88	4.97	5.07	5.18	5.28	5.37	5.47
32	5.03	5.13	5.24	5.34	5.44	5.55	5.65
33	5.19	5.29	5.40	5.51	5.61	5.72	5.82
34	5.34	5.45	5.56	5.67	5.78	5.89	6.00
35	5.50	5.61	5.72	5.84	5.95	6.06	6.17
36	5.65	5.76	5.88	6.00	6.11	6.23	6.35
37	5.81	5.92	6.04	6.17	6.28	6.40	6.53
38	5.97	6.09	6.21	6.34	6.46	6.58	6.71
39	6.13	6.25	6.37	6.51	6.63	6.75	6.88
40	6.28	6.41	6.54	6.67	6.80	6.93	7.06



ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2

Αναγωγή βαρομετρικής ανάγνωσης στην κανονική βαρύτητα
Όρος διόρθωσης της ανάγνωσης

Γεωγραφικό		ΠΙΕΣΗ (mb)						
πλάτος Β ή Ν		920	940	960	980	1000	1020	1040
Μούρες		<i>millibars</i>						
45	45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	46	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
43	47	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19
42	48	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29
41	49	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38
40	50	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.47
39	51	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57
38	52	0.59	0.60	0.61	0.63	0.64	0.65	0.67
37	53	0.67	0.69	0.70	0.71	0.73	0.74	0.75
36	54	0.75	0.77	0.78	0.80	0.81	0.83	0.85
35	55	0.83	0.85	0.87	0.89	0.90	0.92	0.94
34	56	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03
33	57	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11
32	58	1.07	1.09	1.11	1.13	1.16	1.18	1.20
31	59	1.14	1.17	1.19	1.21	1.24	1.26	1.29
30	60	1.22	1.24	1.27	1.29	1.32	1.35	1.37
29	61	1.29	1.31	1.34	1.37	1.40	1.43	1.45
28	62	1.36	1.39	1.41	1.44	1.47	1.50	1.53
27	63	1.43	1.46	1.49	1.52	1.55	1.58	1.61
26	64	1.50	1.53	1.56	1.59	1.63	1.66	1.69
25	65	1.56	1.59	1.63	1.66	1.69	1.73	1.76
24	66	1.63	1.66	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83
23	67	1.69	1.73	1.76	1.79	1.83	1.87	1.91
22	68	1.75	1.79	1.82	1.86	1.89	1.93	1.97
21	69	1.81	1.85	1.89	1.92	1.96	2.00	2.04
20	70	1.86	1.90	1.94	1.98	2.02	2.05	2.10
19	71	1.91	1.95	1.99	2.03	2.07	2.12	2.16
18	72	1.97	2.01	2.05	2.09	2.13	2.17	2.22
17	73	2.01	2.05	2.09	2.14	2.19	2.23	2.28
16	74	2.06	2.11	2.15	2.19	2.23	2.28	2.32
15	75	2.10	2.15	2.19	2.23	2.28	2.33	2.38
14	76	2.14	2.19	2.25	2.29	2.33	2.37	2.42
13	77	2.18	2.23	2.27	2.32	2.37	2.41	2.46
12	78	2.21	2.26	2.31	2.36	2.41	2.45	2.50
11	79	2.25	2.30	2.35	2.39	2.44	2.49	2.54
10	80	2.28	2.33	2.38	2.42	2.47	2.52	2.57
9	81	2.31	2.36	2.41	2.46	2.51	2.56	2.61
8	82	2.33	2.38	2.43	2.48	2.53	2.58	2.63
7	83	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.61	2.66
6	84	2.37	2.42	2.48	2.53	2.58	2.63	2.68
5	85	2.39	2.44	2.49	2.54	2.59	2.65	2.70
0	90	2.43	2.49	2.54	2.59	2.64	2.69	2.75



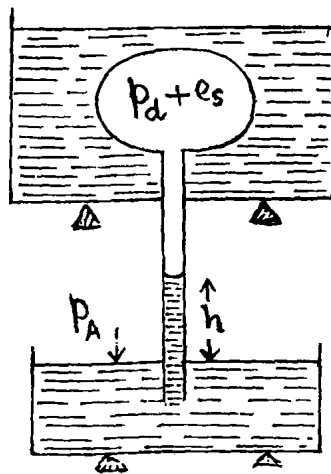
$$p_A = \rho g h + p_d + e_s$$

ή εφαρμόζοντας την εξίσωση των τελείων αερίων $pV = nR^*T$

στον ξηρό αέρα $p_d V = n R T$, όπου $R = \frac{R^*}{M_d}$ (2.3)

παίρνουμε $p_A = \rho g h + \frac{nR}{V} T + e_s$ (2.4)

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού της στήλης ύψους h , g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και n , V και T είναι ο αριθμός των γραμμομορίων, ο όγκος και η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα στον θάλαμο πίεσης και το σωλήνα ενώ R είναι η σταθερά για τον ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα, R^* η παγκόσμια σταθερά των αερίων και M_d το μοριακό βάρος του ξηρού αέρα. Επειδή το σύνολο των περιεχόμενων στον αέρα του θαλάμου υδρατμών μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, γι' αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση των τελείων αερίων που χρησιμοποιείται μόνο για τον ξηρό αέρα.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα του μικρού μήκους στήλης υδάτινου βαρομέτρου

Από την εξίσωση 2.4 φαίνεται ότι το ύψος της στήλης δεν εξαρτάται μόνο από την ατμοσφαιρική πίεση αλλά επίσης από τη θερμοκρασία και τη μερική πίεση των υδρατμών. Αυτό το σύνολο των αλληλοεξαρτήσεων μπορεί να διερευνηθεί με διαφορισμό της εξίσωσης 2.4 για σταθερή ατμοσφαιρική πίεση:

$$0 = \rho g - \frac{nR}{V} \left(\frac{T}{V} \frac{dV}{dh} - \frac{dT}{dh} \right) + \frac{de_s}{dh} \quad \text{δηλ.}$$



$$\frac{nR}{V} = (\rho g + \frac{de_s}{dh}) / (\frac{T}{V} \frac{dV}{dh} - \frac{dT}{dh}) \quad (2.5)$$

Αυτό σημαίνει ότι, με την επιφύλαξη ότι οι αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι αρκετά μικρές και έτσι δεν επηρεάζουν τη γραμμικότητα των διαφορισμένων ποσοτήτων και λαμβάνοντας υπόψη ότι $de_s/dh = (de_s/dT) \cdot (dT/dh)$, η πίεση της ατμόσφαιρας δίνεται από την εξίσωση:

$$P_A = \rho g h + e_s + (\rho g \frac{dh}{dT} + \frac{de_s}{dT}) / (\frac{1}{V} \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dT} - \frac{1}{T}) \quad (2.6)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3

Πίεση κορεσμένων υδρατμών επάνω από πάγο και επάνω από νερό σε mbar σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για θερμοκρασίες κάτω του σημείου πήξης οι επάνω και κάτω αριθμοί είναι για πάγο και νερό σε υπέρτηξη αντίστοιχα (Σημείωση: 1 mm Hg = 1.3336 m bar).

Θερμοκρασία		Πρόσθετη διαφορά στη θερμοκρασία									
°C		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-30		0.38	0.42	0.47	0.52	0.57	0.63	0.70	0.77	0.85	0.94
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-20		1.03	1.14	1.25	1.37	1.51	1.65	1.82	1.99	2.18	2.38
		-	-	-	1.76	1.92	2.08	2.26	2.45	2.45	2.65
-10		2.60	2.84	3.11	3.38	3.69	4.02	4.37	4.76	5.17	5.62
		2.87	3.10	3.35	3.62	3.91	4.22	4.55	4.90	5.28	5.68
0		6.11	6.57	7.06	7.58	8.14	8.73	9.35	10.02	10.73	11.48
10		12.28	13.13	14.03	14.98	15.99	17.05	18.18	19.38	20.64	21.97
20		23.38	24.87	26.44	28.10	29.84	31.68	33.62	35.66	37.81	40.07
30		42.44	44.94	47.56	50.32	53.21	56.24	59.43	62.77	66.27	69.94

Επειδή τα dV/dh και dh/dT μπορεί εύκολα να καθορισθούν (με μετρήσεις της εσωτερικής διαμέτρου του σωλήνα και της μεταβολής του ύψους της στήλης για μια γνωστή αλλαγή της θερμοκρασίας αντίστοιχα) και η πρότυπη (standard) πίεση των κορεσμένων υδρατμών, όπως αυτή φαίνεται στον πίνακα 2.3, δίνει το de_s/dT , η εξίσωση 2.6 μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση του οργάνου. Με την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή, το βαρόμετρο αυτό μπορεί να βαθμονομηθεί με κατευθεία αναγνώσεις. Το σχήμα 2.1 δείχνει τον αέρα που είναι εγκλωβισμένος σε μάζα νερού, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα του ελέγχου των αλλαγών της θερμοκρασίας και της ελάττωσης των διακυμάνσεων του μήκους της στήλης νερού.

Μια εναλλακτική μέθοδος προπαρασκευής του οργάνου για χρήση είναι η βαθμονόμηση με σύγκριση του με ένα πρότυπο βαρόμετρο, έτσι ώστε το nR/V μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση 2.4, αφού αντικαταστήσουμε σ' αυτή τις μετρημένες τιμές των p_A , $\rho g h$, T και e_s .

Η ευαισθησία αυτού του τύπου του βαρομέτρου βρίσκεται από την εξίσωση 2.4, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση μικρών αλλαγών της ατμοσφαιρικής πίεσης για μια σταθερή θερμοκρασία T , και δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{dh}{dp_A} = 1 / \left(\rho g - \frac{nR}{V^2} T \cdot \frac{dV}{dh} + \frac{de_s}{dh} \right) \quad (2.7)$$

Από την εξίσωση 2.7 φαίνεται ότι ένα βαρόμετρο υγρής στήλης δίνει σχεδόν γραμμική σχέση μόνο αν ο όγκος αναφοράς του θαλάμου V είναι μεγάλος και το υγρό έχει μικρή πίεση ατμών. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με τοποθέτηση του οργάνου σε περιβάλλον με μικρή θερμοκρασία.

Ο περιοριστικός παράγων στην ευαισθησία του βαρομέτρου είναι η ευαισθησία της υγρής στήλης στην αλλαγή της θερμοκρασίας. Πάλι, από την εξίσωση 2.4 φαίνεται ότι για σταθερή ατμοσφαιρική πίεση έχουμε:

$$\frac{dh}{dT} = \frac{1}{\rho g} \left[\frac{nR}{V} \left(\frac{T}{V} \frac{dV}{dT} - 1 \right) - \frac{de_s}{dT} \right] \quad (2.8)$$

Ένα βαρόμετρο με όγκο αεροθαλάμου περίπου 0.75 l (λίτρα) και με μια διατομή στήλης περίπου 0.1 cm² έχει μια ευαισθησία πίεσης περίπου 1.3 cm mbar⁻¹ και μια ευαισθησία θερμοκρασίας περίπου 4 cm°C⁻¹. Η τελευταία τιμή είναι ενδεικτική της απαιτούμενης σταθερότητας της θερμοκρασίας.



2.3 Αναεροειδή (aneroid) ή Μεταλλικά βαρόμετρα

Ο τύπος αυτός του βαρομέτρου αποτελείται από μεταλλικό θάλαμο σε σχήμα τυμπάνου με εύκαμπτα τοιχώματα που στο εσωτερικό του υπάρχει μερικό ή σχεδόν ολικό κενό. Ελατήριο στο εσωτερικό του το προστατεύει από σύνθλιψη. Η συμπίεση αυτή πολλαπλασιάζεται με την παράθεση πολλών θαλάμων και τελικά η ολική συμπίεση υποδειχνεται με τη βοήθεια ενός πολλαπλού συστήματος μοχλών. Λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας είναι απαραίτητες οι διορθώσεις των αναγνώσεων σε μια standard θερμοκρασία επειδή έχουμε διαστολές των μοχλών, αλλαγές στην ελαστικότητα του συμπιεζόμενου θαλάμου και την επίδραση της μικρής ποσότητας αέρα που περιέχει ο θάλαμος. Πολλά σύγχρονα αναεροειδή βαρόμετρα είναι κατασκευασμένα έτσι που να αλληλοαναιρούνται οι παραπάνω επιδράσεις των μεταβολών της θερμοκρασίας και να μην απαιτούν διόρθωση της ανάγνωσης. Ο μηχανισμός των αναεροειδών βαρομέτρων χρησιμοποιείται ευρύτατα στο βαρογράφο όπου αντί για ένα απλό δείκτη υπάρχει μοχλός που στο άκρο του φέρει γραφίδα. Αυτή γράφει επάνω σε φύλλο χαρτιού βαθμολογημένο και τοποθετημένο στην κυρτή επιφάνεια κυλίνδρου που περιστρέφεται με τη βοήθεια ωρολογιακού μηχανισμού.

Τα μεγάλα πλεονεκτήματα των αναεροειδών βαρομέτρων είναι η δυνατότητα να μεταφέρονται εύκολα και το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται από τις μεταφορές. Το τελευταίο τους χαρακτηριστικό μας δίνει την ευχέρεια να τα χρησιμοποιούμε και για υψομέτρηση με τη βοήθεια μιας κλίμακας υψομέτρων, παράλληλα με την κλίμακα πιέσεων.

Τοποθετώντας το μηδέν της κλίμακας υψομέτρων στην ατμοσφαιρική πίεση της μέσης στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας παίρνουμε ανάγνωση στην υψομετρική κλίμακα που μας δίνει κατευθεία ύψος. Αν η ατμόσφαιρα είναι ψυχρότερη ή θερμότερη από όσο συνήθως είναι, το όργανο θα μας δώσει μεγαλύτερες ή μικρότερες αναγνώσεις υψομέτρου, αντίστοιχα. Κανονικά οι αναγνώσεις δεν διαφέρουν περισσότερο από 5% από τις πραγματικές τιμές.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα σημερινά αναεροειδή βαρόμετρα είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και μεγάλης ακρίβειας. Τα δυαδικά αναεροειδή βαρόμετρα είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα έτσι που δεν χρειάζεται κατανάλωση έργου για την κίνηση μοχλών από τα συμπιεζόμενα τοιχώματα του θαλάμου. Έτσι δεν απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα για την αποκατάσταση ισορροπίας και η ένδειξη του βαρομέτρου αφορά την πίεση της δεδομένης στιγμής. Ένα μικρομετρικό παχύμετρο τύπου κοχλία, συνδυασμένο με δυαδικό μετρητή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση, του

πάχους μεταξύ των τοιχωμάτων του θαλάμου. Η ακρίβεια του μικρομετρικού συστήματος αυξάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρικού δείκτη που μας δείχνει πότε το μικρόμετρο είναι στη σωστή θέση ισορροπίας.

Τα αναεροειδή βαρόμετρα έχουν σήμερα τη μορφή μικρών ανθεκτικών και καλαίσθητων, ευκολομεταφερόμενων οργάνων ενώ διαθέτουν μεγάλη ευαισθησία και η βαθμονόμησή τους είναι της απολύτου εμπιστοσύνης για μετρήσεις ακρίβειας.

2.3.1. Βαρογράφος

Ο Βαρογράφος είναι μεταλλικό όργανο που καταγράφει συνεχώς τη βαρομετρική πίεση. Αντί ενός μεταλλικού δοχείου-τυμπάνου χρησιμοποιείται μια συστοιχεία από 5 έως 10, ώστε να πολλαπλασιασθεί η ευαισθησία του οργάνου που έχει σχέση με τη μεταβολή μιας διάστασης του τυμπάνου. Η μεταβολή αυτή της διάστασης μεταφέρεται με μοχλούς και συνδέσεις σε γραφίδα που γράφει σε χαρτί, το οποίο περιβάλλει κύλινδρο περιστρεφόμενο με μηχανικό ωρολογιακό μηχανισμό.

ΠΕΙΡΑΜΑ VI. Η ισόθερμη ατμόσφαιρα

Σ' αυτό το πείραμα εξετάζουμε την πίεση p σαν συνάρτηση του ύψους z σε μια πολύ απλοποιημένη ατμόσφαιρα της γης. Αναφερόμενοι στο σχήμα 2.2 εύκολα φαίνεται ότι αν η πυκνότητα του αέρα σε ύψος z είναι ρ τότε:

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (2.9)$$

Από τον νόμο των τελείων αερίων (εξίσωση 2.3):

$$pV = n R^* T$$

όπου V είναι ο όγκος n γραμμομορίων αερίου θερμοκρασίας T και R^* η παγκόσμια σταθερά. Έτσι αν M_a είναι το μοριακό βάρος του αέρα:

$$p = \rho R^* T / M_a \quad (2.10)$$

Επομένως από τις 2.9 και 2.10 έχουμε:

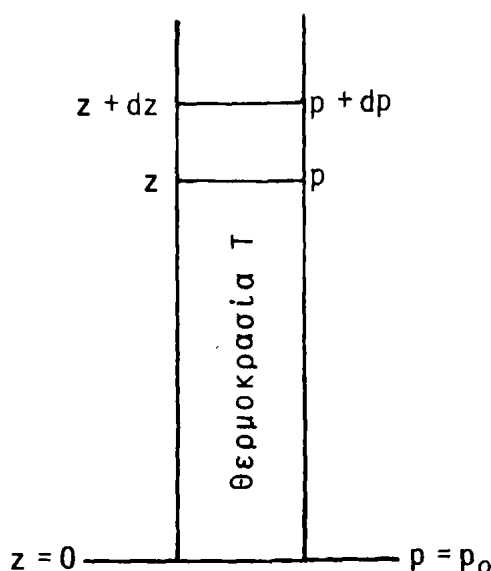
$$\frac{dp}{p} = - \frac{g M_a}{R^* T} dz \quad \text{από την οποία με ολοκλήρωση παίρνουμε:}$$



$$p(z) = p(0) \exp \left(- \frac{gM_a}{R^*T} z \right) \quad (2.11)$$

αν το T είναι ανεξάρτητο του z .

Επειδή το z αλλάζει πολύ περισσότερο γρήγορα από το T , η εξίσωση 2.11 έχει κάποια ισχύ στην πραγματική ατμόσφαιρα, ιδιαίτερα σε νεφοσκεπείς μέρες, όταν οι διαφορές της θερμοκρασίας με το ύψος είναι πολύ μικρές.



Σχήμα 2.2 Μιά κατακόρυφη στήλη αέρα σε μια ισόθερμη ατμόσφαιρα.

Σε μικρές διαφορές ύψους, η εξίσωση 2.11 είναι ικανοποιητικά ακριβής. Ένα υψηλό κτίριο μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε μια σημαντική μεταβολή της πίεσης από το έδαφος μέχρι τον τελευταίο του όροφο που μπορεί να μετρηθεί με οποιοδήποτε αναεροειδές βαρόμετρο, ακόμη και με εκείνο του πειράματος V. Η θερμοκρασία του αέρα T στην εξίσωση 2.11 μπορεί να ληφθεί σαν η μέση των υψών z_1 και z_2 και τότε η εξίσωση γίνεται:

$$p(z_2) = p(z_1) \exp \left[- \frac{gM_a}{R^*T} (z_2 - z_1) \right]$$

Αν τα $p(z_2)$, $p(z_1)$, $(z_2 - z_1)$ και T μετρηθούν ενώ τα g και R^* είναι γνωστά, τότε το απλό αυτό πείραμα μας δίνει τη δυνατότητα καθορισμού του M_a δηλ. του μέσου μοριακού βάρους του αέρα. Σε άλλη περίπτωση το $(z_2 - z_1)$ μπορεί να θεωρηθεί άγνωστο, αφού δώσουμε μια κατάλληλη τιμή στο

M_a . Το M_a μπορεί να υπολογισθεί από τα γνωστά μοριακά βάρη του άζωτου και του οξυγόνου και τις αναλογίες τους στον αέρα, με καλή προσέγγιση.

2.4 Ατμοσφαιρική υγρασία

Η ατμόσφαιρα τροφοδοτείται σε νερό με εξάτμιση από την επιφάνεια της γης. Έτσι, παρότι το ποσοστό υδρατμών της ατμόσφαιρας είναι πολύ μικρό, συγκρινόμενο με το ποσοστό των άλλων αερίων της, αυτό το λίγο λόγω της συνεχούς αλλαγής φάσης του και μεταφοράς του στο χώρο τροφοδοτεί τα ποτάμια, τις λίμνες κλπ. σαν βροχή.

Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών ορίζεται σαν η πίεση των υδρατμών, όταν αυτοί βρίσκονται σε ισορροπία με μια επίπεδη επιφάνεια νερού της ίδιας θερμοκρασίας. Αυτή η εξάρτηση της πίεσης των κορεσμένων υδρατμών από τη θερμοκρασία είναι χαρακτηριστικό της ύλης γενικά και είναι ανεξάρτητη της πίεσης των άλλων αερίων. Η πίεση των κορεσμένων υδρατμών έχει καθοριστεί πειραματικά τόσο επάνω από νερό όσο και επάνω από πάγο. Ο πίνακας 2.3 περιέχει πιέσεις για πάγο και για νερό σε υπέρτηξη, σε θερμοκρασίες κάτω του 0°C . Οι πίνακες που χρησιμοποιούνται για το ξηρό και υγρό θερμόμετρο έχουν την πίεση των υδρατμών σε σχέση με πάγο σε θερμοκρασίες κάτω του 0°C , επειδή δεν συναντάμε υπερτηγμένο νερό στη λεκάνη του υγρού θερμομέτρου.

2.5 Παράμετροι προσδιορισμού υγρασίας

Πίεση και πυκνότητα υδρατμών. Η καταστατική εξίσωση για τους υδρατμούς παίρνει τη μορφή της εξίσωσης για τα ιδανικά αέρια:

$$e = \rho_w \frac{R^*}{M_w} T \quad (2.13)$$

όπου το e είναι η πίεση των υδρατμών, το M_w το μοριακό βάρος των υδρατμών, το T η απόλυτη θερμοκρασία και το ρ_w είναι η πυκνότητα των υδρατμών, ή όπως διαφορετικά λέγεται, η **απόλυτη υγρασία**. Μερικές τιμές της πίεσης των κορεσμένων υδρατμών φαίνονται στον πίνακα 2.3, ενώ ο πίνακας 2.4 δείχνει τιμές της πυκνότητας των κορεσμένων υδρατμών. Η τιμή του R^* είναι $8.13 \times 10^7 \text{ erg K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$ ή $8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$ και του M_w είναι 18.0 g mole^{-1} .

Ειδική υγρασία. Η παράμετρος αυτή της υγρασίας ορίζεται σαν η μάζα των υδρατμών που περιέχονται στη μονάδα της μάζας του αέρα (δηλ. του ξηρού αέρα και των υδρατμών) και δίνεται από τη σχέση:



$$q = m_w/m_a \quad (2.14)$$

όπου τα m_w και m_a είναι οι μάζες νερού και αέρα αντίστοιχα σε ένα ορισμένο όγκο V .

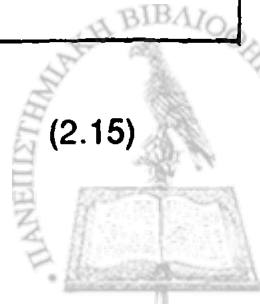
Έτσι $m_w = \rho_w V$ και $m_a = (\rho_d + \rho_w)V$. Επομένως, αφού οι δείκτες a , d και w αναφέρονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, στον ξηρό αέρα και στους υδρατμούς αντίστοιχα, έχουμε:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4

Πυκνότητα κορεσμένων υδρατμών σε $g\ m^{-3}$ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, υπολογισμένη με τη χρησιμοποίηση των τιμών πίεσης των κορεσμένων υδρατμών του πίνακα 2.3 στην εξίσωση 2.13. Για θερμοκρασίες κάτω του $0^\circ C$ οι επάνω και κάτω αριθμοί είναι για πάγο και νερό σε υπέρτηξη αντίστοιχα.

Θερμο- κρασία $^\circ C$	Πρόσθετη διαφορά στη θερμοκρασία									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.50	0.55	0.61	0.67	0.73	0.81
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-20	0.88	0.97	1.06	1.16	1.27	1.38	1.52	1.66	1.81	1.97
	-	-	-	-	1.48	1.61	1.74	1.88	2.04	2.19
-10	2.14	2.32	2.54	2.75	2.99	3.25	3.52	3.82	4.13	4.47
	2.35	2.54	2.74	2.95	3.17	3.41	3.66	3.93	4.22	4.52
0	4.84	5.19	5.56	5.95	6.36	6.80	7.25	7.75	8.27	8.81
10	9.39	10.01	10.66	11.34	12.06	12.81	13.62	14.46	15.35	16.29
20	17.27	18.31	19.67	20.55	21.75	23.01	24.34	25.73	27.19	28.72
30	30.32	32.00	33.75	35.59	37.52	39.52	41.77	43.83	46.12	48.52

$$q = \frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_d} \quad (2.15)$$



όπου το ρ_d είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα.

Επειδή $\rho_d = p_d M_d / \bar{R} T$ και $\rho_w = e M_w / \bar{R} T$ έχουμε:

$$q = \frac{M_w e}{M_d p_d + M_w e} = \frac{M_w}{M_d} e / \left| p_a - \left(1 - \frac{M_w}{M_d} \right) e \right| \quad (2.16)$$

όπου $p_a = p_d + e$ είναι η ολική πίεση.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές $M_w = 18$ και $M_d = 28.9$ παίρνουμε:

$$q = 0.622 e / (p_a - 0.378 e) \quad (2.17)$$

Η ποσότητα αυτή συχνά εκφράζεται σε γραμμάρια υδρατμών στο γραμμάριο ή το χιλιόγραμμο του αέρα και επειδή το e είναι συνήθως πολύ μικρό, σε σύγκριση με το p_a , η εξίσωση 2.17 συχνά γράφεται σαν:

$$q = 0.622 e / p_a \quad (2.18)$$

Αναλογία μίγματος. Αυτή ορίζεται σαν η μάζα υδρατμών που βρίσκεται αναμιγμένη με τη μονάδα μάζας ξηρού αέρα και δίνεται από την

$$r = \rho_w / \rho_d \quad (2.19)$$

από την οποία μπορεί ναδειχθεί ότι:

$$r = 0.622 e / (p_a - e) \quad (2.20)$$

Επειδή το r σπάνια ξεπερνάει το 0.02 g g^{-1} το λάθος που προκύπτει, όταν εξισώνουμε την ειδική υγρασία με την αναλογία μίγματος στις περισσότερες μετεωρολογικές εφαρμογές, δεν είναι αξιοσημείωτο.

Σχετική υγρασία. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε τον όρο σχετική υγρασία που είναι ο λόγος της πραγματικής τιμής της απόλυτης υγρασίας ή της ειδικής υγρασίας ή και αναλογίας μίγματος προς την κορεσμένη τιμή, για την ίδια θερμοκρασία του αντίστοιχου μέτρου υγρασίας (απόλυτης υγρασίας ή ειδικής υγρασίας ή αναλογίας μίγματος) εκφρασμένης επί τοις %.

Θερμοκρασία δρόσου. Αυτή ορίζεται σαν η θερμοκρασία στην οποία θα είχε ακριβώς αρχίσει ο κορεσμός σε μια αέρια μάζα που ψύχεται, υπό σταθερή πίεση, χωρίς αφαίρεση ή πρόσθεση νερού. Αν τα δεδομένα του



πίνακα 2.3 τα περάσουμε σε διάγραμμα ο καθορισμός του σημείου δρόσου, αν είναι γνωστή η πραγματική πίεση των υδρατμών, είναι μια απλή γραφική διαδικασία.

2.6 Μέτρηση της υγρασίας.

Τα φυσικά φαινόμενα στα οποία στηρίζονται οι διάφορες μέθοδοι μέτρησης της υγρασίας είναι τα ακόλουθα:

α. Απορρόφηση. Η απορρόφηση νερού από κατάλληλα υλικά μπορεί να ανιχνευθεί σαν μια αλλαγή στις χημικές, στις ηλεκτρικές και σε άλλες φυσικές ιδιότητες της ύλης όπως και στο ειδικό της βάρος. Το αμέσως παρακάτω, με γράμμα β, είναι στην πραγματικότητα μόνο μια ειδική περίπτωση.

β. Διαστολή. Μερικά φυσικά σώματα, όπως οι τρίχες, διαστέλονται όταν απορροφούν υγρασία. Η διαστολή αυτή μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση ενός δείκτη ή μιας πέννας επάνω σε μια κλίμακα ή σε μια κινούμενη ταινία αντίστοιχα.

γ. Συμπύκνωση. Τα αποτελέσματα της συμπύκνωσης φαίνονται με την παρατήρηση στην πράξη επάνω σε κατάλληλα ψυχόμενες επιφάνειες όπου αποθέτονται υδροσταγονίδια δηλ. δρόσος.

δ. Θερμοδυναμικά φαινόμενα. Ένα παράδειγμα θερμοδυναμικών αποτελεσμάτων μας δίνουν οι διαφορετικές θερμοκρασίες ισορροπίας που παίρνουν οι υγρές και ξηρές επιφάνειες που βρίσκονται στο ίδιο ρεύμα αέρα.

ε. Ηλεκτρικές ιδιότητες. Η ηλεκτρική αντίσταση και η διηλεκτρική σταθερά του αέρα εξαρτώνται από την περιεκτικότητα του σε υγρασία.

στ. Εξασθένηση ακτινοβολίας. Ορισμένες ζώνες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιέχουν τα μήκη κύματος των περιοχών του υπέρυθρου και των μικροκυμάτων απορροφούνται από τους υδρατμούς. Λόγω της άμεσης χρονικά αντίδρασής τους τα υπέρυθρα "υγρασιόμετρα" είναι πολύτιμα στη μελέτη των διακυμάνσεων της τυρβώδους κίνησης των υδρατμών.

2.7 Όργανα μέτρησης της υγρασίας

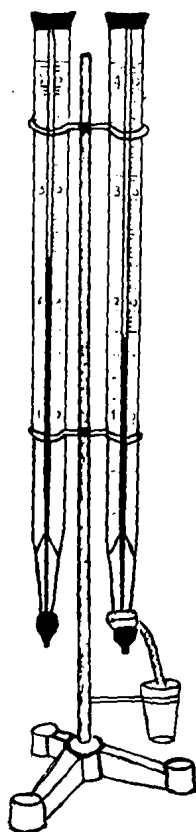
2.7.1 Ψυχρόμετρο August

Αποτελείται από δύο απλής ένδειξης υδραργυρικά θερμόμετρα (Σχ.1), το ξηρό και το υγρό, που είναι τοποθετημένα παράλληλα και σε κατακόρυφη διεύθυνση, με τη βοήθεια μεταλλικής βάσης. Το ένα από τα θερμόμετρα, το υγρό, έχει τη θερμομετρική του λεκάνη περιβαλλόμενη με ύφασμα που

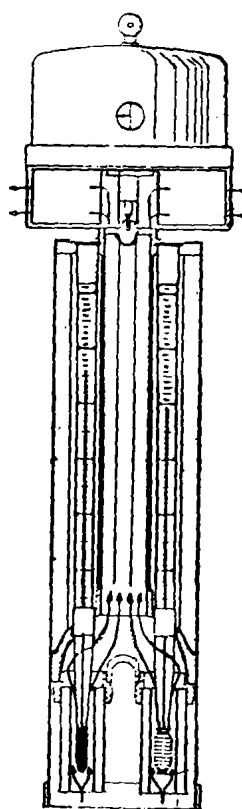
υγραίνεται συνεχώς με αποσταγμένο νερό μέσω νήματος βαμβακιού που στο άλλο του άκρο είναι εμβαπτισμένο σε αποσταγμένο νερό.

2.7.2 Περιστρεφόμενο Ψυχρόμετρο

Το σύστημα του ξηρού και υγρού θερμομέτρου βρίσκονται προσαρμοσμένα σε πλαίσιο και με τη βοήθεια χειρολαβής, αφού διαβραχεί με αποσταγμένο νερό το ύφασμα που περιβάλλει τη λεκάνη του υγρού, περιστρέφονται κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου. Η ταχύτητα περιστροφής των θερμομετρικών λεκανών πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 2.5 m/s.



Σχήμα I. Ψυχρόμετρο August



Σχήμα II. Ψυχρόμετρο Assmann

2.7.3 Ψυχρόμετρο Assmann

Στο ψυχρόμετρο αυτό (Σχ. II), με τη βοήθεια ανεμιστήρα που λειτουργεί μηχανικά, περνά ρεύμα αέρα από τις θερμομετρικές λεκάνες με ταχύτητα μεγαλύτερη των 2.5 m/s. Οι θερμομετρικές λεκάνες προστατεύονται από ακτινοβολίες με τη βοήθεια δύο γυαλιστερών ομοαξονικών μεταλλικών σωλήνων, που τις περιβάλλουν.

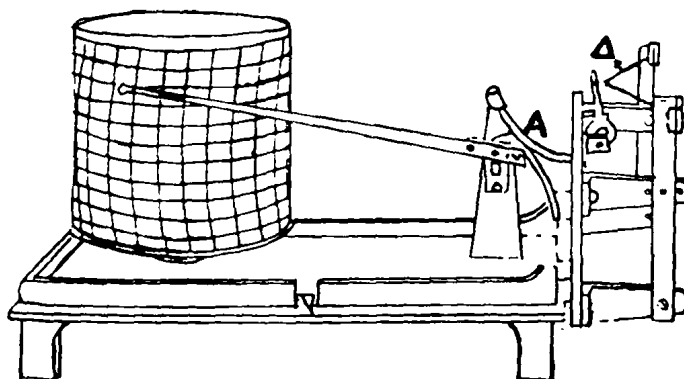


2.7.4 Ψυχρόμετρο με ηλεκτροκίνητο ανεμιστήρα

Ο ανεμιστήρας του ψυχρομέτρου αυτού λειτουργεί με τη βοήθεια ηλεκτρικού κινητήρα και συσσωρευτών (μπαταριών).

2.7.5 Υγρογράφος τριχών

Το όργανο αυτό (Σχ. III), με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικού μηχανισμού Α μεταφέρει τη μεταβολή του μήκους δέσμης τριχών Δ σε γραφίδα, που καταγράφει συνεχώς τη σχετική υγρασία σε ειδικά βαθμολογημένο χαρτί που προσαρμόζεται σε ωρολογιακά περιστρεφόμενο κύλινδρο.



Σχήμα III. Υγρογράφος τριχών.

2.7.6 Ηλεκτρικό υγρόμετρο με πυκνωτή από πολυμερές.

Με το υγρόμετρο αυτό μετράμε τη σχετική υγρασία. Η λειτουργία του βασίζεται στην αλλαγή της χωρητικότητας ενός πυκνωτή που το διηλεκτρικό του στοιχείο είναι λεπτός υμένας από πολυμερές συστατικό με πάχος ένα μικρό ($1\mu\text{m}$). Οι αλλαγές της χωρητικότητας οφείλονται μόνο στην απορρόφηση μορίων ύδατος από το περιβάλλον. Οι μεταβολές της χωρητικότητας μεταφέρονται, με τη βοήθεια ηλεκτρονικής διάταξης, στη βελόνη του οργάνου που κινείται σε κλίμακα 0-100% σχετικής υγρασίας.

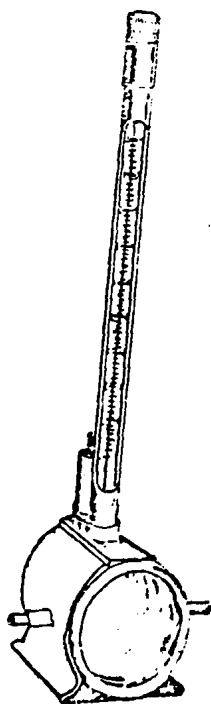
2.7.7 Ηλεκτρικό υγρόμετρο χλωριούχου λιθίου

Το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου είναι υαλοβάμβακας εμποτισμένος με υπερκορεσμένο διάλυμα LiCl (το LiCl είναι σώμα πολύ υγροσκοπικό). Τον υαλοβάμβακα διατρέχουν σπειροειδώς και παράλληλα δύο ηλεκτρικές αντιστάσεις. Με την τροφοδότηση σε ηλεκτρικό ρεύμα (χρησιμοποιείται

εναλλασσόμενο για να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του διαλύματος LiCl) έχουμε στην αρχή μια αύξηση της θερμοκρασίας επειδή το διερχόμενο ρεύμα μέσω του διαλύματος LiCl έχει μεγάλη ένταση. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί εξάτμιση του νερού του διαλύματος που γίνεται όλο και μικρότερης αγωγιμότητας και μαζί με την ελάττωση του διερχόμενου ρεύματος έχουμε σαν απόρροια και την πτώση της θερμοκρασίας. Αν η πτώση της θερμοκρασίας συνεχισθεί, λόγω της εξάτμισης του νερού, η τάση των υδρατμών στην επιφάνεια του διαλύματος ελαττώνεται συνεχώς και σε κάποια στιγμή γίνεται μικρότερη από την τάση των υδρατμών του αέρα του περιβάλλοντος. Λόγω όμως της υγροσκοπικότητας του LiCl λαμβάνει χώρα μεταφορά μορίων νερού από τον αέρα προς το διάλυμα LiCl , οπότε έχουμε άνοδο πάλι της θερμοκρασίας. Τελικά με την παραπάνω διαδικασία μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα επέρχεται ισορροπία στην μεταφορά μορίων νερού από το διάλυμα στον αέρα και αντιστρόφως. Τότε η θερμοκρασία του διαλύματος που λαμβάνεται με τη βοήθεια θερμομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης, είναι η θερμοκρασία δρόσου.

2.7.8 Συμπυκνωτικό υγρόμετρο τύπου Alluard

Το υγρόμετρο αυτό (Σχ. IV) με τη βοήθεια μεταλλικού καθρέφτη διαχωρίζει τον θάλαμο του υγρομετρούμενου δείγματος αέρα από το θάλαμο του θερμομέτρου που μας δείχνει τη θερμοκρασία του καθρέφτη και το



Σχήμα IV. Υγρόμετρο τύπου Alluard



θάλαμο υποδοχής του πτητικού υγρού (αιθέρας). Με τη βοήθεια ρεύματος αέρα που παροχετεύεται στο θάλαμο του πτητικού υγρού πέφτει η θερμοκρασία του δείγματος αέρα και όταν αυτό κορεσθεί αφήνει υδροσταγονίδια στον καθρέπτη που δίνουν την εικόνα νέφους.

ΠΕΙΡΑΜΑ VI. Παρατήρηση του σημείου δρόσου

Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται κορεσμός μιας μάζας αέρα που έχει ορισμένη περιεκτικότητα σε υδρατμούς, όταν αυτή ψύχεται χωρίς να μεταβάλλεται η πιεσή της, είναι γνωστή σαν **σημείο δρόσου** ή **θερμοκρασία δρόσου**. Επειδή υπό κανονικές συνθήκες στην ατμόσφαιρα δεν γίνεται υπερκορεσμός, η θερμοκρασία αυτή είναι χαμηλότερη ή το πολύ ίση με την πραγματική θερμοκρασία του αέρα. Έτσι ο καθορισμός του σημείου δρόσου επιτρέπει ένα άμεσο καθορισμό της ειδικής υγρασίας.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την εύρεση του σημείου δρόσου μπορεί να είναι εξαιρετικά απλή, όσο απλή είναι η παρατήρηση της θερμοκρασίας μιας γυαλισμένης επιφάνειας τη στιγμή ακριβώς που εμφανίζεται δρόσος επάνω σ'αυτή. Η κύρια δυσκολία στη λήψη μετρήσεων εμπιστοσύνης της θερμοκρασίας δρόσου ευρίσκεται στη δυσκολία να αποφασίσουμε σε ποιο ακριβώς στάδιο εξατμίσθηκε όλο το νερό που συμπυκνώθηκε επάνω στη γυαλισμένη επιφάνεια ή τότε ακριβώς άρχισε η συμπύκνωση των υδρατμών. Σε μια αυτοματοποιημένη μορφή του οργάνου ένα φωτοηλεκτρικό στοιχείο σαρώνει συνέχεια μια μεταλλική γυαλισμένη επιφάνεια και δίνει διορθωτικά σήματα σε ένα κύκλωμα ελέγχου της θερμοκρασίας.

Μια σχετικά απλή μέθοδος κάνει χρήση ενός θερμομέτρου, του οποίου το ευαίσθητο στοιχείο έχει μια μεγάλη αναλογία της επιφάνειάς του προς τον όγκο του. Το θερμόμετρο ψύχεται σ'ένα ψυγείο σε μια θερμοκρασία αρκετά μικρότερη απ'εκείνη που εκτιμούμε σαν θερμοκρασία δρόσου έτσι ώστε, όταν φέρουμε το θερμόμετρο στον αέρα που θέλουμε να βρούμε το σημείο δρόσου του, ένα στρώμα υγρού νερού σχηματίζεται επάνω στο θερμόμετρο. Μετά κάνουμε διάγραμμα της καμπύλης θέρμανσης, σε αντίστροφη μορφή απ' εκείνη του πειράματος I. Υποθέτοντας ότι ένα σχετικά σταθερό ποσό ενέργειας χάνεται με την εξατμισμό του συμπυκνωμένου νερού, η καμπύλη θέρμανσης θα μας δείξει μια αλλαγή της κλίσης (σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα), όταν σταματήσει η εξατμισμό. Η θερμοκρασία σ'αυτό το κρίσιμο σημείο παίρνεται σαν η θερμοκρασία δρόσου και ο καθορισμός της αυτός εύκολα επιβεβαιώνεται με τη βοήθεια ενός ψυχρόμετρου Assmann.

Ατυχώς η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας μέσα στα ευαίσθητα στοιχεία των θερμομέτρων οδηγεί σε μια υψηλότερη θερμοκρασία στις επιφάνειες των στοιχείων, όταν τα θερμαίνουμε εξωτερικά, από εκείνη που έχει το εσωτερικό των στοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση ενός υδραργυρικού σε γυαλί θερμομέτρου, για παράδειγμα, αν και είναι κατάλληλη για να μας δείξει την αρχή στην οποία βασίζεται το πείραμα, μας οδηγεί σε μια υποεκτίμηση της θερμοκρασίας δρόσου. Το ιδανικό θερμόμετρο γι' αυτό το σκοπό θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο από πολύ λεπτό μεταλλικό νήμα το οποίο έχει συγκολληθεί με άλλο επίσης πολύ λεπτό μεταλλικό νήμα και έχει δημιουργηθεί έτσι ένα θερμοζεύγος.

ΠΕΙΡΑΜΑ VII. Το υγρόμετρο τρίχας

Πολλές ξηρές οργανικές ύλες, ιδιαίτερα το δέρμα και οι τρίχες, αλλάζουν διαστάσεις όταν αλλάζει η υγρασία του αέρα που τις περιβάλλει. Η ανθρώπινη τρίχα υπόκειται σε αύξηση του μήκους της γύρω στα 2.5%, όταν έρχεται σε ισορροπία με αέρα σχετικής υγρασίας από 0 μέχρι 100%. Παρότι η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι τελείως αμελητέα, αυτή είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με την επίδραση της υγρασίας. Η τρίχα γι' αυτή την ιδιότητά της χρησιμοποιείται σαν ευαίσθητο στοιχείο για τη μέτρηση της υγρασίας όταν χρειαζόμαστε συνεχή καταγραφή της υγρασίας, όπως στον υδρογράφο τρίχας που χρησιμοποιεί ένα σύστημα μοχλών και αρθρώσεων όμοιο μ' εκείνο του μηχανικού θερμογράφου.

Ο χρόνος ισορροπίας της τρίχας στις αλλαγές της υγρασίας είναι ένας σπουδαίος παράγων και μπορεί να μετρηθεί με μια τεχνική που έχει μερικές ομοιότητες με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην εκτίμηση της θερμικής αδράνειας. Η βάση της μεθόδου είναι να μεταφέρουμε το υγρόμετρο, αφού έχει ισορροπήσει σ' ένα περιβάλλον γνωστής υγρασίας, σ' ένα άλλο περιβάλλον διαφορετικής υγρασίας αλλά της ίδιας θερμοκρασίας. Βασίζοντας τις παρατηρήσεις μας στις ενδείξεις υγρασίας της τρίχας σαν συνάρτηση του χρόνου, μπορούμε να βρούμε τη σταθερά χρόνου χρησιμοποιώντας την παράμετρο της υγρασίας όπως την παράμετρο της θερμοκρασίας στο πείραμα I, δηλ.

$$\tau = t / \ln \frac{q_0 - q_a}{q - q_a}$$

όπου οι υγρασίες μπορεί να μετρηθούν σε οποιεσδήποτε μονάδες, επειδή η



λογαριθμική έκφρασή τους είναι αδιάστατη. Η αρχική ανάγνωση του στοιχείου είναι q_0 και οι τιμές του q είναι εκείνες που παίρνουμε σε διαδοχικούς χρόνους t , ενώ η q_a είναι η υγρασία του περιβάλλοντος αέρα.

Κλειστούς χώρους στους οποίους να ελέγχουμε την υγρασία του αέρα που να είναι κατάλληλοι για τον παραπάνω τύπο πειράματος μπορούμε να αποκτήσουμε εύκολα με συγκόλληση κατάλληλων κομματιών αεροστεγούς πολυεστέρα, ενώ για τη λήψη παρατηρήσεων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στη μια πλευρά κομμάτι από perspex (διαφανές ακρυλικό). Οι αλλαγές της υγρασίας μπορεί να δημιουργηθούν με εισαγωγή στον αεροστεγή χώρο μικρών ποσοτήτων νερού με σύριγγα.

2.8 Ξηρό και υγρό θερμόμετρο και το ψυχρόμετρο

Αν οποιοδήποτε θερμομετρικό στοιχείο απλού θερμομέτρου αέρα (ξηρό θερμόμετρο) το καλύψουμε με υγρό ύφασμα μουσελίνας τότε το θερμόμετρο το λέμε υγρό. Όταν η ανάγνωσή του, T_w , συγκρίνεται μ' εκείνη ενός γειτονικού ξηρού θερμομέτρου, $T=T_a$, βρίσκεται ότι $T_w \leq T_a$, ενώ το μέγεθος της διαφοράς εξαρτάται από το βαθμό αερισμού των στοιχείων των θερμομέτρων και από την υγρασία του αέρα. Αν η ειδική υγρασία είναι q και η εξάτμιση από το υγρό θερμόμετρο δημιουργεί μια τοπική υγρασία q_w , τότε έχουν εξατμισθεί $(q_w - q)$ γραμμάρια νερού στη μονάδα μάζας του αέρα που έχει ειδική θερμότητα c_p . Αν η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης είναι L , τότε:

$$(q_w - q)L = c_p(T_a - T_w) \quad (2.21)$$

και επομένως

$$q = q_w - \frac{c_p}{L} (T_a - T_w) \quad (2.22)$$

Αν και θα μπορούσε να υποτεθεί ότι $q_w = q_s$ (η τιμή κορεσμού), η απλή τεχνική των δύο θερμομέτρων, ξηρού και υγρού, δίνει συνήθως ανακριβή αποτελέσματα λόγω της μεταβλητότητας του φυσικού αερισμού και της επίδρασης της ακτινοβολίας έτσι ώστε ακόμα και η T_a να μη θεωρείται ακριβής.

Η παραπάνω τεχνική των δύο θερμομέτρων, ξηρού και υγρού, που βασίζεται στον φυσικό αερισμό των λεκανών των θερμομέτρων βρίσκει εφαρμογή στο ψυχρόμετρο August. Αντί της εξίσωσης 2.22 χρησιμοποιούνται για ευκολία πίνακες, όπως ο 2.5, που δίνουν τη σχετική υγρασία ή άλλα μέτρα υγρασίας με βάση τη θερμοκρασία T_w και T_a . Συνήθως όργανα που είναι γνωστά σαν ψυχρόμετρα και είναι διαφόρων μορφών χρησιμοποιούν το απλό ξηρό και το υγρό θερμόμετρο σε συστήματα στα οποία παροχετεύεται

την
καθ
-περ
θερμ
είναι

ρεύμα αέρα σταθερής ταχύτητας στα ευαίσθητα στοιχεία των θερμομέτρων. Τα πρότυπα ψυχρόμετρα περιλαμβάνουν το σφενδονοειδές, το περιστρεφόμενο και το Assmann που χρησιμοποιεί μηχανικό ανεμιστήρα για αερισμό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5

Σχετικές υγρασίες (σε %) σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών του υγρού θερμομέτρου και των διαφορών του ξηρού από το υγρό θερμόμετρο August ($T_a - T_w$).

$T_w(^{\circ}\text{C})$	$T_a - T_w (^{\circ}\text{C})$											
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0
0	100	90.0	81.0	72.5	64.0	56.5	49.0	36.0	25.0	14.0		
2	100	91.0	83.0	74.5	67.0	60.5	54.0	42.0	31.0	21.0	6.0	
4	100	91.5	84.0	77.0	70.0	63.5	57.0	46.0	36.0	27.0	13.0	
6	100	22.5	85.0	78.5	72.0	66.5	61.0	50.0	41.0	33.0	19.0	
8	100	93.0	87.0	81.5	74.0	69.0	64.0	54.0	45.0	37.0	24.0	
10	100	93.5	88.0	82.0	76.0	71.0	66.0	57.0	49.0	41.0	29.0	18.0
12	100	94.0	88.0	83.0	78.0	73.0	68.0	60.0	52.0	45.0	33.0	23.0
14	100	94.0	89.0	84.0	79.0	74.5	70.0	62.0	55.0	48.0	36.0	27.0
16	100	95.0	90.0	85.0	80.0	76.0	72.0	64.0	57.0	51.0	40.0	30.0
18	100	95.0	90.0	86.0	81.0	77.5	73.0	66.0	59.0	53.0	42.0	33.0
20	100	95.0	91.0	86.5	82.0	78.5	75.0	68.0	61.0	55.0	45.0	36.0
22	100	95.5	91.0	87.0	83.0	79.5	76.0	69.0	63.0	57.0	47.0	39.0
24	100	96.0	92.0	88.0	84.0	80.5	77.0	70.0	65.0	59.0	49.0	41.0
26	100	96.0	92.0	88.5	85.0	81.5	78.0	72.0	66.0	61.0	51.0	43.0
28	100	96.0	92.0	88.5	85.0	82.0	79.0	73.0	67.0	62.0	53.0	45.0
30	100	96.5	93.0	89.5	86.0	82.5	80.0	74.0	68.0	63.0	54.0	47.0
32	100	96.5	93.0	90.0	87.0	83.5	81.0	75.0	70.0	66.0	57.0	50.0
34	100	96.5	93.0	90.0	87.0	83.5	81.0	75.0	70.0	66.0	57.0	50.0

Η ισορροπία θερμικής ενέργειας για ένα θερμόμετρο, που δίνεται από την εξίσωση 1.8, περιλαμβάνει τη ροή αισθητής θερμότητας H και την καθαρή ακτινοβολία A_N . Η εξίσωση αυτή πρέπει να τροποποιηθεί και να περιλάβει τη ροή θερμότητας εξάτμισης LE για εφαρμογή στο υγρό θερμόμετρο, όπου το L είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και το E είναι η τιμή εξάτμισης.

Θεωρώντας ότι έχουμε φθάσει σε ισορροπία θα έχουμε:



$$H + A_N + LE = 0 \quad (2.23)$$

όπου τα θετικά πρόσημα σημαίνουν κέρδος για το θερμόμετρο.
Επειδή,

$$H = \omega(T_a - T_w) \quad (\text{βλέπε εξίσωση 1.1}) \text{ θα έχουμε:}$$

$$H + LE = \omega_e(T_a - T_w) \quad (2.24)$$

όπου το ω_e είναι ο συντελεστής μεταφοράς για υγρή επιφάνεια και ο οποίος είναι όμοιος αλλά μεγαλύτερος από τον ω , που εφαρμόζεται μόνο σε ξηρές επιφάνειες, έτσι ώστε:

$$LE = (\omega_e - \omega)(T_a - T_w)$$

$$LE = (\omega_e - \omega) \frac{L}{c_p} (q_w - q) \quad (2.25)$$

Χρησιμοποιώντας την 1.1 και την 2.25 η εξίσωση 2.23 γίνεται:

$$\omega(T_a - T_w) + A_N + (\omega_e - \omega) \frac{L}{c_p} (q_w - q) = 0$$

και τελικά

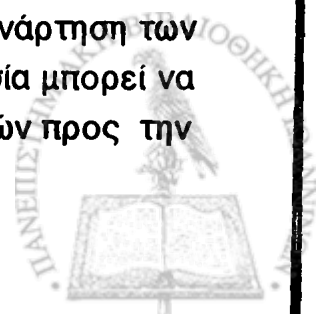
$$q = q_w - \frac{c_p}{L} \left[(T_a - T_w) + \frac{A_N}{\omega} \right] \frac{\omega}{\omega_e - \omega} \quad (2.26)$$

Αν η τιμή του αερισμού είναι ικανοποιητική, το A_N/ω μπορεί να γίνει αμελητέο όταν λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις για ελαχιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας με ακτινοβολία A_N στις λεκάνες των θερμομέτρων, έτσι ώστε η 2.26 γίνεται:

$$q = q_w - \frac{c_p}{L} (T_a - T_w) \frac{\omega}{\omega_e - \omega} \quad (2.27)$$

Η εξίσωση αυτή είναι σχεδόν όμοια με την εξίσωση 2.22. Σε ικανοποιητικά υψηλές ταχύτητες αερισμού, γύρω στα 4 m sec^{-1} , ο λόγος $\omega/(\omega_e - \omega)$ δείχνει σχετική σταθερότητα, δίνοντάς μας τη δυνατότητα να βαθμονομήσουμε τα ψυχρόμετρα. Αντί της εξίσωσης 2.27 χρησιμοποιούνται πίνακες που δίνουν το μέγεθος των διαφόρων μέτρων υγρασίας, όπως ο πίνακας 2.6.

Ο πίνακας 2.6 μας δίνει τιμές σχετικής υγρασίας, σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών υγρού και ξηρού θερμομέτρου. Η σχετική υγρασία μπορεί να εκφρασθεί σαν ο λόγος της πραγματικής πίεσης των υδρατμών προς την



πίεση των κορεσμένων υδρατμών της ίδιας θερμοκρασίας. Η σχετική υγρασία επομένως δεν προσδιορίζει μια μοναδική τιμή των περιεχόμενων υδρατμών στον αέρα, εκτός αν είναι γνωστή η θερμοκρασία. Όταν έχουμε προσδιορίσει την σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία τότε μπορούμε να υπολογίσουμε οποιαδήποτε από τις παραμέτρους που μας προσδιορίζουν την υγρασία, όπως τις μελετήσαμε στην παράγραφο 2.5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6

Σχετικές υγρασίες (σε %) σαν συνάρτηση των θερμοκρασιών του υγρού θερμομέτρου και των διαφορών του ξηρού από το υγρό θερμόμετρο Assmann ($T_a - T_w$).

$T_w(^{\circ}\text{C})$	$T_a - T_w(^{\circ}\text{C})$											
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0
0	100	92	83	75	67	61	54	42	31	22	7	0
2	100	92	84	77	70	64	58	47	37	28	14	2
4	100	93	86	79	73	67	61	51	42	33	20	9
6	100	93	87	81	75	69	64	54	46	38	25	15
8	100	94	88	82	76	71	66	57	49	42	29	19
10	100	94	88	83	78	73	69	60	52	45	33	24
12	100	95	89	84	79	75	70	62	55	48	37	28
14	100	95	90	85	81	76	72	64	57	51	40	31
16	100	96	90	86	82	77	74	66	60	54	43	34
18	100	96	91	86	83	78	75	68	62	56	45	37
20	100	97	91	87	83	79	76	69	63	58	48	39
22	100	97	92	87	84	80	77	71	65	59	50	41
24	100	97	92	88	85	81	78	72	66	61	51	43
26	100	98	92	88	85	82	79	73	67	62	53	45
28	100	98	93	89	86	84	80	75	69	65	56	48
30	100	98	93	89	86	84	80	75	69	65	56	48
32	100	98	93	90	87	84	81	76	70	66	57	50
34	100	98	93	90	87	85	82	76	71	67	58	51

ΠΕΙΡΑΜΑ VIII. Το υγρό θερμόμετρο σε ρεύμα αέρα.

Σε μια πειραματική διάταξη όμοια μ' εκείνη του πειράματος II τοποθετούμε ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα, που δίνει ένα ρεύμα αέρα κατά



μήκος ενός τραπεζιού. Έτσι μικρές ομάδες παρατηρητών μπορούν να κάθονται κατά μήκος του τραπεζιού και να παίρνουν αναγνώσεις από θερμόμετρα που βρίσκονται στηριγμένα επάνω στο τραπέζι και εκθέτονται σε διαφορετικές ταχύτητες ρεύματος αέρα. Βέβαια έχει μεγάλη σημασία οι παρατηρητές να συνεργάζονται και να μη παρεμβάλλουν εμπόδια στο ρεύμα του αέρα, ή η παρεμβολή τους να είναι ελάχιστη. Η ταχύτητα του αέρα, σε κάθε σημείο που βρίσκεται θερμόμετρο, μπορεί να προσδιοριστεί με ανεμόμετρο, όπως στο πείραμα II.

Σε κάθε σημείο παρατήρησης -αυτά έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να μας δίνουν μια αντιπροσωπευτική περιοχή ταχυτήτων αέρα- βρίσκονται δύο θερμόμετρα υποστηριζόμενα στο ρεύμα αέρα, το ένα από τα οποία είναι υγρό. Στις παρατηρήσεις μας απλώς σημειώνουμε τη διαφορά θερμοκρασίας του ξηρού και υγρού θερμομέτρου σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ρεύματος αέρα έτσι ώστε να διαπιστώσουμε την ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος αέρα που χρειάζεται για ικανοποιητική λειτουργία του ζεύγους των θερμομέτρων σαν ψυχομέτρου με σταθερό το λόγο $\omega/\omega_e - \omega$.

Αν η τιμή του $(q_w - q)$ της εξίσωσης 2.27 καθορισθεί ανεξάρτητα, με τη χρήση για παράδειγμα ενός βαθμονομημένου ψυχομέτρου, τότε η τιμή του παράγοντα $\omega/(\omega_e - \omega)$ μπορεί να βρεθεί σα συνάρτηση της ταχύτητας αέρα με την απλή παρατήρηση της τιμής του $(T_a - T_w)$.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική αδράνεια των υγρών θερμομέτρων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από των ξηρών αντιστοίχων τους, εκτός κι αν τα τελευταία έχουν μεγαλύτερες φυσικές διαστάσεις.

ΠΕΙΡΑΜΑ IX. Μέτρηση της αναλογίας Bowen

Η αναλογία Bowen είναι μια έννοια σημαντικής πρακτικής σημασίας. Εκφράζει την αναλογία της ενέργειας που παίρνει μέρος σαν αισθητή θερμότητα για τη θέρμανση του αέρα προς την ενέργεια για την εξάτμιση νερού του χαμηλότερου οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας. Επάνω από φυσικές επιφάνειες που περιλαμβάνουν και τις φυτικές η εξάτμιση λέγεται συνήθως εξατμισοδιαπνοή, για να αναγνωρίζεται ότι η ολική διαδικασία περιλαμβάνει την φυσική εξάτμιση και την διαπνοή των φυτών. Πρόσφατα γίνεται μια προσπάθεια να αντικατασταθεί ο όρος εξατμισοδιαπνοή με τον όρο εξάτμιση ακόμη και για τις φυσικές επιφάνειες με φυτά, αφού έτσι ή αλλιώς το φυσικό φαινόμενο είναι εξάτμιση.

Το πείραμα II μας έδειξε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να καθορίσουμε ένα εμπειρικό συντελεστή μεταφοράς ω , για μια ξηρή επιφάνεια. Αν το πείραμα αυτό γίνει για μια υγρή επιφάνεια, τότε μπορούμε να

καθορίσουμε ένα όμοιο συντελεστή ω_e γι' αυτό τον τύπο επιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή η θερμότητα δεν μεταφέρεται μόνο σαν αισθητή θερμότητα H και σαν καθαρή ακτινοβολία A_N , όπως φαίνεται στην εξίσωση 1.11, αλλά και σαν λανθάνουσα θερμότητα LE που χρειάζεται επίσης για εξάτμιση. Στον όρο LE το E είναι η πραγματική ροή υδρατμών και το L είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Αν ο όρος της καθαρής ακτινοβολίας είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις επιφανειών -πράγμα που για δύο επιφάνειες μια ξηρή και μια υγρή στην ίδια θερμοκρασία, στο ίδιο περιβάλλον θερμοκρασίας εργαστηρίου που δεν έχει μεταβολές της έντασης της ορατής ακτινοβολίας είναι μια λογική υπόθεση-, τότε:

$$\omega(T_a - T) = H$$

$$\omega_e(T_a - T) = H + LE \quad \text{ή}$$

$$\frac{H}{LE} = \frac{\omega}{\omega_e - \omega} \quad (2.28)$$

Η εξίσωση 2.28 είναι μια έκφραση για την αναλογία Bowen.

Το πείραμα βασίζεται κατά ένα μέρος στα αποτελέσματα του πειράματος II και συνεχίζεται με τη χρήση μιας τροποποιημένης μορφής της διάταξης του πειράματος. Οι μεταλλικοί δίσκοι έχουν τώρα μια μικρού βάθους λεκάνη στο επάνω τους μέρος για να έχουμε έτσι μια υδάτινη επιφάνεια στο ρεύμα αέρα, που η ταχύτητα του μετρείται όπως στο πείραμα II. Η τιμή απώλειας θερμότητας, που υποτίθεται ότι γίνεται όλη από την επάνω επιφάνεια αφού όλες οι άλλες είναι θερμικά μονωμένες, μπορεί να υπολογισθεί αν γνωρίζουμε τις μάζες του νερού και του μετάλλου.



ΟΜΑΔΑ 3

ΗΛΙΑΚΗ ΚΑΙ ΓΗΙΝΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Το πείραμα III μας έδειξε ότι τα σώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης δέχονται ακτινοβολία με μήκος κύματος που ανήκει τουλάχιστο σε δύο κύριες ζώνες του φάσματος: α) Την μικρού μήκους κύματος ή ορατή που έρχεται κατευθεία από τον ήλιο ή μετά τη διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα νέφη και την ατμόσφαιρα όπως επίσης και την ανάκλασή της στην επιφάνεια της γης και β) την μεγάλου μήκους κύματος ή υπέρυθρη που προέρχεται από πολυατομικά μόρια της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα νερού και διοξειδίου του άνθρακα, και από τα στερεά και υγρά σώματα που αποτελούν την επιφάνεια της γης. Τα νέφη επίσης λειτουργούν σαν ισχυρές πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε υδρατμούς και υδροσταγονίδια.

Η ακτινοβολία μπορεί να παρατηρηθεί από τα αποτελέσματά της στις φυσικές ιδιότητες ευαίσθητων στοιχείων που η επιφάνειά τους απορροφά ένα ποσοστό της ενέργειας του φάσματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι κατάλληλες ιδιότητες που με την παρατήρηση τους και την καταγραφή των μεταβολών τους οδηγούμαστε αντίστροφα στο μέγεθος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αρχίζουν από τις πολύ βασικές ποσότητες όπως της θερμοκρασίας και φθάνουν στα περισσότερο πολύπλοκα αποτελέσματα των φωτοηλεκτρικών φαινομένων.

3.1 Ειδική ένταση και πυκνότητα ακτινοβολού ροής

Όταν η κάθετος $\bar{n}$ προς μία επιφάνεια στην οποία προσπίπτει ακτινοβολία και η διεύθυνση της ειδικής έντασης I της ακτινοβολίας σχηματίζουν γωνία θ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας από μία στερεά γωνία $d\Omega$ δίνεται από την:

$$dF = I \cos \theta d\Omega \quad (3.1)$$

Θεωρώντας ότι τα I και $\bar{n}$ βρίσκονται στο επίπεδο της επιφάνειας της σελίδας είναι προφανές ότι η ροή διαμέσου της σελίδας θα είναι μηδέν. Όμως η πυκνότητα ροής διαμέσου ενός επίπεδου κάθετου προς τη σελίδα, που η κάθετος του είναι επίσης κάθετη προς την $\bar{n}$ θα είναι $I \cos \theta d\Omega$.



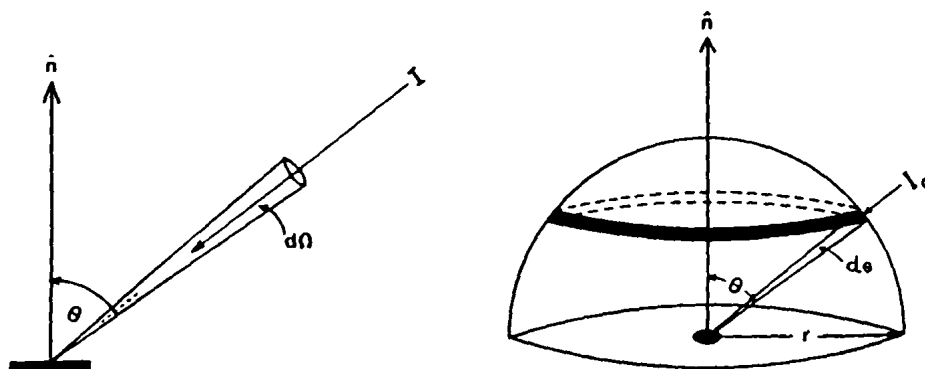
Επομένως γενικά οι ροές διαμέσου μοναδιαίων επιφανειών σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με διευθύνσεις x, y και z συσχετίζονται με την εξίσωση:

$$dF_x^2 + dF_y^2 + dF_z^2 \quad (3.2)$$

Από την εξίσωση 3.1 φαίνεται ότι η γωνιακή κατανομή του πεδίου έντασης έχει μία σημαντική σχέση με την ολική πυκνότητα ροής. Αν η ένταση περιορίζεται σε μια απλή πηγή με μικρή στερεά γωνία, όπως είναι ο ήλιος, τότε η ολική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$F = I \cos \theta \Delta \Omega \quad (3.3)$$

όπου $\Delta \Omega$ είναι η πεπερασμένη αλλά μικρή στερεά γωνία υπό την οποία φαίνεται η πηγή ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.1: Διαγραμματική σχέση μεταξύ ροής και έντασης. Ροή διαμέσου της επιφάνειας ενός επιπέδου στοιχείου από ένα ημισφαίριο που βρίσκεται επάνω του.

Παρότι δεν υπάρχει καμμία απλή γενική έκφραση για την ολική πυκνότητα ροής, μια εξαιρετικά σημαντική περίπτωση είναι εκείνη της ισοτροπικής κατανομής της έντασης επάνω σε ένα ημισφαίριο ή 2π ακτινίων στερεάς γωνίας. Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1,



$$F_0 = 2\pi I_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi I_0 \quad (3.4)$$

όπου το F_0 είναι γνωστό σαν η ιστροπική πυκνότητα ροής και I_0 η ειδική ιστροπική ένταση της ακτινοβολίας.

Η προσπίπτουσα ορατή ακτινοβολία σε μέρες με πλήρη νεφοκάλυψη όπως και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης αποτελούν, με προσέγγιση, παραδείγματα ιστροπικής ακτινοβολίας.

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας είναι ιδανικά σχεδιασμένοι για να αντιδρούν γραμμικά προς την προσπίπτουσα ροή μιας γνωστής ζώνης του φάσματος ακτινοβολίας. Όμως υπάρχουν πολυάριθμα προβλήματα που περιλαμβάνουν μεταβολές στην απορρόφηση της ακτινοβολίας με το μήκος κύματος και την γωνία πρόσπτωσης.

3.2 Κλίμακες ακτινοβολίας

Στις τρεις πρώτες δεκαετίες του αιώνα μας αναπτύχθηκε ένας μεγάλος αριθμός από όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας. Λόγω όμως μιας υπερκαλλιέργειας οπτισμού τα περισσότερα απ' αυτά τα όργανα, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σαν διεθνή πρότυπα, παρέμειναν σε χρήση παρότι η ακρίβεια που έδιναν αποδείχθηκε ελλιπής.

Τα δύο κύρια παραδοσιακά πρότυπα κέντρα ακτινοβολίας ανέπτυξαν τις δικές τους κλίμακες ακτινοβολίας, δηλ. την Angström (στην Ευρώπη) και την Smithsonian (στις Η.Π.Α.). Οι κλίμακες αυτές, πρέπει να τονισθεί, διέφεραν λόγω σφάλματος των οργάνων από την αρχή της χρησιμοποίησής τους (για παράδειγμα υπεισέρχονταν σφάλμα λόγω της επίδρασης των άκρων των τετραγωνικής επιφάνειας ευαίσθητων στοιχείων). Σήμερα φαίνεται απίστευτο το γεγονός ότι τα δύο αυτά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν σαν διεθνή πρότυπα την ίδια χρονική περίοδο δεν συγκρίθηκαν κατευθεία το ένα με το άλλο ποτέ. Οι κλίμακες που αναπαριστούν είναι και οι δύο ανακριβείς μέχρι και 2% και το μέγεθος της διόρθωσης που χρειάζεται για να έλθουν τα παλιά δεδομένα στην τωρινή διεθνή πυρηλιομετρική κλίμακα εξαρτάται επίσης και από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που μετρήθηκε τότε. Υποτίθεται ότι η ποσοστιαία διόρθωση δεν ποικίλει σημαντικά για τις τιμές που παίρνουμε στη μέτρηση της έντασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σ' αυτή τη βάση, οι μετρήσεις που έγιναν σύμφωνα με την αρχική μη διορθωμένη κλίμακα Angström αυξάνονται κατά 1.5% και εκείνες που έγιναν σύμφωνα με την Smithsonian κλίμακα του 1913 ελαττώνονται κατά 2% για να φέρουμε όλα τα δεδομένα όσο το δυνατό κοντά στο κοινό επίπεδο που είναι εκείνο της διεθνούς πυρηλιομετρικής κλίμακας.

Οι μεγάλες δυσκολίες που υπεισέρχονται στη δημιουργία ενός απόλυτου προτύπου ακτινοβολίας προέρχονται:

1. Από την αβεβαιότητα του βαθμού του μαύρου, δηλ. του συντελεστή απορρόφησης της επιφάνειας του ευαίσθητου στοιχείου και
2. Από τη δυσκολία του υπολογισμού της απώλειας θερμότητας από το ευαίσθητο στοιχείο, λόγω αναπόφευκτων ανωμεταφορικών κινήσεων και διαδικασιών αγωγιμότητας.

3.3 Οι ροές ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας

Ο ήλιος, που έχει μια θερμοκρασία 6000°K περίπου, φαίνεται από την επιφάνεια της γης σχεδόν σαν "πηγή σημείο" υπό μία στερεά γωνία 0.68×10^{-4} στερεοακτινίων. Από την άλλη πλευρά η ροή γήινης ακτινοβολίας που προέρχεται από 2π στερεοακτίνια σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ισοτροπική. Θεωρώντας ότι η γη ακτινοβολεί σαν μαύρο σώμα θερμοκρασίας 300°K και με τη βοήθεια του νόμου του Stefan συμπεραίνουμε ότι ο λόγος της έντασης της ηλιακής προς τη γήινη ακτινοβολία είναι ίσος με τον λόγο των τετάρτων δυνάμεων των αντίστοιχων θερμοκρασιών επιφάνειας δηλ. $(6000/300)^4 = 1.6 \times 10^5$. Όμως, ακόμη και αν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και η ακτινοβολία του δεν απορροφάται από την ατμόσφαιρα, οι λόγοι της ροής πυκνότητας ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια απαιτεί τον συνυπολογισμό του λόγου των στερεών γωνιών υπό τις οποίες φαίνονται οι δύο πηγές, δηλ. του λόγου $(0.68 \times 10^{-4}/2\pi) = 1.0828 \times 10^{-5}$ σαν συντελεστή του λόγου έντασης. Τότε το γινόμενο του συντελεστή με το λόγο έντασης της ηλιακής προς την γήινη ακτινοβολία είναι ίσος με $1.0828 \times 10^{-5} \times 1.6 \times 10^5 = 1.73$. Η επίδραση της εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης της από την ατμόσφαιρα όπως επίσης και η απόσταση του ήλιου από το ζενίθ έχει σαν αποτέλεσμα να ελαττώνεται η τιμή του προηγούμενου λόγου. Αυτό σημαίνει ότι γενικά η ροή ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας ενέργειας, παρότι είναι διαφορετικών μηκών κύματος, είναι συγκρίσιμου μεγέθους.

Η εξίσωση του Planck για την κατανομή του μήκους κύματος της ακτινοβολίας μαύρου σώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει ότι η



ηλιακή και η γήινη περιοχή του φάσματος ακτινοβολίας είναι διαφορετικές με μόνη κοινή την περιοχή $4.7 \times 10^{-6} \text{ m}$ όπου, για παράδειγμα, η συνεισφορά στη ροή ηλιακής ακτινοβολίας είναι 0.25% εκείνης της ηλιακής με μήκος κύματος $0.47 \times 10^{-6} \text{ m}$, που είναι το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας.

ΠΕΙΡΑΜΑ Χ. Μέτρηση της ακτινοβολίας με θερμομετρική μέθοδο

Το πείραμα αυτό είναι μια μορφή του πειράματος III περισσότερο ποσοτική και ταυτόχρονα μια βελτίωση του πειράματος II, κατά το ό,τι οι τρεις δίσκοι αλουμίνιου με επιφάνειες μαύρη, λευκή και γυαλισμένη χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα. Αν μετρηθούν οι θερμοκρασίες ισορροπίας είναι θεωρητικά δυνατό να καθορισθούν οι προσπίπτουσες ροές ακτινοβολίας μεγάλου και μικρού μήκους κύματος.

Θα αναφερθούμε στο σχήμα 1.2 αναλύοντας την ισορροπία των επί μέρους ροών ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση. Βασική προϋπόθεση είναι ότι εκτός από την ακτινοβολία, η μόνη άλλη διαδικασία σημαντικής μεταφοράς θερμότητας προς τους δίσκους είναι με θέρμανση του αέρα επάνω από τις εκτεθειμένες επιφάνειες των δίσκων με αισθητή θερμότητα. Στο πείραμα αυτό πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι όλες οι επιφάνειες δεν είναι τέλειες μαύρες ή λευκές στην μια ή και στις δύο περιοχές του φάσματος ακτινοβολίας που θεωρούμε. Έτσι για κάθε δίσκο παίρνουμε μια εξίσωση για την περίπτωση ισορροπίας (σταθερή θερμοκρασία δίσκων) από τις 1.9 και 1.10 της μορφής:

$$\omega(T - T_a) = A_\mu S_i + \varepsilon(L_i - \sigma T^4) \quad (3.5)$$



**Ιδιότητες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας ιδανικών
και πραγματικών επιφανειών**

Είδος Επιφάνειας	Απορροφητικότητα μικρού μήκους κύμα- τος A_μ	Αφεικότητα μεγάλου μήκους κύματος ϵ
α) Ιδανικές ή τέλειες επιφάνειες		
Τέλεια μαύρη	1	1.0
Τέλεια λευκή	0	1.0
Τέλεια γυαλισμένη	0	0
β) Πραγματικές επιφάνειες		
Μαύρη βαμμένη	0.95	0.95
Λευκή βαμμένη	0.05	0.95
Γυαλισμένο αλουμίνιο	0.05	0.05

Αν όλες οι επιφάνειες των δίσκων ήταν ιδανικές τότε θα είχαμε τις παρακάτω τρεις εξισώσεις, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.1, για τις τρεις επιφάνειες:

$$\text{Μαύρη: } \omega(T_B - T_a) = S_i + L_i - \sigma T_B^4 \quad (3.6)$$

$$\text{Λευκή: } \omega(T_w - T_a) = L_i - \sigma T_w^4 \quad (3.7)$$

$$\text{Γυαλισμένη: } \omega(T_R - T_a) = 0 \quad (3.8)$$

όπου τα T_B , T_w και T_R είναι οι θερμοκρασίες της μαύρης, της λευκής και της γυαλισμένης επιφάνειας δίσκου, αντίστοιχα. Στην πράξη, από την παρατήρηση της θερμοκρασίας της γυαλισμένης επιφάνειας του δίσκου αλουμινίου που κάναμε στην ομάδα ασκήσεων I φαίνεται ότι η εξίσωση 3.7 δεν ισχύει. Πράγματι, περισσότερη εξέταση των πραγματικών τιμών των T_B



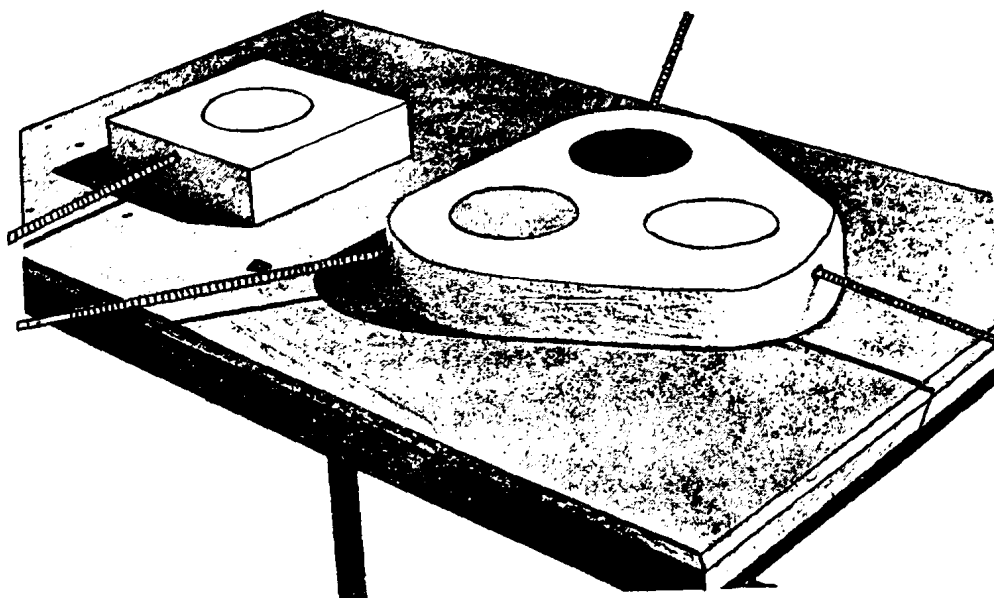
και T_w δείχνει ότι οι τιμές των A_μ και ε είναι περίπου εκείνες που φαίνονται στον πίνακα 3.1. Με τις τιμές αυτές των A_μ και ε οι εξισώσεις γίνονται:

$$\text{Μαύρη:} \quad \omega(T_B - T_a) = 0.95 S_i + 0.95 (L_i - \sigma T_B^4) \quad (3.9)$$

$$\text{Λευκή:} \quad \omega(T_w - T_a) = 0.05 S_i + 0.95 (L_i - \sigma T_w^4) \quad (3.10)$$

$$\text{Γυαλισμένη:} \quad \omega(T_R - T_a) = 0.05 S_i + 0.05 (L_i - \sigma T_R^4) \quad (3.11)$$

όπου οι T_B , T_w και T_R είναι οι θερμοκρασίες των ατελών επιφανειών μαύρης, λευκής και γυαλισμένης, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 Διάταξη για τη θερμομετρική μέθοδο μέτρησης της ακτινοβόλου ενέργειας. Τρεις δίσκοι αλουμινίου (ένα μέρος της μάζας τους έχει αφαιρεθεί για να ελαττωθεί ο χρόνος θερμικής ισορροπίας) που έχουν χρώμα αντίστοιχα μαύρο, λευκό και γυαλισμένο αλουμινίου είναι τοποθετημένοι μέσα σε πολυουρεθάνη. Υδραργυρικά θερμόμετρα μας δίνουν τη θερμοκρασία τους. Στα αριστερά ένας άλλος λευκός δίσκος που δεν του έχει αφαιρεθεί μάζα χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ω .

Επειδή ο συντελεστής μεταφοράς ω είναι με προσέγγιση ανεξάρτητος της θερμοκρασίας, αυτός μπορεί να θεωρηθεί ίσος και για τις τρεις επιφάνειες με την προϋπόθεση ότι οι επιφάνειες είναι όμοια εκτεθειμένες



στον άνεμο. Αυτό σημαίνει ότι αν το ω καθορισθεί από ένα σύνολο παρατηρήσεων που βασίζονται σε ένα από τους δίσκους, ας πούμε σε εκείνο με τη γυαλισμένη επιφάνεια αλουμινίου, τότε τα S_i και L_i μπορεί να υπολογισθούν από τις εξισώσεις 3.9 και 3.10 με τις $T_{B'}$, $T_{w'}$ και T_a σαν μόνες παραμέτρους που απαιτείται να είναι γνωστές και μπορούν να μετρηθούν με παρατήρηση. Για τον καθορισμό του S_i δεν χρειάζεται να είναι γνωστή η θερμοκρασία του αέρα αφού:

$$S_i = \frac{\omega}{0.9} (T_{B'} - T_{w'}) - \frac{0.95}{0.90} \sigma (T_{w'}^4 - T_{B'}^4) \quad (3.12)$$

Οι μετρήσεις έχουν έννοια μόνο όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σταθερή. Επιπλέον, στον καθορισμό της σταθεράς χρόνου του γυαλισμένου δίσκου και επομένως και του ω , ο δίσκος πρέπει να θερμανθεί σε μια θερμοκρασία που να ξεπερνά την $T_{R'}$ στη διαδικασία της καμπύλης ψύξης του, που μεταφέρεται σε διάγραμμα.

Τελικά με γνωστά τα ω , $T_{R'}$, T_a , S_i και σ μπορεί να ελεγχθεί αν ισχύουν οι τιμές 0.05 που πήραμε για τα A_μ και ε στην περίπτωση του γυαλισμένου δίσκου. Η διάταξη για τον έλεγχο φαίνεται στο σχήμα 3.2 στην οποία για τον καθορισμό του ω χρησιμοποιείται ένας επιπλέον λευκός δίσκος.

3.4 Όργανα μέτρησης ακτινοβολίας

Εκτός από τα πυρηλιόμετρα, που μετρούν την ακτινοβολία που δέχονται υπό μια μικρή στερεά γωνία, υπάρχουν σήμερα όργανα που μετρούν την ακτινοβολία υπό μια στερεά γωνία 2π ή ακόμα και 4π ακτινίων. Τα όργανα αυτά είναι σχεδιασμένα για να είναι ευαίσθητα σε ακτινοβολίες με διαφορετικό μήκος κύματος. Συνήθως είναι κατασκευασμένα για να δέχονται ακτινοβολία από ένα ημισφαίριο ή για να μετρούν την καθαρή ακτινοβολία (διαφορά ακτινοβολιών) σαν αποτέλεσμα αλγεβρικής άθροισης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επάνω και στην κάτω επιφάνεια του τετράγωνου οριζοντιωμένου ευαίσθητου στοιχείου του οργάνου.

Το ευαίσθητο στοιχείο αποτελείται από ένα επίπεδο οριζόντιο δίσκο και έχει σαν σκοπό να μετρήσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία στη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας, στη θέση που έχει τοποθετηθεί το όργανο. Βασικά, το στοιχείο είναι όμοιο μ' εκείνο που χρησιμοποιείται στα πυρηλιόμετρα. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι η αιτία που προκαλεί είτε μια διαφορά θερμοκρασίας διαμέσου του πάχους του στοιχείου είτε διαφορετική θέρμανση



κατά μήκος της οριζόντιας επιφάνειας, όπως στη συστοιχεία θερμοζευγών που χρησιμοποιείται στο πυρηλιόμετρο Linke και Feussieur και το πυρανόμετρο Kípp.

Τα όργανα που μετρούν ροή ακτινοβολίας υπό σχετικά μικρή γωνία πρόσπτωσης χρειάζονται προφύλαξη από επιδράσεις ανωμεταφοράς. Συνήθως χρησιμοποιείται μια από τις εξής δύο μεθόδους:

α. Εκμηδενίζουμε τη φυσική ανωμεταφορά με ένα ρεύμα αέρα που περνάει κατά μήκος της επιφάνειας του ευαίσθητου στοιχείου. Στην περίπτωση των ακτινομέτρων καθαρής ακτινοβολίας, το ρεύμα αέρα πρέπει να ρυθμισθεί έτσι ώστε να εξισώνει τις ανωμεταφορές θερμότητας επάνω και από τις δύο επιφάνειες του οργάνου δηλ. την επάνω και την κάτω. Όταν το ρεύμα του αέρα διατηρείται σταθερό τότε μπορούμε να βαθμονομήσουμε τον τύπο αυτό του οργάνου.

β. Τοποθετούμε επάνω από την επιφάνεια του ευαίσθητου στοιχείου ένα ημισφαίριο από κατάλληλο υλικό, που δεν απορροφάει καθόλου ακτινοβολία του μήκους κύματος που μετρούμε.

Τα ακτινόμετρα μικρού μήκους κύματος (ορατή ακτινοβολία) είναι γνωστά σαν πυρανόμετρα και το υλικό κατασκευής του ημισφαίριου που καλύπτει το ευαίσθητο στοιχείο τους είναι γυαλί. Το υλικό αυτό απορροφάει τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία με αποτέλεσμα, εκτός κι αν το γυάλινο ημισφαίριο και το σώμα του ευαίσθητου στοιχείου έχουν την ίδια θερμοκρασία, να προκύπτουν προβλήματα επαναακτινοβολίας από το ημισφαίριο προς το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου. Έτσι παίζει σπουδαίο ρόλο η καλή θερμική επαφή μεταξύ του γυάλινου ημισφαίριου και του σώματος του πυρανόμετρου. Η απόδοση του οργάνου βελτιώνεται με τη χρήση πολλών ομοκεντρικών ημισφαιρίων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο, γιατί με περισσότερα γίνεται σοβαρό το πρόβλημα της πολλαπλής διάθλασης. Τα ακτινόμετρα μεγάλου μήκους κύματος ή όλων των μηκών κύματος δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουν γυαλί και το ευαίσθητο στοιχείο τους μπορεί να καλυφθεί από ημισφαίριο πολυαιθυλενίου με πολύ μικρό πάχος. Ο τύπος αυτός κάλυψης του ευαίσθητου στοιχείου πρέπει να συνοδεύεται από την πλήρωση του χώρου του ημισφαίριου με ξηρό συμπιεσμένο αέρα ή άζωτο. Σε άλλο τύπο ακτινόμετρου όλων των μηκών κύματος δεν υπάρχει κάλυμμα από ημισφαίριο και χρησιμοποιείται τεχνητό ρεύμα αέρα. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του τύπου ακτινομέτρου είναι ότι



ακόμα και σε μέτριους ανέμους πρέπει να αλλάζει η βαθμονόμηση του οργάνου.

Τα μικρού μήκους κύματος ακτινόμετρα (πυρανόμετρα) που έχουν μαύρες επιφάνειες του ευαίσθητου στοιχείου (όπως τα Kirp και τα Erpley) διαφέρουν ουσιαστικά από τα ακτινόμετρα όλων των μηκών κύματος μόνο στον τύπο προστασίας τους από τις ανωμεταφορικές κινήσεις. Τα παλιά πυρανόμετρα Erpley διαφέρουν στο ότι έχουν ένα μαύρο δίσκο που περιβάλλεται από ζώνες εναλλασσόμενες άσπρου και μαύρου χρώματος. Επειδή οι λευκές επιφάνειες λειτουργούν σαν μαύρα σώματα μόνο για την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος δημιουργείται μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των μαύρων και των λευκών επιφανειών του ευαίσθητου στοιχείου με αιτία την μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία. Εκτός από τα ακτινόμετρα μικρού μήκους κύματος και εκείνα όλων των μηκών ένας τρίτος τύπος ακτινομέτρου είναι εκείνος που έχει μια λευκή επιφάνεια σαν ευαίσθητο στοιχείο που ανακλά την περισσότερη από την προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία και έχει ένα κάλυμμα επίπεδου πολυαιθυλενίου, έτσι ώστε ουσιαστικά απορροφά την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Δυστυχώς όμως, επειδή ο ήλιος είναι μια πηγή που δίνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας στην μικρού μήκους κύματος ζώνη ακτινοβολίας η ατελής ανάκλασή της από τη λευκή επιφάνεια έχει σαν αποτέλεσμα να υπεισέρχεται ένα αρκετά μεγάλο λάθος από τον τύπο αυτό ακτινομέτρου ακτινοβολιών μεγάλου μήκους κύματος, εκτός κι αν καλύπτεται ο ήλιος οπότε μικραίνει σημαντικά το λάθος. Ο τύπος αυτός ακτινομέτρου ακόμη και σε συννεφιασμένο καιρό δεν δίνει μετρήσεις εμπιστοσύνης. Για το λόγο αυτό συνήθως μετράμε την ακτινοβολία που περιέχει όλα τα μήκη κύματος και εκείνη που αφορά τα μικρά μήκη κύματος με διαφορετικά για την κάθε μέτρηση ακτινόμετρα, οπότε υπολογίζουμε από τη διαφορά τους την μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία.

Οι ατέλειες στο βαθμό του μαύρου ή του λευκού της επιφάνειας των ευαίσθητων στοιχείων αντισταθμίζονται με τη βοήθεια ιδιαίτερης τεχνικής. Για παράδειγμα, στα ακτινόμετρα όλων των μηκών κύματος βρίσκεται ότι η αντίδραση του οργάνου είναι μεγαλύτερη για μια ορισμένη ροή ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος από εκείνη για ίδια ροή αλλά μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Η ισότητα στις αντιδράσεις του οργάνου στην περίπτωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με λευκό βάψιμο ενός μέρους της μαύρης επιφάνειας



του ευαίσθητου στοιχείου, έτσι ώστε να ελαττώνεται μερικώς η ευαισθησία του οργάνου στην μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία.

Είναι δυνατό να κατασκευάσουμε ένα αρκετά ακριβές ακτινόμετρο για ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος με αντιστάθμιση της ανεπιθύμητης μερικής απορρόφησης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας που απορροφάται από την ατελή επιφάνεια (που μπορεί να απορροφά από 5% μέχρι 10% της προσπίπτουσας μικρού μήκους ακτινοβολίας) με την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που απορροφάται από μια πρόσθετη μικρή θερμοηλεκτρική στήλη με μαύρες ευαίσθητες επιφάνειες κατάλληλου εμβαδού.

Ακτινόμετρα ευαίσθητα σε όλα τα μήκη κύματος, με επίπεδα ευαίσθητα στοιχεία μπορεί να υπάρξουν δύο τύπων. Ο ένας τύπος είναι κατάλληλος για τη μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από το ημισφαίριο προς το οποίο είναι εκτεθειμένη η επίπεδη επιφάνεια του ευαίσθητου στοιχείου και ο άλλος είναι σχεδιασμένος για να μετρήσει την διαφορά της ακτινοβολού ενέργειας μεταξύ των ακτινοβολιών που δέχονται οι δύο ευαίσθητες επίπεδες επιφάνειες του οργάνου εκ των οποίων η μία βλέπει προς το επάνω ημισφαίριο και η άλλη προς το κάτω. Όταν το όργανο είναι ευαίσθητο μόνο στην ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος τότε το ακτινόμετρο καθαρής ενέργειας είναι γνωστό σαν ακτινόμετρο καθαρής ενέργειας μικρού μήκους κύματος.

Όλα τα ακτινόμετρα με επίπεδα ευαίσθητα στοιχεία όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία από μια πηγή που φαίνεται από το ακτινόμετρο υπό πολύ μικρή στερεά γωνία και αναφέρεται σαν "πηγή σημείο" ή η ακτινοβολία της σαν άμεση ακτινοβολία έχουν μια σταθερά βαθμονόμησης που εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για ακτινοβολία με γωνία πρόσπτωσης πολύ μεγάλη και αυτό οφείλεται στην αδυναμία του Νόμου του Lambert να εφαρμοσθεί για μια μαύρη επιφάνεια ευαίσθητου στοιχείου που δεν είναι τέλεια. Έτσι τα ακτινόμετρα που χρησιμοποιούνται σε πολικές περιοχές πρέπει να είναι ιδιαίτερα βαθμονομημένα. Ένα σπουδαίο αποτέλεσμα αυτής της εξάρτησης από τη γωνία πρόσπτωσης είναι ότι η βαθμονόμηση διαφέρει πολύ στην περίπτωση πηγής σημείου και της διαχεόμενης ακτινοβολίας. Έτσι είναι αδύνατο να βγάλουμε συμπεράσματα μεγάλης ακρίβειας από αναγνώσεις που πήραμε στη διάρκεια ημερών με μεγάλη νεφοκάλυψη. Είναι προφανές ότι οι απαραίτητες διορθώσεις μπορεί να γίνουν πιο εύκολα σε όργανα που είναι



ευαίσθητα σε ένα μόνο ημισφαίριο από εκείνα που μετρούν καθαρή ακτινοβολία και δέχονται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία από το ένα ημισφαίριο και την ισοτροπική από το άλλο. Έτσι η μικρού μήκους κύματος καθαρή ακτινοβολία μετρείται με μεγαλύτερη ακρίβεια με δύο διαφορετικά πυρανόμετρα που το καθένα έχει βαθμονομηθεί ιδιαίτερα για τη σταθερά του. Στην περίπτωση του ακτινόμετρου καθαρής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος η ευκολία να έχουμε ένα όργανο ικανό να δίνει μια άμεση ανάγνωση της καθαρής ολικής ακτινοβολίας ενέργειας αντισταθμίζει τις αδυναμίες βαθμονόμησης. Το ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος μπορεί να βαθμονομηθεί με ιδιαίτερη ακρίβεια για μέρες με νεφοκάλυψη και νυχτερινή χρήση επειδή και στις δύο περιπτώσεις έχουμε διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει και στις δύο επιφάνειες του ευαίσθητου στοιχείου. Αν η κάτω επιφάνεια του ακτινόμετρου καθαρής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος καλύπτεται από γυάλινο ημισφαίριο με μαυρισμένη εσωτερική επιφάνεια του οποίου η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί, η ροή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην ημισφαιρική επιφάνεια μπορεί να υπολογισθεί. Η ανάγνωση στην περίπτωση αυτή γίνεται με τη βοήθεια της ροής εξόδου θερμοηλεκτρικής στήλης από το μαυρισμένο ημισφαίριο έτσι ώστε μια ηλεκτρεγερτική δύναμη της θερμοστήλης ίση με μηδέν δεν προϋποθέτει και μη πρόσπτωση ακτινοβολίας.

Τα ακτινομετρικά όργανα είναι τα ακόλουθα:

- α. **Πυρανόμετρο** για τη μέτρηση της ολικής προσπίπτουσας μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας S_i .
- β. **Πυρηλιόμετρο** για τη μέτρηση μόνο της άμεσης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας Z_i και της γωνίας Θ απόκλισης του ήλιου από το ζενίθ. Με τη χρήση πυρανόμετρου καλυμμένου με ζώνη που αποκλείει την άμεση ακτινοβολία παίρνουμε τη διαφορά $S_i - Z_i \cos \Theta$ (διάχυτη ακτινοβολία).
- γ. **Ανακλασίμετρο (Αλμπετόμετρο)** για τη μέτρηση της διαχεόμενης και ανακλώμενης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας S_0 που κατευθύνεται προς το διάστημα.
- δ. **Ακτινόμετρο (Ισοζυγιόμετρο)** για τη μέτρηση της καθαρής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος A_N (διαφορά της προσπίπτουσας από την ανακλώμενη και εκπεμπόμενη).
- ε. **Ακτινόμετρο με κάλυμμα αναφοράς** για τη μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος A_i .



Απο τις ποσότητες Z_i , S_o , A_i και A_N είναι δυνατόν να πάρουμε τις εξής επί πλέον ποσότητες:

1. Την προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος που διαχέεται από την ατμόσφαιρα $C_i = S_i - Z_i \cos \Theta$.
2. Την μικρού μήκους κύματος ανακλαστικότητα (albedo) της επιφάνειας της γης. $\alpha = S_o / S_i$.
3. Την προς την ατμόσφαιρα κατευθυνόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης όλων των μηκών κύματος $A_o = A_i - A_N$.
4. Την προσπίπτουσα μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία $L_i = A_i - S_i$ και
5. Την προς την ατμόσφαιρα κατευθυνόμενη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία $L_o = A_o - S_o$.

Σημείωση: Το S σημαίνει μικρό μήκος κύματος (αρχικό του Sort), το L σημαίνει μεγάλο μήκος κύματος (αρχικό του Long), το A σημαίνει όλα τα μήκη κύματος (αρχικό του All) και τα i και o σαν δείκτες σημαίνουν προσπίπτουσα στη γη και κατευθυνόμενη στο διάστημα από τη γη, αντίστοιχα.

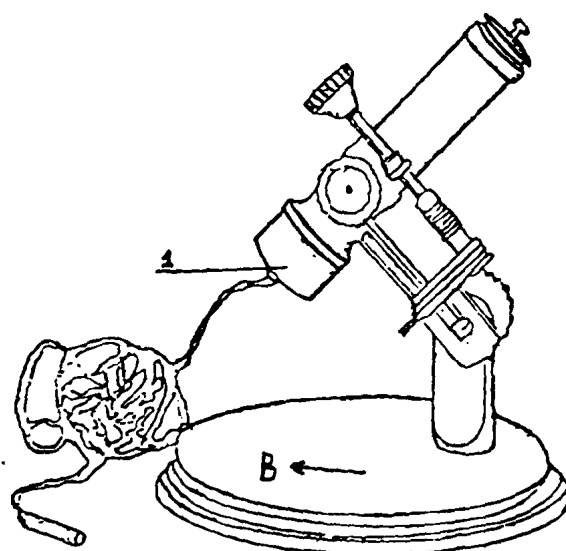
3.4.1. Πυρηλιόμετρο

Πρότυπο θεωρείται το πυρηλιόμετρο του Angström που είναι αντισταθμιστικό και στο οποίο μια μαυρισμένη πλάκα από μαγγανίνη θερμαίνεται με δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος ενώ σκιάζεται από τον ήλιο. Όταν η πλάκα αποκτήσει την ίδια θερμοκρασία με μια όμοιά της που εκτίθεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία τότε η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση της σκιασμένης πλάκας είναι ίση με την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την άλλη πλάκα. Αντί δύο πλακών έχουμε σειρά από σκιασμένες και μη σκιασμένες πλάκες που αποτελούν στήλη (θερμοστοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά).

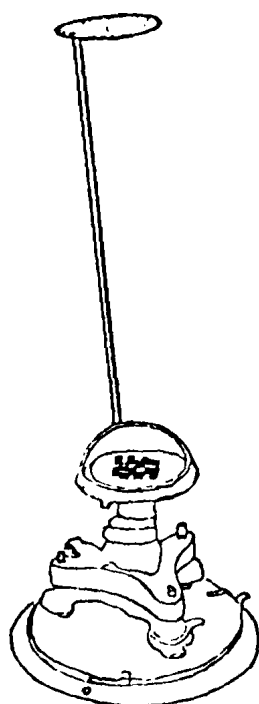
Το πυρηλιόμετρο του εργαστηρίου AT-50 (σχ. I) είναι Ρωσικής κατασκευής. Έχει θερμοζεύγη από μαγγανίνη-κωνσταντάνη που αποτελούν θερμοηλεκτρική στήλη. Η θερμή επαφή της στήλης είναι συνδεδεμένη με μεταλλικό δίσκο που αποτελεί και το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου. Αυτό είναι τοποθετημένο στον πυθμένα ενός σωλήνα (1) που εσωτερικά είναι μαυρισμένος και έχει δακτυλίους ώστε να αποφεύγονται ακτινοβολίες, λόγω ανάκλασης στα εσωτερικά τοιχώματα. Όταν κατευθύνουμε το όργανο προς τον ήλιο οι ηλιακές ακτίνες που φθάνουν σαν παράλληλη δέσμη από τον ήλιο (η άμεση δηλ. ακτινοβολία) προσπίπτουν στο ευαίσθητο στοιχείο και το θερμαίνουν. Η ψυχρή επαφή, στην οποία δεν



προσπίπτει ακτινοβολία, είναι συνδεδεμένη με το σώμα του οργάνου. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής και της ψυχρής επαφής είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η διαφορά της θερμοκρασίας δημιουργεί ηλεκτρεγερτική δύναμη Thomson. Μετρώντας το μέγεθος της τάσης, αντίστροφα, προσδιορίζουμε την προσπίπτουσα άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο όργανό μας.



Σχήμα Ι. Πυρηλιόμετρο AT-50



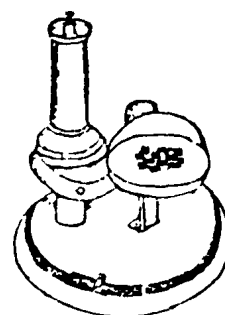
Σχήμα ΙΙ. Πυρανόμετρο M-80

3.4.2. Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο M-80 (σχ. II) είναι Ρωσικής κατασκευής με θερμοηλεκτρική στήλη (θερμοζεύγη μαγγανίνης-κωνσταντάνης). Οι θερμές επαφές των θερμοστοιχείων βρίσκονται στα μαύρα τετραγωνίδια και οι ψυχρές στα λευκά του σε σχήμα σκακίερας ευαίσθητου στοιχείου του ογάνου που καλύπτεται από γυάλινο ημισφαιρικό θόλο. Με σκίαση του ευαίσθητου στοιχείου μετράμε τη διάχυτη ακτινοβολία που έρχεται από τον ήλιο αφού υποστεί διάχυση στην ατμόσφαιρα. Ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι το άθροισμα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας και της συνιστώσας κατά την κατακόρυφό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία μετράται άμεσα με το πυρανόμετρο χωρίς τη χρήση του σκιάδιου (χωρίς σκίαση του οργάνου).

3.4.3. Ανακλασίμετρο (Αλμπετόμετρο)

Το αλμπετόμετρο ΑΠ-33 (σχ. III) μετρά την ανακλαστικότητα μιας επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία και η κατασκευή του είναι όμοια με εκείνη του πυρανόμετρου M-80. Η μόνη διαφορά του είναι ότι προσαρμόζεται σε γυροσκοπική βάση (σχ. III) που του εξασφαλίζει την οριζοντίωση.



Σχήμα III. Ανακλασίμετρο ΑΠ-33

3.4.4. Διμεταλλικός ακτινογράφος Robitzsch

Το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου είναι δύο διμεταλλικά ελάσματα που είναι παράλληλα μεταξύ τους και βαμμένα το ένα μαύρο και το άλλο λευκό. Όταν εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία το μαύρο απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτό και θερμαινόμενο διαστέλλεται. Η διαστολή μεταφέρεται με μοχλούς και συνδέσμους σε γραφίδα που γράφει σε χαρτί που προσαρμόζεται σε ωρολογιακά περιστρεφόμενο κύλινδρο.

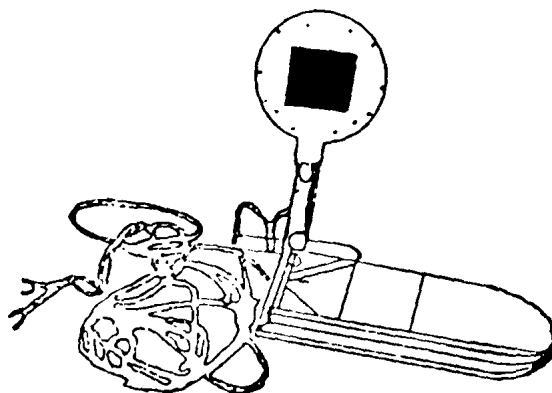
3.4.5. Ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας (ισοζυγίμετρο).

Το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου καταλήγει σε θερμοηλεκτρική στήλη χαλκού-κωνσταντάνης. Έχει δύο ευαίσθητα στοιχεία ώστε όταν το



όργανο είναι οριζοντιωμένο το ένα να είναι στραμμένο προς τα επάνω και να δέχεται την προσπίπτουσα ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος ενώ το άλλο είναι στραμμένο προς τα κάτω και δέχεται την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος που εκπέμπει η επιφάνεια της γης ή ανακλά και διαχέει. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που δημιουργείται στη θερμοηλεκτρική στήλη είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μεταξύ του άνω και κάτω ευαίσθητου στοιχείου, δηλ. της διαφοράς ροής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος που δέχονται τα στοιχεία (σχ. IV).

Το κάθε ευαίσθητο στοιχείο αποτελείται από λεπτό χάλκινο φύλλο επάνω στο οποίο βρίσκονται οι επαφές του θερμοστοιχείου έτσι ώστε οι θερμές επαφές των στοιχείων εφάπτονται στο χάλκινο φύλλο της μιας επιφάνειας ενώ οι ψυχρές επαφές εφάπτονται στο αντίστοιχο φύλλο της άλλης επιφάνειας.



Σχήμα IV. Ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας (Ισοζυγίομετρο).

ΠΕΙΡΑΜΑ ΧΙ. Βαθμονόμηση ακτινομέτρου με θάση πυρηλιόμετρο

Η πείρα έχει δείξει ότι οι απλούστερες αρχές και η μεγαλύτερη αντοχή που χαρακτηρίζουν την κατασκευή του πυρηλιομέτρου οδηγούν στη μεγαλύτερη εμπιστοσύνη της βαθμονόμησης του από εκείνη των οργάνων που διαθέτουν ημισφαιρικούς θόλους, όπως επίσης και εκείνων που τα ευαίσθητα στοιχεία τους εκτίθενται για περισσότερο χρονικό διάστημα σε επιδράσεις που χρονικά μεταβάλλονται. Έτσι συχνά ένα κατάλληλο πυρηλιόμετρο χρησιμοποιείται σαν πρότυπο για έλεγχο βαθμονόμησης.



άλλων οργάνων όπως πυρανομέτρων και ακτινομέτρων όλων των μηκών κύματος.

Η βαθμονόμηση ενός πυρανομέτρου μας δείχνει τις βασικές διαδικασίες που μπορούν επίσης να χρησιμεύσουν για τη βαθμονόμηση ενός ακτινομέτρου καθαρής ακτινοβολίας όλων των μηκών κύματος με βάση ένα άλλο μικρών μηκών κύματος.

Επιλέγουμε μια ηλιόλουστη ημέρα και παίρνουμε μια ανάγνωση ε_s (mV) με το ακτινόμετρο για την ολική προσπίπτουσα μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία S_i . Αν η άγνωστη σταθερά βαθμονόμησης του ακτινομέτρου είναι K_s (mV/cal·cm⁻²·min⁻¹ ή mV/mW·cm⁻²) τότε, αν το ευαίσθητο στοιχείο του συμπεριφέρεται σαν τέλειο μαύρο σώμα:

$$\varepsilon_s = K_s S_i = K_s (Z_i \cos \Theta + C_i) \quad (3.13)$$

Μετά από αυτό χρησιμοποιούμε ένα μεταλλικό δίσκο που η σκιά του να καλύπτει τουλάχιστο το όργανο και να δίνει τη μικρότερη δυνατή στερεά γωνία και παίρνουμε μια ανάγνωση ε_c , για την ακτινοβολία του ουρανού μόνο, που θα είναι

$$\varepsilon_c = K_s C_i \quad (3.14)$$

Η ανάγνωση επομένως που θα έδειχνε το ακτινόμετρο στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι

$$\varepsilon_z = \varepsilon_s - \varepsilon_c = K_s Z_i \cos \theta \quad (3.15)$$

όπου έχει υποθεθεί ότι η ίδια σταθερά βαθμονόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμεση και για τη διάχυτη ακτινοβολία. Αν και αυτό συνήθως δεν συμβαίνει, το λάθος που υπεισέρχεται είναι μηδαμινό λόγω του μικρού μεγέθους της διάχυτης ακτινοβολίας σε σχέση με την άμεση.

Παίρνουμε μετά το πυρηλιόμετρο, αφού το στρέψουμε προς τον ήλιο και βρούμε και την ζενιθιακή γωνία θ του ήλιου, την ανάγνωση ε_o . Τότε λόγω και της γνωστής του σταθεράς βαθμονόμησης K_z θα έχουμε:

$$\varepsilon_o = K_z Z_i \quad (3.16)$$



Από τις 3.15 και 3.16 παίρνουμε την σταθερά βαθμονόμησης του πυρανομέτρου που είναι:

$$K_s = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{\varepsilon_0 \cos \theta} K_z \quad (3.17)$$

Με σκοπό να ελαττώσουμε τα λάθη που προέρχονται από μη καθορισμένες αλλαγές από στιγμή σε στιγμή της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας παίρνουμε ένα σύνολο μετρήσεων που να αφορά σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

3.5 Ο Νόμος του Lambert ή του συνημιτόνου

Η ροή ακτινοβολίας από ένα στοιχείο επιφάνειας τέλειου μαύρου σώματος είναι ανάλογη προς το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζει η διεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας προς την κάθετη της επιφάνειας. Ένας όμοιος ορισμός θα ισχύει και για την απορρόφηση ακτινοβολίας από τέλειο μαύρο σώμα. Επειδή οι ευαίσθητες επιφάνειες των ακτινομέτρων είναι σε σχέση με τη συμπεριφορά τους στις ακτινοβολίες τέλεια σώματα σημαντική προϋπόθεση για κάθε ακτινόμετρο είναι ο έλεγχος του για απόκλιση από τη συμπεριφορά που ορίζει ο νόμος του Lambert.

Παράγοντες όπως ο σχεδιασμός των ακτινομέτρων και η ατελής ανταπόκρισή τους στο νόμο του συνημιτόνου συνδυάζονται και δίνουν εξαιρετικά μεγάλες αποκλίσεις στον συντελεστή βαθμονόμησης. Ένας όμως προσεκτικός ερευνητής πάντοτε ελέγχει τον συντελεστή βαθμονόμησης ως προς το ύψος του ήλιου και ως προς το αζιμούθιο σχετικά με το όργανο.

Η θερμοηλεκτρική στήλη ενώ είναι απόλυτα κατάλληλη για κάθετη πρόσπτωση δεν είναι τελείως ικανοποιητική όταν χρησιμοποιείται σε πυρανόμετρα ή σε μικρού μήκους κύματος ακτινόμετρα επειδή είναι σχετικά άνισες οι επιφάνειες των θερμοστοιχείων όταν η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι κάθετη. Αυτή η ανισότητα των επιφανειών των ταινιών των θερμοστοιχείων γίνεται ιδιαίτερα σοβαρή όταν η γωνία πρόσπτωσης απέχει πολύ από την κάθετη.

Τα ακτινόμετρα με τετράγωνη επιφάνεια θερμοστοιχείων αντί κυκλικής είναι επίσης αναληθούς ευαισθησίας στις μεταβολές του αζιμούθιου της πηγής ακτινοβολίας ως προς το επίπεδο της επιφάνειας του οργάνου. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα σοβαρό στα πυρανόμετρα σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης ακτίνων όταν ο εσωτερικός γυάλινος θόλος μπορεί να λειτουργήσει σαν φακός συγκέντρωσης των ακτίνων. Τότε η ακτινοβολία



συγκεντρώνεται στις άκρες των θερμοστοιχείων και η πρόσπτωση των ακτίνων μέσα ή έξω από το ευαίσθητο στοιχείο εξαρτάται από την οριζόντια διευθέτηση του τετράγωνου ευαίσθητου στοιχείου, ως προς τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα.

ΠΕΙΡΑΜΑ XII. Συνημιτονική ανταπόκριση ακτινομέτρου

Παρότι είναι δυνατό να παρατηρήσουμε την αντίδραση που προκαλεί στο ακτινόμετρο μια τεχνητή πηγή φωτός είναι αναγκαίος ο ιδιαίτερος εξοπλισμός που να διατηρεί σταθερή την ένταση της φωτεινής πηγής καθώς αυτή κινείται γύρω από το όργανο που ελέγχουμε, αφού αυτό πρέπει να είναι οριζόντιο. Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε τον ήλιο σαν "πηγή σημείο" και να κάνουμε διαδοχικές βαθμονομήσεις του οργάνου στη διάρκεια μερικών ωρών ηλιόλουστης ημέρας. Η μεγαλύτερη αλλαγή συμβαίνει όταν ο ήλιος βρίσκεται κοντά στον ορίζοντα. Για το λόγο αυτό τα ακτινόμετρα που χρησιμοποιούνται στις πολικές περιοχές είναι απαραίτητο να υποστούν αυτή τη μεγαλύτερης ακρίβειας βαθμονόμηση. Η ίδια τεχνική μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα ακτινόμετρα καθαρής ακτινοβολίας και σε εκείνα που δέχονται ακτινοβολία από ένα ημισφαίριο.

Το πείραμα γίνεται υπό ιδανικές συνθήκες όταν καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας με παρατηρήσεις - μετρήσεις.

3.6 Βαθμονομήσεις ακτινομέτρου για την άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Έστω ότι η ανάγνωση ενός ακτινομέτρου σε μια ροή F άμεσης ακτινοβολίας είναι $\varepsilon_z(\theta)$ όπου θ είναι η ζενιθιακή γωνία της πηγής, για παράδειγμα του ήλιου, και έστω επίσης ότι $K_z(\theta)$ είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης που παρατηρούμε σ' αυτή τη γωνία. Έτσι, αν η ροή ακτινοβολίας από τον ήλιο σε κατευθεία πρόσπτωση είναι Z_i , τότε:

$$F = Z_i \cos \theta \quad \text{και} \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_z(\theta) = K_z(\theta) Z_i \cos \theta \quad (3.19)$$

Ο συντελεστής βαθμονόμησης θα βρεθεί ότι εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τη θερμοκρασία κυρίως όμως θα βρεθεί ότι είναι ανάλογος προς την



απορροφητικότητα του ευαίσθητου στοιχείου για μια πηγή που οι ακτίνες της σχηματίζουν γωνία θ με την κάθετο προς την επιφάνεια του στοιχείου.

Υποθέτοντας τώρα ότι η ίδια ολική ροή προσπίπτει υπό συνθήκες τέλει διάχυσης, όπως θα μπορούσε να προσεγγισθεί σε μια νεφροσκεπή ημέρα, η ένταση I_0 κατανέμεται ιστροπικά σε ένα ημισφαίριο (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1) και είναι $F = \pi I_0$. Έτσι για μια δοσμένη απειροστή ζώνη ουρανού, ομόκεντρη γύρω από το ζενίθ και σε μια γωνία θ απ' αυτό, η ροή αποτελείται από συνεισφορές τέτοιες ώστε:

$$F = 2\pi I_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta$$

Η αντίδραση του ακτινομέτρου θα είναι:

$$\epsilon_c = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\epsilon_c(\theta) = 2\pi I_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} K_z(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (3.20)$$

Αν $K_z(\theta) = K_z(0)$ δηλ. σταθερά, τότε το αποτέλεσμα είναι:

$$\epsilon_c = \pi I_0 K_z(0) = K_z(0) F \quad (3.21)$$

όπως στην άμεση ακτινοβολία.

Όμως έχουμε αποκλίσεις από το νόμο του συνημιτόνου για τις επιφάνειες ευαίσθητων στοιχείων ακτινομέτρων, έτσι ώστε γενικότερα η ιστροπική αντίδραση δίνεται από την

$$\epsilon_c = 2 F \int_0^{\frac{\pi}{2}} K_z(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad \text{και επομένως}$$

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_z(\theta)} = \frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} K_z(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{K_z(\theta)} = \frac{K_c}{K_z(\theta)} \quad (3.22)$$

όπου K_c είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης για ιστροπική ακτινοβολία.



Πολλοί κατασκευαστές οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας δίνουν μόνο ένα απλό συντελεστή βαθμονόμησης που έχει καθορισθεί για κάθετη πρόσπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για τον οποίο:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_z(0)} = \frac{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} K_z(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{K_z(0)} = \frac{K_c}{K_z(0)} \quad (3.23)$$

Προπαρασκευαστικά για ακριβείς μετρήσεις ακτινοβολίας είναι σημαντικότερο να μετρηθεί ο λόγος στην εξίσωση 3.23, αφού αποκλίσεις 5% δεν είναι σπάνιες. Μια επέκταση του πειράματος XII θα ήταν επομένως η εκτίμηση της εξίσωσης 3.23, χρησιμοποιώντας τις μετρηθείσες τιμές του $K_z(\theta)$. Αυτό γίνεται κατά τον καλύτερο τρόπο γραφικά ή αριθμητικά.

ΠΕΙΡΑΜΑ XIII. Η εξάρτηση της ανακλαστικότητας (albedo) από το ύψος του ηλίου

Πολλές επιφάνειες της γης έχουν μια δομή που θα αναμενόταν να αποτελεί παράγοντα μεταβολής της ανακλαστικότητας στη διάρκεια της ημέρας καθώς ο ήλιος αλλάζει θέσεις. Οι υδάτινες επιφάνειες, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες στο ότι ο προσανατολισμός των κυμάτων ποικίλης συχνότητας και πλάτους έχει σαν αποτέλεσμα τις χρονικές και χωρικές μεταβολές της ανακλαστικότητας. Περιοχές με καλαμιές σιτηρών (μετά το θερισμό) αναλύονται περισσότερο εύκολα και είναι προφανές ότι οι μεταβολές στην ανακλαστικότητα συμβαίνουν μεταξύ των ακραίων περιπτώσεων που ο ήλιος είναι κοντά στο ζενίθ (τότε φωτίζονται οι σκοτεινού χρώματος επιφάνειες του εδάφους που βρίσκονται μεταξύ των γραμμών των καλαμιών) και κοντά στον ορίζοντα (τότε το φως του ηλίου πέφτει επάνω στις καλαμιές και τα φύλλα και δεν φθάνει κατευθεία στο έδαφος).

Τέτοιες παρατηρήσεις απαιτούν μερικές ώρες, με σκοπό να εξασφαλισθεί αρκετή μεταβολή στην ζενεθιακή γωνία του ηλίου. Αλλά αν έχουμε βαθμονομήσει προσεκτικά δύο πυρανόμετρα, αυτά μπορεί να συνδεθούν με ένα κατάλληλο καταγραφικό χωρίς να απαιτείται η συνεχής παρατήρηση από παρατηρητή (το ένα από το πυρανόμετρα θα χρησιμοποιείται σαν ανακλασίμετρο).



Επειδή οι περισσότερες επιφάνειες της γης είναι φυτικές και υδάτινες οι συνέπειες της μεταβολής της ανακλαστικότητας τους είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος.

Στη διάρκεια μέτρησης της ανακλαστικότητας σε μια ηλιόλουστη ημέρα είναι επιβεβλημένο να χρησιμοποιηθεί η βαθμονόμηση "πηγής σημείου" ή άμεσης ακτινοβολίας για πυρανόμετρο που καταγράφει την προσπίπτουσα ροή έτσι ώστε:

$$\varepsilon_z(\theta) = K_z(\theta) (Z_i \cos \theta + C_i) = K_z(\theta) S_i$$

Αυτή η προσέγγιση είναι αποδεκτή επειδή η συνιστώσα της ακτινοβολίας διάχυσης $C_i \ll Z_i \cos \theta$ για $\theta < 80^\circ$.

Από την άλλη πλευρά, η προς τα άνω ανακλώμενη ροή από την επιφάνεια της γης μπορούσε να θεωρηθεί σαν διάχυση, κάνοντας τη χρήση της βαθμονόμησης της διάχυτης ακτινοβολίας που είναι περισσότερο κατάλληλη.

$$\varepsilon_c = K_c S_o$$

Η ανακλαστικότητα δίνεται από την

$$a = \frac{S_o}{S_i} = \frac{\varepsilon_c K_z(\theta)}{\varepsilon_z(\theta) K_c} \quad (3.24)$$

3.7 Μετρήσεις ακτινοβολίας επάνω από επίπεδες επιφάνειες ορισμένου εμβαδού

Η ακρίβεια που αναμένεται στα στοιχεία που πάρθηκαν με μετρήσεις ανακλαστικότητας μιας ορισμένης περιοχής εξαρτάται από το μέγεθος και την ομοιομορφία της περιοχής. Αν οι ανισοτροπίες της επιφάνειας είναι τριών διαστάσεων, όπως στις επιφάνειες που σχηματίζονται από φυτά, από εδαφικούς κυματισμούς και κύματα ωκεανών, τότε το ύψος του οργάνου που είναι εκτεθειμένο με το ευαίσθητο στοιχείο του προς τα κάτω επηρεάζει το μέγεθος της ανάγνωσης της ανακλαστικότητας.

Όμως εδώ θα μας απασχολήσει μια απλή, επίπεδη και οριζόντια επιφάνεια.

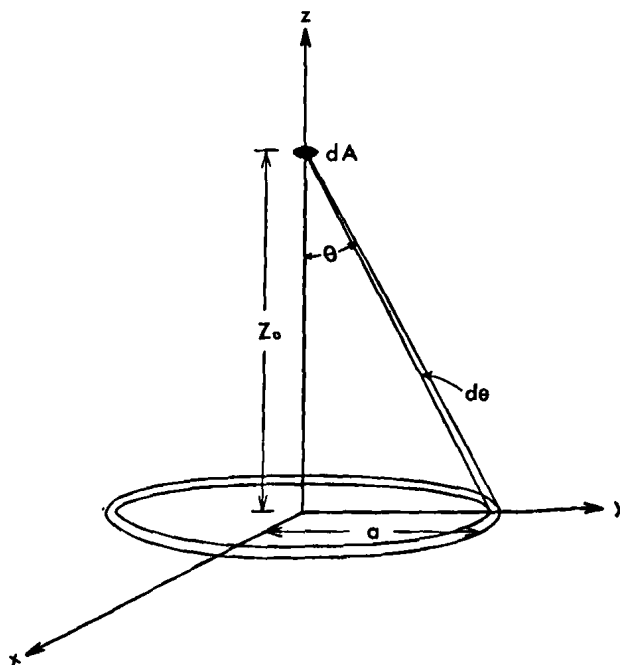


Αν η επιφάνεια dA στο σχήμα 3.3 αναπαριστά το ευαίσθητο στοιχείο ενός ανεστραμμένου πυρανόμετρου που βρίσκεται σε ένα ύψος z_0 επάνω από μια απεριόριστη οριζόντια επιφάνεια, τότε η ροή πυκνότητας ακτινοβολίας F στο όργανο αποτελείται από μια σειρά συνεισφορών που προέρχονται από ομόκεντρες ζώνες όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3:

$$F = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_0 \sin\theta \cos\theta \, d\theta \quad (3.25)$$

Η απλούστερη περίπτωση είναι εκείνη μιας ισοτροπικής κατανομής έντασης I_0 από μία απεριόριστα εκτεινόμενη επίπεδη επιφάνεια που ακτινοβολεί έτσι ώστε $F = \pi I_0 = F_0$, απλώς δείχνοντας ότι το ευαίσθητο στοιχείο ανακόπτει την ισοτροπική ροή.

Συνήθως όμως η διαθέσιμη επιφάνεια για παρατηρήσεις ανακλαστικότητας είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα, αν η επιφάνεια είναι κυκλική ακτίνας r , τότε η ακτινοβολία πυκνότητα ροής που ανακόπτεται από το όργανο που βρίσκεται σε ύψος z_0 είναι:



Σχήμα 3.3 Σχήμα για τον υπολογισμό της ακτινοβολούσας ροής διαμέσου της επιφάνειας ενός επίπεδου στοιχείου dA που βρίσκεται παράλληλο και σε συμμετρία επάνω από ορισμένη, επίπεδη και κυκλική ακτινοβολούσα επιφάνεια ακτίνας r .

$$F_a = 2\pi I_0 \int_0^{\sin^{-1}(r/\sqrt{r^2+z_0^2})} \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{r^2}{r^2+z_0^2} F_0 \quad (3.26)$$

Επιπλέον μπορεί εύκολα ναδειχθεί ότι αν η επιφάνεια εκτός του κύκλου που μας ενδιαφέρει συνδέεται με μια διαφορετική ιστροπική πυκνότητα $m I_0$, τότε αυτή συνεισφέρει μια ροή πυκνότητας στο όργανο:

$$m(F_0 - F_a) = m\pi I_0 \frac{z_0^2}{r^2+z_0^2}$$

Η ολική ροή πυκνότητας που λαμβάνεται από το ευαίσθητο στοιχείο είναι τώρα:

$$F'_a = F_a + m(F_0 - F_a) = \frac{r^2 + mz_0^2}{r^2 + z_0^2} F_0 \quad (3.27)$$

Δύο επιπλέον παραδείγματα διασαφηνίζουν τη σπουδαιότητα του συνυπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων πριν από την αποδοχή λανθασμένων αποτελεσμάτων από μια ορισμένη περιοχή.

Για $m = 0$, δηλ. για μια μη ακτινοβολούσα επιφάνεια έξω από τον κύκλο που μας ενδιαφέρει:

$$F'_a = \frac{r^2}{r^2+z_0^2} F_0$$

και για $m = 2$, δηλ. η εξωτερική επιφάνεια έχει διπλάσια ανακλαστικότητα από εκείνη του εσωτερικού κύκλου:

$$F'_a = \frac{r^2+2z_0^2}{r^2+z_0^2} F_0$$

Επομένως αν δεχτούμε ότι, ανεξάρτητα από άλλα λάθη των οργάνων, η πραγματικά ακτινοβολούσα επιφάνεια δεν θα δημιουργούσε άλλες ανακρίβειες επιπλέον του 2% τότε και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η απαίτησή του $|F_a - F'_a| \leq 0.02$ θα προϋπόθετε μια κυκλική επιφάνεια που έχει μια ελάχιστη ακτίνα κατά προσέγγιση 7 μέτρων, όταν το ευαίσθητο στοιχείο βρίσκεται σε ένα ύψος 1 μέτρου.



ΠΕΙΡΑΜΑ ΧΙΥ. Μέτρηση της ανακλαστικότητας επάνω από ορισμένες επιφάνειες

Η ανακλαστικότητα (όπως επίσης και η καθαρή ακτινοβολία) είναι μια ποσότητα που συνήθως μετρείται από αναγκαιότητα επάνω από περιορισμένες επιφάνειες. Για παράδειγμα, αγρομετεωρολογικές έρευνες μπορεί να απαιτούν εκτίμηση της ανακλαστικότητας μιας φυτοκοινωνίας από μετρήσεις που έγιναν σε σχετικά πειραματικά τεμάχια. Η επίδραση ορισμένων επιφανειών, όταν σ' αυτές έγιναν μηχανικές επεμβάσεις, στο ισοζύγιο ακτινοβολίας μπορεί να αποτελεί αντικείμενο έρευνας επάνω από περιορισμένου εμβαδού επιφάνειες.

Η εξίσωση 3.27 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας μιας απεριόριστης επιφάνειας της οποίας μόνο ορισμένα τμήματα είναι στη διάθεσή μας. Σε μια απλή επίδειξη της μεθόδου μετρείται η ανακλαστικότητα μιας μεγάλης οριζόντιας επιφάνειας, σαν εκείνης ενός αγρού σιτηρών. Υποτίθεται ότι η επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλη για να θεωρηθεί απεριόριστης έκτασης.

Αντίθετα, διαμορφώνεται μια κυκλική επιφάνεια με ομοιόμορφο διασκορπισμό αλεύρων ή ασβέστου στο έδαφος, για παράδειγμα, και μετρείται η ανακλαστικότητα από ένα ορισμένο ύψος επάνω από το κέντρο της επιφάνειας που η ακτίνα της μετρείται προσεκτικά. Μετρήσεις γίνονται με πυρανόμετρα σε δύο και τρία διαφορετικά ύψη.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΧΥ. Μέτρηση ροών ακτινοβολίας μεγάλου και μικρού μήκους κύματος

Τα ακτινόμετρα που μετρούν ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της καθαρής (A_N) και της προσπίπτουσας (A_i) ακτινοβολίας. Το πυρανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της προσπίπτουσας S_i και της ανακλώμενης S_0 μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας, από τον λόγο των οποίων παίρνουμε την ανακλαστικότητα A_μ της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας.

Είναι συνήθης ο καθορισμός της γήινης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που κατευθύνεται προς τον ουρανό L_0 με δύο μεθόδους. Πρώτα από τις αναγνώσεις των οργάνων αφού

$$L_0 = A_0 - S_0$$



όπου οι τιμές A_0 και S_0 λαμβάνονται με την τοποθέτηση των σχετικών οργάνων έτσι ώστε τα ευαίσθητα στοιχεία τους να "βλέπουν" προς το έδαφος. Η τιμή του A_0 μπορεί να υπολογισθεί και από τη καθαρή και την προσπίπτουσα ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος:

$$A_0 = (A_i - A_N)$$

Μια δεύτερη ανεξάρτητη μέθοδος περιλαμβάνει κατευθεία μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους. Όταν η επιφάνεια καθορίζεται σχετικά με σαφήνεια, όπως στην περίπτωση γυμνού εδάφους, ένα κατάλληλο θερμόμετρο μπορεί να ενσωματωθεί ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και να ληφθούν αναγνώσεις. Λόγω όμως των μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας που συνήθως επικρατούν στα στρώματα του εδάφους που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερες φροντίδες για τη σωστή τοποθέτηση του θερμομέτρου.

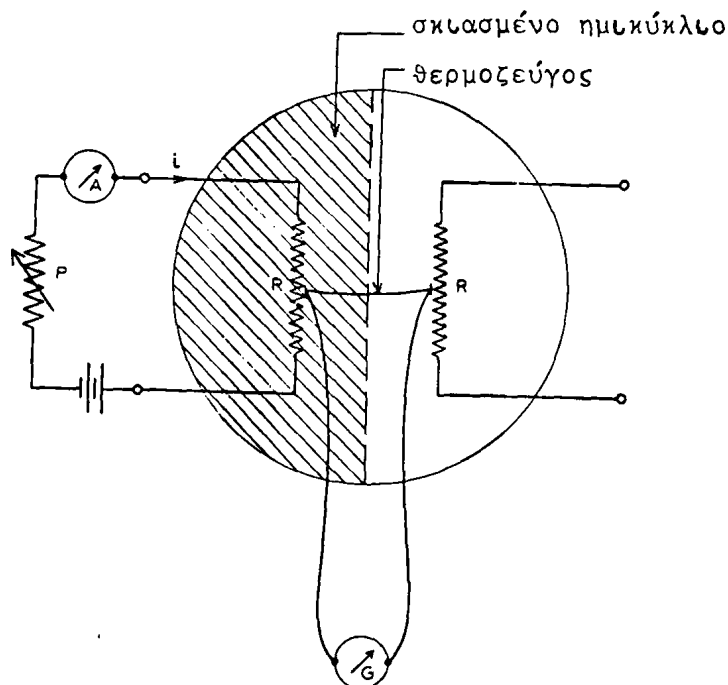
Αν το πείραμα γίνει σε επιφάνεια κουρεμένου γρασιδιού, για παράδειγμα, τότε υπάρχει μεγάλη δυσκολία στο να αποφασίσουμε σε ποιά θέση της μη σαφώς καθορισμένης εδαφικής επιφάνειας πρέπει να τοποθετηθεί το θερμόμετρο για να ληφθεί η πιο τυπική θερμοκρασία ακτινοβολίας της επιφάνειας.

ΠΕΙΡΑΜΑ XVI. Ένα βασικό πυρηλιόμετρο

Το αντισταθμιστικό ηλεκτρικό πυρηλιόμετρο του Angström ενώ συνήθως χρησιμοποιείται σαν ένα δευτερεύον όργανο βαθμονόμησης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και σαν πρωτεύον.

Το ευαίσθητο στοιχείο του οργάνου αυτού αποτελείται από δύο λεπτά ημικύκλια το ένα από τα οποία σκιάζεται και το άλλο εκτίθεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Οι συνενώσεις των θερμοζευγών είναι κολλημένες στο κέντρο των δύο ημικυκλίων από το οποίο είναι ηλεκτρικά μονωμένες και επιτρέπουν την παρατήρηση της διαφοράς θερμοκρασίας που είναι δυνατόν να μηδενισθεί με τη ρύθμιση της διόδου ηλεκτρικού ρεύματος θέρμανσης διαμέσου του σκιασμένου ημικυκλίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στην τελευταία κατάσταση η ηλεκτρική ισχύς που εκλύεται στο σκιασμένο ημικύκλιο μπορεί να θεωρηθεί ίση με την ηλιακή ροή ακτινοβολίας που απορροφάται από το στοιχείο που είναι εκτεθειμένο σ' αυτή.





Σχήμα 3.4. Διάγραμμα διατομής του πυρηλιομέτρου τύπου ισοστάθμισης του Angström. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ομοίων μεταλλικών ημικυκλίων αντίστασης R καταγράφεται με τη βοήθεια δύο θερμομέτρων θερμοζεύγους που είναι συντηγμένα και συνδέονται με γαλβανόμετρο G . Το ηλεκτρικό ρεύμα I που περνάει διαμέσου της αντίστασης που βρίσκεται στο σκιασμένο ημικύκλιο μετρείται με το αμπερόμετρο A και ελέγχεται από το ποτενσιόμετρο P .

Αν η ηλεκτρική αντίσταση των ημικυκλίων που έχουν ίδιες φυσικές ιδιότητες είναι R και η επιφάνειά τους είναι A τότε η ισχύς που εκλύεται ανά μονάδα επιφάνειας είναι $R I^2 / A$. Έτσι αν I είναι το ρεύμα που απαιτείται για να εξισώσει τις θερμοκρασίες των ημικυκλίων και A_μ είναι η απορροφητικότητα της ακτινοβολίας του εκτεθημένου ημικυκλίου τότε, σε κάθετη πρόσπτωση, η ηλιακή ακτινοβολός πυκνότητα ροής δίνεται από την εξίσωση:

$$Z_i = R I^2 / A_\mu \cdot A \quad (3.28)$$

Αυτός ο τύπος του οργάνου μπορεί να κατασκευασθεί εύκολα. Για εκπαιδευτικούς σκοπούς κάποια ακρίβεια του οργάνου μπορεί να θυσιασθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε κατάλληλα υλικά για τα ημικύκλια και θερμομέτρα θερμοζεύγους. Τα δύο μεταλλικά ημικύκλια μπορεί να στερεωθούν επάνω σε ράβδους-αγωγούς που είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα μονωμένο δίσκο και η απορρόφηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να διασφαλισθεί με τη βοήθεια μαυρισμένου μεταλλικού ημικυκλίου που συγκρατείται με ένα απλό συνδετήρα στην απαιτούμενη κατεύθυνση.

Η λειτουργία του βασικού πυρηλιόμετρου μπορεί να ελεγχθεί με σύγκριση με ένα κατάλληλο πρότυπο όργανο ή με μια παρατήρηση της ηλιακής σταθεράς, όπως περιγράφεται στο επόμενο πείραμα. Στην τελευταία τεχνική η εξωγήινη πυκνότητα ροής ηλιακής ακτινοβολίας, ακριβώς έξω από την επίδραση εξασθένισης της ατμόσφαιρας, θεωρείται γνωστή και χρησιμοποιείται ουσιαστικά σαν μια πρότυπος πηγή.

Η ζενιθιακή γωνία του ήλιου μπορεί να υπολογισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια με τη χρησιμοποίηση αεροθάλαμου οριζοντίωσης και νήματος με βαρίδι για την υλοποίηση της κατακόρυφου.

3.8 Η εξωγήινη ροή ηλιακής ακτινοβολίας

Η πυκνότητα ροής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μια επίπεδη επιφάνεια που βρίσκεται στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, είναι γνωστή σαν "ηλιακή σταθερά".

Οι μεταβολές της τελευταίας προέρχονται από τη μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο, όπως επίσης και από μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας που μπορεί να φθάνουν το $\pm 1.5\%$ της εκπεμπόμενης ηλιακής ισχύος.

Η κλίση του άξονα της γης ως προς το επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς της περί τον ήλιο έχει σαν αποτέλεσμα μια σημαντική απώλεια συμμετρίας μεταξύ της ολικής ετήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο βόρειο και το νότιο ημισφαίριο. Η διαφορά αυτή, διορθωμένη για τη μέση απόσταση γης-ήλιου, είναι 136 m W cm^{-2} .

ΠΕΙΡΑΜΑ XVII. Καθορισμός της ηλιακής σταθεράς

Ένας ακριβής καθορισμός της ηλιακής σταθεράς θα συμπεριλάμβανε την πλήρη διερεύνηση σε όλες τις ζώνες του φάσματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λόγω της κατανομής της και της διαφορικής απορρόφησής της. Ο συνδυασμός της μεταβαλλόμενης απορρόφησης, της επίδρασης της διάθλασης και της διάχυσης λόγω των τοπικών ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως επίσης και το μεταβαλλόμενο ύψος και η γωνία πρόσπτωσης κάνουν την ακριβή ανάλυση πολύ δύσκολη.

Με βάση απλοποιημένες υποθέσεις το σχήμα 3.5 δείχνει τον τύπο της γεωμετρίας που υπεισέρχεται. Το μέσο πάχος της ατμόσφαιρας δίνεται από το h , έτσι ώστε σε μια γωνία θ από το ζενίθ το πάχος της ατμόσφαιρας που

Για
εξα-
στις
h se

συνδ
του c
 $N = \chi \cdot t$
επιφ
 $M_s = M$

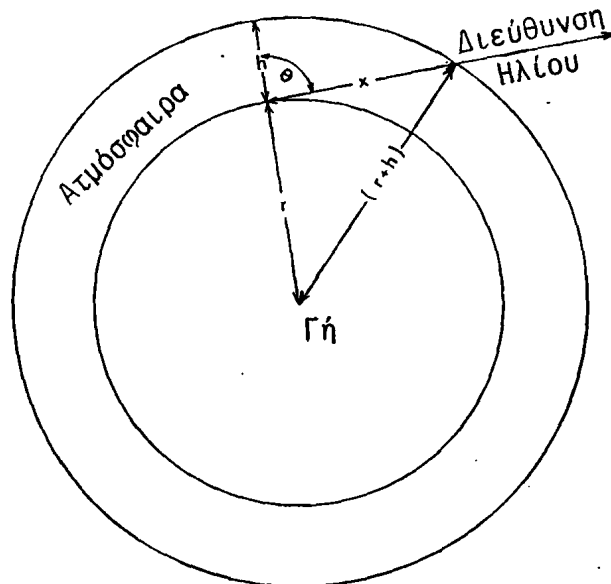
παρατ
καταλλ



διατρέχεται από την ηλιακή ακτινοβολία είναι x . Από το σχήμα 3.5 μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι:

$$x = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 \cos^2 \theta + h^2 + 2hr} \quad (3.29)$$

όπου r είναι η ακτίνα της γης.



Σχήμα 3.5 Ένα απλοποιημένο γεωμετρικό σχήμα με τον ήλιο, τη γη και την ατμόσφαιρα

Για την απλή περίπτωση $\theta = 0$ η εξίσωση 3.30 δίνει $x = h$.

Γιά $\theta = 90^\circ$ είναι $x = \sqrt{h^2 + 2hr}$. Η πρακτική εφαρμογή αυτής της εξίσωσης εξαρτάται επομένως από την υπόθεση ενός μέσου ατμοσφαιρικού πάχους στις ίδιες μονάδες με την ακτίνα της γης. Για μικρές τιμές του θ έχουμε $x = h \sec \theta$.

Είναι επομένως προφανές ότι η χρήση ενός πρότυπου πίνακα που θα συνδέει το x και το θ είναι αναπόφευκτη. Ο πίνακας 3.2 δίνει τη μέση μάζα του αέρα M σε σχέση με εκείνη για $\theta = 0$, σαν συνάρτηση της γωνίας. Το $M = x/h$ βρίσκεται από την εξίσωση 3.29. Σε μια ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια από p mbars η τιμή του M θα πρέπει να τροποποιείται στην $M_p = M \cdot p/1015$.

Το πείραμα γίνεται από ομάδα που τα μέλη της παίρνουν με τη σειρά παρατήρηση-μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με ένα κατάλληλο πυρηλιόμετρο σε κανονικά χρονικά διαστήματα, που καλύπτουν



τις μεσημβρινές ώρες. Τα αποτελέσματα μεταφέρονται σε διάγραμμα σαν συνάρτηση της μέσης μάζας M του αέρα και επεκτείνονται στο 0 για τη λήψη της ηλιακής σταθεράς.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2

Σχετική μάζα του αέρα M που διατρέχεται από ακτινοβολία με τον ήλιο σε μια γωνία θ από το ζενίθ.

θ	sec θ	M	θ	sec θ	M
0	1.000	1.000	66	2.459	2.447
5	1.004	1.004	68	2.669	2.654
10	1.015	1.015	70	2.924	2.904
15	1.035	1.035	72	3.236	3.209
20	1.064	1.064	74	3.628	3.588
25	1.103	1.103	75	3.864	3.816
30	1.154	1.154	76	4.134	4.075
35	1.221	1.220	77	4.445	4.372
40	1.305	1.304	78	4.810	4.716
42	1.346	1.344	79	5.241	5.120
44	1.390	1.389	80	5.76	5.600
46	1.440	1.438	81	6.39	6.18
48	1.494	1.492	82	7.19	6.88
50	1.556	1.553	83	8.21	7.77
52	1.624	1.621	84	9.54	8.90
54	1.701	1.698	85	11.47	10.40
56	1.788	1.784	86	14.34	12.44
58	1.887	1.882	87	19.12	15.36
60	2.000	1.995	88	28.65	19.80
62	2.130	2.123	89	57.30	27.00
64	2.281	2.274	90	∞	39.00



ΟΜΑΔΑ 4

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ

Η ταχύτητα του ανέμου είναι διανυσματικό μέγεθος και επομένως απαιτείται ο προσδιορισμός του μέτρου και της διεύθυνσης του ανέμου για μια ορισμένη χρονική στιγμή και ένα ορισμένο τόπο. Για ορισμένες μικρομετεωρολογικές μελέτες απαιτείται η μέτρηση των παραμέτρων του ανέμου για χρονικά διαστήματα του κλάσματος του δευτερολέπτου, ενώ για τις συνοπτικές μελέτες είναι απολύτως ικανοποιητικές οι μέσες τιμές για χρονικές περιόδους της τάξης της ώρας. Προφανώς θα υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των ευαίσθητων στοιχείων των οργάνων που χρησιμοποιούνται στις ακραίες αυτές περιπτώσεις. Τα πρώτα θα πρέπει να διακρίνονται για τη μικρή τους αδράνεια ενώ τα δεύτερα δεν χρειάζονται ευαισθησία στις υψηλές συχνότητες μεταβολής αλλά στη μέση ταχύτητα του ανέμου και σ' αυτό βοηθά η μεγάλη αδράνειά τους.

4.1 Μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας ανέμου

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται στη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να ταξινομηθούν σε πέντε κύριες ομάδες.

4.2 Ανεμόμετρα περιστρεφόμενα.

Τα όργανα αυτά περιλαμβάνουν το σύστημα ημισφαιρίων (cups) με ανεμοδείκτη που περιστρέφεται σε κατακόρυφο άξονα και τα ελικοφόρα (propellers). Η αντίδραση στον άνεμο ενός έλικα εξαρτάται από τον προσανατολισμό του σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Αν η ροή του αέρα είναι ομοιόμορφη στο χώρο και το χρόνο, ο κατάλληλος προσανατολισμός του έλικα μπορεί να γίνει με κατάλληλους χειρισμούς. Τέτοιες συνθήκες όμως επικρατούν μόνο σε αεροσήραγγες. Στην ατμόσφαιρα η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι η συνισταμένη των στροβίλων ποικίλου μεγέθους, έτσι ώστε σε οποιαδήποτε θέση η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου να μεταβάλλεται συνεχώς.

Ανεμόμετρα με σύστημα ημισφαιρίων που ο άξονάς τους είναι οριζόντιος δεν αντιδρούν στις μεταβολές της ταχύτητας του αέρα στην οριζόντια διεύθυνση. Τα μεγάλα ευαίσθητα στοιχεία είναι ικανά να εξομαλύνουν τις μικρές τοπικές διακυμάνσεις στο χώρο ενώ η αύξηση της μάζας τους ή της αδράνειάς τους εξομαλύνει διακυμάνσεις στο χρόνο.



Έτσι τα ανεμόμετρα που απαιτούνται για να καταγράψουν τα χαρακτηριστικά της μέσης ταχύτητας του αέρα σε μια αντιπροσωπευτική θέση ευρύτερης περιοχής θα πρέπει να είναι ογκώδη και να έχουν μια μεγάλη επιφάνεια διατομής στη ροή του αέρα.

Τα σωστά σχεδιασμένα ελικοφόρα ανεμόμετρα έχουν μια σχεδόν συνημιτονική αντίδραση στη διεύθυνση του ανέμου και μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν για μέτρηση των διανυσματικών συνιστωσών του ανέμου. Αν οι τρεις καρτεσιανές συντεταγμένες της ταχύτητας του ανέμου δίνονται από τα u , v και w υπάρχουν μικρομετεωρολογικές εφαρμογές που απαιτούν στιγμιαίες μετρήσεις των τριών αυτών συνιστωσών ή των $\sqrt{u^2+v^2}$ και w . Οι τελευταίες δύο τιμές λαμβάνονται με ένα έλικα που είναι συνδεδεμένος με ανεμοδείκτη και περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο και άλλο έλικα που περιστρέφεται περί κατακόρυφο άξονα και δίνει την κατακόρυφη συνιστώσα του κινούμενου αέρα. Για την επίτευξη πολύ ελαφρών ελίκων χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους γενικά διογκωμένος πολυεστέρας.

Τα ανεμόμετρα τύπου ημισφαιρίου είναι συνήθως σχεδιασμένα για να καταγράφουν τα χαρακτηριστικά της οριζόντιας μόνο ροής του αέρα. Στην περίπτωση που απαιτείται και η διεύθυνση τότε χρησιμοποιείται και ανεμοδεικτικό.

Η αντίδραση του ανεμοδεικτικού εξαρτάται από την αδράνεια, την επιφάνεια και την γεωμετρία του και από την ιδιαίτερη απαίτηση για παρατήρηση χαρακτηριστικών της τυρβώδους ή της μέσης ροής. Ελάττωση της ευαισθησίας στις μικρές τύρβες επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μηχανικών ή υδροδυναμικών επιβραδυντών, όπως επίσης με κατασκευή που εξασφαλίζει μεγάλη αδράνεια.

Όπου απαιτείται ταχεία αντίδραση και σε πολύ μικρές ταχύτητες του αέρα η μέτρηση του ανεμομέτρου μπορεί να ληφθεί με την διακοπή, από τα φτερά του έλικα, μιας ακτίνας φωτός ή με μαγνητικό διακόπτη. Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος ελάττωσης της ταχύτητας έναρξης περιστροφής των ημισφαιρίων είναι η διατήρηση με τεχνητά μέσα της περιστροφής με σταθερή ταχύτητα στην απαιτούμενη ελάχιστη ταχύτητα. Η μόνη δυσκολία είναι η ανάγκη πρόσθεσης αυτής της ταχύτητας σε όλες τις παρατηρήσεις.

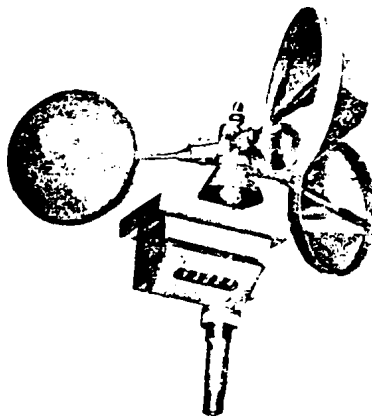
Τα ανεμόμετρα ημισφαιρίων συχνά χρησιμοποιούνται για μικρομετεωρολογικές μετρήσεις του προφίλ του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται μικρές ταχύτητες αέρα για την έναρξη περιστροφής των ημισφαιρίων.



4.2.1 Ανεμόμετρα ημισφαιρίων (κυπελοφόρα).

Τα ανεμόμετρα αυτά λέγονται και τύπου Robinson. Αποτελούνται από κατακόρυφο άξονα (σχ. Ι) που μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα και ο οποίος στο επάνω άκρο του φέρει τρεις ή τέσσερες οριζόντιες ακτίνες που απολήγουν σε τρία ή τέσσερα, αντίστοιχα, κενά ημισφαίρια (κύπελα). Μια πλήρης περιστροφή του άξονα, αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο μήκος περιστροφής των ημισφαιρίων, που είναι ίσο με το μήκος που διέτρεξε ο άνεμος.

Η μετάδοση των περιστροφών του άξονα στην κλίμακα ανάγνωσης της ταχύτητας του ανέμου είναι μηχανική ή μαγνητική ή ηλεκτρική.

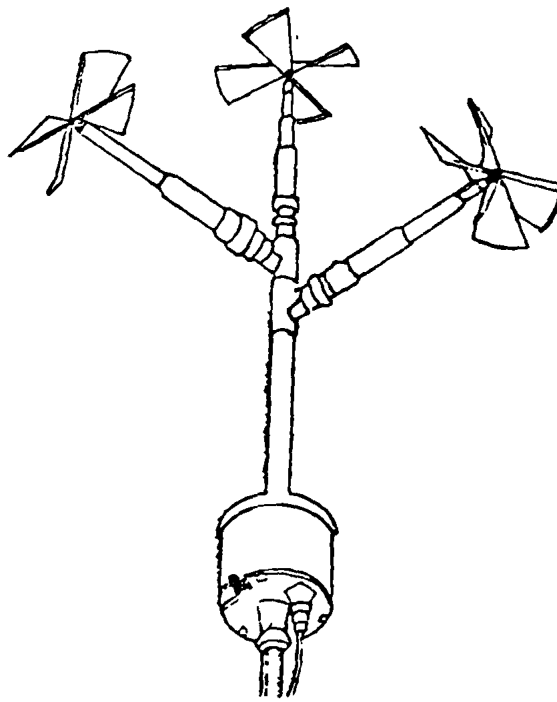


Σχήμα Ι. Ανεμόμετρα ημισφαιρίων

4.2.2 Διανυσματικό ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο αυτό (σχ. ΙΙ) μας δίνει απ' ευθείας τη προβολή του μέτρου της ταχύτητας του αέρα σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις τρισσορθογώνιου συστήματος αναφοράς. Το διανυσματικό αυτό ανεμόμετρο αποτελείται από ιστό στον οποίο είναι αρθρωμένα τρία στελέχη κάθετα μεταξύ τους που στα άκρα τους φέρουν έλικες απο πολυουρεθάνη. Τα δύο βρίσκονται σε οριζόντιο επίπεδο ενώ το τρίτο είναι κατακόρυφο. Το κάθε στέλεχος είναι ανεμόμετρο ηλεκτρικής μετάδοσης και συνδέεται είτε με κλίμακα ανάγνωσης στην οποία κινείται δείκτης είτε με καταγραφικό όργανο.





Σχήμα II. Διανυσματικό ανεμόμετρο

4.3 Ανεμόμετρα πίεσης δίσκου.

Η ομάδα αυτή των οργάνων μπορεί να διαιρεθεί στον τύπο της αιώρας και τον τύπο της κάθετης πρόσπτωσης στην επιφάνεια του ανεμομέτρου. Στον πρώτο τύπο έχουμε ένα δίσκο κρεμασμένο που η ορμή του ανέμου τον κάνει να αιωρείται και είτε να εξισορροπείται από τη δύναμη της βαρύτητας ή από εκείνη ενός ελατηρίου. Και στις δύο περιπτώσεις η επιφάνεια του δίσκου που προσπίπτει κάθετα ο άνεμος αλλάζει με την αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Ο δίσκος κάθετης πρόσπτωσης είναι εξαναγκασμένος να μην αλλάζει τον προσανατολισμό του σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου και η δύναμη προς τον δίσκο -που εκθέτει σταθερή επιφάνεια στον άνεμο- μπορεί να μετρηθεί με ποικίλους τρόπους, όπως με συμπίεση ελατηρίου, μετακίνηση φορτίου σε μοχλό, μετατόπιση ρευστού από έμβολο ή συμπίεση αερίου και για ηλεκτρικό παράδειγμα με τη χρήση ενός μετρητή τάσης.



Αν η ταχύτητα του αέρα πυκνότητας ρ είναι V , τότε η δύναμη σε ένα δίσκο επιφάνειας A που κρατείται κάθετα προς το διάνυσμα της ταχύτητας δίνεται από την

$$F = c A \rho \frac{V^2}{2} \quad (4.1)$$

όπου $c \approx 1$ και αλλάζει κάπως με το σχήμα και το μέγεθος του δίσκου.

4.4 Ανεμόμετρα σωλήνα πίεσης.

Αυτός ο τύπος ανεμομέτρου σχετίζεται με τον προηγούμενο τύπο του δίσκου. Συνήθως όμως γίνεται μια τροποποίηση που δίνει τη διαφορά πίεσης να παρατηρείται μεταξύ δύο σωλήνων - θαλάμων που τα ανοίγματά τους είναι σχεδιασμένα να είναι κάθετα και παράλληλα, αντίστοιχα, προς την διεύθυνση του αέρα. Τέτοιες επινοήσεις είναι γνωστές σαν σωλήνες Pitot. Η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο σωλήνων - θαλάμων σχετίζεται με την ταχύτητα του ανέμου V και την πυκνότητα του αέρα ρ με την εξίσωση του Bernoulli:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (4.2)$$

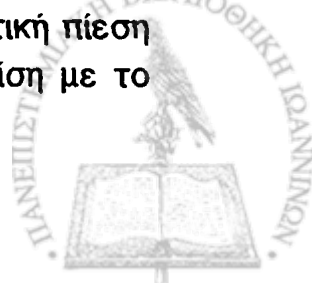
και

$$V = \sqrt{2 \Delta p / \rho} \quad (4.3)$$

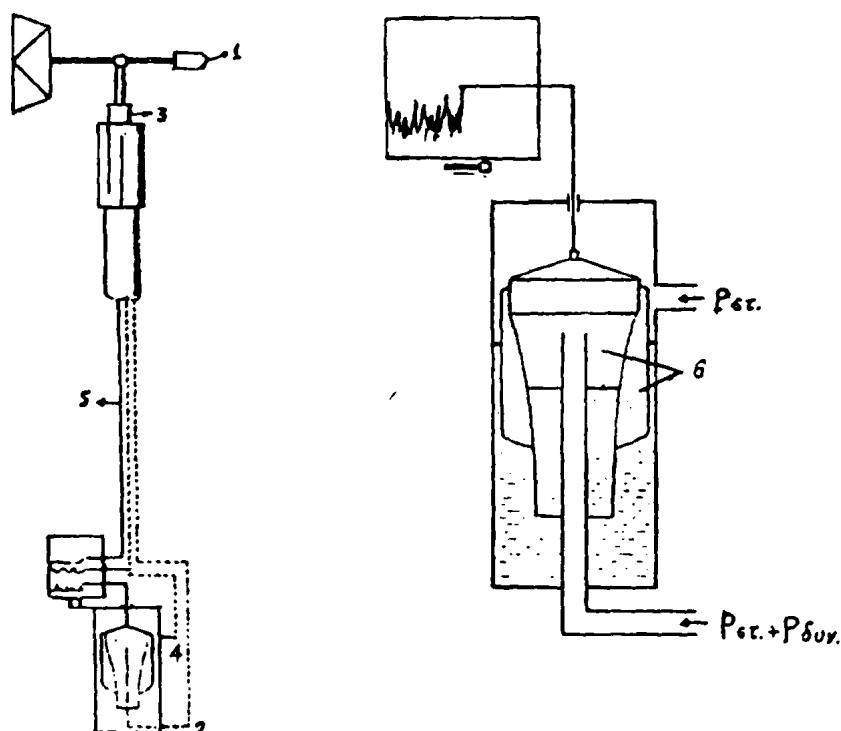
Η εξίσωση 4.2 δεν είναι απόλυτα ακριβής και χρειάζεται να συμπληρωθεί με μια σταθερά όπως στην εξίσωση 4.1.

4.4.1 Ανεμόμετρο πίεσης

Το ανεμόμετρο πίεσης τύπου Dines (σχ. III) είναι πολύ διαδεδομένος τύπος ανεμομετρικού και ανεμοδεικτικού ταυτόχρονα οργάνου. Αποτελείται από ανεμοδείκτη με στέλεχος σωλήνα που το ένα του άκρο (1) είναι ανοικτό ενώ στο άλλο βρίσκεται το πτερύγιο. Έτσι το ανοικτό άκρο του σωλήνα δείχνει πάντοτε τη διεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος. Το ανοικτό άκρο του σωλήνα του ανεμοδείκτη επικοινωνεί με σωλήνα που το άλλο του άκρο (2) καταλήγει στο εσωτερικό ενός πλωτήρα (6) ο οποίος επιπλέει σε υγρό που βρίσκεται μέσα σε κλειστό δοχείο-κύλινδρο. Ένας άλλος κατακόρυφος άξονας-σωλήνας στο σημείο (3) έχει πολλές μικρές οπές και καταλήγει στο επάνω μέρος του δοχείου-κυλίνδρου (4), όπου βρίσκεται αέρας. Έτσι η πίεση που ασκείται πάνω στον πλωτήρα είναι η στατική πίεση $p_{στ}$, ενώ στο εσωτερικό του πλωτήρα ασκείται πίεση που είναι ίση με το



άθροισμα της στατικής και της δυναμικής, $p_{στ} + p_{δυν}$. Στον πλωτήρα προσαρμόζεται στέλεχος που καταλήγει σε γραφίδα η οποία καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου σε χαρτί που προσαρμόζεται σε ωρολογιακά περιστρεφόμενο κύλινδρο. Στο στέλεχος του ανεμοδεικτικού είναι προσαρμοσμένος κατακόρυφος άξονας (5) που περιστρέφεται μαζί με τον ανεμοδείκτη και καταλήγει σε γραφίδα που γράφει, στο ίδιο περιστρεφόμενο ωρολογιακά χαρτί, την διεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα III. Ανεμόμετρο πίεσης Dines

4.5 Θερμικά ανεμόμετρα.

Δύο κύριοι τύποι θερμικού ευαίσθητου στοιχείου που να μετρά ταχύτητα ανέμου μπορούν να επινοηθούν. Ο πρώτος υλοποιείται με την διαδικασία που βασίζεται στη μέτρηση της τιμής ψύξης θερμομέτρου που προηγούμενα έχει θερμανθεί. Όπως έχει δειχθεί στο πείραμα II, η τιμή ψύξης είναι μια μονοσήμαντη συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, αν εκφρασθεί στην κατάλληλη χωρίς διαστάσεις μορφή. Ο τύπος αυτός της μέτρησης έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτεί μια ορισμένη χρονική περίοδο

για παρατήρηση της ψύξης, έτσι ώστε η μέθοδος να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεχή καταγραφή.

Η δεύτερη ομάδα ευαίσθητων στοιχείων περιλαμβάνει το ανεμόμετρο θερμού σύρματος (hot wire) και το ανεμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης τύπου σφαιριδίου (thermistor-bead), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία μετατροπέων (transducers). Όλα τα ανεμόμετρα αυτά εξαρτώνται από ένα ευαίσθητο στοιχείο που έχουν και το οποίο θερμαίνεται από μια μεταβλητή ή σταθερή πηγή ισχύος ηλεκτρικού ρεύματος. Υπ' αυτές τις συνθήκες, η θερμοκρασία του ευαίσθητου στοιχείου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τον επαρκή αερισμό. Η θερμοκρασία μπορεί να παρακολουθείται συνέχεια είτε με άμεση μέτρηση της αντίστασης του αγωγού ή εμμέσως με τη βοήθεια ενός προσκολλημένου θερμοζεύγους, για παράδειγμα.

Με χρήση μικρής ισχύος η θερμοκρασία και επομένως η αντίσταση εξαρτάται πολύ από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπως στην περίπτωση ενός θερμομέτρου αντίστασης. Με τη χρήση όλο και μεγαλύτερης ισχύος η θερμοκρασία ισορροπίας, που καθορίζεται από την τιμή απώλειας θερμότητας, προοδευτικά ελέγχεται από τον αερισμό ή με άλλα λόγια από την ταχύτητα του ανέμου. Στις μέσες τιμές θέρμανσης έχουμε διπλή εξάρτηση τόσο από τη θερμοκρασία του αέρα όσο και από την ταχύτητα αερισμού με αποτέλεσμα να μην ικανοποιούνται οι ανάγκες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου.

4.5.1 Θερμοηλεκτρικό ανεμόμετρο

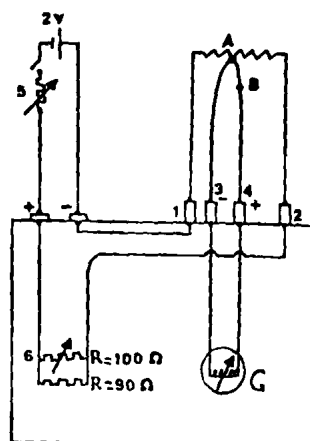
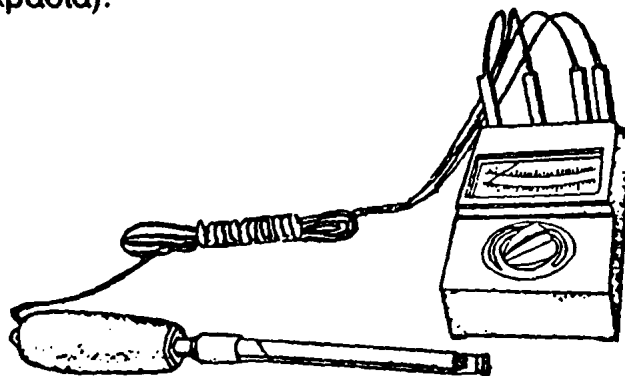
Όταν ένα μεταλλικό νήμα (αντίσταση) το θερμάνουμε και ακολούθως το εκθέσουμε σε ρεύμα αέρα τότε αυτό θα ψυχθεί μέχρι κάποιο σημείο που εξαρτάται από τη θερμοκρασία αλλά και την ταχύτητα του ρεύματος αέρα. Στην αρχή αυτή βασίζεται η λειτουργία του ηλεκτρικού ανεμομέτρου. Στα ανεμόμετρα αυτά η ταχύτητα του ανέμου σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία ισορροπίας που αποκτά σύρμα θερμαινόμενο συνεχώς, το οποίο χάνει θερμότητα λόγω έκθεσής του σε ρεύμα αέρα.

Το θερμοηλεκτρικό ανεμόμετρο με θερμαινόμενο σύρμα είναι παραλλαγή των ηλεκτρικών. Στα άκρα λεπτού σύρματος (σχ. IV) εφαρμόζεται σταθερή ηλεκτρική τάση 2V η οποία το θερμαίνει. Όταν το σύρμα εκτεθεί σε ρεύμα αέρα η θερμοκρασία του πέφτει ανάλογα με την ταχύτητα και τη θερμοκρασία του αέριου ρεύματος.



Στο θερμαινόμενο σύρμα εφάπτεται η μία επαφή (Α) ενός θερμοζεύγους του οποίου η άλλη επαφή (Β) βρίσκεται κοντά στην πρώτη, χωρίς να εφάπτεται στο σύρμα, ώστε να εκτίθεται κι αυτή στο ρεύμα του αέρα που θέλουμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του.

Έτσι όταν η ηλεκτρική αντίσταση εκτεθεί σε ρεύμα αέρα ψύχεται ανάλογα με την ταχύτητα του ρεύματος και μεταβάλλεται η θερμοκρασία της επαφής (Α) του θερμοζεύγους. Με το γαλβανόμετρο (G) μετρούμε έμμεσα τη διαφορά θερμοκρασίας των επαφών (Α) και (Β) του θερμοζεύγους και αντί της διαφοράς θερμοκρασίας διαβάζουμε στο όργανο κατευθεία την ταχύτητα του ρεύματος αέρα σε m/s. Πριν από κάθε μέτρηση γίνεται η ρύθμιση του οργάνου για την περίπτωση που η αντίσταση δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (μηδενική ένδειξη του γαλβανομέτρου) και για την περίπτωση που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα αλλά δεν είναι εκτεθειμένο σε ρεύμα αέρα (μεγίστη θερμοκρασία).



Σχήμα IY. Ηλεκτρικό ανεμόμετρο θερμού σύρματος.

4.6 Ακουστικά ανεμόμετρα.

Τα ακουστικά ή ηχητικά ανεμόμετρα στηρίζονται στην εξάρτηση του χρόνου μεταφοράς ενός ηχητικού παλμού από την κατάσταση του μέσου



μεταφοράς, στην προκειμένη περίπτωση του αέρα. Παρότι πρέπει να παραβλέψουμε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στο μέσο μεταφοράς τα όργανα αυτά, όταν αποφεύγουν αδρανειακές καταστάσεις των ευαίσθητων στοιχείων, είναι ικανά για χρησιμοποίηση στη μελέτη τυρβών μεγάλης συχνότητας.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΧVIII. Σύγκριση ανεμομέτρων

Η σύγκριση διαφορετικών τύπων ανεμομέτρων γίνεται καλύτερα μέσα σε ένα ομοιόμορφο ρεύμα αέρα, πράγμα που είναι αδύνατο να συναντηθεί στους φυσικούς ανέμους. Ένα ικανοποιητικά ομοιόμορφο ρεύμα αέρα επιτυγχάνεται με την κατασκευή αεροσήραγγας από τεμάχια διογκωμένου πολυεστέρα που κολλούνται μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τετράγωνης διατομής. Η διατομή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν. Ένας μεγάλος ηλεκτρικός ανεμιστήρας, που η ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να ρυθμισθεί, τοποθετείται στο ένα άκρο και διευθετείται έτσι ώστε να στέλνει ρεύμα αέρα δια μέσου μιας εσχάρας στο αρκετού μήκους πειραματικό θάλαμο (αεροσήραγγα). Η μία του πλευρά του θαλάμου διαθέτει παράθυρα από διαφανές υλικό (perspex), μέσω των οποίων μπορούμε να παρατηρήσουμε τα όργανα και να παίρνουμε τις μετρήσεις.

Αν ένα ανεμόμετρο είναι πρόσφατα βαθμονομημένο ή είναι καινούργιο τότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση όλων των άλλων.

Ένα ανεμόμετρο δίσκου τύπου αιώρας μπορεί να κατασκευασθεί από απλά υλικά. Ένας στερεωμένος δίσκος κάθετης πρόσπτωσης εξοπλισμένος με μανόμετρο μπορεί να βαθμονομηθεί για ενδείξεις δύναμης με ποικίλους τρόπους. Όμως αυτό πρέπει να γίνεται χωρίς την αλλαγή προσανατολισμού του δίσκου από εκείνο που θα έχει κατά τη διάρκεια της χρησιμοποιήσεώς του για λήψη πραγματικών μετρήσεων. Έτσι η δύναμη από ένα σταθερό βάρος πρέπει να μεταφέρεται οριζόντια με τη βοήθεια μοχλού.

Το κύριο πρόβλημα με τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος (hot wire) στον απλό έλεγχο τους για βαθμονόμηση προκύπτει από την έλλειψη ικανοποιητικής θερμικής αδράνειας για να ισοσταθμισθεί η επίδραση των διακυμάνσεων της τυρβώδους ταχύτητας εκτός και αν χρησιμοποιείται σχετικά παχύ σύρμα. Ομοίως αν οι μετρήσεις γίνονται με thermistor τότε θα πρέπει να επιλέγεται ένας σχετικά μεγάλος ημιαγωγός. Στις περισσότερες



εφαρμογές, η ταχύτητα αντίδρασης των ελαφρών-λεπτών αυτών μορφών θερμικών ανεμομέτρων είναι η κύρια ιδιότητά τους για την οποία επιλέγονται. Τέτοιες όμως ευαίσθητες κατασκευές απαιτούν και μια περισσότερο επεξεργασμένη ευκολία βαθμονόμησης.

Αν χρησιμοποιείται σύρμα με κατάλληλο μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης, όπως είναι το νικέλιο, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση για σταθερό ρεύμα ή για σταθερή διαφορά δυναμικού μπορεί να συσχετισθεί εμπειρικά με την ταχύτητα του ανέμου. Η θερμοκρασία T του σύρματος πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε το μεγαλύτερο αναμενόμενο μέγεθος των μεταβολών $|\Delta T_a|$ στον αέρα που έχει μέση θερμοκρασία T_a , να είναι ασήμαντο συγκρινόμενο με το $(T - T_a)$. Αφού ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ω έχει καθορισθεί στο πείραμα I για μια ποικιλία σχημάτων επιφανειών, η απώλεια θερμότητας από το ηλεκτρικά θερμαινόμενο σύρμα, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 1.1, μπορεί να συγκριθεί με την μετρούμενη τιμή εξάλειψης ηλεκτρικής ισχύος στην αντίσταση του σύρματος, όπως στο πείραμα IV.

Ένα ανεμόμετρο σωλήνα Pitot μπορεί επίσης να κατασκευασθεί από κοινά υλικά, όπως χάλκινο σωλήνα στον οποίο ανοίγονται οπές. Οι δύο σωλήνες που αποτελούν τους χωριστούς θαλάμους πίεσης δεν είναι αναγκαίο να είναι ομοαξονικοί αλλά μπορεί να είναι παράλληλοι σωλήνες της ίδιας διαμέτρου, ο ένας με οπή στο μπροστινό του άκρο και ο άλλος με οπές στα πλευρά του. Λόγω της σχετικά μικρής επιφάνειας διατομής τους που έρχεται σε επαφή με το ρεύμα αέρα, αυτός ο τύπος ευαίσθητου στοιχείου μπορεί να αντιδρά στις τυρβώδεις διακυμάνσεις που δημιουργούν τη μέση ροή αέρα. Ο χρόνος αντίδρασης εξαρτάται κυρίως από την αδράνεια του όγκου του μεταφερόμενου ρευστού στο σχετικό μανόμετρο όπως επίσης και από το ιξώδες του. Η μάζα του ρευστού που μετακινείται σε ένα ορισμένο σωλήνα μανόμετρο σχήματος U εξαρτάται μόνο από την εφαρμοζόμενη διαφορά πίεσης και όχι από την πυκνότητα του ρευστού. Έτσι η ταχύτητα της αντίδρασης μπορεί να ελέγχεται με κατάλληλη εκλογή ρευστού που να έχει κατάλληλο ιξώδες. Για το σκοπό αυτό υπάρχει ποικιλία λεπτόρευστων ελαίων στη διάθεσή μας. Το ανεμόμετρο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό των σχετικών μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου που μπορεί να προκύψουν στην αεροσήραγγα, χωρίς να απαιτείται γνώση του εμπειρικού συντελεστή διόρθωσης.



4.7 Η κατατομή (profile) της ταχύτητας ανέμου στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Ο κινούμενος αέρας επάνω από επίπεδη επιφάνεια ασκεί μια οριζόντια δύναμη στην επιφάνεια που έχει τη διεύθυνση της κίνησής του. Μια τέτοια δύναμη συνήθως εκφράζεται ανά μονάδα επιφάνειας και ορίζεται σαν διατμητική τάση τ . Αντίστροφα, η επιφάνεια ασκεί μια ίση και αντίθετη δύναμη στον κινούμενο αέρα. Η δύναμη αυτή δεν δρα σε όλο τον όγκο του αέρα αλλά μόνο στο χαμηλότερό του στρώμα, που είναι γνωστό σαν οριακό στρώμα του αέρα. Η ροή μέσα σε ένα τέτοιο στρώμα μπορεί να είναι τελείως στρωτή (laminar), μια κατάσταση που σπάνια συναντάμε επάνω από φυσικές επιφάνειες, ή τυρβώδης (turbulent), με ένα υπόστρωμα στρωτής σε επαφή με την επιφάνεια (βλέπε σχήμα 4.1). Η διατμητική τάση που ασκείται σε μια επιφάνεια από τη ροή του αέρα εμφανίζεται μέσα στο οριακό στρώμα και μεταφέρεται προς τα κάτω, προς την επιφάνεια του εδάφους, με τη μορφή ροής ορμής.

Αυτή η προς τα κάτω ροή ορμής προέρχεται από τη διατμητική φύση μέσα στο οριακό στρώμα και δημιουργείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της διάτμησης και των τυχαίων κατακόρυφων κινήσεων μέσα στον αέρα. Στο υπόστρωμα της στρωτής ροής οι διαχυτικές αυτές κινήσεις είναι εντελώς μοριακής φύσης και κλίμακας. Στο στρώμα της τυρβώδους ροής αυτές είναι μακροσκοπικά -τουλάχιστο στην κλίμακα- διακρινόμενα "πακέτα" (eddies) αέρα που μετακινούνται με τυρβώδη κίνηση διαμέσου ενός χαρακτηριστικού μήκους, γνωστού σαν "**μήκους ανάμιξης**" l (ανάλογου ίσως με τη μέση ελεύθερη μοριακή διαδρομή), πριν εμφανισθούν με τον αέρα που τα περιβάλλει.

Αναφερόμενοι στο Σχήμα 4.1 υποθέτουμε ότι ένα πακέτο αέρα που βρίσκεται αρχικά στο επίπεδο $(z+l)$ και έχει την μέση ταχύτητα $u(z+l)$ μετακινείται στο επίπεδο z με τη δράση της τύρβης. Η στιγμιαία ταχύτητα στο z είναι τότε μεγαλύτερη της μέσης τιμής κατά ένα ποσό u' που δίνεται από το $u(z+l)-u(z)$ δηλ. σε πρώτη προσέγγιση

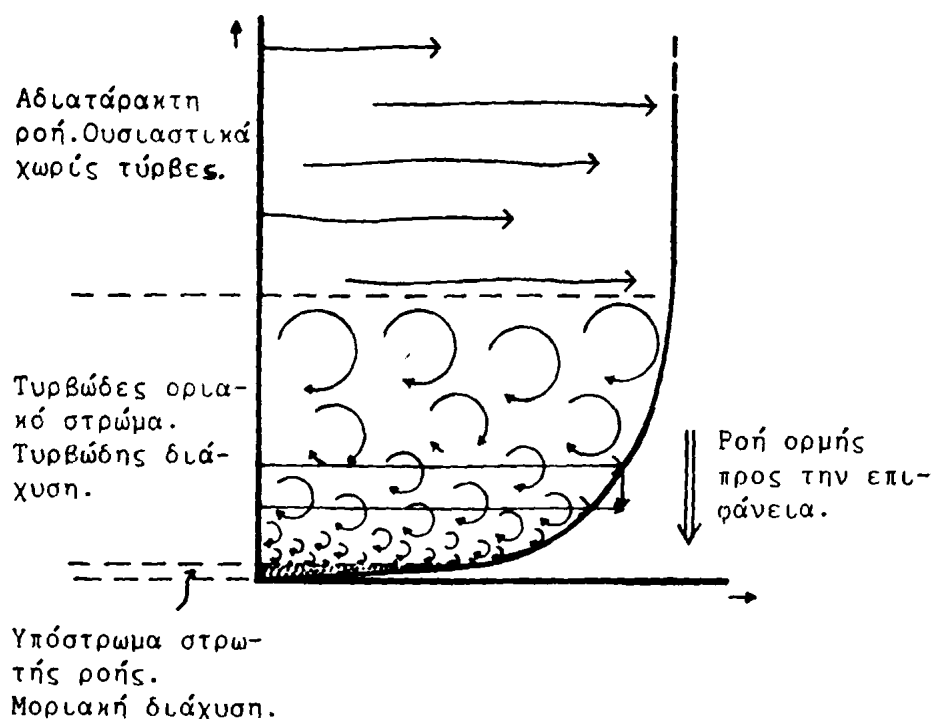
$$u' = l (\partial u / \partial z) \quad (4.4)$$

Η εμφάνιση στη συνέχεια αυτού του πακέτου αέρα με το περιβάλλον του έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια ποσότητα ορμής $\rho u'$ ανά μονάδα όγκου, που συνεισφέρεται στη ροή στο επίπεδο z . Επιπλέον, αν το μέγεθος της μεταβαλλόμενης ταχύτητας κατά την κατακόρυφο που παίρνει μέρος στη μεταφορά του πακέτου είναι w' , τότε η τιμή με την οποία η ορμή



μεταφέρεται προς τα κάτω διαμέσου της μονάδας της οριζόντιας επιφάνειας σε μια τέτοια κίνηση πρέπει να είναι $\rho u' w'$. Υποθέτοντας ότι μια σταθερή ροή ορμής αυτού του μεγέθους προχωράει με όμοιες διαδικασίες μέχρι την κορυφή του υποστρώματος της στρωτής ροής και από εκεί με μοριακά μέσα μέχρι την επιφάνεια, τότε μπορούμε να γράψουμε

$$\tau = \rho u' w' \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.1 Οριακό στρώμα τυρβώδους ροής

Μας διευκολύνει όμως η έκφραση της διατμητικής τάσης συναρτήσει της "ταχύτητας τριβής" (friction velocity), έτσι ώστε

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (4.6)$$

όπου u_* , όπως το $u'w'$, είναι σταθερό διαμέσου μιας περιοχής σταθεράς ροής ορμής ή διατμητικής τάσης τ . Αν υποθέσουμε ότι τα u' και w' είναι απλώς συγκρίσιμα σε μέγεθος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το u_* αντικατοπτρίζει το μέγεθος των διακυμάνσεων της ταχύτητας ροής στο



οριακό τυρβώδες στρώμα. Είναι όμως δυνατό να υποθέσουμε ισότητα των u' και w' , έτσι ώστε

$$u' = w' = u_* \quad (4.7)$$

και να αντικαταστήσουμε το u' με το u_* στην εξίσωση 4.4. Για την εξεύρεση μιας έκφρασης του μήκους ανάμιξης l στην εξίσωση 4.4 φανταζόμαστε τη χαοτική κίνηση του αέρα σε ένα οριακό στρώμα τυρβώδους ροής σαν μια ομαλή μέση ροή στην οποία λαμβάνει μέρος ένας πολύ μεγάλος αριθμός μικρών "πακέτων" αέρα. Κάθε πακέτο κινείται με τη μέση ταχύτητα ροής $u(z)$ στην οποία πρέπει να προσθέσουμε τις συνιστώσες u' και w' , για να πάρουμε τη στιγμιαία ταχύτητα σε κάθε δεδομένο σημείο. Το μήκος ανάμιξης l μπορεί να εκφρασθεί σαν συνάρτηση της κλίμακας μεγέθους των πακέτων. Διαισθητικά συμπεραίνουμε ότι η κλίμακα αυτή ελαττώνεται προς τα κάτω διαμέσου του οριακού στρώματος (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1) μέχρι που, στην επιφάνεια την ίδια, όλες οι τυρβώδεις κινήσεις αποκλείονται και το l παίρνει την τιμή $l = 0$. Στην πράξη η τυρβώδης κίνηση σταματά στην κορυφή του υποστρώματος της στρωτής, μέσα στο οποίο το l είναι τελικά η μέση ελεύθερη μοριακή διαδρομή. Το απλούστερο συμπέρασμα από τον πιο πάνω συλλογισμό είναι ότι το l είναι κατευθεία ανάλογο προς την απόσταση επάνω από την επιφάνεια (κι αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί με πείραμα) έτσι ώστε

$$l = kz \quad (4.8)$$

Η σταθερά αναλογίας k βρίσκεται ότι είναι ανεξάρτητη της φύσης της υποκείμενης επιφάνειας και για ιστορικούς λόγους είναι γνωστή σαν σταθερά του Von Karman και έχει τιμή 0.40.

Από τις εξισώσεις 4.4, 4.7 και 4.8 παίρνουμε:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \quad (4.9)$$

Η εξίσωση 4.9 με ολοκλήρωση γίνεται

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln z + c \quad (4.10)$$

Η εξίσωση 4.10 περιγράφει το σχήμα της κατατομής (profile) της ταχύτητας ανέμου στη ροή του τυρβώδους οριακού στρώματος μέχρι το κατώτατο



σημείο του, που είναι η κορυφή του υποστρώματος της στρωτής ροής. Είναι φανερό ότι στην επιφάνεια του εδάφους $z = 0$ θα έχουμε $u(0) = -\infty$. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης της εξίσωσης 4.9 από $z = 0$ μέχρι $z = z$, όπου το $z = 0$ είναι η επιφάνεια του εδάφους με ροή στρωτή και όχι τυρβώδη. Στην πράξη αποφεύγουμε την ολοκλήρωση μέσα στο στρώμα της στρωτής ροής και ολοκληρώνουμε από $z = z_0$ μέχρι $z = z$, όπου το z_0 είναι το "μήκος τραχύτητας" (roughness length), που είναι χαρακτηριστικό κάθε επιφάνειας και ορίζεται σαν το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους όπου $u(z) = 0$.

Τότε η εξίσωση 4.10 γίνεται

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.11)$$

στην οποία το z_0 συμπεριλαμβάνει τον όρο της σταθεράς ολοκλήρωσης, που στην εξίσωση 4.10 σημειώνεται σαν c . Το μήκος z_0 έχει φυσική σημασία και κυμαίνεται από 0.01 mm μέχρι 500 mm για επιφάνειες επίπεδου πάγου και δάσους, αντίστοιχα ενώ για επιφάνεια χόρτου γίνεται 1 cm, όταν το ύψος του χόρτου είναι 10 cm.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΧΙΧ. Παρατήρηση του μέσου profile του ανέμου και εύρεση του μήκους τραχύτητας z_0

Οι πιο πάνω εκφράσεις για τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από τη συγκεκριμένη φυσικής κατάστασης επιφάνεια του εδάφους ισχύουν μόνο σε αυστηρές συνθήκες ουδέτερης ισορροπίας της ατμόσφαιρας. Τέτοιες συνθήκες ισχύουν συνήθως σε ημέρες συννεφιασμένες και με άνεμο.

Με τη βοήθεια τεσσάρων τουλάχιστον ανεμομέτρων τοποθετημένων σε ένα ιστό ύψους μέχρι 4 μέτρα μετρούμε την ταχύτητα του ανέμου σε τακτά χρονικά διαστήματα και εξαγάγουμε τελικά τη μέση ταχύτητα u για κάθε ύψος. Αν την ταχύτητα αυτή για κάθε ύψος την τοποθετήσουμε σε χαρτί με ημιλογαριθμική κλίμακα, τα σημεία αυτά (ταχύτητα-ύψος) θα βρίσκονται περίπου σε ευθεία γραμμή και τότε με extrapolation για $u=0$ ευρίσκουμε το "μήκος τραχύτητας" z_0 .



ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ BEAUFORT

$V = 0.836 B^{3/2}$ (V=ταχύτητα ανέμου ms^{-1} , B=κλίμακα Beaufort)

Κλίμακα Beaufort	Χαρακτηρισμός	Όρια ταχύτητας σε ύψος 10m υπεράνω του εδάφους (km/h)	Μέση ταχύτητα στα 10 m ύψους (km/h)	Αποτελέσματα που προκαλούνται στη στεριά
0	Νηνεμία (Calm)	< 1	0	Άπνοια. Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα
1	Υποπνέων άνεμος	1 - 5	3	Η διεύθυνση του ανέμου δείχνεται από τον καπνό. Ο ανεμοδείκτης ακίνητος
2	Ασθενής άνεμος	6 - 11	9	Αισθητός στο πρόσωπο. Θρόϊσμα φύλλων. Κινείται συνήθως ο ανεμοδείκτης.
3	Λεπτός άνεμος (Centa Breeze)	12-19	16	Φύλλα και μικρά κλωνάρια κινούνται συνεχώς. Ανοίγει μικρή σημαία.
4	Μέτριος άνεμος (Moderate breeze)	20- 28	24	Σηκώνεται σκόνη και φύλλα χαρτιού. Κινούνται μικροί κλάδοι δένδρων.
5	Λαμπρός άνεμος (Fresh breeze)	29-38	34	Λυγίζουν μικρά δένδρα με φύλλα. Σηκώνονται κυματισμοί σε συγκεντρωμένα νερά.
6	Ισχυρός άνεμος (Strong breeze)	39-49	44	Κινούνται μεγάλοι κλάδοι. Ακούεται συριγμός στα τηλεγραφικά σύρματα. Χρησιμοποιείται με δυσκολία η ομπρέλα.
7	Σφοδρός άνεμος (Moderate gale)	50-61	55	Κινούνται ολόκληρα δένδρα. Βάδισμα προς τον άνεμο δύσκολο.
8	Θελλώδης άνεμος (Gale)	62-74	68	Σπάνε κλωνάρια δένδρων. Δυσκολεύεται γενικά το βάδισμα.
9	Θύελλα	75-88	82	Ελαφρές ζημιές στις οικοδομές. Αρπάζει καπνοδόχους και κεραμύδια.
10	Ισχυρά θύελλα (Storm)	89-102	96	Ξερίζωμα δένδρων. Σημαντικές ζημιές σε οικοδομές.
11	Σφοδρή θύελλα (Violent storm)	103-117	110	Σπάνιοι στην ξηρά. Μεγάλες ζημιές.
12	Τυφώνας (Hurricane)	118-133	125	Καταστροφές εξαιρετικά σοβαρές.
13	"	134-149	141	"
14	"	150-166	158	"
15	"	167-183	175	"
16	"	184-201	193	"
17	"	202-220	211	"



ΟΜΑΔΑ 5

Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Τα επιφανειακά στρώματα της γης αποτελούνται από μια πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών που ξεκινά από νερό, πάγο και χιόνι και φθάνει σε υλικά που απαντούν στο μητρικό πέτρωμα (άργιλος και άμμος) και σε ποικίλες αναλογίες από οργανική ουσία και κενά με αέρα ή νερό. Στα αδιαφανή στερεά η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγιμότητα, στις πορώδεις ύλες, όπως στο χιόνι, οι μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας μεταφέρονται με ανωμεταφορά και τύρβες της αισθητής θερμότητας, όπως επίσης και με τη λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών ενώ στην άργιλο, την άμμο και το έδαφος η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με το μεταφερόμενο νερό μέσω των πόρων όπως και με αγωγιμότητα. Στις μεγάλες διαφανείς μάζες πάγου που βρίσκονται στις παραλίες της Ανταρκτικής, για παράδειγμα, έχουμε το ενδιαφέρον φαινόμενο της ταυτόχρονης μεταφοράς με ακτινοβολία που διεισδύει στον πάγο και με αγωγιμότητα. Το νερό των ωκεανών και των λιμνών παρουσιάζει ένα αριθμό πολύπλοκων συνδυασμών μεταφοράς με αγωγιμότητα, με ακτινοβολία και μεταφοράς με τύρβες, της τελευταίας εξαρτώμενης από την ευστάθεια και την δράση του ανέμου και της παλίρροιας. Σε μερικές περιπτώσεις, τόσο στην ξηρά όσο και στο νερό, το πάγωμα μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον πολυπλοκότητες λόγω της λανθάνουσας θερμότητας.

Σε όλα τα παραπάνω υλικά η κατακόρυφη μεταφορά σε οποιοδήποτε βάθος μπορεί να εκφρασθεί σαν μια ροή που εξαρτάται τόσο από την κατακόρυφη κλίση (gradient) της θερμοκρασίας στο σημείο όσο και από την μέση θερμική αγωγιμότητα. Η τελευταία παράμετρος είναι ταυτόσημη με την πραγματική θερμική αγωγιμότητα μόνο όταν η αγωγιμότητα είναι η μόνη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας.

Η ροή θερμότητας με αγωγιμότητα G εξαρτάται από την κλίση της θερμοκρασίας $\partial T / \partial z$ και δίνεται από τη σχέση:

$$G = k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.1)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Η τιμή του συντελεστή αυτού για έναν αριθμό υλικών της γήινης επιφάνειας φαίνεται στον πίνακα



5.1. Στην άμμο και το έδαφος, για παράδειγμα, που μπορεί να έχουν μεγάλο πορώδη χώρο η αγωγιμότητα εξαρτάται κυρίως από το αν ο πορώδης χώρος καταλαμβάνεται από αέρα ή νερό χωρίς να υπάρχει απλή συναρτησιακή σχέση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα, k ($\text{mWcm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Θερμοχωρητικότητα κατ' όγκο, C ($\text{J cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	Θερμική διαχυτικότητα, K ($\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$)	Θερμική ικανότητα αγωγιμότητας $\sqrt{kC}$ ($\text{Wcm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{sec}^{1/2}$)
Άμμος	90	1.2	0.075	0.33
Άργιλος	30	1.9	0.016	0.24
Οργαν. ύλη	2.5	2.5	0.001	0.08
Νερό	5.8	4.2	0.0014	0.16
Πάγος	2.2	2.1	0.0105	0.68
Αέρας	0.25	0.0013	≈ 200	0.0006

Σημείωση: Η μέση θερμική αγωγιμότητα (και επομένως και διαχυτικότητα) του νερού και του αέρα σε κίνηση μπορεί να αυξηθεί μέχρι μερικές τάξεις μεγέθους.

Τα φυσικά υλικά αποτελούνται από οποιοδήποτε από τα υλικά του πίνακα και από κενά αέρα και έχουν τιμές θερμικής αγωγιμότητας σημαντικά μικρότερες από τα κύρια στερεά συστατικά. Για τέτοια πορώδη υλικά η ειδική θερμότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι μικραίνει ανάλογα με την πυκνότητα.

Η θερμοχωρητικότητα κατόγκο C μπορεί να καθορισθεί εύκολα αφού εξαρτάται από τις σχετικές αναλογίες των συστατικών παρά από τις θέσεις τους στο χώρο. Παίρνοντας σαν παράδειγμα το έδαφος, η ειδική θερμότητα ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση

$$C = x_m C_m + x_o C_o + x_w C_w + x_a C_a \quad (5.2)$$

όπου x_m , x_o , x_w και x_a είναι τα σχετικά ποσοστά των πετρωμάτων, της οργανικής ύλης, του νερού και του αέρα στην μονάδα όγκου του εδάφους αντίστοιχα και C_m , C_o , C_w και C_a είναι οι αντίστοιχες ειδικές θερμότητες που φαίνονται και στον πίνακα 5.1. Στον πίνακα αυτό φαίνεται και ο συντελεστής θερμικής διαχυτικότητας (thermal diffusivity) που ορίζεται από τη σχέση

$$K = k/C \quad (5.3)$$



Όπως θα φανεί αργότερα ο συντελεστής θερμικής διαχυτικότητας μας εφοδιάζει με ένα μέτρο για την τιμή ταχύτητας προσαρμογής υλικού στην αλλαγή της θερμοκρασίας του.

5.1 Μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας του εδάφους

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν στην Ομάδα 1. Όμως στη μέτρηση θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη του εδάφους είναι απαραίτητο να ληφθεί πρόνοια για ενδείξεις μακριά από το σημείο μέτρησης ή μέτρησης με μεταφορά του ευαίσθητου στοιχείου από το θερμομετρούμενο σημείο. Στην πρώτη περίπτωση αυτό επιτυγχάνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις και με κατάλληλο καταγραφικό μέσο ή με υγρά θερμόμετρα, για παράδειγμα υδραργύρου σε μεταλλικό σωλήνα, που συνδέονται υδραυλικά με τη βοήθεια εύκαμπτων σωλήνων με ένα καταγραφικό ή άλλο μηχανισμό ένδειξης της μέτρησης. Στη δεύτερη περίπτωση ευρίσκει εφαρμογή η τεχνική των θερμομέτρων με μεγάλη θερμική αδράνεια στο συχνά χρησιμοποιούμενο θερμόμετρο υδραργύρου σε γυαλί που το ευαίσθητο στοιχείο του είναι εγκλωβισμένο σε αρκετά μεγάλο όγκο κηρού, του οποίου η μεγάλη ειδική θερμότητα και η μικρή θερμική αγωγιμότητα συνδυάζονται για να ελαττώσουν την μεταβολή στο χρόνο της θερμοκρασίας. Τέτοια θερμόμετρα μπορεί να αναρτώνται με αλυσίδα ή καλώδιο στο επιθυμητό βάθος μέσα σε κατάλληλες οπές που ανοίγονται στο έδαφος.

Σε ειδικές περιπτώσεις η παρουσία της οπής αποτελεί μια ανεπιθύμητη διατάραξη. Γενικά η γρήγορη ανταπόκριση του θερμομέτρου στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι ανεπιθύμητη όταν μετρούμε τη θερμοκρασία του εδάφους επειδή εκεί η θερμοκρασία μεταβάλλεται πολύ αργά και μόνο στην εδαφική επιφάνεια έχουμε μια εξαίρεση.

Στο έδαφος δεν υπάρχει πιθανότητα αδυναμίας προσαρμογής της θερμοκρασίας του θερμομέτρου με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπως είναι δυνατό να συμβεί στον αέρα ή στο νερό, όπου ο αερισμός ή η ανάδευση του νερού, αντίστοιχα, αυξάνει την τιμή ροής θερμότητας μεταξύ του ευαίσθητου στοιχείου και του περιβάλλοντος. Αδυναμία αύξησης της υπό εξάλειψη ενέργειας του θερμομέτρου εμφανίζεται συνήθως όταν χρησιμοποιούνται θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης που λειτουργούν με αρκετά υψηλή ένταση ρεύματος και κυρίως για όλα τα είδη θερμομέτρων σε διαφανή ή και σε περατά στο φως μέσα, όπως σε πάγο και χιόνι. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία είναι ικανή να διεισδύσει σε αυτά τα φυσικά σώματα σε αρκετό πάχος, τα θερμόμετρα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες συνθήκες



πρέπει να σχεδιάζονται με κάποια προσπάθεια προσομοίωσης στις οπτικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Σκοτεινού χρώματος και αδιαφανή θερμόμετρα χρησιμοποιούμενα στη διάρκεια της ημέρας για τη θερμομέτρηση μέσα σε πάγο ή χιόνι μας δίνουν περισσότερο μια ένδειξη για τη διεύθυνση της ακτινοβολίας παρά τη θερμοκρασία.

5.2 Η θεωρία της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος

Στην παράγραφο αυτή θα διερευνήσουμε τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας του εδάφους T και των ρών θερμότητας G .

Οι βασικές εξισώσεις της ροής θερμότητας είναι ο νόμος του Fourier:

$$G = -k \partial T / \partial z \quad (5.4)$$

και η αρχή της διατήρησης της θερμότητας

$$\partial G / \partial z = -C \partial T / \partial t \quad (5.5)$$

όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα και C είναι η θερμοχωρητικότητα κατόγκο. Τα z και t είναι αντίστοιχα βάθος εδάφους και χρόνος.

Από την εξίσωση 5.4 με διαφορισμό παίρνουμε:

$$\partial G / \partial z = -k \partial^2 T / \partial z^2 \quad (5.6)$$

έτσι ώστε σε σύγκριση και με την 5.5 παίρνουμε:

$$\partial T / \partial t = K \partial^2 T / \partial z^2 \quad (5.7)$$

όπου $K = k/C$ είναι ο συντελεστής θερμικής διαχυτικότητας.

Επιπλέον από την 5.4 και την 5.5 ομοίως παίρνουμε:

$$\partial G / \partial t = -k \partial^2 T / \partial t \partial z \quad \text{και} \quad \partial^2 G / \partial z^2 = -C \partial^2 T / \partial z \partial t \quad \text{και επομένως}$$

$$\partial G / \partial t = K \partial^2 G / \partial z^2 \quad (5.8)$$

Οι εξισώσεις 5.7 και 5.8 δείχνουν ότι οι ίδιες μαθηματικές εξισώσεις εφαρμόζονται στη "ροή" θερμοκρασίας και στη ροή θερμότητας σε ένα αγωγό και συνεπώς ευρίσκουν εφαρμογή όμοιες λύσεις. Ιδιαίτερα αν οι θερμοκρασίες μπορούν να περιγραφούν από μια ημιτονοειδή συνάρτηση τότε

μια όμοια έκφραση της ίδιας συχνότητας μπορεί να εφαρμοσθεί στη ροή θερμότητας με μόνες διαφορές το εύρος και τη φάση.

Ενώ οι οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλονται σημαντικά, οι περισσότερες φυσικές καταστάσεις μπορεί να περιγραφούν με όρους ημιτονοειδούς μεταβολής της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους, όπως για παράδειγμα στην ημερήσια και την ετήσια μεταβολή.

Στην περίπτωση απουσίας οριζόντιων ή μη αντιστρεπτών θερμικών διαδικασιών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι για περιοδικές διαδικασίες περιόδου τ , η μέση ροή μεταφερόμενης με αγωγιμότητα θερμότητας σε οποιοδήποτε βάθος δίνεται από την:

$$\bar{G} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} G \, dt = 0$$

Από την άλλη πλευρά, η μέση θερμοκρασία του εδάφους σε ένα ορισμένο βάθος είναι γενικά:

$$\bar{T} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} T \, dt \neq 0$$

Αν περιορίσουμε τη θεώρησή μας σε μια μόνο συχνότητα, η πρότυπη λύση της εξίσωσης 5.7 είναι:

$$T_o(t) = \bar{T}_o + \Delta T_o \cos(nt - \delta) \quad (5.9)$$

(όπου $T_o(t) = T(0, t)$, δηλ. $z = 0$) και για οποιοδήποτε βάθος z κάτω από την επιφάνεια:

$$T(z, t) = \bar{T}_o + \Delta T_o e^{-z/Z} \cos(nt - \frac{z}{Z} - \delta) \quad (5.10)$$

όπου $Z = \sqrt{2K/\eta}$ και η είναι η ημιτονοειδής συχνότητα.
Από την 5.4 ακολουθεί ότι

$$G(z, t) = -k \frac{\partial T(z, t)}{\partial z}$$

έτσι ώστε από την 5.10 παίρνουμε:



$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} = -\Delta T_0 \left[\frac{1}{z} e^{-z/z} \cos\left(nt - \frac{z}{z} - \delta\right) + \frac{1}{z} e^{-z/z} \sin\left(nt - \frac{z}{z} - \delta\right) \right]$$

και επομένως

$$G(z,t) = \frac{k \Delta T_0 e^{-z/z}}{z} \left[\cos\left(nt - \frac{z}{z} - \delta\right) + \sin\left(nt - \frac{z}{z} - \delta\right) \right]$$

Η έκφραση αυτή μπορεί ακόμη να απλοποιηθεί στην:

$$G(z,t) = \frac{\sqrt{2} k \Delta T_0 e^{-z/z}}{z} \cos\left(nt - \frac{z}{z} - \delta - \frac{\pi}{4}\right) \quad (5.11)$$

$$\text{επειδή } \cos \frac{\pi}{4} = \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 5.10 και 5.11 φαίνεται ότι για οποιοδήποτε βάθος το θερμοκρασιακό και το κύμα ροής θερμότητας είναι εκτός φάσης κατά $\pi/4$.

Αν τα εύρη των κυμάτων θερμοκρασίας και ροής θερμότητας σε βάθος z δίνονται, αντίστοιχα, από το ΔT και ΔG από τις εξισώσεις 5.10 και 5.11 εύκολα φαίνεται ότι:

$$\Delta T / \Delta T_0 = \Delta G / \Delta G_0 = e^{-z/z} \quad (5.12)$$

Η εξίσωση (5.12) μας λέει ότι για μια ορισμένη συχνότητα ενός θερμικού κύματος σε έδαφος με ορισμένο συντελεστή διαχυτικότητας λαμβάνει χώρα μια εκθετική διείσδυση με το βάθος. Επιπλέον, θυμούμενοι ότι $z = \sqrt{2} K/n$, είναι φανερό ότι η τιμή διείσδυσης είναι μικρότερη για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή διαχυτικότητας και μεγαλύτερη για μεγαλύτερες συχνότητες.

Στην επιφάνεια

$$G_0(t) = G(0, t)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{z} k \Delta T_0 \cos\left(nt - \delta - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$= \sqrt{nkC} \Delta T_0 \cos\left(nt - \delta - \frac{\pi}{4}\right)$$



και επομένως

$$\Delta G_0 = \sqrt{nkC} \Delta T_0$$

και

$$\Delta G_0 / \Delta T_0 = \sqrt{nkC} \quad (5.13)$$

Από την εξίσωση 5.13 συμπεραίνουμε ότι για μια ορισμένη συχνότητα, η σχέση μεταξύ του εύρους του κύματος ροής θερμότητας στην επιφάνεια και του κύματος της θερμοκρασίας της επιφάνειας είναι ανάλογη προς το $\sqrt{kC}$, που είναι γνωστό σαν **ικανότητα αγωγιμότητας** (conductive capacity). Στη μαθηματική γλώσσα αυτή είναι η μέση γεωμετρική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας κατόγκο. Μέσες τιμές της φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 5.1.

Οι καταγραφόμενες θερμοκρασίες του εδάφους μπορεί να αναλυθούν σε μερικές συνιστώσες συχνότητας και είναι επομένως σημαντικό να έχουμε υπόψη μας κατάλληλες τεχνικές απομόνωσης για την επιλογή απλών συχνοτήτων για ανάλυση, σύμφωνα με τα προηγούμενα.

Η τιμή του $Z = \sqrt{2K/n}$ μπορεί να ευρεθεί από την εξίσωση 5.12, δηλ. με σύγκριση του εύρους κυμάτων απλής συχνότητας σε διάφορα βάθη. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι εκείνη που περιλαμβάνει σύγκριση των φάσεων αυτού του κύματος σαν συνάρτηση του βάθους και με αναφορά στην εξίσωση 5.10. Αν το έδαφος είναι θερμικά ανομοιογενές οι δύο μέθοδοι δεν θα δίνουν τα ίδια αποτελέσματα.

Ο καθορισμός του Z για μια ορισμένη συχνότητα κύματος n επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμικής διαχυτικότητας K από την οποία η αγωγιμότητα k μπορεί να υπολογισθεί, αν μπορεί να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί η θερμοχωρητικότητα κατόγκο C . Η μέτρηση της θερμοχωρητικότητας ενός δείγματος εδάφους προϋποθέτει θερμιδομέτρηση. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη θερμική αγωγιμότητα για να μπορούμε να υπολογίσουμε τα εύρη του κύματος ροής θερμότητας από δεδομένα θερμοκρασίας.

ΠΕΙΡΑΜΑ XX. Καθορισμός της θερμικής διαχυτικότητας από το παρατηρούμενο θερμοκρασιακό προφίλ (profile)

Μια σειρά θερμομέτρων βάθους εδάφους μας δίνει τις θερμοκρασίες στα αντίστοιχα βάθη για κάθε χρονική στιγμή. Τα βάθη είναι ανά 5cm από την επιφάνεια μέχρι τα 25cm ενώ ένα τελευταίο είναι στο 1m. Τα θερμομέτρα μπορεί να είναι κοινά υδραργυρικά εδάφους, ηλεκτρικής



αντίστασης ή θερμοζεύγη. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν και υδρομηχανικοί θερμογράφοι για δύο ή τρία βάθη εδάφους.

Αν $\partial \bar{T}_1 / \partial z$ και $\partial \bar{T}_2 / \partial z$ είναι οι μέσες κλίσεις της θερμοκρασίας σε δύο βάθη z_1 και z_2 μέσα στο έδαφος για μια χρονική περίοδο Δt τότε η αλλαγή στο ποσό θερμότητας που περιέχει το εδαφικό στρώμα που προσδιορίζουν τα βάθη z_1 και z_2 δίνεται από τη διαφορά στις ροές θερμότητας του ανώτερου και του κατώτερου επιπέδου του στρώματος. Με την προϋπόθεση ότι η θερμική αγωγιμότητα k και η διαχυτικότητα C είναι οι ίδιες σε όλο το πάχος του εδάφους θα έχουμε

$$k \left(\frac{\partial \bar{T}_1}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}_2}{\partial z} \right) = C(z_2 - z_1) \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} \quad (5.14)$$

όπου το $\Delta \bar{T}$ είναι η αλλαγή στη μέση θερμοκρασία $\bar{T}$ του στρώματος $\Delta z = z_2 - z_1$ που παρατηρούμε στη διάρκεια του χρόνου t . Η εξίσωση 5.14 γράφεται και με τη μορφή

$$\frac{\Delta \bar{T}}{\Delta t} = K \frac{\Delta \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)}{\Delta z}$$

$$\text{όπου το } \Delta \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) = \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}_2}{\partial z}$$

μπορεί να αναγνωρισθεί σαν πεπερασμένη διαφορά από μια διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης, της εξίσωσης 5.7 της θερμικής διαχυτικότητας.

Αν τα $\partial \bar{T}_1 / \partial z$, $\partial \bar{T}_2 / \partial z$, z_1 , z_2 , $\Delta \bar{T}$ και Δt μετρηθούν τότε η θερμική διαχυτικότητα K μπορεί να υπολογισθεί και δίνεται από την:

$$K = \frac{k}{C} = \frac{(z_2 - z_1) \Delta \bar{T}}{\left(\frac{\partial \bar{T}_1}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}_2}{\partial z} \right) \Delta t} \quad (5.15)$$

Χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες στα βάθη 0cm και 10cm όπως και τις θερμοκρασίες των βαθών 15cm και 25cm που παίρνουμε ανά δύο ώρες ευρίσκουμε τις μέσες κλίσεις θερμοκρασίας στα βάθη 5cm και 20cm. Η αδυναμία της μεθόδου αυτής στην εύρεση του K βρίσκεται στη δυσκολία

καθορισμού της μέσης κλίσης της θερμοκρασίας σε ένα βάθος, αφού για τη λήψη της τιμής αυτής αναγκαζόμαστε και χρησιμοποιούμε, όπως παραπάνω, τις θερμοκρασίες σε βάθη 0cm και 10cm όπως και 15cm και 25cm, πράγμα που μας δίνει όχι τόσο ακριβείς τιμές για την κλίση της θερμοκρασίας στα βάθη 5cm και 20cm.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΧΧΙ. Τα κύματα της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας μέσα στο έδαφος

Χρησιμοποιείται πάλι η ίδια σειρά θερμομέτρων και τα βάθη τους, όπως στο προηγούμενο πείραμα. Αυτό μας εξασφαλίζει το πλεονέκτημα ότι οι θερμοκρασίες στα βάθη μεταξύ 0 και 25cm συσχετίζονται με εκείνη του 1m που για περιόδους της τάξης της μιας εβδομάδας ή και περισσότερο παραμένει σχεδόν σταθερή. Τα δεδομένα επομένως περιέχουν μόνο εκείνες τις ανώτερες συχνότητες που δεν εισχωρούν αισθητά στο βάθος του 1m.

Επειδή η ημερήσια πορεία της θέρμανσης του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία ακόμη και σε ηλιόλουστες ημέρες δεν είναι καθαρή ημιτονοειδής, η θερμοκρασία που αποκτά η επιφάνεια του εδάφους απαρτίζεται από μερικές σημαντικές συχνότητες. Επομένως, με σκοπό να επιχειρήσουμε μια ανάλυση των παρατηρούμενων θερμοκρασιών με τη βοήθεια εξισώσεων, όπως της 5.10, πρέπει να διαχωρίσουμε τις κύριες συνιστώσες συχνότητες.

Η απλούστερη μέθοδος επιλογής μιας ακολουθίας συχνότητας από τα δεδομένα είναι να πάρουμε μια μέση μεταφερόμενη 12ωρη. Η διαδικασία αυτή θα έχει σαν αποτέλεσμα την εξαφάνιση όλων των συνιστωσών σταθερού εύρους που έχουν περιόδους 12/η, όπου το η είναι ακέραιος ≥ 1 . Αυτή η εργασία μπορεί να γίνει είτε με ένα κατάλληλο ηλεκτρονικό calculator ή με ένα απλό πρόγραμμα computer.

Το πείραμα αυτό γίνεται ιδανικό με δεδομένα μιας ακολουθίας ηλιόλουστων ημερών στο τέλος του καλοκαιριού που οι ποικίλες συνιστώσες συχνότητες διατηρούνται σχεδόν σταθερές σε εύρος και η μέση ημερήσια θερμοκρασία του εδάφους δεν αλλάζει σημαντικά στη διάρκεια των μετρήσεων. Το αποτέλεσμα θα είναι η ανυπαρξία συνιστωσών με περίοδο ≥ 24 ωρών στα δεδομένα.

Η τεχνική της αριθμητικής επιλογής που περιγράφηκε θα δώσει τότε μια πρακτικά καθαρή περίοδο 24 ωρών.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Byers, H.R., 1974. *General Meteorology*. McGraw-Hill, New York, N.Y. 4th edition.
2. Geiger, R., 1965. *The climate near the Ground*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
3. Haugen, A.D. (Editor) 1973. *Workshop on Micro-Meteorology*. American Meteorological Society.
4. Κυριαζόπουλος, Β. και Λιθαδάς, Γ., 1974. *Πρακτική Μετεωρολογία*. Θεσσαλονίκη.
5. List, R. J. (Editor) 1949. *Smithsonian Meteorological Tables*. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
6. Meteorological Office, 1969. *Handbook of Meteorological Instruments, 1. Instruments for Surface Observations*. H.M.Stationery Office, London.
7. Monteith, J. L., 1972. *Survey of instruments for Micro-Meteorology*. (I.B.P Handbook No 22) Blackwell, Oxford.
8. Munn, R.E., 1966. *Descriptive Micro-Meteorology*. Academic Press, New York, N.Y.
9. Ρεπαπής, Χ. και Τζίμας, Ε., 1976. *Εργαστηριακές Ασκήσεις Μετεωρολογίας*. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
10. Schwerdtfeger, P., 1976. *Physical Principles of Micro-Meteorological Measurements*. Elsevier, Amsterdam.
11. Sutton, O. G., 1953, *Micro-Meteorology*. McGraw-Hill, New York, N.Y.
12. Τζίμας, Ε., 1988. *Αρχές Μέτρησης Φυσικών Παραμέτρων της Ατμόσφαιρας*. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
13. Weast, C.R. (Editor) 1972. *Handbook of Chemistry and Physics*. The Chemical Rubber Co, Cleveland, Ohio, 53rd edition.



Τυπώθηκε στο Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο με δαπάνη
του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Κ.Α. Πανεπιστημιακού Τυπογραφείου.

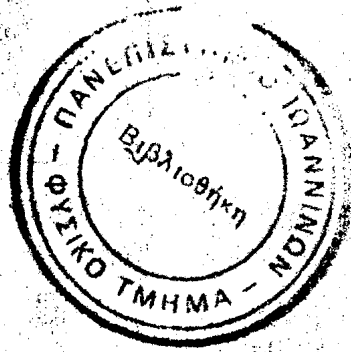
Copyright : Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Απαγορεύεται η μερική ή ολική ανατύπωση, καθώς και η
λήψη φωτοαντιγράφων από το βιβλίο χωρίς τη γραπτή
άδεια του Τμήματος Δημοσιευμάτων του Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων και του συγγραφέα.

Διατίθεται και στο Βιβλιοπωλείο του Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων, Δομπόλη, 451 10 Ιωάννινα τηλ. 21801.

ΔΙΑΝΕΜΕΤΑΙ ΔΩΡΕΑΝ στους φοιτητές.





ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΝ ΤΜΗΜΑΤΟΝ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ

