



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

« Επισκόπηση μεθόδων εκτίμησης ισοδύναμου ύψους νερού χιονόπτωσης »



**ΔΗΜΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

Επιβλέπων καθηγητής:  
ΜΑΜΑΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2005-2006

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1</b>	Εισαγωγή.....	3
1.1	Αντικείμενο εργασίας.....	3
1.2	Περιεχόμενα διάρθρωσης εργασίας.....	3
1.3	Σημασία μέτρησης της συσσώρευσης του χιονιού.....	5
<b>Κεφάλαιο 2</b>	Διεργασία δημιουργίας χιονιού-Λανθάνουσα θερμότητα-Χιονοστιβάδα.....	6
2.1	Εισαγωγή στην ορολογία μέτρησης του χιονιού.....	6
2.2	Δημιουργία κατακρημνισμάτων.....	7
2.3	Μετεωρολογικό πλαίσιο.....	9
2.4	Μετρικές ιδιότητες χιονιού.....	12
2.5	Υλικά χαρακτηριστικά του χιονιού-Ιδιότητες του χιονιού.....	13
2.6	Μεταμορφισμός του στρωμένου χιονιού.....	15
2.7	Χιονοστιβάδα – Στρώματα χιονιού.....	18
<b>Κεφάλαιο 3</b>	Μέτρηση χιονιού - υπολογισμός χιονοκάλυψης.....	26
3.1	Χιονομετρία.....	26
3.1.1	Βροχόμετρα.....	28
3.1.2	Χιονοτράπεζες.....	29
3.1.3	Πάσσαλοι χιονιού.....	30
3.1.4	Φωτογραμμετρία.....	32
3.1.5	Ραδιενέργεια.....	32
3.1.6	Μέθοδος μέτρησης με RADAR.....	33
3.2	Χιονοκάλυψη – Μέθοδοι μέτρησης.....	35
3.2.1	Μετεωρολογικοί Δορυφόροι.....	35
3.2.2	Ορατές εικόνες.....	36
3.2.3	Θερμικές υπέρυθρες.....	39
3.2.4	Παθητικά και ενεργητικά μικροκύματα.....	40
3.2.5	Χάρτες χιονιού σχεδιασμένοι στο χέρι.....	44
3.2.6	Φωτοερμηνεία.....	44
3.3	Σύγχρονες εφαρμογές.....	44
3.3.1	NOHRSC – Όργανα χιονοκάλυψης και ισοδύναμου χιονιού.....	44
3.4	Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	46
3.4.1	Βελτιωμένη ανάλυση στα παθητικά μικροκύματα.....	46
3.4.2	Βελτιωμένοι αλγόριθμοι στα παθητικά μικροκύματα.....	47
3.4.3	Προοπτική για αιτήσεις RADAR.....	48
<b>Κεφάλαιο 4</b>	Τήξη – Παράγοντες που επηρεάζουν – Φάσεις τήξης – Μετακίνηση του νερού πάνω στο χιόνι - Μοντέλα τήξης - Ποιότητα νερού που απορρέει.....	50
4.1	Τήξη.....	50
4.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την τήξη.....	51
4.3	Φάσεις τήξης.....	54

4.4. Μοντέλα τήξης χιονοστρώματος.....	60
4.4.1. Ομαλά προσαρμοσμένη μέθοδος τήξης – απορροής (CONCORDANT – FLOW METHOD - CFM) .....	60
4.4.2. Μέθοδος ημερήσιας θερμοκρασίας.....	62
4.4.3. Υπολογισμός της μείωσης τήξης.....	63
4.4.4. Μοντέλα υδατικού ισοζυγίου.....	65
4.4.5. Μοντέλα ενεργειακού ισοζυγίου.....	66
4.4.6. Ακτινοβολία γάμα.....	69
4.5. Ποιότητα του νερού που απορρέει μετά τη φάση της τήξης.....	70

<b>Κεφάλαιο 5</b> Διεθνείς εφαρμογές μοντέλων χιονόπτωσης και τήξης.....	73
5.1. Μελέτη περίπτωσης προτύπου τήξης στο DANVILLE, VT.....	73
5.2. Χαρτογράφηση SWE καναδικών λιβαδιών.....	76
5.3. Εφαρμογές νορβηγικής ενέργειας.....	77
5.4. Εφαρμογές ισπανικής ενέργειας.....	77
5.5. Προγνωστικά ινδικής απορροής.....	78

<b>Κεφάλαιο 6</b> Συμπεράσματα.....	80
-------------------------------------	----

Βιβλιογραφία.....	93
-------------------	----

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διεξαγωγή αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του κ. Νικολάου Μαμάση, επιβλέποντα καθηγητή, καθώς επίσης και του συνεργάτη του κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη. Η καθοδήγησή τους, οι εύστοχες παρατηρήσεις τους, η βοήθεια στην ανεύρεση του υλικού και κυρίως η υπομονή τους, ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και για το λόγο αυτό τους ευχαριστώ θερμά.

Μέσα από το βήμα αυτό μου δίνεται επίσης η ευκαιρία να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων και να τους αφιερώσω την εργασία αυτή ως ελάχιστη ανταπόδοση της στήριξής τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους και φίλους: Αλέξανδρο Καλό, Δήμητρα Ιωαννίδου και Νικόλαο Καραντζούλη για την πολύτιμη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς επίσης και τους αδελφικούς φίλους: Θεοχάρη Κατοστάρα και Σταθά Διονύσιο για την απλόχερη φιλία τους και τη στήριξή τους σε πολύ δύσκολες στιγμές.

Επίσης πρέπει να ευχαριστήσω και την κοπέλα μου, Δράκου Μαρία, για τη βοήθεια της στη μορφοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για τη στήριξή και την υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και την παρέα μου από το Καματερό, για την υποστήριξη τους και για την ανοχή που μου έδειξαν όλον αυτό τον καιρό, αλλά και για την υποστήριξή τους σε μια δύσκολη περίοδο της ζωής μου, που αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για την έναρξη της φοίτησής μου.

Σας ευχαριστώ όλους θερμά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στην διπλωματική αυτή εργασία εξετάζεται το χιόνι και οι διάφορες σχετικές παράμετροι που το επηρεάζουν. Επίσης δίνονται πληροφορίες για τη σημασία που έχει η μορφή αυτή κατακρημνίσματος στην υδρολογία.

Στην ελληνική βιβλιογραφία δίνονται ελάχιστα στοιχεία για το φαινόμενο αυτό, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία για τη μορφή αυτή κατακρήμνισης. Στην εργασία γίνονται αναφορές για τη διαδικασία δημιουργίας των χιονονιφάδων και κατ' επέκταση της χιονόπτωσης, καθώς επίσης και ορισμένες πληροφορίες για τη σημειακή μέτρηση της με όργανα χιονομετρίας. Το φαινόμενο αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι το χιόνι αποτελεί μικρό ποσοστό κατακρημνίσματος στο υδρολογικό ισοζύγιο, που επηρεάζει όμως τους υδρολογικούς υπολογισμούς στα έργα πολιτικού μηχανικού. Το χιόνι αποτελεί παράγοντα ο οποίος υπάρχει στην επιφάνεια του εδάφους συγκεκριμένων περιοχών, που με κατάλληλες συνθήκες απορρέει και αποτελεί κομμάτι του υδρολογικού κύκλου. Επομένως είναι σημαντικό το γεγονός να συνυπολογιστεί κατά τον υδρολογικό σχεδιασμό μειώνοντας την πιθανότητα αστοχίας κατά την κατασκευή ενός έργου.

Σε βιβλιογραφικές αναφορές του εξωτερικού έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη μορφή αυτή κατακρήμνισης αφού το χιόνι αποτελεί σημαντικό παράγοντα του υδρολογικού ισοζυγίου και πολλές φορές είναι η μορφή κατακρήμνισης με το μεγαλύτερο ποσοστό εισροής. Επομένως, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ο ακριβής υπολογισμός της ποσότητας του χιονιού που κατακρημνίζεται. Για το σκοπό αυτό έχουν μελετηθεί και ερευνηθεί μοντέλα για τον υπολογισμό του ύψους του χιονοστρώματος και του ισοδύναμου ύψους νερού χιονόπτωσης που απορρέει κατά την τήξη του χιονιού, καθώς επίσης έχουν προταθεί και εφαρμοστεί μέθοδοι υπολογισμού της έκτασης της χιονοκάλυψης με ποιο πολύπλοκες μεθόδους και διαδικασίες που απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για την επεξεργασία των δεδομένων που παράγονται. Με τη βοήθεια της τεχνολογικής προόδου οι μέθοδοι αυτοί γίνονται ολοένα και πιο συνεπείς με μικρά ποσοστά σφάλματος (δορυφόροι, χρήση πτητικών μέσων).

## 1.2 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Συγκεκριμένα, στην εργασία, γίνεται αναφορά στα παρακάτω σημεία που εξετάζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια:

1. Φυσική διεργασία συσσώρευσης (accumulation) του χιονιού (Λανθάνουσα θερμότητα). Περιγράφεται η φυσική διαδικασία δημιουργίας της κατακρήμνισης αυτής της μορφής και δίνονται πληροφορίες για το συνακόλουθο μετεωρολογικό πλαίσιο που περιλαμβάνει η διαδικασία. Αναφέρονται οι μετρικές ιδιότητες του χιονιού καθώς επίσης και πληροφορίες για το πολύ σημαντικό φυσικό φαινόμενο δημιουργίας της χιονοστιβάδας.
2. Εξετάζονται τρόποι μέτρησης του ύψους του χιονιού με όργανα σημειακής μέτρησης καθώς επίσης γίνεται αναφορά και στις μεθόδους εκτίμησης της χιονοκάλυψης, με πιο εξειδικευμένα μέσα και πιο πολύπλοκες διαδικασίες. Με την πάροδο του χρόνου ολοένα και περισσότερα όργανα έχουν κατασκευαστεί και βελτιωθεί καθώς επίσης και καινούργιες μέθοδοι έχουν προταθεί, για τη μείωση του ποσοστού του σφάλματος των μετρήσεων και τη διεξαγωγή ακριβέστερων και συνεπέστερων αποτελεσμάτων.
3. Αναφέρονται μοντέλα υπολογισμού του ισοδύναμου ύψους νερού χιονόπτωσης που παράγεται από την τήξη του χιονιού. Έχουν μελετηθεί και αξιοποιηθεί μοντέλα για την εκτίμηση του ισοδύναμου ύψους νερού που παράγεται από την τήξη του χιονιού SWE (Snow Water Equivalent). Η συνέπεια των μοντέλων αυτών εξαρτάται άμεσα από τα δεδομένα που εισάγουμε τα οποία θα πρέπει να έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια. Επομένως πολύ σημαντικό μέλημα είναι ο ορθός υπολογισμός παραγόντων που επηρεάζουν την τήξη και που αποτελούν μεταβλητές των μοντέλων υπολογισμού. Τέτοιοι παράγοντες είναι: η θερμοκρασία, η πυκνότητα του χιονιού, η έκταση της χιονοκάλυψης, η υγροσκοπικότητα του εδάφους, το ποσοστό ηλιοφάνειας, το τοπογραφικό ανάγλυφο κ.α.

4. Περιγράφονται διεθνείς εφαρμογές για την καλύτερη κατανόηση των μοντέλων. Χώρες όπως: ο Καναδάς, η Νορβηγία, η Ισπανία και η Ινδία έχουν χρησιμοποιήσει μοντέλα για τον υπολογισμό της ισοδύναμης ποσότητας νερού που παράγεται κατά την τήξη (SWE: Snow Water Equivalent), για τον υπολογισμό της πυκνότητας και της έκτασης του χιονοστρώματος. Για την ορθή εκτίμηση της έκτασης κρίθηκε απαραίτητος ο διαχωρισμός υγρού και ξηρού χιονιού που οδηγεί σε σφάλματα μετρήσεων υπερεκτιμώντας ή υποεκτιμώντας τη χιονοκαλυμμένη έκταση. Αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν για υδρολογικούς υπολογισμούς όπως: πρόβλεψη υπερχειλίσης χειμάρρου, σχεδιασμό υδροηλεκτρικής παραγωγής και χαρτογράφηση χιονοκαλυμμένων περιοχών.
5. Αναφέρονται συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του χιονιού και της σημασίας του στο υδρολογικό ισοζύγιο. Γίνεται σχολιασμός ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας, πινακοποίηση των μοντέλων εκτίμησης της τήξης με τις εισροές, τις εκροές και το βασικό τύπο υπολογισμού, πινακοποίηση των οργάνων και των μεθόδων εκτίμησης ύψους χιονιού και της χιονοκάλυψης με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους αντίστοιχα, αναφορά στην ποιότητα του νερού που απορρέει και τέλος αναφορά στις αντικειμενικές δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά τον υπολογισμό του ύψους και της έκτασης της χιονοκάλυψης.

### **1.3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ**

Η σημασία της συσσώρευσης και τήξης του χιονιού στην υδρολογία είναι πολύ μεγάλη δεδομένου ότι:

1. Αποτελεί πηγή επιφανειακής απορροής. Όταν το χιόνι συσσωρευτεί στην επιφάνεια του εδάφους με το πέρασμα του χρόνου, και με τη βοήθεια φυσικών διαδικασιών, (ηλιακή ακτινοβολία, αέρας, θερμοκρασία εδάφους), "λιώνει", με αποτέλεσμα το ισοδύναμο νερό που παράγεται να αποτελεί κομμάτι του υδρολογικού κύκλου. Απορρέει επιφανειακά και αποτελεί πηγή τροφοδοσίας για ποτάμια και λίμνες.

2. Είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας επαναφόρτισης των υπόγειων υδροφορέων. Μετά την τήξη του χιονιού ένα ποσοστό του νερού αυτού απορρέει επιφανειακά, όπως προαναφέρθηκε, ενώ το υπόλοιπο εισχωρεί μέσα στο έδαφος εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς.
3. Η προσωρινή αποθήκευση του νερού, με τη μορφή του χιονιού, αυξάνει την υστέρηση μεταξύ κατακρημνίσματος και απορροής. Η διαδικασία τήξης του χιονιού δεν γίνεται, τις περισσότερες φορές, ακαριαία αλλά μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα μεταξύ κατακρήμνισης και απορροής του νερού που παράγεται. Το χιόνι, δηλαδή, αποτελεί έναν μόνιμο παράγοντα ο οποίος προϋπάρχει και ανάλογα με τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες τήκεται, και αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα εισροής στον υδρολογικό κύκλο.
4. Μειώνει το ρυθμό απορροής. Η τήξη του χιονιού είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο συμβαίνει σταδιακά με το πέρασμα του χρόνου. Ο ρυθμός της απορροής εξαρτάται άμεσα από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ κατακρήμνισης και απορροής. Η αρχική ποσότητα του χιονιού που τήκεται είναι μεγάλη άρα και το αντίστοιχο παραγόμενο νερό είναι μεγάλης ποσότητας που όμως μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου αφού μειώνεται και η ποσότητα του χιονιού με αποτέλεσμα να ελαττώνεται και ο ρυθμός απορροής του νερού.
5. Επιδρά σημαντικά στο κλίμα. Η τήξη του χιονιού είναι ένα φυσικό φαινόμενο που εξαρτάται από ποικίλους τοπικούς παράγοντες. Κατά την τήξη του χιονιού απορροφούνται μεγάλα ποσά ενέργειας από το περιβάλλον (ατμόσφαιρα, έδαφος) που μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στο κλίμα τοπικά αλλά και σε μεγαλύτερη κλίμακα.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΧΙΟΝΙΟΥ- ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ-ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ:**

#### **Γενικά:**

Το χιόνι αποτελεί έναν παράγοντα κατακρήμνισης και είναι πολύ σημαντική η μέτρησή του, ιδιαίτερα η μέτρηση της ισοδύναμης ποσότητας νερού που προκύπτει από την τήξη του. Το χιόνι συμπαρασύρεται κατά τη διάρκεια καταιγίδων με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη ποικιλία σε ύψη, πυκνότητα καθώς επίσης και σε συνακόλουθο μεταμορφισμό και εξάτμιση που οφείλεται στον τοπικό άνεμο, θερμοκρασία, ακτινοβολία, και άλλες μικροκλιματικές συνθήκες που μπορούν περαιτέρω να επηρεάσουν τις ιδιότητες του χιονιού. Επομένως, τα χαρακτηριστικά του χιονιού έχουν μεγάλη ποικιλία σε περιοχές που παρουσιάζουν έντονο ανάγλυφο αλλά και ποικίλες μικροκλιματικές συνθήκες, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για αυτό το λόγο η κατανόηση των ιδιοτήτων του χιονιού σε μια περιοχή μελέτης είναι σημαντική γιατί θα επηρεάσει την ορθότητα των μετρήσεων και επομένως τα συμπεράσματα που θα προκύψουν. Θα πρέπει όμως να αποσαφηνισθούν αρχικά κάποιοι όροι που είναι απαραίτητοι, για την πληρέστερη κατανόηση των μεθόδων μέτρησης του. Οι όροι αυτοί αναφέρονται παρακάτω:

**Κατακρήμνισμα:** είναι το ύψος της βροχής μαζί με το ύψος του ισοδύναμου νερού (SWE: Snow Water Equivalent) που προκύπτει από την τήξη του χιονιού, χιονόνερο, και το χαλάζι που πέφτει κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης καταιγίδας ή μιας περιόδου μέτρησης.

**Η συσσώρευση του χιονιού:** είναι το αυξανόμενο ύψος του χιονιού και άλλων φαινομένων στερεών κατακρημνισμάτων που προστίθενται πάνω στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας ή μιας περιόδου μέτρησης

**Χιονοκάλυψη ή «στρώσιμο» του χιονιού:** αναφέρεται σε ολόκληρη την έκταση του προστιθέμενου χιονιού πάνω στο έδαφος κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης.

**Νερό τήξης:** είναι το σύνολο του νερού της υγρής μορφής του χιονιού, που παράγεται από το λιώσιμο του χιονοστρώματος και το οποίο εγκαταλείπει το στρωμένο χιόνι κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Συχνά αναφέρεται σαν ύψος ισοδύναμου νερού τήξης.

**Απορροή:** είναι η ολική απώλεια του νερού που ακολουθείται (η τήξη και η συνακόλουθη εξάτμιση) από το «στρωμένο» χιόνι κατά τη διάρκεια μιας περιόδου μέτρησης. Συχνά αναφέρεται σαν ύψος ισοδύναμου νερού.

**Έξοδος του νερού:** είναι το συνολικό ύψος του νερού σε υγρή μορφή, που εγκαταλείπει το «στρωμένο» χιόνι κατά τη διάρκεια μιας περιόδου μέτρησης.

Οι χιονοπτώσεις αποτελούν τη δεύτερη σε σπουδαιότητα μορφή κατακρημνίσεων, και στα εύκρατα κλίματα αποτελούν την κυριότερη πηγή της εαρινής (μερικές φορές και της θερινής) απορροής, ρυθμίζοντας, με την υστέρηση στην τήξη του χιονιού, την διαίτα των μεγάλων κυρίως υδατορευμάτων που έχουν τις πηγές τους σε ψηλούς ορεινούς σχηματισμούς. Η καλύτερη διερεύνηση των αποθεμάτων και της πυκνότητας του χιονιού επιτρέπει σήμερα τη ρεαλιστική εκτίμηση της απορροής σε εποχιακή και ετήσια κλίμακα, ανάλογα με το μοντέλο μέτρησης που χρησιμοποιείται. Έχει αξία η μέτρηση της τιμής της απορροής της τήξης του χιονοστρώματος γιατί το χιόνι αποτελεί έναν υδρολογικό παράγοντα ο οποίος υπάρχει σε χιονοκαλυμμένες εκτάσεις σε ευρεία κλίμακα και η αλλαγή της κατάστασης του από τη μια μορφή στην άλλη (μετατροπή από στερεό σε υγρό) δίνει ένα σημαντικό ποσοστό απορροής στον υδρολογικό κύκλο. Αποτελεί δηλαδή έναν παράγοντα ο οποίος δεν πρέπει να αμελείται, αντιθέτως είναι σημαντικός και ο ακριβής υπολογισμός του.

Το χαλάζι είναι μια τρίτη μορφή κατακρημνίσματος, η μελέτη του οποίου αποκτά σημασία λόγω των καταστροφικών αποτελεσμάτων του ιδίως στη γεωργία. Άλλες μορφές κατακρημνισμάτων όπως το χιονόβροχο, ή αποθέσεων, όπως η δρόσος, η πάχνη, η βρέχουσα ομίχλη και η άχλη έχουν μικρότερη σημασία για την υδρολογία, εξαιτίας της μικρής έκτασής τους και της μικρής συχνότητάς τους (Κουτσογιάννης, 1999).

## **2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ**

Το πρώτο βήμα στη γένεση των κατακρημνισμάτων είναι η δημιουργία θερμοδυναμικής κατάστασης κορεσμού των υδρατμών (συνθήκες υγροποίησης). Κατά την ανοδική του πορεία, ο εμπλουτισμένος σε υγρασία αέρας, διογκώνεται και ψύχεται. Η ανοδική του πορεία προκαλείται από διαφορές θερμοκρασίας και πίεσης οι οποίες δημιουργούν ρεύματα μεταφοράς (πεδία ανέμων). Ειδικότερα η ανοδική κίνηση ευνοείται σε συνθήκες ατμόσφαιρας, δηλαδή σε συνθήκες απότομης μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα όσο μεγαλώνει το υψόμετρο (ισχυρής θερμοβαθμίδας).

Το δεύτερο βήμα είναι η συμπύκνωση των υδρατμών σε λεπτά σταγονίδια ενδεικτικής μέσης διαμέτρου 10 έως 30 μm ή μικρούς κρυστάλλους (ανάλογα με την θερμοκρασία που επικρατεί). Η υγροποίηση των υδρατμών απαιτεί τη δημιουργία διεπιφάνειας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης, που προϋποθέτει την ύπαρξη υγροσκοπικών πυρήνων, οπότε το όλο φαινόμενο παρουσιάζει την ασυνεχή ενδιάμεση φάση της πυρηνοποίησης. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία της διεπιφάνειας, δηλαδή του υγροσκοπικού πυρήνα, δημιουργεί ένα ενεργειακό φράγμα στο φαινόμενο της συμπύκνωσης των υδρατμών. Το φράγμα ξεπερνιέται δύσκολα όταν η πυρηνοποίηση είναι ομογενής, δηλαδή όταν το έμβρυο πυρήνας δημιουργείται αποκλειστικά από σύμπλεγμα μορίων νερού. Όμως στην ατμόσφαιρα κυκλοφορούν σε επαρκείς ποσότητες στερεοί πυρήνες συμπύκνωσης διάφορων προελεύσεων (π.χ. σκόνη εδαφικού υλικού, προϊόντα καύσης, κρύσταλλοι άλατος από το θαλασσινό νερό, κτλ.), τυπικής διαμέτρου μικρότερης του 1 μm, οι οποίοι ευνοούν την ετερογενή πυρηνοποίηση, γιατί οι ενεργειακές απαιτήσεις της είναι πολύ μικρότερες (Κουτσογιάννης, 1999).

Η δημιουργία των σταγονιδίων σε μεγάλες ποσότητες είναι εμφανής μακροσκοπικά, αφού έχει συνέπεια τη δημιουργία των νεφών, αλλά δεν είναι ικανή για την έναρξη της κατακρήμνισης, αφού τα σταγονίδια λόγω της μικρής ταχύτητας καθίζησης τους, παραμένουν σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα.

Η έναρξη της κατακρήμνισης προϋποθέτει ένα τρίτο βήμα, κατά το οποίο παρατηρείται εντυπωσιακή αύξηση (π.χ.  $10^6$  φορές) της μάζας των σταγόνων (ή των κρυστάλλων πάγου) σε μεγέθη κατακρήμνισμα, δηλαδή μέχρις ότου οι

δυνάμεις βαρύτητας της μεμονωμένης σταγόνας υπερνικήσουν την αιώρηση που δημιουργεί η τυρβώδης διάχυση. Για να πραγματοποιηθεί ο πολλαπλασιασμός της μάζας των σταγονιδίων πρέπει να προχωρήσουν οι διεργασίες σύμφυσης των σταγονιδίων με τις επαφές που δημιουργούν οι μεταξύ τους συγκρούσεις ή και ανάπτυξης των παγοκρυστάλλων, οι οποίοι συμπυκνώνουν γύρω τους κατά προτίμηση τους εναπομένοντες υδρατμούς, απορροφώντας ταυτόχρονα μόρια νερού από τα υγρά σταγονίδια που συνυπάρχουν στην περιοχή (Ahrens, 1993). Η πραγματοποίηση των δύο παραπάνω βημάτων που δημιουργούν τα σταγονίδια είναι συνηθέστατη, δεν ακολουθείται όμως συχνά και από το τρίτο βήμα, οπότε το σύννεφο, επηρεαζόμενο από τις διάφορες ακτινοβολίες ή από τυχόν καθοδική κίνησή του, βαθμιαία διαλύεται με επανεξάτμιση των σταγονιδίων.

Τέταρτο βήμα για την πραγματοποίηση υδρολογικά σημαντικών κατακρημνίσεων είναι η συνεχής τροφοδότηση με νέους υδρατμούς, ώστε να συντηρηθούν επί αρκετό χρόνο οι διεργασίες των τριών προηγούμενων βημάτων (Κουτσογιάννης, 1999).

### **2.3 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

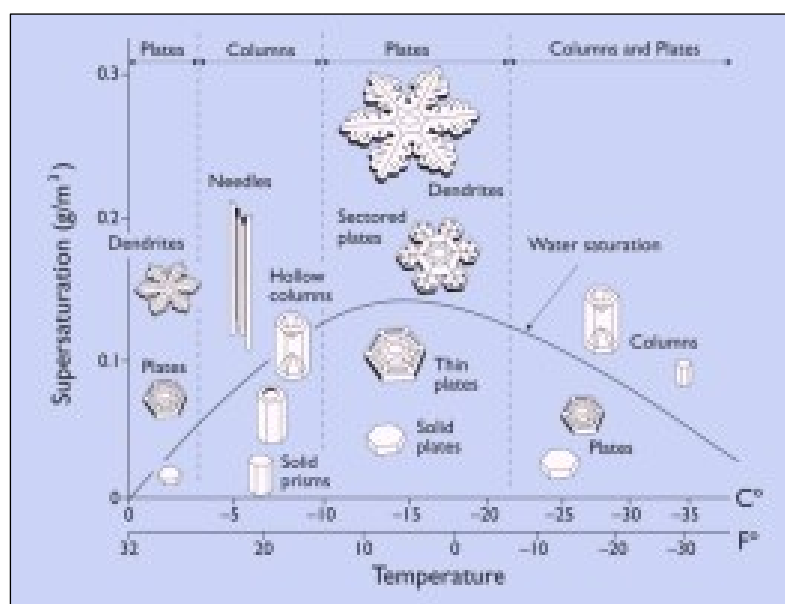
Οι μηχανισμοί γέννησης των κατακρημνισμάτων συνδέονται με την κίνηση της ατμόσφαιρας, που είναι υπεύθυνη τόσο για τη δημιουργία κατάστασης κορεσμού των υδρατμών, όσο και για τη συνεχή τροφοδοσία με νέους υδρατμούς, μέσα από τα πεδία ανέμων που δημιουργούνται. Παρακάτω συνοψίζονται οι μετεωρολογικές συνθήκες που επάγουν αυτές τις κινήσεις και οδηγούν στο σχηματισμό κατακρημνισμάτων.

Γενικά οι μετεωρολογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από τη σχετική κυριαρχία ενός από τους δύο βασικούς μετεωρολογικούς μηχανισμούς κατακρήμνισης: του μεταγωγικού (ή κατακόρυφης μεταφοράς – convective) και του διαστρωματικού (stratiform). Στον μεταγωγικό μηχανισμό κυριαρχεί η κατακόρυφη κίνηση του αέρα και η δημιουργία της κατακρήμνισης είναι ταχύτερη (τυπικός χρόνος ανάπτυξης 45 min.), ενώ η ανάπτυξη της κατακρήμνισης ξεκινά από τη βάση του σύννεφου. Αντίθετα, στο διαστρωματικό μηχανισμό η κατακόρυφη κίνηση του αέρα είναι ασθενής, οι χρόνοι δημιουργίας μπορεί να είναι αρκετές ώρες, ενώ η ανάπτυξη ξεκινά από

το πάνω μέρος του σύννεφου (Smith, 1993). Ένας άλλος μηχανισμός είναι ο ορογραφικός (orographic) που συνδέεται με τη μεταφορά αέριων μαζών πάνω από όρη και συνδυάζει μεταγωγικές και διαστρωματικές συνιστώσες.

### **ΧΙΟΝΟΝΙΦΑΔΕΣ**

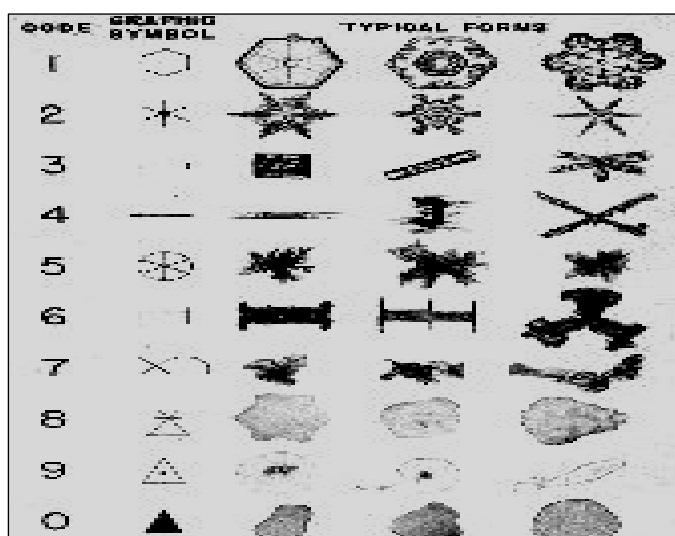
Χιονοκρύσταλλοι έχουν αναπαραχθεί στο εργαστήριο κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και έχει παρατηρηθεί ότι το σχήμα τους εξαρτάται από την θερμοκρασία και την υγρασία. Αυτή η συμπεριφορά των χιονοκρυστάλλων συνοψίζεται στο μορφολογικό διάγραμμα, που δείχνει το σχήμα που παίρνουν οι χιονοκρύσταλλοι κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Το μορφολογικό διάγραμμα αναφέρει μια μεγάλη ποικιλία σχετικά με το ποια είδη κρυστάλλων αναπτύσσονται και κάτω από ποιες συνθήκες. Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι: λεπτά επίπεδα σχήματα και αστεροειδείς σχηματισμοί αναπτύσσονται στους  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $28\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), ενώ κολωνοειδή σχήματα και βελονοειδή εμφανίζονται κοντά στους  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $23\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). Λεπτά επίπεδα σχήματα και αστεροειδείς σχηματισμοί εμφανίζονται επίσης κοντά στους  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $5\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) και ένας συνδυασμός επίπεδων σχημάτων και κολωνοειδών στους  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-22\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). Επίσης από το σχήμα φαίνεται ότι οι κρύσταλλοι του χιονιού τείνουν να γίνουν λιγότερο απλοί όταν η υγρασία (υπερδιαβροχή) είναι χαμηλή, ενώ υπάρχουν πιο σύνθετοι σχηματισμοί σε μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας. Οι περισσότερο πολύπλοκοι σχηματισμοί – βελονοειδείς περίπου στους  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  και μεγάλοι επίπεδοι λεπτοί σχηματισμοί γύρω στους  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  – σχηματίζονται όταν η υγρασία είναι ιδιαίτερα υψηλή, (Σχήμα 2.1).



ΣΧΗΜΑ 2.1: Δείχνει την εξάρτηση του σχήματος των παγοκρυστάλλων από τη θερμοκρασία και από την υπερδιαβροχή (υγρασία).

Αυτή η συμπεριφορά των κρυστάλλων με την αλλαγή της θερμοκρασίας παραμένει ακόμα μυστήριο στην επιστημονική κοινότητα. Η ανάπτυξη των παγοκρυστάλλων εξαρτάται από το πώς μόρια από την εξάτμιση του νερού συσσωματώνονται σε αναπτυσσόμενους κρυστάλλους. Όμως η φυσική διεργασία πίσω από αυτό το φαινόμενο είναι σύνθετη και όχι πλήρως κατανοητή.

Επίσης υπάρχουν πολλών ειδών χιονονιφάδες και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την ομαδοποίησή τους. Η πιο αξιόλογη προσπάθεια έγινε το 1951 με το Διεθνές συμβούλιο για το χιόνι και τον πάγο, που πρότεινε έναν απλό και ευρέως κατανοητό τρόπο για τη διάκριση των στερεών κατακρημνισμάτων. Αυτό το σύστημα αποσαφηνίζει 7 βασικές κρυσταλλικές δομές, (Σχήμα 2.2), που είναι: λεπτά επίπεδα σχήματα, αστεροειδείς σχηματισμοί, κολώνες, βελονοειδείς σχηματισμοί, κρύσταλλοι δενδριτικής ανάπτυξης, κολωνοειδείς σχηματισμοί με επίπεδο σχηματισμό στις άκρες τους και ακανόνιστα σχήματα. Σε αυτά προστίθενται και τρεις τύποι παγωμένων κατακρημνισμάτων: ακανόνιστος σχηματισμός παγοκρυστάλλου, παγωμένα σφαιρίδια και χαλάζι (πηγή internet, [www.snowflakes.com](http://www.snowflakes.com)).



ΣΧΗΜΑ 2.2: Δείχνει τις συνολικά 10 γενικές κατηγορίες του σχήματος των χιονονιφάδων από το Διεθνές συμβούλιο για το χιόνι και τον πάγο.

## 2.4 ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ

Για τις στερεές μορφές κατακρημνισμάτων και ειδικότερα για το χιόνι, το ύψος κατακρημνίσματος δεν αποδίδει σε επαρκή βαθμό την υδρολογική σπουδαιότητα των αντίστοιχων φυσικών διεργασιών. Δεν αρκεί να γνωρίζουμε μόνο το ύψος της χιονόπτωσης αλλά ο σημαντικότερος μετρητικός παράγοντας είναι η τήξη του χιονιού και ο υπολογισμός του ισοδύναμου νερού που προκύπτει από την τήξη του (SWE: Snow Water Equivalent). Πράγματι, η τεχνική υδρολογία ενδιαφέρεται τελικώς για την όλη διαδικασία του μετασχηματισμού των κατακρημνισμάτων σε απορροή και, κατά συνέπεια, στη χιονόπτωση σημασία έχει η ειδική διεργασία απόθεσης και υγροποίησης του χιονιού, από τη στιγμή που αγγίζει το έδαφος ή τη χλωρίδα. Έτσι, για το χιόνι ενδιαφέρουν περισσότερες από μία μετρικές ιδιότητες, που και πάλι ορίζονται σε σημειακή βάση. Ειδικότερα:

1. Το ύψος κατακρημνισμάτων (precipitation depth) συμπεριλαμβάνει την ποσότητα των κάθε μορφής κατακρημνισμάτων, υγρής ή στερεής φάσης, (βροχής - χιονιού) τα οποία φτάνουν στο έδαφος κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης κατακρήμνισης, ή σε μια δεδομένη περίοδο μέτρησης.
2. Το ύψος χιονόπτωσης (snowfall depth) είναι το ύψος του χιονιού που φτάνει στο έδαφος κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης κατακρήμνισης χιονιού, ή σε μία δεδομένη περίοδο μέτρησης. Το ύψος αυτό αναφέρεται στη στερεά απόθεση του χιονιού που συσσωρεύεται κατά την περίοδο μέτρησης και δεν περιλαμβάνει αποθέσεις που είχαν σχηματιστεί προηγουμένως.
3. Το ύψος χιονοκάλυψης (snowcover depth, snowpack depth) είναι το ύψος του συσσωρευμένου στο έδαφος χιονιού σε κάποια στιγμή μέτρησης. Και αυτό αναφέρεται στη στερεά μορφή του χιονιού.
4. Το ισοδύναμο ύψος νερού - χιονόπτωσης είναι το ύψος νερού (σε υγρή φάση), το οποίο προκύπτει αν το δεδομένο ύψος χιονόπτωσης λιώσει.

5. Το ύψος τήξης χιονιού (snowmelt depth) είναι η ποσότητα νερού (σε υγρή φάση), εκφρασμένη σε ισοδύναμο ύψος, που παράγεται από τη φυσική διαδικασία της τήξης του χιονιού κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου μέτρησης.
6. Η πυκνότητα της χιονόπτωσης (ή της χιονοκάλυψης, αντίστοιχα). Αν  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα της χιονόπτωσης (ή της χιονοκάλυψης),  $h$  το ισοδύναμο ύψος του νερού της χιονόπτωσης (ή της χιονοκάλυψης, αντίστοιχα) και  $h'$  το ύψος χιονόπτωσης (ή της χιονοκάλυψης, αντίστοιχα), τότε ισχύει:

$$\rho_s = \frac{h'}{h} \rho_w$$

Όπου  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  είναι η πυκνότητα του νερού σε υγρή μορφή. Τυπικά η πυκνότητα της χιονόπτωσης λαμβάνεται  $\rho_s = 0,1\rho_w$ , ενώ η συνήθης διακύμανση είναι  $0,07 - 0,15 \rho_w$  (Dingman, 1994). Η πυκνότητα χιονοκάλυψης είναι γενικά μεγαλύτερη (λόγω της καθίζησης υπό την επίδραση της βαρύτητας και άλλων μηχανισμών) και εξαρτάται από το χρόνο παραμονής και το ύψος της χιονοκάλυψης. Μετά από μερικές μέρες παραμονής η πυκνότητα έχει τυπική τιμή γύρω στα  $0,2 \rho_w$ , ενώ μετά από μερικούς μήνες παραμονής σε μεγάλα ύψη μπορεί να προσεγγίσει τα  $0,4 \rho_w$  (Κουτσογιάννης, 1999).

## 2.5 ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ (ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ)

Το χιόνι είναι ένα κοκκώδες υλικό, μέτριου πορώδους, που αποτελείται από πάγο, κενά πόρων και νερό. Όταν το χιόνι είναι παγωμένο (π.χ. η θερμοκρασία του είναι κάτω από το σημείο τήξης του πάγου,  $0^\circ\text{C}$ ) τα κενά των πόρων περιέχουν μόνο αέρα (συμπεριλαμβανομένου και του νερού λόγω εξάτμισης). Στο σημείο τήξης, τα κενά των πόρων μπορούν να περιέχουν νερό σε υγρή μορφή όπως επίσης και αέρα, και το χιόνι (στερεό) γίνεται ένα σύστημα τριών φάσεων, αφού αποτελείται από συστατικά τα οποία βρίσκονται και σε αέρια και σε υγρή φάση. Αν εξετάσουμε ένα αντιπροσωπευτικό ποσοστό του στρωμένου χιονιού βάθους  $h_s$ , μιας τυχαίας περιοχής έκτασης  $A$ , μπορούμε να απλοποιήσουμε το παραπάνω φαινομενικά πολύπλοκο συλλογισμό.



Χρησιμοποιώντας τα σύμβολα  $M, V, h, \rho$  για να περιγράψουμε:

$M$ : για τη μάζα,

$V$ : για τον όγκο,

$h$ : για το ύψος,

$\rho$ : για την πυκνότητα της μάζας,

και δείκτες:

$s$ : για το χιόνι,

$i$ : για τον πάγο,

$w$ : για το νερό σε υγρή μορφή και

$a$ : για τον αέρα,

μπορούμε να προσδιορίσουμε ποσότητες που είναι χρήσιμες στον χαρακτηρισμό του στρωμένου χιονιού. Ο όγκος του χιονιού είναι:

$$V_s = V_i + V_w + V_a = h_s A \quad (2.1)$$

Το πορώδες,  $\phi$ , προσδιορίζεται σαν ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο:

$$\phi = \frac{V_a + V_w}{V_s} \quad (2.2)$$

$$\text{Επομένως} \quad V_i = (1 - \phi)V_s \quad (2.3)$$

Η περιεκτικότητα νερού σε υγρή μορφή,  $\theta$ , προσδιορίζεται σαν ο λόγος του νερού σε υγρή μορφή στο στρωμένο χιόνι προς τον ολικό όγκο του χιονιού:

$$\theta \equiv \frac{V_w}{V_s} \quad (2.4)$$

Η πυκνότητα του χιονιού,  $\rho_s$ , προσδιορίζεται ως η μάζα ανά μονάδα όγκου του χιονιού:

$$\rho_s = \frac{M_i + M_w}{V_s} = \frac{\rho_i V_i + \rho_w V_w}{V_s} \quad (2.5)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.2) – (2.5) μας επιτρέπει να συσχετίσουμε την πυκνότητα, την περιεκτικότητα νερού σε υγρή μορφή και το πορώδες με τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_s = (1 - \phi)\rho_i + \theta\rho_w \quad (2.6)$$

όπου το  $\rho_i = 0,92 \text{ g cm}^{-3}$  και  $\rho_w = 1,00 \text{ g cm}^{-3}$

Για τους υδρολόγους, η σημαντικότερη ιδιότητα του «στρωμένου» χιονιού, είναι η ποσότητα του νερού που περιέχει γιατί αυτή θα είναι η ποσότητα του νερού που θα εισαχθεί στην επίγεια, στην υποδερμική αλλά και στην υπόγεια φάση του υδρολογικού κύκλου. Αυτό ονομάζεται ισοδυναμία νερού του «στρωμένου» χιονιού (SWE: Snow Water Equivalent), και εκφράζεται σαν το ύψος του νερού που προέρχεται από την ολοκληρωτική τήξη του χιονιού στην περιοχή,  $h_m$ :

$$h_m = h_i + h_w = \frac{V_m}{A} \quad (2.7)$$

όπου το  $V_m$  είναι ο όγκος του νερού που προέρχεται από την ολοκληρωτική τήξη του χιονιού.

Για να συσχετίσουμε την ισοδυναμία του νερού από προηγούμενες προσδιορισμένες ποσότητες πρέπει να σημειώσουμε ότι:

$$V_m = V_w + V_i \frac{\rho_i}{\rho_w} \quad (2.8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (2.3) - (2.4), η εξίσωση (2.8) γίνεται:

$$V_m = \theta V_s + (1 - \phi) V_s \frac{\rho_i}{\rho_w} \quad (2.9)$$

Μπορούμε τώρα να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις (2.1) - (2.7) για να ξαναγράψουμε την εξίσωση (2.9) όπως παρακάτω:

$$h_m = \theta h_s + (1 - \phi) h_s \frac{\rho_i}{\rho_w} = \left[ \frac{\rho_i}{\rho_w} - \phi \frac{\rho_i}{\rho_w} + \theta \right] h_s \quad (2.10) - (2.11)$$

Τελικά, βλέπουμε ότι από την εξίσωση (2.6), η εξίσωση (2.11) μπορεί να γραφτεί:

$$h_m = \frac{\rho_s}{\rho_w} h_s \quad (2.12)$$

Η εξίσωση (2.12) συχνά εκφράζεται ως «ισοδυναμία του νερού που εξισώνει την πυκνότητα και το ύψος» όπου η πυκνότητα είναι κατανοητή ως σχετική πυκνότητα (π.χ. ειδική βαρύτητα). Αυτή η σχέση χρησιμοποιείται στην μέτρηση του χιονιού (Dingman, 1993).

## 2.6 ΜΕΤΑΜΟΡΦΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΕΝΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ

Η πυκνότητα του χιονιού που πρόσφατα έχει κατακρημνισθεί προσδιορίζεται από το σχηματισμό των νιφάδων, όπου το μέγεθός τους είναι μια συνάρτηση (α) της θερμοκρασίας του αέρα, (β) του βαθμού της υγρασίας στο σύννεφο της κατακρήμνισης (Mellor, 1964), και (γ) της ταχύτητας του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια. Οι υψηλότερες ταχύτητες του ανέμου τείνουν να σπάσουν τις νιφάδες του χιονιού που έχουν αστρικά ή βελονοειδή σχήματα και να τους συσσωρεύσουν σε πυκνότερα στρώματα. Οι πυκνότητες του πρόσφατα κατακρημνιζόμενου χιονιού κυμαίνονται από 0,004 σε 0,34  $\text{g cm}^{-3}$  (Mc Kay, 1970), με τις χαμηλότερες τιμές σε συνθήκες ηρεμίας, πολύ ψυχρών συνθηκών και τις ψηλότερες τιμές να συνοδεύονται από υψηλότερους ανέμους και υψηλότερες θερμοκρασίες. Όμως μια συνήθης διακύμανση είναι από 0,07 σε 0,15  $\text{g cm}^{-3}$  (Garstka, 1964). Εξαιτίας της δυσκολίας στη μέτρηση της πυκνότητας του πρόσφατα κατακρημνιζόμενου χιονιού, ένας μέσος όρος σχετικής πυκνότητας,  $\rho_s = 0,1\rho_w$ , χρησιμοποιείται συχνά, όταν μετατρέπονται οι παρατηρούμενες τιμές του χιονιού, σε ισοδύναμη ποσότητα νερού.

Όσο το χιόνι συσσωρεύεται πάνω στην επιφάνεια ξεκινάει μία διαδικασία μεταμορφισμού που συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί η τήξη. Τέσσερις μηχανισμοί είναι γενικώς υπεύθυνοι για αυτή τη διαδικασία:

- (1) βαρυτική καταστάλαξη,
- (2) καταστρεπτικός μεταμορφισμός,
- (3) εποικοδομητικός μεταμορφισμός και
- (4) μεταμορφισμός τήξης.

(1) Η βαρυτική καταστάλαξη σε ένα δεδομένο στρώμα χιονιού γίνεται σε σειρά στρωμάτων, όπου αυξάνεται με το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων του χιονιού και με τη θερμοκρασία των στρωμάτων και μειώνεται με την πυκνότητα των στρωμάτων. Σύμφωνα με τις σχέσεις που έχουν δοθεί από τον Anderson (1976), κάποιος θα περίμενε ότι η βαρυτική καταστάλαξη θα αύξανε την πυκνότητα σε σειρά από 0,002 σε 0,05  $\text{g cm}^{-3} \text{ day}^{-1}$  σε αβαθείς χιονοκαλύψεις. Σε παγετούς, η πίεση των λεπτών στρωμάτων του

συσσωρευμένου χιονιού είναι ο βασικότερος παράγοντας που οδηγεί στο σχηματισμό χιονιού μεγάλης πυκνότητας.

(2) Ο καταστρεπτικός μεταμορφισμός υπάρχει γιατί οι πιέσεις λόγω εξάτμισης είναι οι ψηλότερες πάνω από επιφάνειες με μικρότερη κύρτωση, έτσι το σημείο και η προβολή των νιφάδων τείνουν να εξατμιστούν και η εξάτμιση τείνει να τροφοδοτήσει γειτονικές λιγότερο καμπύλες επιφάνειες. Αυτό οδηγεί σε σχηματισμό μεγαλύτερων, πιο σφαιρικών κόκκων χιονιού με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η διαδικασία είναι πρωτίστως σημαντική για τις νιφάδες που έχουν πρόσφατα κατακρημνιστεί, αυξάνοντας την πυκνότητα του στρώματος χιονιού που έχει πρόσφατα πέσει περίπου 1% την ώρα. Η διαδικασία τείνει να γίνει πολύ σημαντική όταν οι πυκνότητες φτάσουν την τιμή  $0,25 \text{ g cm}^{-3}$  (Anderson, 1976).

(3) Ο εποικοδομητικός μεταμορφισμός είναι η πιο σημαντική διαδικασία πύκνωσης πριν την τήξη σε «εποχιακά στρωμένο» χιόνι. Σε κοντινές αποστάσεις, μόρια νερού αποθηκεύονται στο σημείο όπου δύο κόκκοι χιονιού έρχονται σε επαφή, σταδιακά, φτιάχνοντας ένα «λαιμό» μεταξύ γειτονικών κόκκων. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ο εποικοδομητικός μεταμορφισμός προκαλείται σαν αποτέλεσμα της μεταφοράς της εξάτμισης μέσα στο χιόνι, που οφείλεται στη διαφορά των θερμοκρασιών σε διαφορετικά σημεία. Η εξάχνωση υπάρχει σε ζεστότερα σημεία του χιονιού που έχει στρωθεί, και η εξάτμιση του νερού μετακινείται σε ψυχρότερες περιοχές όπου υπάρχει συμπύκνωση. Τα πολύ ψυχρά ρεύματα αέρα των υπερκείμενων στρωμάτων προκαλούν μια σημαντική ανοδική μείωση της θερμοκρασίας των κόκκων του χιονιού, με μια συνακόλουθη ανοδική μείωση της πίεσης της εξάτμισης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το χιόνι που βρίσκεται στη βάση του συσσωρευμένου, εξατμίζεται με γρηγορότερους ρυθμούς, προκαλώντας μεγαλύτερους σχηματισμένους κρυστάλλους, πολύ χαμηλής πυκνότητας και συνοχής.

(4) Ο μεταμορφισμός της τήξης περιλαμβάνει δύο διαδικασίες. Στην πρώτη, το νερό σε υγρή μορφή σχηματίζεται από την τήξη στην επιφάνεια του ήδη υπάρχοντος χιονιού ή εισέρχεται σαν βροχή που παγώνει στο ήδη χαμηλής θερμοκρασίας στρωμένο χιόνι. Αυτό έχει επιπτώσεις στην πύκνωση και μπορεί να προκαλέσει στρώματα εξαιρετικά στερεού πάγου που εκτείνονται

σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης το πάγωμα σε βάθος απελευθερώνει λανθάνουσα θερμότητα, που συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του «στρωμένου» χιονιού και στην επιτάχυνση της εξάτμισης. Η δεύτερη μεταμορφική διαδικασία που συνοδεύει την τήξη είναι η γρήγορη εξαφάνιση των μικρότερων κόκκων χιονιού και ανάπτυξη μεγαλύτερων κόκκων (Colbeck, 1978).

Εκτός από τον συνήθη σχηματισμό στρωμάτων με κρυστάλλους πολύ χαμηλής πυκνότητας και συνοχής, όλες οι διαδικασίες του μεταμορφισμού οδηγούν σε μία ενεργή αύξηση της πυκνότητας μέσα από την «εποχιακή» συσσώρευση του χιονιού. Πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχει χρόνος με το χρόνο μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών «στρωμένου» χιονιού και ότι η κατακρήμνιση του χιονιού και οι διαδικασίες που προκαλούν μεταμορφισμό έχουν μεγάλη ποικιλία σε μεγάλες αποστάσεις, εξαιτίας των μεγάλων διαφορών που έχουν οι πλαγιές σε ανάγλυφο, υψόμετρο, καθώς επίσης και σε φυτοκάλυψη.

Κατά την έναρξη της περιόδου τήξης, το στρωμένο χιόνι είναι τυπικά ετερογενές, με πολλαπλά στρώματα διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατά τη διάρκεια της τήξης η πυκνότητα συνεχίζει να αυξάνεται και η κατακόρυφη ανομοιογένεια τείνει να εξαφανιστεί. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής η πυκνότητα μπορεί να κυμανθεί σε ωριαία ή ημερήσια χρονική κλίμακα. Το στρωμένο χιόνι που έχει θερμοκρασία 0°C και είναι καλά στραγγισμένο τείνει να έχει σχετικές πυκνότητες κοντά στο  $0,35 \text{ grcm}^{-3}\text{day}^{-1}$  (McKay, 1970 Dingman, 1993).

## **2.7 ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑ - ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΧΙΟΝΙΟΥ**

### **Γενικά:**

Οι χιονοστιβάδες μπορούν μόνο να εμφανιστούν όταν το στρώμα του χιονιού που προϋπάρχει είναι ασταθές. Η επιφάνεια του χιονοστρώματος αποτελεί περιοχή στην οποία εναποτίθεται και συσσωρεύεται κάθε νέα κατακρήμνιση χιονιού κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η συσσώρευση αυτή και η πυκνότητα

του πρόσφατα δημιουργούμενου χιονοστρώματος εξαρτάται άμεσα από δύο τοπικά φαινόμενα: (α) τη θερμοκρασία που επικρατεί και (β) από την συχνότητα και την ταχύτητα του ανέμου που πνέουν στην περιοχή. Υπάρχουν περισσότερο και λιγότερο πυκνά στρώματα μέσα σε μια επιφάνεια χιονιού (ετερογένεια στρωμάτων).

Τα πυκνά στρώματα, είναι συμπαγή και αποτελούνται από μικρούς σφαιρικούς κόκκους χιονιού που συσσωρεύονται πολλοί μαζί και συνδέονται καλά μεταξύ τους (συνεκτικά στρώματα). Τα λιγότερα πυκνά, (αραιά) στρώματα, αποτελούνται από τους κακώς συνδεδεμένους, μη συνεκτικούς, σφαιρικούς κόκκους χιονιού (μη συνεκτικά στρώματα). Επειδή τα αραιά, μη συνεκτικά στρώματα, αποτρέπουν τα πυκνά στρώματα από τη σύνδεση το ένα με το άλλο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη σχέση αυτών των στρωμάτων (πηγή internet, [www.avalanche.com](http://www.avalanche.com)).

Η κατανόηση του παραπάνω φαινομένου των συνεκτικών και μη συνεκτικών στρωμάτων, αλλά και η σημασία του, μπορεί να αποσαφηνισθεί με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Μπορούμε να παρομοιάσουμε το ισχυρό συνεκτικό στρώμα ως «τούβλο» και το μη συνεκτικό με ένα λεπτό στρώμα από σφαιρικά ρινίσματα σιδήρου. Όταν το αραιό στρώμα (ρινίσματα σιδήρου) είναι πάνω από το πυκνό (τούβλο) δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα. Πρόβλημα υπάρχει όταν αντιστρέφεται η διάταξη και τοποθετείται το συνεκτικό στρώμα (τούβλο) από πάνω και το μη συνεκτικό (λεπτό στρώμα από ρινίσματα σιδήρου) από κάτω. Το αδύνατο στρώμα μπορεί να μην είναι σε θέση να υποστηρίξει το ισχυρό στρώμα και εάν η κλίση είναι αρκετά απότομη μια χιονοστιβάδα θα μπορούσε να εμφανιστεί.

Ένας πολύ σημαντικός επιπρόσθετος παράγοντας στην προβληματική κατάσταση είναι και η έμμεση επέμβαση του ανθρώπου με τις πολυάριθμες ψυχαγωγικές δραστηριότητες του, που αποτελούν επιπλέον βάρος στο ήδη επιβαρημένο χιονόστρωμα προκαλώντας έτσι τη χιονοστιβάδα (πηγή internet, [www.avalanche.com](http://www.avalanche.com)).

### **ΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑΣ**

Το στρώμα του χιονιού υπάρχει σε μια δυναμική ισορροπία πάνω στην επιφάνεια των βουνοπλαγιών. Όταν στο χιόνι επικρατούν σταθεροποιητικοί

παράγοντες, η δύναμη είναι μεγαλύτερη από την πίεση. Αυτός ο σταθεροποιητικός παράγοντας είναι ο σημαντικότερος και αν τα πράγματα ήταν διαφορετικά δεν θα έμενε ποτέ το χιόνι πάνω σε μια βουνοπλαγιά. Αλλά μερικές φορές η ισορροπία μεταξύ της πίεσης και της δύναμης είναι σχεδόν ίση και έχουμε ένα ασταθές στρώμα χιονιού. Αν προσθέσουμε στην περίπτωση αυτή τους παρακάτω παράγοντες: (α) πρόσθετη πίεση από ένα γρήγορα εξελισσόμενο φορτίο κατακρήμνισης, (β) ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας,

(γ) το μεταδιδόμενο μέσω του ανέμου χιόνι και

(δ) την έμμεση ενέργεια του ανθρώπου, μια χιονοστιβάδα θα μπορούσε να προκληθεί. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις συνθήκες του χιονοστρώματος και του τοπικούς παράγοντες που επικρατούν σε μια περιοχή για να μπορέσουμε να εξετάσουμε τις πιθανότητες δημιουργίας χιονοστιβάδας, γεγονός ζωτικής σημασίας (πηγή internet, [www.avalanche.com](http://www.avalanche.com)).

## **ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΧΙΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ**

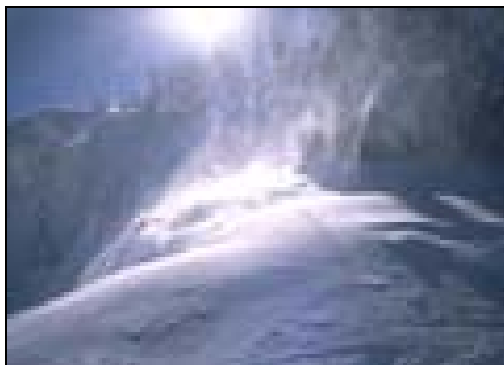
Οι κατακρημνίσεις, ο αέρας και η θερμοκρασία είναι στοιχεία που μπορούν να αλλάξουν τη σταθερότητα του χιονοστρώματος με την αλλαγή της ισορροπίας μεταξύ της πίεσης και δύναμης.

(1) Ο τύπος κατακρήμνισης και η έντασή της (Σχήμα 2.3) είναι εξίσου σημαντική όσο και το συνολικό ύψος της. Γενικά, όσο πιο γρήγορα εξελίσσεται ένα φαινόμενο κατακρήμνισης τόσο περισσότερο δυσκολεύεται το χιονόστρωμα να προσαρμοστεί στις καινούργιες συνθήκες, δηλαδή να προσαρμοστεί στην πρόσθετη πίεση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία χιονοστιβάδας.



ΣΧΗΜΑ 2.3: Ένα γρήγορο φορτίο κατακρήμνισης μπορεί να αλλάξει την σταθερότητα του χιονοστρώματος.

(2) Δεν είναι όμως οι κατακρημνίσεις ο μοναδικός παράγοντας που αυξάνει τον κίνδυνο δημιουργίας χιονοστιβάδας. Υπάρχει πιθανότητα και σε μια ημέρα που να χαρακτηρίζεται από ηπιότητα καιρικών φαινομένων, αν υπάρχουν άνεμοι, να παρασέρνουν το γύρω χιόνι, αυξάνοντας τον κίνδυνο δημιουργίας του φαινομένου. Ο αέρας ανακατανέμει χιόνι μεγάλων ποσοτήτων προσήνεμων πλευρών και το συσσωρεύει σε άλλες θέσεις (Σχήμα 2.4), επιβαρύνοντας τα συγκεκριμένα σημεία με επιπλέον φορτίο χιονιού. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, γίνονται μετρήσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου ώστε να προβλεφθούν ποιες περιοχές θα επιβαρυνθούν ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

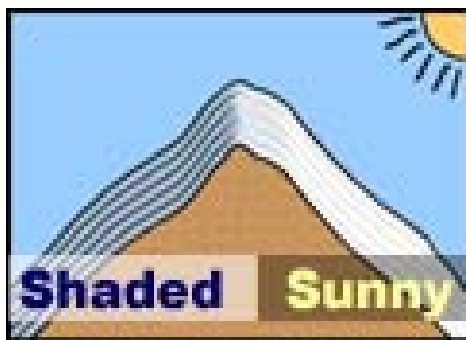


ΣΧΗΜΑ 2.4: Ο άνεμος μπορεί να αλλάξει τη σταθερότητα του χιονοστρώματος αναδιανέμοντας το χιόνι.

(3) Ένας σημαντικός επιπρόσθετος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την σταθερότητα του χιονοστρώματος είναι η θερμοκρασία. Γενικότερα, στρώματα



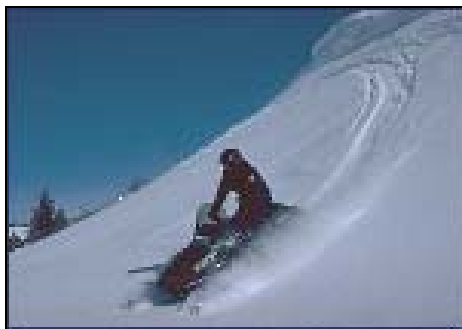
που εκτίθενται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από ότι άλλα (Σχήμα 2.5), τείνουν να γίνουν πιο ασταθή και λιγότερο πυκνά από άλλα που προσβάλλονται σε χαμηλότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Το χιόνι, όπως προαναφέραμε, είναι ετερογενές υλικό ως προς τη στρωματογραφία του, που αποτελείται από στρώματα λιγότερο και περισσότερο πυκνά. Όταν το στρώμα απορροφάει ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνεται η θερμοκρασία του και προκαλείται το φαινόμενο της τήξης. Τα στρώματα που θα επηρεαστούν γρηγορότερα θα είναι τα λιγότερο πυκνά και συνεκτικά. Αν αυτά βρίσκονται στην επιφάνεια δεν θα υπάρξει πρόβλημα χιονοστιβάδας, αλλά θα απορρεύσει επιφανειακά το ισοδύναμο του χιονιού νερό. Πρόβλημα θα εμφανιστεί αν το μη συνεκτικό και αραιότερο στρώμα έχει εγκλωβιστεί σε κατώτερα στρώματα, με τα υπερκείμενα να είναι πιο πυκνά. Σε αυτή τη περίπτωση η τήξη του μη συνεκτικού στρώματος θα προκαλέσει αλλαγή στην ισορροπία των υπερκείμενων στρωμάτων (πυκνά) και είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση της χιονοστιβάδας. Κατά συνέπεια μια σκιασμένη και μια ηλιόλουστη πλαγιά στην ίδια περιοχή, θα έχουν διαφορετική σταθερότητα και διαφορετική συμπεριφορά σε επικείμενες αλλαγές.



ΣΧΗΜΑ 2.5: Ηλιόλουστες και σκιάδης περιοχές έχουν διαφορετική σταθερότητα και συμπεριφορά.

Οι χιονοστιβάδες μπορούν μόνο να εμφανιστούν σε κλίσεις πιο απότομες από περίπου 25 βαθμούς (Σχήμα 2.6) και συχνότερα εμφανίζονται στις κλίσεις μεταξύ περίπου 35 και 45 βαθμών. Εκτός από την κλίση της πλαγιάς ένας άλλος σημαντικός σταθεροποιητικός παράγοντας είναι και το ανάγλυφο της υπό εξέταση περιοχής. Όσο πιο ανομοιόμορφο είναι το ανάγλυφο, τόσο δυσκολότερο είναι να εμφανιστεί χιονοστιβάδα, αλλά και σε περίπτωση που εμφανιστεί δεν θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα γιατί λόγω ανάγλυφου

δεν θα μπορέσει να αναπτύξει μεγάλη κινητική ενέργεια. Η συνήθης ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει μια χιονοστιβάδα είναι 350 km/hr, μια ταχύτητα που μπορεί να καταστρέψει ολοκληρωτικά το οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά και οτιδήποτε προσκρούσει. Κλίσεις πιο απότομες από περίπου 50 έως 60 βαθμούς προκαλούν μεγάλη αστάθεια στο χιονόστρωμα, ενώ ηπιότερες κλίσεις και από 25 βαθμούς έχουν λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης χιονοστιβάδας.



ΣΧΗΜΑ 2.6: Οι δραστηριότητες του ανθρώπου συμβαίνουν σε κλίσεις 30 - 40 βαθμών γεγονός που αυξάνει τις πιθανότητες να προκαλέσει ο ίδιος μια χιονοστιβάδα, αφού ήδη βρίσκεται σε μια «επικίνδυνη ζώνη».

#### **ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΛΑΓΙΑΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑ:**



ΣΧΗΜΑ 2.7: Χαρακτηριστικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια χιονοστιβάδα

Crown: Το σημείο γένεσης της χιονοστιβάδας

Fracture line or Crown Face: Τα όρια του μετώπου που δημιουργούνται κατά τη φάση γέννησης της χιονοστιβάδας

Flanks: Τα πλευρικά όρια του μετώπου εντός των οποίων ολισθαίνει η χιονοστιβάδα

Bed surface: Κύρια επιφάνεια ολίσθησης

Debris Pile: Η περιοχή στη ζώνη των χιονοστιβάδων όπου το χιόνι και τα συντρίμμια συσσωρεύονται.

### **ΜΟΡΦΕΣ ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΩΝ**

Οι χιονοστιβάδες μπορούν να εμφανιστούν με τις παρακάτω μορφές:



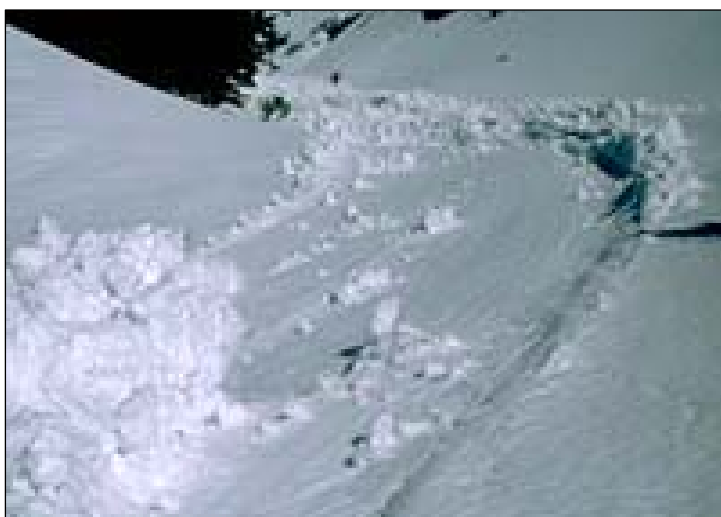
ΣΧΗΜΑ 2.8: Εμφάνιση χιονοστιβάδας από δύο αντικριστά μέτωπα.

(1) Υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν χιονοστιβάδες, ταυτόχρονα, από δυο αντικριστές χιονισμένες πλαγιές (Σχήμα 2.8). Η έναρξη της πρώτης μπορεί να προκαλέσει εδαφικές αναταράξεις που να επηρεάσουν την σταθερότητα του χιονοστρώματος της γειτονικής πλαγιάς και να προκαλέσουν την εμφάνιση χιονοστιβάδας και σε αυτή. Αν το φαινόμενο εξελιχθεί σε πολύ κοντινό χρονικά διάστημα, «ταυτόχρονα», τότε τα μέτωπα συναντώνται κατόπιν και πολλαπλασιάζεται η μάζα και ενέργεια του φαινομένου έχοντας τα πιο καταστροφικά αποτελέσματα που μπορούν να εμφανιστούν.



ΣΧΗΜΑ 2.9: Εμφάνιση χιονοστιβάδας σε μικρό πλάτος δημιουργώντας ένα φυσικό “ροϊκό σωλήνα”.

(2) Μια άλλη μορφή χιονοστιβάδας που μπορεί να εμφανιστεί είναι και του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 2.9). Το σημείο γένεσης της είναι περιορισμένης έκτασης με αποτέλεσμα το μέτωπό της να μην έχει μεγάλο πλάτος. Η ολίσθησή της γίνεται σε περιορισμένο πλάτος δημιουργώντας έναν «φυσικό ροϊκό σωλήνα».



ΣΧΗΜΑ 2.10: Εμφάνιση χιονοστιβάδας με μεγάλο μέτωπο.

(3) Η τελευταία μορφή εμφάνισης της χιονοστιβάδας είναι του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 2.10). Το σημείο γένεσής της έχει τώρα μεγαλύτερο πλάτος,

επομένως και η ολίσθηση της πραγματοποιείται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Επειδή δεν έχω μεγάλη συσσώρευση μάζας κατά την ολίσθηση είναι η μορφή με τις λιγότερο καταστρεπτικές συνέπειες. Η έντασή της εξαρτάται και από την κλίση της πλαγίας που όσο πιο απότομη είναι τόσο μεγαλύτερη κινητική ενέργεια θα δώσει στην μάζα του χιονιού και θα προκαλέσει ανάλογα αποτελέσματα (πηγή internet, [www.avalanche.com](http://www.avalanche.com)).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΧΙΟΝΙΟΥ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ**

### **3.1 ΧΙΟΝΟΜΕΤΡΙΑ**

#### **Γενικά:**

Η μέτρηση του χιονιού είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την υδρολογία. Πρέπει να γίνει με ακρίβεια και ορθά από εξειδικευμένο προσωπικό για τη διεξαγωγή λογικών αποτελεσμάτων, γεγονός που θα βοηθήσει στην σωστή εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων που είναι απαραίτητη σε έργα πολιτικού μηχανικού. Για τη μέτρηση του χιονιού ενδιαφέρουν περισσότερες από μία μετρικές ιδιότητες. Από αυτές, οι τυπικές υδρολογικές μετρήσεις αναφέρονται στο ύψος κατακρημνισμάτων, στο ύψος χιονόπτωσης και στο πάχος και στην έκταση της χιονοκάλυψης, καθώς και στα αντίστοιχα ισοδύναμα ύψη νερού που παράγονται κατά την τήξη.

Πολλές φορές θεωρείται δεδομένο ότι η μέτρηση του χιονιού είναι εύκολη και ότι για να μετρήσουμε το βάθος (ύψος) του χιονοστρώματος αρκεί η έμπηξη εντός του στρώματος χιονιού μιας βαθμονομημένης σταδίας, μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Τα πράγματα όμως δεν είναι τόσο απλά.

Τρεις ιδιότητες του χιονιού είναι υπεύθυνες για τις περισσότερες δυσκολίες που παρουσιάζονται στο να γίνονται ακριβείς και συνεχόμενες μετρήσεις:

1. Το χιόνι συχνά «λιώνει» αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με το έδαφος ή αφού έχει ήδη στρωθεί, εξ' αιτίας της θερμοκρασίας του εδάφους, του

θερμού αέρα και της έκθεσης του χιονοστρώματος στην ηλιακή ακτινοβολία. Υπάρχουν περιπτώσεις που έχει χιονίσει για κάποια συγκεκριμένη ώρα, αλλά η επιφάνεια του εδάφους είναι καθαρή από χιόνι. Επομένως ο παρατηρητής των μετρήσεων βρίσκεται σε δίλημμα αν θα αναφέρει αυτού του είδους τη χιονόπτωση και αν θα τη συμπεριλάβει στις μετρήσεις του ή αν θα αναφέρει μηδενική κατακρήμνιση.

2. Το χιόνι δημιουργεί στρώμα, πάνω στην επιφάνεια του εδάφους καθώς κατακρημνίζεται. Μπορεί να στρωματοποιηθεί γρήγορα ή κλιμακωτά με το χρόνο, γεγονός που εξαρτάται από την ποιότητα του κατακρημνιζόμενου χιονιού και από άλλες τοπικές κλιματικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό έχει επίπτωση στους παρατηρητές που ανάλογα με τη συχνότητα μέτρησης τους (μια ή περισσότερες φορές την ημέρα) θα προκύπτουν και διαφορετικά αποτελέσματα.
3. Το χιόνι μπορεί εύκολα να χάσει την ισορροπημένη και στρωματοποιημένη του μορφή και να αναδιανεμηθεί. Δεν παρουσιάζει την τάση να συσσωρεύεται ομοιόμορφα, επομένως στην ίδια περιοχή και ανάλογα με το ανάγλυφο του εδάφους, υπάρχει πιθανότητα να έχω συσσωρευμένο χιόνι σε ένα σημείο της περιοχής και σε γειτονικό σημείο της ίδιας περιοχής να μην υπάρχει καθόλου χιόνι. Σε αυτήν την περίπτωση η μέτρηση της κατακρήμνισης είναι δύσκολη. Ακόμα και μικρής ταχύτητας άνεμος να πνέει στην περιοχή μπορεί να μεταβάλει σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επομένως οι περισσότερες μετρήσεις που γίνονται το χειμώνα, χρησιμοποιώντας σταθερές παραμέτρους (για την επιφάνεια της χιονοκάλυψης), υπερεκτιμούν ή υποεκτιμούν το παραπάνω φαινόμενο της μη ομοιόμορφης διανομής του χιονιού στην επιφάνεια, αφού δεν μπορούν να συμπεριλάβουν αυτήν την ιδιαιτερότητα της χιονοκάλυψης.

Σημαντικά θέματα στην μέτρηση της ακρίβειας της χιονόπτωσης αποτελούν τα παρακάτω:

1. Λήψη απόφασης για αντιπροσωπευτική τοποθεσία μέτρησης του χιονιού.

2. Δημιουργία συνεπούς μεσοδιαστήματος χρόνου ανάμεσα στις μετρήσεις που γίνονται στο νέο-κατακρημιζόμενο χιόνι (η χρονική διάρκεια που μεσολαβούν οι μετρήσεις να είναι η ίδια).

### **ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ**

1. Μέτρηση της ποσότητας του χιονιού που κατακρημνίστηκε πριν από 24 hrs από μια χιονοτράπεζα, σε μια αντιπροσωπευτική τοποθεσία ή λήψη τιμής από το μέσο όρο πολλών μετρήσεων.
2. Μέτρηση αθροιστικά του βάθους (ύψους) του «παλιού» και «φρέσκου» χιονιού.
3. Μέτρηση της περιεκτικότητας του νερού του «φρέσκου» χιονιού που έχει κατακρημνιστεί πάνω από το «παλιό» στρώμα, αν είναι αντιπροσωπευτικό, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 24 hrs.
4. Μέτρηση της ολικής ποσότητας του νερού του παλιού και του νέου χιονιού.
5. Αναφορά και καταγραφή όλων των στοιχείων χρησιμοποιώντας γνωστές μονάδες και αξιόπιστα μοντέλα.

Από τις παραπάνω αναφορές είναι γεγονός ότι ο ακριβής υπολογισμός του ισοδύναμου ύψους νερού που παράγεται από την τήξη του χιονιού (SWE: Snow Water Equivalent), το ύψος αλλά και η έκταση του χιονοστρώματος είναι σημαντικά δεδομένα τα οποία είναι απαραίτητα σε υδρολογικούς σχεδιασμούς στα έργα πολιτικού μηχανικού. Επομένως μια σειρά οργάνων έχουν κατασκευασθεί και μια σειρά μεθόδων έχουν επινοηθεί για την εκτίμηση των παραπάνω παραγόντων. Από αυτά τα όργανα κάποια είναι περισσότερο πολύπλοκα στον χειρισμό τους και απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό στην επεξεργασία των δεδομένων και κάποια άλλα είναι περισσότερο απλά στη χρήση τους με υστέρηση όμως ακρίβειας και αύξηση της πιθανότητας σφάλματος.

#### **3.1.1 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΑ**

Το ύψος κατακρημνισμάτων προκύπτει κατ'αρχήν από τα βροχόμετρα, τα οποία συλλέγουν όλες τις μορφές κατακρημνισμάτων.

(α) Όταν η υγροποίηση του χιονιού είναι άμεση (δεν στρώνεται το χιόνι), τότε η μέτρησή του (σε ισοδύναμο ύψος νερού) στο βροχόμετρο αποδίδει το ζητούμενο ύψος με σχετική ακρίβεια. Ωστόσο, το χιόνι δεν συλλέγεται αντιπροσωπευτικά στο στόμιο υποδοχής, λόγω της τοπικής διαταραχής που εισάγεται από τον κύλινδρο υποδοχής του κατακρημνίσματος που οφείλεται στην ύπαρξη του ανέμου.

(β) Όταν η υγροποίηση δεν είναι άμεση (στρώνεται το χιόνι), τότε τα τυπικά βροχόμετρα δεν αποδίδουν πιστά το ύψος κατακρημνίσματος, δεδομένου ότι το χιόνι συσσωρεύεται πάνω από το στόμιο υποδοχής κατά περιόδους και παρασύρεται από τον άνεμο. Έτσι, η ποσότητα που, αφού λιώσει, εισχωρεί στο δοχείο μέτρησης, δεν είναι αντιπροσωπευτική του ύψους κατακρημνίσματος. Οι τρόποι αυτοί μέτρησης υπόκεινται σε πολλά λάθη τα ποιο σημαντικά εκ των οποίων οφείλονται στον άνεμο, όπως έχει προαναφερθεί. Για να αρθεί αυτός ο παράγοντας που στερεί ακρίβεια και προκαλεί παραπλανητικά αποτελέσματα στις μετρήσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί στον Καναδά ειδικά προστατευτικά πετάσματα που παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε χαμηλής ταχύτητας ανέμους, της τάξης των  $5 \text{ m/s}^2$ .

### 3.1.2 ΧΙΟΝΟΤΡΑΠΕΖΕΣ

Το ύψος χιονόπτωσης μετριέται συνήθως με χιονοτράπεζες. Αυτές είναι απλές οριζόντιες επιφάνειες, όπου, αφού συσσωρευτεί το χιόνι, μετριέται το ύψος του με ένα κοινό πήχη. Μετά τη μέτρηση, η τράπεζα καθαρίζεται από το χιόνι, ώστε να είναι έτοιμη για την επόμενη μέτρηση του ύψους χιονόπτωσης.

(α) Το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονόπτωσης και (β) η αντίστοιχη πυκνότητα του μπορούν να μετρηθούν από τη χιονοτράπεζα, αν αυτή είναι εφοδιασμένη με ένα απλό σύστημα ζύγισης που μετρά το βάρος του χιονιού. Συνηθέστερα όμως, τέτοιος μηχανισμός ζύγισης απουσιάζει, οπότε, με την υπόθεση ότι η πυκνότητα της χιονόπτωσης είναι  $\rho_s = 0,1 \rho_w$ , το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονόπτωσης είναι το 1/10 του νερού της χιονόπτωσης. Η ισοδυναμία του νερού από το χιόνι μπορεί να μετρηθεί και μέσω ειδικά



διαμορφωμένων χιονοτραπεζών που αποτελούνται από κυκλικές ή οκταγωνικές μεμβράνες φτιαγμένες από πλαστικό ή ελαστικό υλικό και περιέχουν υγρό με χαμηλό σημείο τήξης. Το βάρος του χιονιού που εισχωρεί σε καθεμία ελέγχει την πίεση του υγρού που περιέχει η οποία καταγράφεται διαμέσου ενός μανομέτρου. Η διάμετρος των ειδικά διαμορφωμένων τραπεζών ποικίλει από 2 – 4 m, με μεγαλύτερες διαμέτρους να συνίστανται για βαθύτερες χιονοκαλύψεις (Barton, 1974). Οι τράπεζες αυτές είναι κατάλληλες για μετακινούμενες εγκαταστάσεις με τις μετρήσεις πίεσης να δίνονται μέσω τηλεμετρίας. Όμως πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ακρίβεια των αναγνώσεων. Εάν διαβάζονται οι μετρήσεις αρκετά συχνά και αν ο σκοπός των αποτελεσμάτων δεν απαιτεί αυστηρή ακρίβεια, οι συσκευές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μέτρηση της ισοδυναμίας του νερού.

### **3.1.3 ΠΑΣΣΑΛΟΙ ΧΙΟΝΙΟΥ**

Το ύψος χιονοκάλυψης μετριέται εύκολα με την έμπηξη ενός κοινού πήχη, ή την ανάγνωση του ύψους του σε μόνιμα εγκατεστημένα σταδία, της οποίας η μηδενική στάθμη συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους. Το ισοδύναμο ύψος νερού του χιονιού μετριέται με τη λήψη δείγματος χιονιού μέσω της έμπηξης κατάλληλου κυλινδρικού δειγματολήπτη χιονιού (χιονοσωλήνα) και στη συνέχεια με τη ζύγιση του χιονιού που συλλέγεται. Για τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων ύψους χιονοκάλυψης και ισοδύναμου ύψους νερού, αποφεύγεται η μέτρηση σε ένα σημείο και προτιμάται η λήψη του μέσου όρου από κάποια σημεία μιας διαδρομής. Η διαδρομή αυτή είναι ένα μονοπάτι μεταξύ δύο καταμετρητών πάνω στο οποίο γίνονται σειρές μετρήσεων του ύψους του χιονιού και της ισοδυναμίας του νερού της χιονόπτωσης. Το μήκος των μονοπατιών αυτών είναι περίπου 150 - 250 m, με τις μετρήσεις να γίνονται σε περίπου έξι σημεία με απόσταση μεταξύ τους γύρω στα 30 m. Σε κάθε σημείο υπάρχει ένας εξοπλισμός από έναν σωλήνα ο οποίος έχει μτερή άκρη και ονομάζεται χιονοσωλήνας και τοποθετείται κάθετα στο έδαφος. Αφού διαβαστεί το ύψος του χιονιού στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, που είναι βαθμονομημένη με ειδικά διαμορφωμένο για αυτό το σκοπό επιφανειακό μετρητή, οι σωλήνες τοποθετούνται μερικά

εκατοστά μέσα στο έδαφος και «ταρακουνιούνται» ώστε να επιβεβαιωθεί ότι έχει μείνει κομμάτι εδάφους μέσα του, το οποίο σαν βούλωμα, διατηρεί το χιόνι στο εσωτερικό του. Ο σωλήνας μετά βγαίνει και ζυγίζεται σε ένα όργανο, ειδικά σχεδιασμένης κλίμακας, το οποίο μπορεί να υπολογίσει την ισοδυναμία του χιονιού σε νερό, σε μονάδα μέτρησης: εκατοστά ή ίντσες (cm ή in). Η πυκνότητα σε κάθε σημείο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (2.12) και η ισοδυναμία του νερού για την κάθε διαδρομή είναι ο μέσος όρος των τιμών των σημείων που έχουν μετρηθεί.

Πολλοί σχεδιασμοί χιονοσωλήνων είναι διαθέσιμοι. Μπορεί να είναι σχεδιασμένοι από αλουμίνιο ή πλαστικό και η διάμετρος ποικίλει από 3,8 -7,6 cm. Οι συγκρίσεις που έχουν γίνει με το χιόνι που έχει εξαχθεί και ζυγιστεί, έχουν δείξει ότι οι περισσότεροι χιονοσωλήνες υπερεκτιμούν την ισοδυναμία αυτή του νερού περίπου 10% (Work et al. 1965, Goodison et al. 1981).

Σε ρηχές επιφάνειες χιονιού (π.χ. λιγότερες από 1 m), το βάθος και η πυκνότητα έχει βρεθεί ότι είναι ανεξάρτητα και υπάρχει τυπικά λιγότερη ποικιλία στην πυκνότητα από ότι στο βάθος του χιονιού ( Goodison et al. 1981). Κάτω από αυτές τις συνθήκες μέρος της ακρίβειας χάνεται και λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο, μπορεί να εξισορροπηθεί η ακρίβεια, κάνοντας περισσότερες μετρήσεις πυκνότητας, από ότι μετρήσεις βάθους. Ένας οδηγός στην ποικιλία των πυκνοτήτων είχε προταθεί από τον Rikhter (1954): το χιόνι με μια σχετική πυκνότητα 0,32 - 0,35 μπορεί να υποστηρίξει έναν ώριμο χωρίς σκι, 0,35 - 0,38 τα πόδια αφήνουν μόνο αχνά σημάδια και πάνω από το 0,4 τα πόδια δεν αφήνουν σημάδια στην επιφάνεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Υπολογισμός πυκνότητας χιονιού κατά Rikhter (1954).

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΚΑΤΑ Rikhter (1954)	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ
0,32 - 0,35	Υποστηρίζει έναν ώριμο χωρίς σκι άντρα
0,35 - 0,38	Τα πόδια αφήνουν μόνο αχνά σημάδια
0,4	Τα πόδια δεν αφήνουν σημάδια στην επιφάνεια

Ένα τέτοιο δίκτυο χιονοδιαδρόμων, θα πρέπει να σχεδιαστεί για να υποστηρίξει μια αξιοπρεπή εικόνα της χιονοκάλυψης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Όμως όσο οι μετρήσεις είναι εργαστηριακά εξαρτημένες, οι διάδρομοι αυτοί του χιονιού συνήθως λαμβάνονται πιο πλατιοί και διαβάζονται σε μεγαλύτερα διαστήματα - τυπικά κάθε δύο βδομάδες. Επειδή οι συνθήκες χιονοκάλυψης επηρεάζονται περισσότερο από τις τοπικές συνθήκες, είναι περισσότερο στρατηγικής σημασίας να σχεδιαστεί το δίκτυο σε κατάλληλες θέσεις που να επηρεάζονται λιγότερο από την τοπολογία της περιοχής. Λαμβάνοντας υπόψη και μετρώντας τις παραμέτρους που επηρεάζουν κάθε περιοχή, μπορούμε να πάρουμε τα αποτελέσματά μας έχοντας υπολογίσει τις ποικίλες συνθήκες της περιοχής ενδιαφέροντος. Για ερευνητικούς σκοπούς, όπως πρόγνωση της απορροής, οι μετρήσεις βασίζονται μόνο σε λίγους χιονοδιαδρόμους οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για μία περίοδο του χρόνου ώστε να προσφέρουν έναν πίνακα μετρήσεων που να αφορά τη συγκεκριμένη περιοχή, από το να προσφέρουν ένα δείγμα μετρήσεων της ευρύτερης χιονοκάλυψης.

#### **3.1.4 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ**

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων μέτρησης του ύψους χιονόπτωσης, οι οποίες δίνουν επιπλέον και την έκταση της χιονοκάλυψης, στηρίζονται στη φωτογραμμετρία, εναέρια (με αεροφωτογραφίες) ή επίγεια (με φωτογραφίες εδάφους), (World Meteorological Organization, 1983). Η έκταση της χιονοκάλυψης μπορεί να προσδιοριστεί και από δορυφορικές εικόνες, με μεγαλύτερη ακρίβεια.

#### **3.1.5 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων μέτρησης του ισοδύναμου νερού της χιονοκάλυψης στηρίζονται στη ραδιενέργεια. Η ραδιενεργός ακτινοβολία (ακτίνες γάμα) εκπέμπεται από πηγές κατάλληλα τοποθετημένες στο έδαφος και μετρείται από ανιχνευτές που τοποθετούνται πάνω από το έδαφος. Πολλοί τύποι οργάνων εκμεταλλεύονται την αραίωση των ακτινών γάμα ή των νετρονίων όταν περνούν μέσα από το νερό και χρησιμοποιούνται για τη

μέτρηση της ισοδυναμίας του νερού στις χιονοκαλύψεις. Μία έκδοση περιέχει μια αυθεντική πηγή ακτινών γάμα ( $^{60}\text{Co}$  or  $^{137}\text{Cs}$ ) και έναν ανιχνευτή, ένας από τους οποίους είναι στην επιφάνεια του εδάφους με τον άλλον να βρίσκεται από πάνω του. Οι αναγνώσεις από τον ανιχνευτή μεταφέρονται μέσω τηλεμετρίας από την περιοχή στον παρατηρητή. Η ακτινοβολία διαπερνά το ύψος του χιονιού αλλά ένα μέρος της, ανάλογο της μάζας του χιονιού, απορροφάται από το χιόνι. Έτσι μπορεί να συσχετιστεί άμεσα η μετρούμενη απορρόφηση της ακτινοβολίας με το ισοδύναμο ύψος του νερού. Για τη μέτρηση του ισοδύναμου ύψους νερού της χιονοκάλυψης μικρότερου των 400 mm, μπορεί να αξιοποιηθεί η φυσική γήινη ακτινοβολία γάμα. Αυτό το γεγονός έχει το πλεονέκτημα ότι η μέτρηση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο χωρίς να προηγηθεί η εγκατάσταση ραδιενεργού πηγής. Μάλιστα, είναι δυνατό μια συστηματική εναέρια επιθεώρηση με αυτή τη μέθοδο (με χαμηλή πτήση τυπικού ύψους μικρότερο από 150 m) να δώσει τη χωρική κατανομή του ισοδύναμου ύψους χιονόπτωσης (World Meteorological Organization, 1983, Κουτσογιάννης, 1999).

### **3.1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ RADAR**

Η επιχειρησιακή εφαρμογή των μετεωρολογικών ραντάρ (ή ραντάρ καιρού – weather radar) για τη μέτρηση βροχοπτώσεων σε μεγάλες επιφάνειες ξεκινά από τη δεκαετία του 1980, παρόλο που η χρήση του κοινού ραντάρ για τον εντοπισμό βροχοπτώσεων είναι αρκετά παλαιότερη.

Το ραντάρ αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή των μικροκυμάτων.

(α) Η ακτινοβολία μικρών κυμάτων (μήκη κύματος από 0,1 – 50 cm) συμπεριλαμβανομένου του ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ισοδυναμίας του νερού. Τα εγκατεστημένα συστήματα των κυμάτων αυτών έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν διαπεράσουν τα σύννεφα. Όμως πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την παρατήρηση. Η τήξη, με την επίδραση της ακτινοβολίας των μικροκυμάτων, του χιονοστρώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το μέγεθος του κόκκου και από τις εδαφικές συνθήκες όπως και

από την πυκνότητα. Επομένως, πληροφορίες σχετικά με τις εδαφικές συνθήκες απαιτούνται για την μέτρηση των εκπομπών των παθητικών μικροκυμάτων, για τη μέτρηση της ισοδυναμίας του νερού και η έρευνα συνεχίζεται ακόμη για την εξαγωγή αξιόπιστων αλγορίθμων για τον ακριβέστερο υπολογισμό.

(β) Ο πομπός εκπέμπει παλμούς μικροκυμάτων, οι οποίοι ανακλώνται από τα υδρομετέωρα που συναντούν στη διαδρομή τους (ή οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο) και το σήμα που επιστρέφει λαμβάνεται από το δέκτη, μεγεθύνεται και αναλύεται κατάλληλα. Ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή και στη λήψη δείχνει την απόσταση του «στόχου», που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το κατακρημνίσιο συστατικό, ενώ η ισχύς του σήματος που επιστρέφει σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος των υδρομετεώρων και έμμεσα με την ένταση των κατακρημνισμάτων στην περιοχή του στόχου. Πιο συγκεκριμένα, η ισχύς του σήματος  $P$  που επιστρέφει μετά από αντανάκλαση σε μια περιοχή της ατμόσφαιρας σε απόσταση  $r$  από το ραντάρ, όπου πραγματοποιείται κατακρήμνιση, δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{CLZ}{r^2}$$

Όπου:

C: σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ραντάρ,

L: συντελεστής που σχετίζεται με την εξασθένιση του σήματος και

Z: ο συντελεστής αντανάκλαστικότητας του ραντάρ.

Ο συντελεστής Z σχετίζεται άμεσα με την ένταση των κατακρημνισμάτων R μέσω εξισώσεων της μορφής:  $R = aZ^b$ , που είναι γνωστές ως σχέσεις Z-R. Οι παράμετροι a και b αυτών των σχέσεων εξαρτώνται από τον (μετεωρολογικό) τύπο της κατακρήμνισης και μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή (Meneghini and Kozu, 1990, Newsome, 1992, Smith, 1993, Μιμίκου 1999)

Η χρονική διακριτότητα των μετρήσεων ραντάρ φτάνει το 1 min και η χωρική διακριτότητα το 1 x 1 km. Συνήθως οι μετρήσεις δίνονται για αδρότερες από αυτές τις διακριτότητες. Η εμβέλεια των ραντάρ μπορεί να ξεπερνά τα 200 km, αλλά είναι προφανές ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση τόσο μειώνεται η ακρίβεια της μέτρησης. Σύμφωνα με τους Linsley et al. (1975), και Dingman, (1995), οι μετρήσεις του ραντάρ σε ακτίνα 110 km κυμαίνονται ανάμεσα στο

μισό και στο διπλάσιο των αντιστοίχων μετρήσεων από βροχομετρικούς σταθμούς εδάφους. Προφανώς, αν τα δεδομένα των σταθμών εδάφους χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση των μετρήσεων του ραντάρ, το σφάλμα μειώνεται. Σε μια περίπτωση που εξετάζεται από τον Brandes (1975), το σφάλμα μειώθηκε από 52% σε 18% όταν μαζί με τα δεδομένα του ραντάρ χρησιμοποιήθηκαν και οι μετρήσεις ενός βροχογράφου.

Τέλος, μπορούμε να αναφέρουμε επιγραμματικά, ότι το ραντάρ εκπέμπει μια ευθυτενή δέσμη μικροκυματικής ακτινοβολίας πάνω στο χιονόστρωμα και μετράει την ανακλώμενη ακτινοβολία, για να εξάγει τα χαρακτηριστικά του. Όσο αυτή η ακτινοβολία μπορεί να εισχωρεί μέσα στο στρώμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξάγει πληροφορίες σχετικά με τη στρωματογραφία του χιονιού και την περιεκτικότητα σε νερό υγρής μορφής όπως επίσης και την ισοδυναμία νερού εάν πληροφορίες σχετικά με την επικάλυψη και την τοπογραφία είναι διαθέσιμες (Κουτσογιάννης, 1999, Μιμίκου 1999).

### **3.2 ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

#### **Γενικά:**

Εκτός από τις μεθόδους μέτρησης του πάχους του χιονιού και του ισοδύναμου ύψους νερού με τα όργανα που προαναφέρθηκαν, πολύ σημαντικός παράγοντας για την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού αποτελεί η με κατάλληλο τρόπο μέτρηση της έκτασης της χιονοκάλυψης. Όλες οι περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 40° N, έχουν μια σημαντική εποχιακή χιονοκάλυψη συγκεκριμένης διάρκειας. Αυτό αποτελεί περίπου το 42% του Βορείου Ημισφαιρίου. Οι τοποθεσίες που επηρεάζονται από ωκεανούς και υψόμετρα, είναι τοποθεσίες που επηρεάζουν και την ποσότητα των κατακρημνισμάτων, που πέφτουν σαν χιόνι. Εξαιτίας της έλλειψης επαρκούς γνώσης στην διαδικασία της απορροής, είναι δύσκολο να φτιαχτεί μια συνάρτηση για την μέτρηση της απορροής από την τήξη του χιονιού. Ο L'vonich (1974), ανέφερε ότι περισσότερο από το 50% της ετήσιας απορροής στο Βόρειο Ημισφαίριο οφείλεται στην τήξη του χιονιού. Για αυτό είναι πολύ σημαντικό να εξαχθούν κατάλληλα ακριβείς μέθοδοι για την μέτρηση της χιονοκάλυψης, που είναι το πρώτο βήμα για την διεξαγωγή ορθών μοντέλων

τήξης, δηλαδή εύρεσης του ισοδύναμου ύψους νερού που παράγεται από το χιόνι (SWE).

### **3.2.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ**

Μια άλλη πηγή πληροφορίας για την επιφανειακή κατανομή των βροχοπτώσεων (χιονοπτώσεων) παρέχουν σήμερα οι μετεωρολογικοί δορυφόροι. Η σχετική πληροφορία εξάγεται από εικόνες (images) που λαμβάνονται από δορυφόρους τόσο στην ορατή, όσο και στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Engman and Gurney, 1991) (Engman, 1993). Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι εικόνες στην υπέρυθρη περιοχή, δεδομένου ότι από τις μετρήσεις της ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών μπορεί να εξαχθεί, μέσω του νόμου των Stefan-Boltzmann, η θερμοκρασία των σωμάτων που εκπέμπουν την ακτινοβολία και, εν προκειμένω, των σύννεφων στην ανώτερη περιοχή τους. Με δεδομένη τη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας, η θερμοκρασία της ανώτερης περιοχής των σύννεφων μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους των σύννεφων. Μικρή θερμοκρασία της κορυφής των σύννεφων συνεπάγεται μεγάλο πάχος σύννεφων και κατά συνέπεια μεγάλη πιθανότητα κατακρήμνισης. Με σύγκριση των αναλύσεων των υπέρυθρων εικόνων με πραγματικά βροχομετρικά (χιονομετρικά) δεδομένα εδάφους, προκύπτουν εμπειρικές σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του ύψους βροχής (χιονιού) σε περιοχές που δεν διαθέτουν βροχομετρικούς (χιονομετρικούς) σταθμούς.

Οι εκτιμήσεις των κατακρήμνισμάτων από δορυφορικές μετρήσεις, αν και χονδροειδείς, είναι πολύτιμες για μεγάλες περιοχές που δεν μπορούν να μετρηθούν από σταθμούς εδάφους. Ειδικότερα, αποτελούν τη μόνη συστηματική πληροφορία για τη βροχή στους ωκεανούς, που καλύπτουν το 70% της γης (Κουτσογιάννης, 1999).

### **3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΑΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Αποτελεί μεθοδολογία μέτρησης της έκτασης του χιονιού και του πάγου. Με μια ποικιλία αισθητηρίων συσκευών εξ' αποστάσεως μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να παρακολουθήσουμε την έκταση του χιονιού. Η καλύτερη

εφαρμογή έχει γίνει στην ορατή και κοντινότερη υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η κόκκινη λωρίδα (0,6 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) του υποσυστήματος του πολυφασματικού σαρωτή (MSS) στο δορυφόρο Landsat χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για τη χαρτογράφηση του χιονιού. Αρχικά, η έκταση της χαρτογράφησης γινόταν με το χέρι χρησιμοποιώντας photo-interpretive συσκευές και MSS φωτογραφίες (Bowley et al. 1981). Προσφάτως, η ψηφιακή χαρτογράφηση έχει προτιμηθεί (Baumgartner et al. 1986, 1987, Dozier και Marks, 1987, Baumgartner και Rango, 1995).

(α) Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρεμπόδιζε τη χαρτογράφηση από τον Landsat (και SPOT) στο παρελθόν ήταν η κακή συχνότητα παρατήρησης. Βάσει του δορυφόρου Landsat, κάθε περιοχή που μελετάται παρατηρείται ξανά μόνο κάθε 16 - 18 ημέρες. Σε περιοχές με τα λιγότερα σύννεφα, κατά τη διάρκεια της τήξης του χιονιού, υπάρχει ικανοποιητική συχνότητα παρατήρησης. Στις περισσότερες ορεινές χιονισμένες περιοχές, παρ' όλα αυτά, η συχνότητα παρατήρησης είναι ανεπαρκής επειδή συνήθως εμπόδιο αποτελούν τα σύννεφα, τα οποία καθιστούν δύσκολη έως αδύνατη την παρατήρηση χιονιού μεγαλύτερου βάθους από τους αισθητήρες του δορυφόρου.

Ένα φασματικό κανάλι (1,55 - 1,75  $\mu\text{m}$ ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στην χαρτογράφηση όταν τα σύννεφα καλύπτουν εν μέρει την υπό εξέταση περιοχή. Σε αυτό το φάσμα, τα σύννεφα συνήθως προκαλούν αντανάκλασεις περισσότερες από το χιόνι (Dozier, 1989). Ως αποτέλεσμα, είναι δυνατή η αυτόματη διάκριση μεταξύ χιονιού και σύννεφων. Αν και χρήσιμη, αυτή η ικανότητα δεν υπερνικά το πρόβλημα της πλήρους κάλυψης από σύννεφα ή μιας ανεπαρκούς συχνότητας για παρατήρηση.

(β) Όταν μια περιοχή είναι εν μέρει καλυμμένη, άλλη μια μέθοδος έχει προβλεφθεί για την εκτίμηση της κάλυψης του χιονιού σε μέρη που καλύπτονται από σύννεφα (Lichtenegger et al. 1981, Baumgartner et al. 1986, Ehrler et al. 1997). Χρησιμοποιούνται ψηφιακά τοπογραφικά δεδομένα και θεωρείται ως δεδομένο ότι εικονοστοιχεία με ίσο υψόμετρο, προσανατολισμό και κλίση έχουν την ίδια σχετική κάλυψη σε όλη την κοιλάδα (παραδοχή). Με αυτή την μέθοδο παραδοχής, πληροφορίες από το κομμάτι της περιοχής που



είναι ακάλυπτο από σύννεφα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί το χιόνι σε μέρη που είναι καλυμμένα από σύννεφα. Είναι μια μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μικρά ποσοστά σφάλματος, μόνο σε ομοιογενείς περιοχές.

(γ) Ως αποτέλεσμα του προβλήματος της συχνότητας παρατήρησης του Landsat (και SPOT), πολλοί χρήστες έχουν στραφεί στο δορυφόρο NOAA, που βρίσκεται σε πολική τροχιά με το AVHRR, ο οποίος έχει ανάλυση περίπου 1 km σε μήκος κύματος 0,58 - 0,68 μm στην ερυθρά περιοχή. Η συχνότητα κάλυψης είναι δυο φορές κάθε 24 ώρες (1 πέρασμα την ημέρα και 1 τη νύχτα). Το κυριότερο πρόβλημα με τα NOAA-AVHRR δεδομένα είναι ότι η ανάλυση του 1 km μπορεί να είναι ανεπαρκής για τη χαρτογράφηση σε μικρές περιοχές. Καθώς το βραδινό πέρασμα του NOAA-AVHRR δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογράφηση στο ορατό φάσμα, μόνο οι μισές πτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Παρ' όλα αυτά, αρκετοί δορυφόροι NOAA μπορεί να περάσουν σε συγκεκριμένες τοποθεσίες σε διαφορετικές ώρες μια δεδομένη μέρα.

Παρ' όλα τα διάφορα προβλήματα που έχουν αναφερθεί, οι ορατές εικόνες από αεροσκάφη και δορυφόρους είναι πολύ χρήσιμες για την παρακολούθηση της συσσώρευσης του χιονιού σε μια κοιλάδα και ακόμη περισσότερο για την τήξη του την περίοδο της άνοιξης. Η εξάντληση του χιονιού είναι σημαντικό να παρακολουθείται με σκοπό να γίνονται καλύτερες προβλέψεις για το ισοδύναμο νερό που προέρχεται από την τήξη του χιονιού. Έχουν γίνει συστάσεις (Rango, 1985) ότι η βέλτιστη συχνότητα παρακολούθησης του χιονιού κατά τη διάρκεια της τήξης θα ήταν 1 φορά τη βδομάδα. Βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, θα ήταν δύσκολο να έχουμε αυτή τη συχνότητα. Συγκεκριμένες εφαρμογές για το νερό που προέρχεται από την τήξη ήταν δυνατές με μόλις 2 ή 3 παρατηρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της τήξης (Rango, 1985).

Υπάρχουν αρκετά **πλεονεκτήματα** με τη χρήση ορατών δεδομένων από δορυφόρους για εφαρμογές στο χιόνι και στον πάγο:

(α) είναι σχετικά εύκολο να αναλυθούν και να ερμηνευθούν τα δεδομένα και είναι επίσης σχετικά εύκολο να ξεχωρίσουμε τις περιοχές με χιόνι από τις

περιοχές χωρίς χιόνι (όπως και τις περιοχές με πάγο από εκείνες χωρίς πάγο). Εάν είναι απαραίτητο, η ανάλυση των ορατών δεδομένων από δορυφόρους για τη χαρτογράφηση του χιονιού μπορεί να επιτευχθεί με ειδικό λογισμικό (Baumgartner και Rango, 1995). Τα ορατά δεδομένα από δορυφόρο είναι διαθέσιμα σε ένα φάσμα αναλύσεων από 20 m ανάλυση (SPOT) μέχρι 8 km ανάλυση (δορυφόρο NOAA) η οποία επιτρέπει εφαρμογές με μικρές περιοχές μέχρι και εφαρμογές σε περιοχές τόσο μεγάλες όσο μια ήπειρος (Schultz – Engman, EDS, 2000).

Υπάρχουν επίσης αρκετά **μειονεκτήματα** στη χρήση ορατών δορυφορικών δεδομένων για τη χαρτογράφηση του χιονιού και του πάγου. Τίποτε δε μπορεί να γίνει γνωστό άμεσα για SWE (Snow Water Equivalent) ή το πάχος του χιονιού από ορατά δεδομένα. Η έκταση του χιονιού είναι πολύτιμη στην πρόβλεψη του νερού που προέρχεται από την τήξη του χιονιού, αλλά τα σύννεφα μπορεί να είναι μεγάλο πρόβλημα διότι περιορίζουν την παρατήρηση, ειδικά όταν η συχνότητα της παρατήρησης είναι κάθε 16 μέρες (Schultz – Engman, EDS, 2000).

### **3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ**

Οι θερμικές υπέρυθρες, έχουν μικρή δυνατότητα για τη χαρτογράφηση της χιονοκάλυψης μιας περιοχής και του αντίστοιχου ισοδύναμου νερού που παράγεται από την τήξη του χιονιού.

(α) Η χαρτογράφηση με θερμικές υπέρυθρες, όπως και η ορατή χαρτογράφηση, παρεμποδίζεται από τα σύννεφα.

(β) Επιπλέον, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του χιονιού, σε μεγάλες εκτάσεις, μπορεί να ποικίλει, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλη ανομοιομορφία. Αυτό κάνει εξαιρετικά δύσκολη τη διαχώριση της έκτασης που είναι καλυμμένη με χιόνι από άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους, ιδιαίτερα κατά την περίοδο της τήξης. Κατά την περίοδο αυτή, η θερμότητα που εκλύεται από την τήξη προκαλεί σύγχυση στα όργανα, και υπάρχει κίνδυνος να χαρτογραφηθεί μη χιονοκαλυμμένη έκταση, ως χιονοκαλυμμένη. Όταν τα σύννεφα το επιτρέπουν, το μεγάλο πλεονέκτημα της θερμικής χαρτογράφησης είναι ότι αυτή μπορεί να γίνει και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σε εκτιμήσεις του ισοδύναμου νερού

που προκύπτει από το χιόνι, ο έλεγχος της θερμοκρασίας της επιφάνειας του χιονοστρώματος μπορεί να έχει άμεση εφαρμογή στην χαρτογράφηση των περιοχών μιας περιοχής κατά τη διάρκεια της τήξης. Εάν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι πάντα κάτω από 0 °C δεν υπάρχει τήξη. Εάν η επιφάνεια έχει θερμοκρασία 0 °C την ημέρα και κάτω από το 0 °C τη νύχτα, η τήξη γίνεται. Εάν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι στο 0 °C και τη μέρα και τη νύχτα τότε είναι πολύ πιθανό ότι το χιονόστρωμα είναι ισοθερμικό, η τήξη γίνεται και νερό απελευθερώνεται από τη βάση του χιονοστρώματος το οποίο απορρέει επιφανειακά. Αρκετή έρευνα πρέπει να γίνει για να καθοριστεί το κατά πόσο οι θερμικές υπέρυθρες μπορεί να παίξουν σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση και πρόβλεψη του ισοδύναμου νερού που προέρχεται από την τήξη (SWE), (Schultz – Engman, EDS, 2000)

### **3.2.4 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ**

Το χιόνι στην επιφάνεια της γης είναι η συσσώρευση κρυστάλλων ή κόκκων πάγου, που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χιονοστρώματος το οποίο μπορεί να καλύψει μια περιοχή ολοκληρωτικά ή εν μέρει. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του χιονοστρώματος καθορίζονται από τις μικροκυματικές ιδιότητες. Η ακτινοβολία μικροκυμάτων που εκπέμπεται από τα κατώτερα στρώματα του εδάφους διασκορπίζεται σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις από τους κόκκους του χιονιού μέσα στο χιονόστρωμα (διάχυση), που έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μικροκυμάτων στην κορυφή της επιφάνειας του χιονιού, η οποία είναι μικρότερη από την εκπομπή στο έδαφος.

Οι ιδιότητες που επηρεάζουν την αντίδραση των μικροκυμάτων από το χιονόστρωμα αφορούν:

- (α) το αντίστοιχο ύψος του χιονιού και την αντίστοιχη ποσότητα ισοδύναμου νερού που μπορεί να εξαχθεί,
- (β) την περιεκτικότητα του χιονοστρώματος σε νερό υγρής φάσης,
- (γ) την πυκνότητα του στρώματος,
- (δ) το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων,
- (ε) τη θερμοκρασία και την διάταξη των διαφόρων στρωμάτων του χιονοστρώματος,

(στ) την κατάστασή του, (ξηρό / υγρό) καθώς επίσης και

(ζ) την έκταση της κάλυψης του εδάφους.

Η επίδραση της ακτινοβολίας των μικροκυμάτων στο χιονόστρωμα κάνει δυνατή την παρακολούθηση της κάλυψης του χιονιού με τη χρήση τεχνικών μικροκυμάτων εξ αποστάσεως έτσι ώστε να αντλήσει πληροφορίες για την έκταση του χιονιού, το βάθος του, το SWE (Snow Water Equivalent) και την κατάσταση του χιονιού (ξηρό / υγρό). Για την απόκτηση αξιόπιστων πληροφοριών για την έκταση του χιονιού, το βάθος, και το ισοδύναμο του νερού απαιτούνται συνθήκες στεγνού χιονιού, επειδή η παρουσία υγρού μέσα στο χιονόστρωμα αλλάζει δραστικά την εκπομπή του χιονιού, έχοντας ως αποτέλεσμα πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από όταν το χιονόστρωμα ήταν ξηρό. Επομένως, ένα πέρασμα νωρίς το πρωί (τοπική ώρα) είναι η προτιμότερη τροχιά για την απόκτηση πληροφοριών για την κάλυψη του χιονιού έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνθήκες υγρού χιονιού. Αναγνωρίζεται επίσης ότι η γνώση της κατάστασης του χιονοστρώματος είναι χρήσιμη για υδρολογικές εφαρμογές. Η τακτική παρακολούθηση επιτρέπει την ανίχνευση για την έναρξη της τήξης ή της κατάστασης υγρού χιονιού (Goodison και Walker, 1995).

### **ΚΑΛΥΨΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΠΑΓΟ**

Τα δεδομένα από μικροκύματα χρησιμοποιούνται για να συλλέξουμε άλλες κρουσφαιρικές πληροφορίες. Αν και η ανάλυση των παθητικών δορυφορικών δεδομένων από μικροκύματα εμποδίζει τη συλλογή πληροφοριών σε παγετώνες βουνών και σε πάγο ποταμών, τα δεδομένα του δορυφόρου SAR φαίνεται ότι είναι χρήσιμα (Rorr και Nagler, 1993, Leconte και Klassen 1991, Rott και Matzler 1987). Η χαρτογράφηση της χιονογραμμής (έκτασης) στους παγετώνες είναι σημαντική εισαγωγή δεδομένων στα υδρολογικά μοντέλα. Ο Adam et al. (1997) χρησιμοποίησε ERS - 1 C - band, δεδομένα VV SAR για τη χαρτογράφηση της χιονογραμμής των παγετώνων. Η τεχνική μπορούσε να διαχωρίσει το υγρό χιόνι που λιώνει από τον πάγο του παγετώνα, αλλά δε μπορούσε να εφαρμοστεί όταν το χιόνι ήταν ξηρό, επειδή το ξηρό χιόνι ήταν διαφανές στο C - band SAR. Κάποιες έρευνες έχουν γίνει στις εφαρμογές πάγου και τήξης σε κυματοειδώς παγωμένες περιοχές (England, 1990,

Zuerndorfer et al. 1989), αλλά άλλοι αισθητήρες με μεγαλύτερη ανάλυση (π.χ. του Landsat) μπορεί να είναι καταλληλότεροι στη χαρτογράφηση κυματοειδώς παγωμένων περιοχών (Leverington και Duguay, 1997, Duguay και Lewowicz, 1995).

Τα χωρικά και χρονικά σχέδια της δημιουργίας και διάλυσης του πάγου λιμνών μπορούν να παρατηρηθούν χρησιμοποιώντας παθητικές μετρήσεις μικροκυμάτων πάνω από μεγάλες λίμνες εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς μεταξύ της εκπομπής μικροκυμάτων του πάγου των λιμνών και του γλυκού νερού. Εξαιτίας μια πρόχειρης ανάλυσης ραδιομετρητών για δορυφορικά παθητικά μικροκύματα, η τεχνική περιορίζεται σε μεγάλες λίμνες (>100 km<sup>2</sup> σε μέγεθος). Η χρήση παθητικών μικροκυμάτων εξ αποστάσεως για τον καθορισμό του πάχους του πάγου των λιμνών περιορίζεται σε μεγαλύτερα μήκη κυμάτων (π.χ. 1 – 5 GHz συχνότητες), τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν μέσα από μεγάλες ποσότητες πάγου, σε αντίθεση με μικρότερα μήκη κυμάτων (π.χ. 37 GHz) τα οποία εκπέμπονται από την επιφάνεια και είναι ευαίσθητα στη χιονοκάλυψη (Hall και Martinec, 1985). Η πιθανότητα εφαρμογής δεδομένων υψηλότερης συχνότητας για τον υπολογισμό του πάχους του πάγου έχει ερευνηθεί από τον Chang et al. (1997) χρησιμοποιώντας εναέρια δεδομένα μικροκυμάτων και ένα μοντέλο ραδιενεργού στρώματος μεταφοράς για τον υπολογισμό του πάχους του πάγου. Παρόλα αυτά, το μικρό μέγεθος του δείγματος περιόρισε τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης σε μεγάλο βαθμό.

Ο εξ' αποστάσεως εντοπισμός ενεργών μικροκυμάτων έχει πλεονέκτημα σε σύγκριση με τις παθητικές μεθόδους για την απόκτηση πληροφοριών για πάγο λιμνών. Η μεγαλύτερη χωρική ανάλυση σημαίνει ότι οι λίμνες όλων των μεγεθών μπορούν να μελετηθούν. Μαζί με την παροχή χωρικών και χρονικών πληροφοριών για τη δημιουργία και διάλυση του πάγου των λιμνών και του πάχους του πάγου, το ραντάρ backscatter επηρεάζεται από την εσωτερική δομή του πάγου των λιμνών. Ο Hall (1993) μας παρέχει μια γενική άποψη για την αποτελεσματικότητα στην ανάκτηση πληροφοριών για τον πάγο των λιμνών από εξ' αποστάσεως αισθητήρες ενεργών μικροκυμάτων. Η εφαρμογή του δορυφόρου SAR για την εξ' αποστάσεως ανίχνευση του πάγου των

λιμνών έχει ερευνηθεί και παρουσιαστεί πρόσφατα από το δορυφόρο ERS - 1 (π.χ. Hall et al. 1994, Jeffries et al.1994, Leshkevich et al.1994).

Τα δεδομένα παθητικών μικροκυμάτων έχουν αρκετά **πλεονεκτήματα** που δεν προσφέρονται από άλλους δορυφορικούς αισθητήρες. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι τα δεδομένα παθητικών μικροκυμάτων προσφέρουν τη δυνατότητα να αποκτήσουμε σημαντικές πληροφορίες για τη χιονοκάλυψη, όπως το SWE, το βάθος, την έκταση και την κατάσταση του χιονιού. Το SSM / I είναι κομμάτι ενός λειτουργικού δορυφορικού συστήματος, που παρέχει καθημερινή εποπτεία των περισσότερων χιονισμένων περιοχών, με πολλαπλά περάσματα σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, έτσι ώστε να επιτρέπει τη μελέτη της μεταβλητότητας με τη συχνότητα των παρατηρήσεων που παρέχει. Η τεχνική έχει εφαρμογή σε όλους του καιρούς (παρόλο που επηρεάζεται από τη χιονόπτωση στα 85 GHz), και μπορεί να παρέχει δεδομένα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε σχεδόν πραγματικούς χρόνους, και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υδρολογικές προβλέψεις. Ο SAR έχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα ανάλυσης περίπου 25 km έτσι ώστε να είναι πολύ χρήσιμος για ορεινά χιονοστρώματα (Schultz – Engman, EDS, 2000).

Υπάρχουν **μειονεκτήματα** στη χρήση δεδομένων μικροκυμάτων για την απόκτηση πληροφοριών της χιονοκάλυψης για την υδρολογία.

(α) Η πρόχειρη ανάλυση των δορυφορικών αισθητήρων όπως των SMMR και SSM / I (~25 km) είναι περισσότερο κατάλληλη για μελέτες μεγάλων περιοχών, παρόλο που ο Rango et al. (1989) ανακάλυψε ότι σημαντικές SWE εκτιμήσεις θα μπορούσαν να γίνουν και για περιοχές μικρότερες από 10.000 km<sup>2</sup>. Επομένως, η κατανόηση της σχέσης μεταξύ χιονοκάλυψης και επιφάνειας της περιοχής (π.χ. Goodison et al.1981) είναι σημαντική στην ανάπτυξη εξ' αποστάσεων εφαρμογών στην υδρολογία όπως και για τις συμβατικές υδρολογικές αναλύσεις σε περιοχές καλυμμένες με χιόνι.

(β) Άλλο ένα μειονέκτημα προκύπτει από την αλλαγή των συνθηκών του χιονοστρώματος κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Σκοπός είναι η απαλοιφή των διαφορετικών συνθηκών που δημιουργούνται, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ορθότητα των μετρήσεων. Κυρίως κατά τη διάρκεια του

τέλους της εποχής, που αρχίζει να αυξάνεται η θερμοκρασία και παρατηρείται το φαινόμενο της τήξης του χιονοστρώματος, αλλάζει το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, γεγονός που επηρεάζει την εκπομπή μικροκυμάτων που διαπερνούν το στρώμα αυτό του χιονιού. Σε περιοχές με πολύ χαμηλή θερμοκρασία, το βάθος του χιονοστρώματος χαρακτηρίζεται από την πολύπλοκη κρυσταλλική του δομή, αυξάνοντας τη διασπορά (διάχυση) στην ακτινοβολία μικροκυμάτων, παράγοντας μια υπερεκτίμηση του SWE ή του βάθους του χιονιού (Hall, 1987 και Armstrong et al. 1993). Ο καλύτερος τρόπος για να λυθεί το πρόβλημα της επιρροής των μετρήσεων της εκπομπής μικροκυμάτων από το χιονόστρωμα, από την εποχιακή μεταβλητότητα, είναι να συγκεντρωθεί μια χρονοσειρά από δορυφορικά δεδομένα εκτεινόμενη σε όλη τη διάρκεια της εποχής, που αργότερα θα μπορεί να συσχετιστεί με τις αλλαγές στο σύνολο κατά τη διάρκεια της εποχής. Το γεγονός αυτό θα μειώσει το ποσοστό σφάλματος αφού οι τιμές θα μπορούν να συσχετιστούν και να προσαρμοστούν μεταξύ τους (Walker et al. 1995).

(γ) Τα δεδομένα SAR μειονεκτούν επειδή δεν είναι ικανά να εντοπίσουν το στεγνό χιονόστρωμα. Επιπροσθέτως, τα δεδομένα SAR είναι δύσκολο να επεξεργαστούν τη διάχυση από τραχύ στρώμα, που δημιουργείται από την ανομοιομορφία των κόκκων λόγω διαφορετικότητας των στρωμάτων κάτω από το χιόνι, προκαλώντας ερμηνευτικά προβλήματα. Οι βέλτιστες περιοχές, περίπου στο 1 cm μήκους κύματος, δεν είναι αντιπροσωπευτικές σε κανένα υπάρχον ή προγραμματισμένο όργανο SAR (Schultz – Engman, EDS, 2000).

### **3.2.5 ΧΑΡΤΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ ΧΕΡΙ**

Είναι πιθανό να χρησιμοποιήσουμε ένα κύριο χάρτη, όπως μια απεικόνιση Landsat (δορυφορική) χωρίς χιόνι και να χαρτογραφήσουμε τη θέση της χιονογραμμής σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Αυτή η προσέγγιση είναι επίσης πιθανή και από το έδαφος σε μια πολύ μικρή περιοχή (μικρότερη από πολλά km<sup>2</sup>) ανεβαίνοντας στο υψηλότερο σημείο και μεταφέροντας ορατά την περιοχή που καλύφτηκε από χιόνι στον κύριο χάρτη. Αυτές οι τεχνικές είναι άκρως χρήσιμες όπου η πρόσβαση στη περιοχή ή η χρήση αεροπορικών μέσων είναι εύκολα προσεγγίσιμες.

### **3.2.6 ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ**

Επίσης είναι πιθανό να ληφθούν φωτογραφίες από δορυφόρο και να χαρτογραφηθεί χειροκίνητα η περιοχή που έχει καλυφθεί με χιόνι ώστε να αποταμιευθεί ένα σημαντικό ποσό χρημάτων. Τα λογισμικά συστήματα έχουν γίνει τόσο οικονομικά και εύχρηστα, που η πρόσβαση της φωτοερμηνείας δε χρησιμοποιείται πάρα πολύ πλέον (Schultz – Engman EDS, 2000).

## **3.3 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

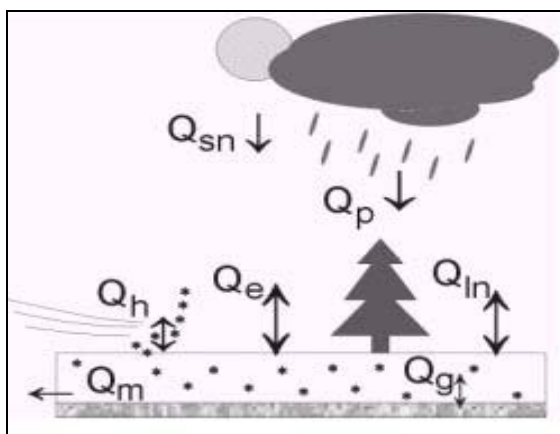
### **3.3.1 NOHRSC- ΟΡΓΑΝΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Υπάρχουν χιονομετρικά δεδομένα από τη δεκαετία του '60, με αποτέλεσμα μια ομάδα επιστημόνων να έχει υλοποιήσει μια σειρά πολύ χρήσιμων εφαρμογών. Μια ομάδα επιστημόνων από μια ποικιλία αμερικανικών κυβερνητικών οργανισμών ανέπτυξε σχέδια στις αρχές του '80 για λειτουργική χαρτογράφηση χιονιού από την αμερικανική NWS (National Water Service) για υδρολογικούς σκοπούς. Το 1986, η NWS υιοθέτησε αυτά τα σχέδια και προχώρησε στην ανάπτυξη λειτουργικών εξ' αποστάσεων οργάνων, κυρίως για την υδρολογία του χιονιού. Τα πιο διαδεδομένα όργανα της NWS NOHRSC, είναι περιοδικοί χάρτες της έκτασης της χιονοκάλυψης σε ποταμούς από δεδομένα NOAA-AVHRR και από δεδομένα του Γεωστατικού Λειτουργικού Περιβαλλοντολογικού Δορυφόρου (GOES) υψομετρικής ζώνης (Carroll, 1995). Η διανομή και επεξεργασία των δεδομένων γίνεται μέσα από μια ποικιλία ηλεκτρονικών εργαλείων όπως το internet και με τη βοήθεια του Geographic Information System (GIS).

Τα διανεμημένα μοντέλα της συσσώρευσης και τήξης του χιονιού είναι πολύ σημαντικό θέμα. Πρόσφατη πρόοδος στην τεχνολογία GIS επιτρέπει δυναμική ολοκλήρωση με αναλυτικά εργαλεία και εργαλεία γραφικής απεικόνισης



βασισμένα σε φυσικά υδρολογικά μοντέλα. Ειδικά το κομμάτι της γραφικής απεικόνισης είναι απαραίτητο στην κατανόηση του εκάστοτε εξεταζόμενου φαινομένου. Η υπό εξέταση περιοχή χωρίζεται σε εικονίδια (pixels) που κάθε ένα από αυτά παρέχει την δική του πληροφορία, που η πρόσβαση σε αυτή είναι εύκολη και αυτοματοποιημένη. Στον τομέα των μοντέλων τήξης του χιονιού, αυτή η δυναμική ανάπτυξη προσφέρει αξιόλογη βάση για την καλύτερη κατανόηση της συσσώρευσης του χιονιού και για τη διαδικασία τήξης και επιφανειακής απορροής. Όπως έχει προαναφερθεί, η φυσική διαδικασία που συμβαίνει μέσα στο χιονόστρωμα και προκαλεί την τήξη, είναι πολύπλοκη. Συμπεριλαμβάνεται στη διαδικασία υπολογισμού, ενεργειακό ισοζύγιο και ισοζύγιο μάζας όπως επίσης μεταφορά μάζας και θερμότητας. Επίσης αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την εισαγωγή στον υπολογισμό υδρολογικών και γεωγραφικών τοπικών παραγόντων που επηρεάζουν τις μετρήσεις με αποτέλεσμα να έχω πιο αξιόπιστες πληροφορίες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική διαδικασία ανταλλαγής ενεργειών με την επιφάνεια του χιονοστρώματος. Το στρώμα του χιονιού που έχει κατακρημνιστεί αλληλεπιδρά με το έδαφος και με την ατμόσφαιρα μέσα από τη διαδικασία ανταλλαγής που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Θερμική ενέργεια εισρέει υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλώντας την τήξη του χιονοστρώματος και την επακόλουθη απορροή του είτε επιφανειακά, είτε εντός του χιονοστρώματος είτε διηθείτε στο έδαφος αυξάνοντας την υγρασία του.



ΣΧΗΜΑ 3.1: Σχηματικό διάγραμμα ανταλλαγής ενεργειών.  $Q_{sn}$ , καθαρή ηλιακή ακτινοβολία,  $Q_{ln}$ , καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων,  $Q_p$ , θερμοκρασία που

εισρέει με την κατακρήμνιση,  $Q_h$ , λογική θερμότητα,  $Q_e$ , λανθάνουσα θερμότητα εξάχνωσης / συμπύκνωσης,  $Q_g$ , εισροή θερμότητας από το έδαφος,  $Q_m$ , θερμότητα που απομακρύνεται από την τήξη.

Μαζί με την παραγωγή λειτουργικών δεδομένων για την έκταση της χιονοκάλυψης, ο NOHRSC παρέχει λειτουργικά δεδομένα για την πυκνότητα του χιονιού, με χρήση εναέριας γάμα ακτινοβολίας. Η διαφορά μεταξύ των εναέριων μετρήσεων ακτινοβολίας του NOHRSC πάνω από γυμνό έδαφος κι από έδαφος καλυμμένο με χιόνι χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του μέσου SWE με περιθώριο λάθους λιγότερο ενός εκατοστού (Carroll, 1995). Αμέσως μετά από κάθε εναέρια έρευνα, το SWE που βγαίνει μετά από κάθε πτήση χρησιμοποιείται σε ένα GIS για να παράγει μια επιφάνεια καμπύλης του SWE για την περιοχή της έρευνας. Μετά από κάθε έρευνα, οι χρήστες των δεδομένων μπορούν να αποκτήσουν με ηλεκτρονικά μέσα ένα ισουΐψή χάρτη του SWE στη περιοχή και το μέσο SWE για κάθε κομμάτι αποστράγγισης της ευρύτερης περιοχής (Schultz – Engman, EDS, 2000).

### **3.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ**

#### **3.4.1 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ**

Το πιο σημαντικό πρόβλημα που εμποδίζει την αποτελεσματική εξαγωγή της ισοδύναμης ποσότητας νερού από την τήξη του χιονιού, χαρτογραφώντας από το διάστημα μέσω δορυφόρων, είναι η ελλιπής ανάλυση στα μικροκύματα. Αυτό, πρόκειται να αλλάξει από τη στιγμή που κάποια νέα όργανα παθητικών μικροκυμάτων όπως το Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) στο EOS θα τεθούν σε τροχιά στο διάστημα, προσπαθώντας να βελτιώσουν την ανάλυση σε 0,8 cm περίπου μήκος κύματος και από τα υπάρχοντα 25 km απόσταση, στα προτεινόμενα 8 km. Αυτό θα δώσει στους ερευνητές, που πειραματίζονται με τις δυνατότητες στα 25 km, την ευκαιρία να συγκρίνουν τα βελτιωμένα πλεονεκτήματα της ανάλυσης των παθητικών μικροκυμάτων, πάνω σε περιοχές που χρησιμοποιούνταν παλιότερα (Schultz – Engman EDS, 2000).

#### **3.4.2 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ**

Ένα δύσκολο πρόβλημα που επικρατούσε ήταν η αδυναμία εξαγωγής ενός αλγόριθμου ο οποίος να έχει ευρύτατη εφαρμογή. Η δυσκολία του γεγονότος αυτού ενισχυόταν από την άμεση εξάρτηση των μετρήσεων χαρτογράφησης από τοπικούς παράγοντες που αφορούσαν μόνο τη συγκεκριμένη περιοχή (άνεμος, θερμοκρασία, ανάγλυφο), καθώς επίσης το φαινόμενο εντεινόταν και από την αδυναμία των οργάνων να προσφέρουν ακριβή δεδομένα μετρήσεων.

Σήμερα, επομένως έχει γίνει προσπάθεια από διάφορα ερευνητικά προγράμματα να εξαχθεί μοναδικός αλγόριθμος που να παράγει αντιπροσωπευτικές τιμές μέτρησης χιονοκάλυψης σε παγκόσμια κλίμακα (π.χ. Goodison και Walker, 1995, Solberg et al. 1998).

Το 1992 μια στρατηγική για μελλοντική ανάπτυξη αλγορίθμου χιονοκάλυψης είχε προκύψει από την επιστημονική κοινότητα ερευνών παθητικών μικροκυμάτων σε διεθνές επίπεδο - «Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions». Οι προτεραιότητες που διευκρινίστηκαν για τη εξαγωγή αυτής της εφαρμογής συμπεριλάμβαναν:

(α) την ανάγκη για έρευνα χρησιμοποιώντας επίγεια ραδιομετρία μικροκυμάτων για να γίνει κατανοητή η επιρροή της φυτοκάλυψης και οι φυσικές διακυμάνσεις στη δομή του χιονοστρώματος,

(β) την ανάπτυξη των θεωρητικών μοντέλων για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αλληλεπίδραση των μικροκυμάτων, με στρώματα της χιονοκαλυμμένης έκτασης,

(γ) την ένταξη των πληροφοριών της χιονοκαλυμμένης έκτασης (π.χ. τύπος και πυκνότητα) σε αποκατεστημένους αλγορίθμους χιονοκάλυψης,

(δ) την ανάλυση της περιοχής με ακριβείς μετρήσεις χιονοκάλυψης για την ανάπτυξη και εγκυρότητα αλγορίθμων, και

(ε) την έρευνα των «mixed pixels» που χαρακτηρίζονται από υψηλή ανάλυση σε κατανομή χιονιού (χιονοκάλυψη).

Συνδυάζοντας τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην εκπομπή μικροκυμάτων εξάγονται ποιο αναλυτικά συμπεράσματα σχετικά με την ευκρίνεια των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν για τα pixel. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί σε αυτές τις περιοχές με κοινό σκοπό την ανάπτυξη αλγορίθμων με αξιόπιστες πληροφορίες, δίνοντας έμφαση στις παραμέτρους

χιονοκάλυψης σε μεγαλύτερη έκταση της υδρογείου (Chang et al. 1997, Matzler 1994, Woo et al. 1995, Foster et al. 1996, De Seve et al. 1997, Sun et al. 1997 και Kurvonen και Hallikainen 1997).

### **3.4.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΓΙΑ ΑΙΤΗΣΕΙΣ PANTAP**

Η αίτηση για δορυφορικούς αισθητήρες ενεργών μικροκυμάτων με σκοπό την αποκατάσταση πληροφοριών χιονοκάλυψης, είναι γενικότερα περιορισμένη στον εντοπισμό και στη χαρτογράφηση υγρού χιονιού (Rott, 1993). Συνεπώς, η ανάκτηση προοπτικής των βελτιωμένων πληροφοριών χιονοκάλυψης από τους αισθητήρες ενεργών μικροκυμάτων έχει επικεντρωθεί στα συστήματα πολύ - συχνότητα και πολύ - πόλωση (Rott, 1993).

Το 1994, ένα SAR σύστημα πολύ - συχνότητας και πολύ - πόλωσης (SIR-C/X-SAR) εφαρμοζόταν σε δύο αποστολές Space Shuttle της NASA, για διερεύνηση της πιθανότητας ενός ανεπτυγμένου SAR συστήματος δεδομένων για αποκατάσταση πληροφοριών χιονοκάλυψης. Το SIR-C (Spaceborne Imaging Radar-C) χειριζόμενο σε L- και C-bands και το X-SAR (X-Band Synthetic Aperture Radar) χειριζόμενο σε X-band, είναι συνεπώς ταυτόχρονες πηγές δεδομένων για 3 συχνότητες ραντάρ (1,25, 5,3 και 9,6 GHz). Το SIR-C επίσης χρησιμοποιήθηκε σε 4 διαφορετικές (μετάδοση / λήψη) πολώσεις, για την παροχή πολικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα της έρευνας χιονοκάλυψης χρησιμοποιώντας SIR-C/X-SAR δεδομένα, απέδειξαν ότι είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθεί πολύ - συχνότητα πολικών δεδομένων SAR για να αναπαραχθούν πληροφορίες όπως:

- (α) η διάκριση περιοχών με υγρό χιόνι (Lin και Shi, 1996),
- (β) υγρασία χιονοκάλυψης ή συστατικά υγρού χιονιού (μέγεθος – σχήμα κόκκων) (Shi και Dozier 1995, Matzler et al. 1997) και
- (γ) την αντιστοιχία ισοδύναμου νερού που παράγεται από το στεγνό χιόνι (Shi και Dozier, 1996).

Η διαθεσιμότητα της πορείας των δεδομένων SAR από δορυφόρους είναι περιορισμένη σε μονή συχνότητα και μονή πόλωση. Δυο πολικοί αισθητήρες SAR έχουν εκτοξευθεί. Το Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), εκτοξεύθηκε στην πλατφόρμα European Space Agency's Envisat-1 το 2000, και εφοδιάστηκε C-band, με έναν αριθμό εναλλασσόμενων τρόπων πόλωσης.

Το Radarsat-Z, είναι το Καναδικό Space Agency's C-band ο απόγονος του Radarsat, το οποίο εκτοξεύθηκε στα τέλη του 2001, με νέες προοδευτικές ικανότητες, συμπεριλαμβάνοντας διπλές ή τετραπλές πιθανότητες πόλωσης με επιλεγμένους τρόπους. Η διαθεσιμότητα των πολικών δεδομένων SAR από αυτές τις δορυφορικές πλατφόρμες αποσκοπούν στο να βελτιώσουν τη χρήση αισθητήρων ενεργών μικροκυμάτων για καταγραφή της δεδομένης χιονοκάλυψης, σε συνδυασμό με υδρολογικά δεδομένα (απορροή - τήξη), ειδικά σε μικρά, ορεινά μέρη. Η κατάλληλη συχνότητα και ο συνδυασμός πόλωσης για λειτουργική καταγραφή από μια μονή διαστημική πλατφόρμα, θα είναι πιθανή στο μέλλον (Schultz – Engman, EDS, 2000).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΤΗΞΗ – ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ – ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΞΗΣ - ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΞΗΣ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ-ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΕΕΙ**

### **4.1 ΤΗΞΗ**

Η ανάλυση της τήξης και της απορροής είναι ένα ειδικό κομμάτι της υδρολογικής ανάλυσης. Το χιόνι είναι ο κυριότερος παράγοντας των αποθεμάτων του νερού και ο σημαντικότερος παράγοντας πλημμυρικής απορροής. Είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της τήξης και της απορροής για τον υδρολογικό σχεδιασμό σε έργα πολιτικού μηχανικού όπως: (α) καλλιέργειες, (β) δημοτικά αποθέματα του νερού, (γ) παραγωγή ενέργειας, (δ) ψυχαγωγία, (ε) ναυτιλία, (ε) πλημμυρικό έλεγχο και (στ) έλεγχο της μόλυνσης. Επίσης, ο υπολογισμός της ποσότητας του χιονιού εξαρτάται άμεσα από αξιόπιστες μετεωρολογικές προβλέψεις. Περισσότερο ακριβείς μετεωρολογικές προβλέψεις είναι απαραίτητες, για την βέλτιστη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων. Η συνεχόμενη ανάγκη για ακρίβεια και βελτίωση των μετεωρολογικών προβλέψεων, τονίζεται από τα οικονομικά οφέλη που παράγονται από ένα δεδομένο ποσοστό αύξησης της ακρίβειας της μετεωρολογίας, που θα έχει ως αποτέλεσμα τον ακριβή υπολογισμό του κατακρημνιζόμενου χιονιού και στη συνέχεια του ισοδύναμα παραγόμενου νερού από την τήξη του χιονιού (SWE).

Με σκοπό την κατανόηση της σημασίας του υπολογισμού του ισοδύναμου νερού που παράγεται λόγω της τήξης του χιονιού (SWE), απαιτούνται κάποιες μέθοδοι εκτίμησης. Δυστυχώς όμως τα δεδομένα που απαιτούνται για την λειτουργία των μοντέλων αυτών ή είναι δύσκολο να συλλεχθούν ή απαιτούνται υπερβολικά δύσκολες, στην ακρίβεια και στην μέτρησή τους, πηγές. Επιπροσθέτως, λίγες «ιστορικές» μετρήσεις είναι διαθέσιμες, που κάνουν δύσκολη την ορθότητα των θεωρητικών μοντέλων.

Υπάρχουν όμως εμπειρικά μοντέλα, έναντι των θεωρητικών, που εξαγουν λογικές και αξιόπιστες μετρήσεις της απορροής λόγω τήξης του χιονιού, ειδικά για περίοδο μετρήσεων πάνω από 60 ημέρες. Τα στοιχεία που απαιτούνται για αυτά τα μοντέλα είναι έτοιμα και διαθέσιμα σε πολλές περιοχές. Πριν ακόμα γίνει αναφορά για την ανάπτυξη των μοντέλων είναι δόκιμο να αναφερθούμε:

(α) σε παράγοντες που επηρεάζουν την τήξη και

(β) στις φάσεις που μεσολαβούν μέχρι την τήξη για την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων μέτρησης της τήξης (McCuen, 2005).

## **ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΞΗ ΤΟΥ ΧΙΟΝΙΟΥ**

Το 1973, η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία των ΗΠΑ αποφάσισε να αλλάξει τις τεχνικές πρόγνωσης απορροών που χρησιμοποιούσε μέχρι τότε (Sittner 1973). Οι εμπειρικές τεχνικές αντικαταστάθηκαν από τα συνολικά ομοιώματα λεκάνης και ο Anderson, το ίδιο έτος, ανέπτυξε στο Εργαστήριο Υδρολογίας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ το ομοίωμα συσσώρευσης και τήξης του χιονιού (Snow Accumulation and Ablation model of National Weather Service River Forecast System, NWSRFS, Anderson 1973). Το ομοίωμα αυτό είναι συνολικό, συνεχές και έχει εξελιχθεί ως προς τους αλγόριθμους λειτουργίας του (Anderson 1976, 1978<sub>a,b</sub>). Χρησιμοποιείται από κοινού με το ομοίωμα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας NWSRFS (Soil Moisture Accounting Model of NWSRFS), ή οποιοδήποτε άλλο ομοίωμα βροχόπτωσης- απορροής για προσομοίωση και πρόγνωση απορροών ορεινής λεκάνης. Τα αποτελέσματα (έξοδοι) του ομοιώματος χιονιού αποτελούν δεδομένα εισόδου για το ομοίωμα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας. Έξοδοι του ομοιώματος είναι η απορροή χιονοστιβάδας (νερό βροχής και τήξη που εγκαταλείπει τη χιονοστιβάδα) και η βροχή που πέφτει πάνω σε γυμνό από χιόνι έδαφος.

Το ομοίωμα εκφράζεται από σειρά μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν την αλλαγή αποθήκευσης και θερμότητας στη χιονοστιβάδα. Μεταβλητές εισόδου στο χιονόστρωμα είναι η θερμοκρασία αέρα και η κατακρήμνιση επιφάνειας που εισέρχονται με εξάωρο χρονικό βήμα. Η ημερήσια κατακρήμνιση επιμερίστηκε σε εξάωρα χρονικά διαστήματα, ενώ η εξάωρη

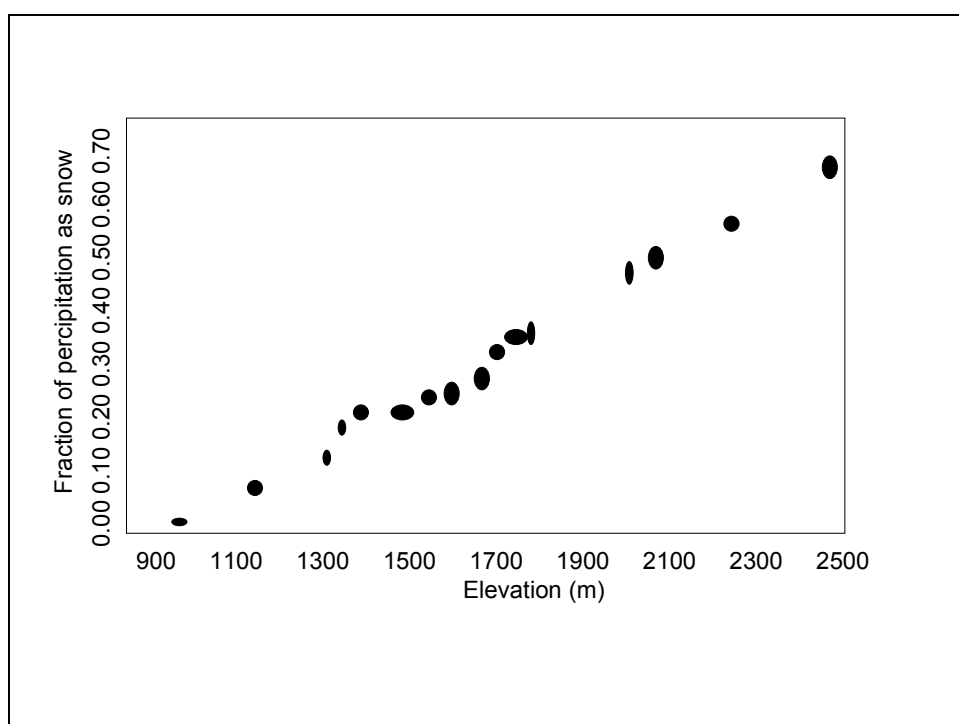
θερμοκρασία υπολογίστηκε, με βάση τις εξισώσεις του Anderson (1973), από μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Οι εισοδοί του ομοιώματος περιορίζονται στη θερμοκρασία αέρα και στην κατακρήμνιση γιατί άλλα δεδομένα απαιτούμενα για τα ισοζύγια θερμότητας που χρησιμοποιεί το ομοίωμα δεν διατίθενται, κατά κανόνα στις ορεινές περιοχές.

Η λειτουργικότητα του ομοιώματος έχει ελεγχθεί σε αρκετές λεκάνες απορροής (Skyland, Creek Upper Columbia, Rock River Iowa, Sacramento California κ.α), και έχει αποδειχθεί ότι για λεκάνες με έντονη υδρολογική δραστηριότητα, όπου σημαντικές χιονοπτώσεις παρατηρούνται το χειμώνα, δεδομένα 10 ετών επαρκούν για την εκτίμηση των παραμέτρων του. Για ημίξηρες ή ξηρές λεκάνες, όπου δεν συσσωρεύονται αρκετές χιονοστιβάδες κάθε έτος, απαιτούνται δεδομένα περισσότερα των 10 ετών για να προσδιοριστούν πλήρως οι παράμετροι του ομοιώματος.

Περιγράφονται λεπτομερώς οι μαθηματικές σχέσεις που αντιπροσωπεύουν τις φυσικές διαδικασίες του ομοιώματος, οι παράμετροι, και οι κλιματικοί και φυσιογραφικοί παράγοντες που προσδιορίζουν τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του.

## 4.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΗΞΗ ΥΨΟΜΕΤΡΟ

Εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας με την άνοδο του υψομέτρου, οι συναρτήσεις των κατακρημνισμάτων που πέφτουν ως χιόνι, για την μέτρηση της ισοδύναμης ποσότητας του νερού, έχουν συχνά ισχυρή εξάρτηση από το υψόμετρο μιας συγκεκριμένης περιοχής.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Ποσοστό κατακρήμνισης που λαμβάνεται ως χιόνι, σαν συνάρτηση του υψομέτρου στο San Bernardino στα βουνά της Νότιας Καλιφόρνια (Στοιχεία από το Minnich, 1986).

Οι ρυθμοί μείωσης της ποσότητας του ισοδύναμου νερού, με το υψόμετρο, ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή και εξαρτώνται από τοπικούς παράγοντες όπως ανάγλυφο και επίσης διαφέρουν από χρόνο σε χρόνο για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Ο Meiman (1968) εξέδωσε πολλές μελέτες σχετικά με την διανομή του χιονιού λόγω υψομέτρου, στην Βόρεια Αμερική και ανέφερε ρυθμούς μείωσης του ισοδύναμου νερού από 0,58 – 22 cm ισοδύναμου νερού ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς. Ο Cain (1975) βρήκε ότι χρόνο με το χρόνο η ισοδυναμία του νερού μειώνεται σε συνάρτηση με το υψόμετρο, στα νότια βραχώδη όρη. Για περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ψηλά όρη, περίπου το 85% της ετήσιας απορροής προέρχεται από το χιόνι (Shafen και Daeman, 1982).

## **ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την μέτρηση του χιονιού, οι ιδιότητες του χιονιού εξαρτώνται άμεσα από το ανάγλυφο της περιοχής, και από την φυτοκάλυψη. Διαφορές στην ισοδύναμη ποσότητα παραγόμενου νερού και στο ύψος του χιονιού που κατακρημνίζεται μπορεί να προκληθούν από νέα διανομή των ανέμων (αλλαγή διεύθυνσης, συχνότητας, έντασης) και από αλλαγές της ποσότητας του χιονιού που επικάθεται πάνω στη βλάστηση. Επίσης, διαφορές στους ρυθμούς μεταμορφισμού του χιονοστρώματος και στην τήξη, λόγω ποικιλίας μικροκλιματικών παραγόντων, προκαλούν επιπλέον ποικιλία στις ιδιότητες αυτές του χιονιού.

Διαφορές στην πυκνότητα προκαλούνται από ανέμους, την χρονική στιγμή που το χιόνι πέφτει, όπως επίσης προκαλείται και διαφορά στην συνακόλουθη εξέλιξη της στρωματογραφίας του χιονιού. Σε σημεία που η ένταση του ανέμου είναι μεγάλη, παρασύρεται το χιόνι που κατακρημνίζεται σε άλλα σημεία από αυτά που πέφτει, με αποτέλεσμα η συσσώρευση του χιονιού να είναι μεγάλη σε μερικά σημεία και μικρότερη σε άλλα. Επίπτωση του παραπάνω γεγονότος είναι ότι στα σημεία που συσσωρεύεται περισσότερο



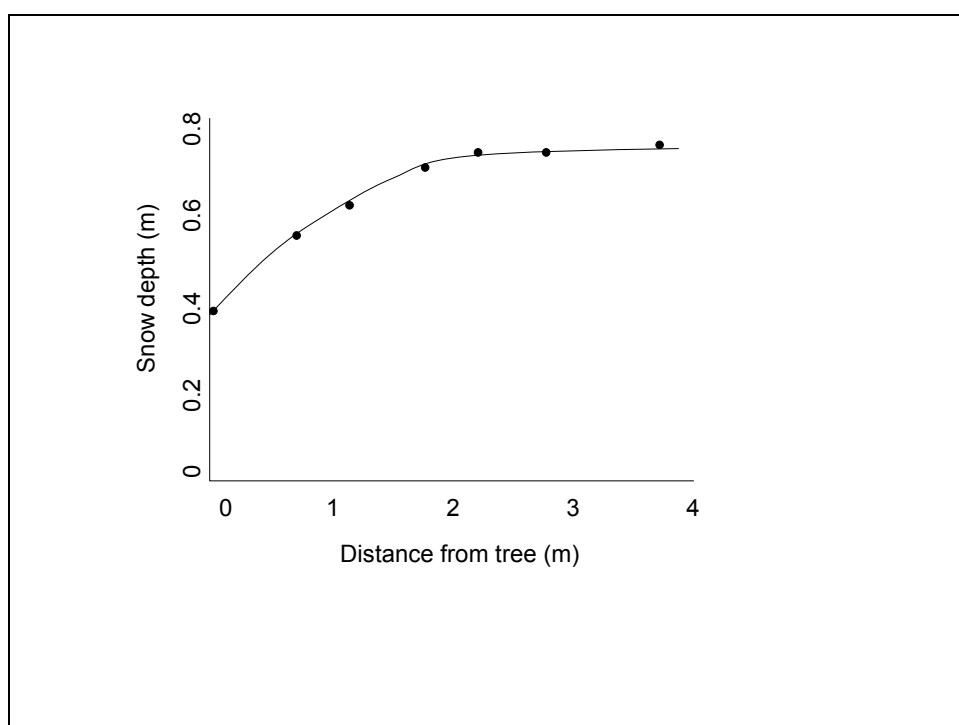
χιόνι υπάρχει μεγαλύτερη πυκνότητα στο χιονόστρωμα, λόγω μεγαλύτερων υπερκείμενων πιέσεων από το βάρος του χιονιού. Το γεγονός αυτό προκαλεί διαφορετικότητα στις πυκνότητες του χιονιού στην ίδια περιοχή και κατ' επέκταση ανομοιομορφία χιονοστρώματος, που αποτελεί παράγοντα ο οποίος προκαλεί προβλήματα στην ακριβή μέτρηση της ισοδύναμης ποσότητας του παραγόμενου νερού από τήξη (SWE). Γενικότερα, οι τοπικές συνθήκες θα επηρεάζουν εντονότερα τις μετρήσεις σε περιοχές, όπου οι περίοδοι της τήξης πραγματοποιούνται διαμέσου της χειμερινής περιόδου και όπου το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνει το χιόνι, αυξάνοντας κατά ένα μεγάλο ποσοστό τη θερμοκρασία του στρώματος και εντείνοντας το φαινόμενο της τήξης, (Dingman, 1993).

### **ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗ**

Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι η συσσώρευση του χιονιού στην επιφάνεια του εδάφους είναι μεγαλύτερη σε μικρά και αραιά δάση από ότι σε δάση πυκνά (περιφέρεια κορμού δέντρων μικρότεροι από 20hf, όπου το hf είναι το μήκος της περιμέτρου των δέντρων.) Όμως για δέντρα μεγαλύτερα από 20hf, η συσσώρευση τείνει να αλλάξει, γιατί η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική. Οι αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου αλλάζει και τη συσσώρευση του χιονιού, και προκαλεί μεγαλύτερη εξάχνωση σε δάση που είναι αραιά. Αυτό έχει ως επίπτωση στα πυκνά δάση που προστατεύονται από ισχυρούς ανέμους, και δεν είναι έντονο το φαινόμενο της εξάχνωσης, να συσσωρεύεται περισσότερο χιόνι στα φυλλώματα των δέντρων από ότι στα αραιά δάση (Golding και Swanson, 1986).

Οι Woo και Steer, 1986, παρουσίασαν στοιχεία σε διαφορετικά σημεία, με σκοπό τον υπολογισμό του βάθους του χιονιού σε περιοχές γύρω από μεμονωμένα δέντρα, σε ένα υποαρκτικό δάσος με έλατα στο βόρειο Οντάριο. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις στα μεσοδιαστήματα των δέντρων, με σκοπό την εξαγωγή του μέσου όρου του βάθους του χιονιού. Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν έδειξαν ότι το βάθος του χιονοστρώματος αυξάνεται μη γραμμικά όσο απομακρυνόμαστε από τον κορμό και φτάνει την τιμή του βάθους που θα είχε το χιόνι σε μια περιοχή χωρίς βλάστηση (στη συγκεκριμένη περιοχή και με τις συγκεκριμένες συνθήκες και κατακρήμνιση),

σε μια απόσταση 2 – 4 m από το δέντρο. Πιθανότατα αυτό το αποτέλεσμα, παράγεται από την κατακράτηση μέρους του κατακρημνίσματος από τα φυλλώματα των δέντρων και από την επιπρόσθετη θερμοκρασία, που παράγεται, από του κορμούς των δέντρων, εξαιτίας των μακρών κυμάτων ακτινοβολίας που επιταχύνει τη διαδικασία της τήξης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα απόστασης – ύψους χιονιού (Dingman, 1993).



ΣΧΗΜΑ 4.2: Βάθος χιονιού συναρτήσει της απόστασης του από ένα δέντρο. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από ένα δάσος με έλατα στο βόρειο Οντάριο (Στοιχεία από Woo και Steer, 1986).

### 4.3 ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΞΗΣ

Κατά τη διάρκεια της περιόδου συσσώρευσης, η μέση θερμοκρασία του στρωμένου χιονιού αυξάνεται. Η ισοδύναμη ποσότητα του νερού που παράγεται έχει μια αυξητική τάση την περίοδο εκείνη. Η περίοδος τήξης μιας εποχιακής στρώσης χιονιού μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις.

### ΦΑΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κατά τη διάρκεια της οποίας η μέση θερμοκρασία του χιονιού αυξάνεται με περισσότερο ή λιγότερο σταθερό ρυθμό μέχρι το χιόνι να αποκτήσει θερμοκρασία 0 °C. Ο παράγοντας  $Q_{cc}$  της χιονοκάλυψης, είναι η επιπλέον ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για να αυξηθεί η μέση θερμοκρασία και να φτάσει το σημείο τήξης στους 0 °C. Άρα:

$$Q_{cc} = -c_i \rho_w h_m (T_s - T_m) \quad (4.1), \text{ όπου:}$$

$c_i$ : είναι η θερμοκρασία του πάγου, ( $c_i = 10.502 \text{ cal.g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),

$T_s$ : είναι η μέση θερμοκρασία του στρωμένου χιονιού,

$T_m$ : είναι η θερμοκρασία τήξης του χιονιού, (0°C),

$\rho_w$ : είναι η πυκνότητα του «υγρού χιονιού», και

$h_m$ : είναι το ύψος του ισοδύναμου νερού που παράγεται από την τήξη.

Ο παράγοντας  $Q_{cc}$  της χιονοκάλυψης, μπορεί να υπολογιστεί κάθε στιγμή της φάσης ωρίμανσης και για την αρχή της περιόδου τήξης (1<sup>η</sup> φάση), ο παράγοντας αυτός παίρνει τη μορφή  $Q_{m1}$ , που ισοδυναμεί με την ενέργεια που απαιτείται στην αρχή της περιόδου τήξης. Ο παράγοντας  $Q_{cc}$  έχει διαστάσεις ( $\text{E L}^{-2}$ ).

### ΦΑΣΗ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ

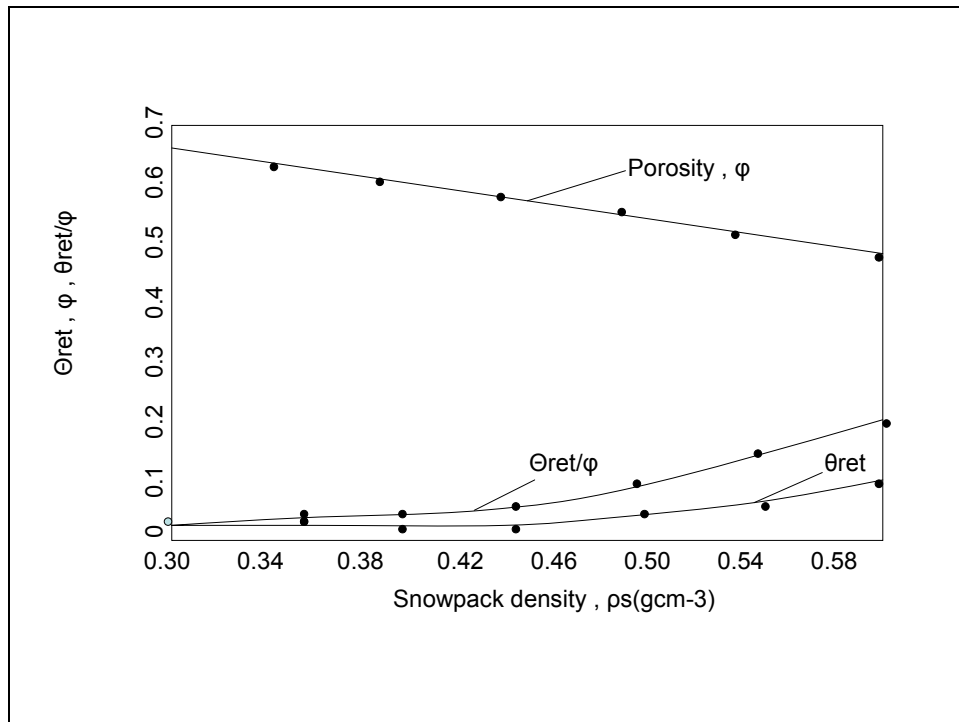
Κατά την οποία το χιόνι υφίσταται αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό), αλλά το «λιωμένο» χιόνι διατηρείται στο χιονόστρωμα. Στο τέλος της φάσης αυτής το χιόνι έχει θερμοκρασία 0 °C, και δεν μπορεί να διατηρηθεί περισσότερο υγρό και για αυτό ονομάζεται ωρίμανση. Η 2<sup>η</sup> φάση της τήξης ξεκινάει με την παραδοχή ότι το χιόνι έχει γίνει ισοθερμικό. Η ενέργεια που παράγεται στη φάση αυτή, έχει ως επίπτωση την τήξη του χιονιού το οποίο διατηρείται στα κενά των πόρων. Το ύψος του χιονιού «υγρής φάσης» που παράγεται στη φάση αυτή,  $h_{wret}$ , δίνεται από τον τύπο:

$$h_{wret} = \Theta_{ret} h_s \quad (4.2) \text{ όπου:}$$

$\Theta_{ret}$ : είναι η μέγιστη ογκομετρική περιεκτικότητα του νερού, όπου το χιόνι μπορεί να διατηρήσει. Για το ώριμο χιόνι το  $\Theta_{ret}$  μπορεί να υπολογισθεί από εμπειρικές μεθόδους (Eagleson, 1970), με τον τύπο:

$$\theta_{ret} = -0.0735 \frac{\rho_s}{\rho_w} + 0.267 \frac{\rho_s^2}{\rho_w} \quad (4.3)$$

Φαίνεται ο γραφικός υπολογισμός του στο παρακάτω σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 4.3: Εμπειρικές σχέσεις μεταξύ πορώδους  $\phi$ , και πυκνότητας χιονιού,  $\rho_s$ , διατήρησης χωρητικότητας υγρού νερού,  $\theta_{ret}$  και  $\rho_s$  και σχέση ανάμεσα στο  $\theta_{ret}/\phi$  και  $\rho_s$  (Στοιχεία του Eagleson, 1970).

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις προαναφερθείσες εκφράσεις για την μοντελοποίηση και τον υπολογισμό του ποσοστού των κενών των πόρων τα οποία είναι κορεσμένα με νερό, όταν  $\Theta = \theta_{ret}$ . Λαμβάνοντας υπ' όψιν ένα ώριμο στρωμένο χιόνι, με πυκνότητα  $\rho_s = 0,50 \text{ g cm}^{-1}$ , από το παραπάνω σχήμα παίρνω τιμή για το  $\theta_{ret} = 0,03$ . Βάζοντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση (4.3) προκύπτει τιμή για το πορώδες,  $\phi = 0,49$ . Ο λόγος  $\theta_{ret} / \phi$  είναι το ποσοστό των κενών των πόρων που είναι γεμάτοι με νερό στο τέλος της 2<sup>ης</sup> φάσης που σε αυτήν την περίπτωση είναι  $0,03 / 0,49 = 0,061$ . Όπως είναι φανερό το 6% των κενών των πόρων στο ώριμο χιόνι, περιέχουν νερό και τέτοιου είδους χιόνι απέχει πολύ στο να γίνει υγρό (ποσοστό περίπου 94%). Η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της φάσης ωρίμανσης,  $Q_{m2}$ , μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$Q_{m2} = h_{wret} \rho_w \lambda_f = \theta_{ret} h_s \rho_w \lambda_f, \quad (4.4)$$

όπου το  $\lambda_f$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης ( $79,7 \text{ cal g}^{-1}$ ).

### ΦΑΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Κατά τη διάρκεια της οποίας, επιπλέον εισροή ενέργειας προκαλεί απορροφή του νερού.

Το «υγρό χιόνι» προκαλεί υδρατμούς στο βάθος του χιονοστρώματος, οι οποίοι παγώνουν για δεύτερη φορά, απελευθερώνοντας λανθάνουσα θερμότητα που αυξάνει τη θερμοκρασία του χιονιού. Παρομοίως, η θερμοκρασία της επιφάνειας του χιονιού, πέφτει κάτω από το  $0^\circ\text{C}$  τη νύχτα, ή για συνεχόμενες ημέρες την περίοδο τήξης, με αποτέλεσμα να χρειάζεται επιπλέον ενέργεια και θερμοκρασία για να συνεχιστεί το φαινόμενο της τήξης. Όταν το χιόνι είναι ώριμο, επιπρόσθετη ενέργεια εισροής παράγει «υγρό χιόνι», το οποίο δεν μπορεί να διατηρηθεί στην επιφάνεια με τη επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, και το χιόνι ξεκινάει να απορρέει επιφανειακά. Η ενέργεια που χρειάζεται για την ολοκλήρωση της φάσης αυτής,  $Q_{m3}$ , είναι η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την τήξη του χιονιού, και δίνεται στο τέλος της φάσης ωρίμανσης (Dingman, 1993)

$$Q_{m3} = (h_m - h_{wret}) \rho_w \lambda_f \quad (4.5)$$

### ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΧΙΟΝΙ

Το ώριμο χιόνι περιέχει περίπου το 3% της περιεκτικότητάς του σε νερό υγρής μορφής το οποίο βρίσκεται ως λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια. Επιπρόσθετα το νερό παράγεται κατά τη διάρκεια της τελευταίας φάσης της τήξης και δεν μπορεί να κρατηθεί επιπλέον πάνω στην επιφάνεια λόγω βαρύτητας και η διαδικασία της διήθησης ξεκινάει.

Η κατακόρυφη διήθηση του νερού στο χιόνι, πραγματοποιείται διαμέσου των πόρων του χιονοστρώματος. Ο Colbeck (1979) έδωσε μια αναλυτική περιγραφή με πειραματική προσέγγιση των σχέσεων της διήθησης του χιονιού. Έδειξε ότι οι δυνάμεις πίεσης στο χιόνι είναι συνήθως ασήμαντες, για αυτό η εξίσωση της κίνησης (Νόμος του Darcy) μπορεί να γίνει:

$$V_{(x,t)} = K_n [\theta_{(x,t)}]. \quad (4.6)$$

Οι ιδιότητες της μη διαβρεχόμενης ροής στην απορροή λόγω τήξης του χιονιού, προσδιορίζεται από τον υπολογισμό Z ποσοτήτων. Ο πρώτος από αυτούς είναι το ενεργό πορώδες,  $\Phi_{eff}$ , το οποίο είναι το πορώδες που συνοδεύεται από τη μέγιστη ποσότητα νερού,

$$\Theta_{ret}: \Phi_{eff} = \Phi - \Phi_{ret}, \quad (4.7)$$

όπου το  $\Phi_{ret}$  είναι το πορώδες που καταλαμβάνεται από νερό, στην επιφάνεια. Η δεύτερη ιδιότητα, είναι η πραγματική διαπερατότητα  $K_1$ , το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί από το παρακάτω:

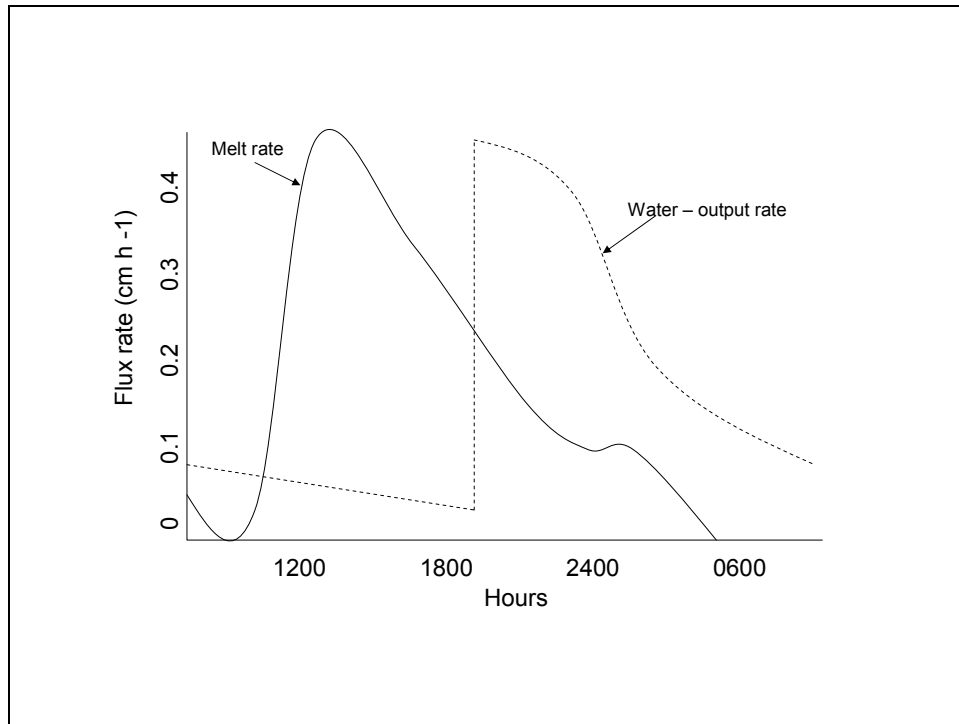
$$K_1 = 0,077d^2 \exp[-7,8(\rho_s/\rho_w)], \quad (4.8)$$

όπου το  $d$  είναι χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων του χιονιού σε mm, και το  $K_1$  είναι σε  $mm^2$  (Colbeck 1978). Τυπικές τιμές των  $d$  για μη διαβρεχόμενο ώριμο χιόνι είναι 1-2mm. Η ενέργεια που εισρέει στην επιφάνεια του ώριμου στρωμένου χιονιού ποικίλει, ημερήσια, συνήθως πλησιάζει, μια ημιτονοειδή καμπύλη με ακρότατο αργά το απόγευμα. Η ποικιλία παράγει ένα ημερήσιο κύμα «λιωμένου» νερού που παράγεται πάνω στην επιφάνεια και διηθείται. Όπως τονίζεται από τον Dunne et.al. (1976) και τον Colbeck (1978), η ταχύτητα του νερού,  $u$ , από έναν δεδομένο ρυθμό ροής, είναι συνδεδεμένο με τις ιδιότητες του χιονιού και το ρυθμό λιωσίματος

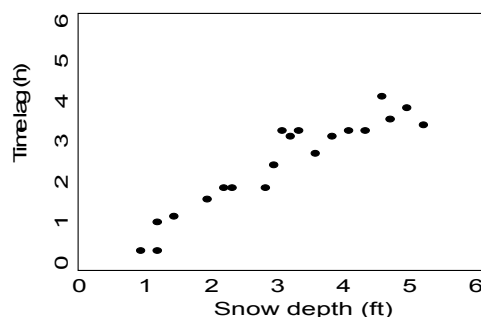
$$\frac{dh_m}{dt} : u = \frac{3}{\phi_{eff}} \left( \frac{\rho_w g k_1}{\mu} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{dh_m}{dt} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (4.9)$$

όπου το  $\mu$  είναι το ιξώδες του νερού, και ο ρυθμός τήξης μπορεί να υπολογισθεί επειδή η ταχύτητα των κυμάτων τήξης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός τήξης. Το νερό παράγεται κατά τη διάρκεια, που η τήξη έχει φτάσει στην κορυφή, κατά το μεσημέρι, και μετά κινείται γρηγορότερα από το νερό που παράγεται νωρίτερα την ημέρα. Έτσι τα κύματα τείνουν να συσσωρεύσουν το νερό και να παράγουν ένα αιχμηρό μέτωπο κύματος (καμπανοειδούς μορφής). Η συνήθης ταχύτητα των κυμάτων είναι 30 με 60  $cm \cdot h^{-1}$  που είναι γενικότερα η διακύμανση που έχει βρεθεί από μελέτες. Έτσι,

για τα περισσότερα εποχιακά χιονοστρώματα, η κορυφή της απορροής του νερού θα συμβεί μερικές ώρες μετά τον ρυθμό τήξης.



ΣΧΗΜΑ 4.4: Σύγκριση του χρόνου του ρυθμού τήξης πάνω στην επιφάνεια (εισροή) και ρυθμός κατακόρυφης μη διαβρεχόμενης ροής (έξοδος νερού) στη βάση 101 cm ύψος άδενδρου χιονοστρώματος. Στοιχεία από Dunne et al. (1976), χρησιμοποιούμενα με την άδεια του American Geophysical Union.



ΣΧΗΜΑ 4.5: Διαφορά μεταξύ του χρόνου μέγιστης επιφανειακής τήξης και του μέγιστου χρόνου τήξης από τον πυθμένα του χιονοστρώματος σαν

συνάρτηση του βάθους του χιονιού. Στοιχεία από Anderson (1968) χρησιμοποιούμενα με την άδεια του American Geophysical Union.

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε ότι όσο περισσότερο ύψος έχει το χιόνι στην υπό εξέταση περιοχή, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος υστέρησης, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από την τήξη μέχρι την απορροή του νερού. Το γεγονός αυτό είναι λογικό γιατί όσο το ύψος του χιονιού είναι μεγάλο τόσο μεγαλύτερο όγκο καταλαμβάνει. Επομένως χρειάζεται μεγαλύτερα ποσοστά θερμότητας για να αλλάξει μορφή (ηλιακή ακτινοβολία, θερμός άνεμος), με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερος χρόνος για να ολοκληρωθεί η διαδικασία.

Ο Anderson (1973), διατύπωσε ένα εμπειρικό τύπο για τον χρόνο υστέρησης του νερού της τήξης. Αυτός είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η τήξη, μέχρι το χρόνο που ξεκινάει η απορροή. Ο εμπειρικός τύπος έχει σχεδιαστεί για βήμα 6 - ωρών και δίνεται:

$$t_{lag} = 5.33 \left[ 1.00 - \exp\left(-\frac{0.03h_m}{\Delta h_{w6}}\right) \right], \quad (4.10)$$

όπου το,

το  $t_{lag}$ : είναι ο χρόνος υστέρησης (hrs),

το  $h_m$ : είναι η ισοδυναμία νερού όταν το χιόνι ξεκινάει να λιώνει (cm) και

το  $\Delta h_{w6}$ : είναι το σύνολο της τήξης που γενικεύεται σε 6-ωρη περίοδο,

(Dingman, 1993).

#### **4.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ**

##### **4.4.1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΞΗΣ- ΑΠΟΡΡΟΗΣ (CONCORDANT – FLOW METHOD) (CFM)**



Όταν δεν υπάρχουν δεδομένα απορροής, είναι απαραίτητο να μεταφερθεί η υδρολογική πληροφορία από άλλες μετρήσεις απορροών, γειτονικών, υδρολογικά ομοιογενών, λεκανών. Το μοντέλο (CFM) αναφέρει ότι οι μετρήσεις της απορροής από την τήξη του χιονιού, σε γειτονικές λεκάνες, είναι διαθέσιμες και για τον υπολογισμό της απορροής άλλων λεκανών όταν αυτές δεν έχουν επαρκείς τιμές μέτρησης, με σημαντικό περιορισμό να είναι υδρολογικά ομοιογενείς. Είναι όμως δόκιμο να χρησιμοποιηθεί δίκτυο σταθμών μέτρησης, ώστε να γίνει υπολογισμός των μη μετρημένων όγκων απορροής από την τήξη, γεγονός που θα μειώσει το ποσοστό σφάλματος, σε περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε τιμές από γειτονικές λεκάνες. Αφού εξάγουμε τις μετρήσεις με κατάλληλο τρόπο, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε όπου είναι απαραίτητο. Ένας υπολογισμός της απορροής λόγω τήξης του χιονιού, για την απορροή που δεν έχουμε επάρκεια μετρήσεων),  $(\hat{y})$ , θα είναι μια συνάρτηση του υπολογισμού της απορροής του χιονιού,  $(\bar{y})$ , στην λεκάνη που έχω επάρκεια μετρήσεων, και της αναλογίας των χαρακτηριστικών της απορροής ( $c$ ) για τη μετρημένη και τη μη μετρημένη περιοχή:

$$\hat{y} = \bar{y} \left( \frac{C_u}{C_g} \right) \quad (4.11)$$

Στην προηγούμενη εξίσωση, οι δείκτες  $u$  και  $g$  αφορούν την περιοχή μη μετρήσεων και την περιοχή μετρήσεων αντιστοίχως. Το χαρακτηριστικό  $C$  μπορεί να είναι το ποσοστό της απορροής με χιόνι ή ο μέσος όρος του ύψους του χιονιού για την απορροή. Αν περισσότερες από μία απορροές με τα ίδια χαρακτηριστικά υπάρχουν στην υπό εξέταση περιοχή, τότε η εξίσωση μπορεί να γενικευτεί για  $m$  μετρημένες απορροές:

$$\hat{y} = \frac{C_u}{m} \sum_{i=1}^m \frac{y_i}{C_i} \quad (4.12)$$

Στην εξίσωση αυτή,  $y_i$  είναι η υπολογισμένη απορροή λόγω τήξης χιονιού για την  $i$  απορροή και  $c_i$  είναι το χαρακτηριστικό για την απορροή. Η μέθοδος (CF) είναι παρόμοια με τη μέθοδο του μέσου όρου από μετρήσεις σταθμών, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ύψους της βροχόπτωσης σε μια λεκάνη. Το μοντέλο (CF) χρησιμοποιεί τον παράγοντα  $C$  ως συντελεστή βαρύτητας των τιμών των μετρήσεων (McCuen, 2005).

#### 4.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας της απορροής λόγω της τήξης του χιονιού. Η μέθοδος των ημερήσιων θερμοκρασιών, που απαιτεί μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα, έχει τον τύπο  $M = K D$ , στην οποία:

το  $K$ : είναι μια σταθερά αναλογίας,

το  $D$ : είναι η τιμή των θερμοκρασιών για μία δεδομένη μέρα και

το  $M$ : είναι το ύψος της απορροής λόγω τήξης του χιονιού σε ίντσες ανά μέρα.

Ο ρυθμός τήξης ( $Q$ ) μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το  $M$  με το εμβαδόν της χιονοκαλυμμένης έκτασης ( $A$ ) (το  $A$  μπορεί και να αποτελεί το εμβαδόν της υπό εξέταση περιοχής σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα χιονοκάλυψης):

$$Q = M A = K D A. \quad (4.13)$$

Η τιμή των θερμοκρασιών ανά ημέρα ισοδυναμεί με τη διαφορά κάθε τιμής που μετράται, από τη βασική θερμοκρασία των  $+ 32^\circ F$ . Επομένως η εξίσωση  $M = K D$  γίνεται:

$$M = \begin{cases} K(T - 32), & \text{για } T \geq 32^\circ F \\ 0, & \text{για } T < 32^\circ F \end{cases} \quad (4.14)$$

στην οποία το  $T$  είναι η μετρούμενη θερμοκρασία της ημέρας. Η σταθερά αναλογίας  $K$  της εξίσωσης περιλαμβάνει τη διαθέσιμη βροχή και η τιμή του  $D$  αντιπροσωπεύει το σύνολο των θερμοκρασιών που είναι ικανές να προκαλέσουν τήξη. Η τιμή της σταθεράς  $K$  στην εξίσωση είναι μία συνάρτηση ενός αριθμού παραγόντων που αντιπροσωπεύουν την διαπερατότητα, στην παραγωγή ημερήσιας τήξης, συμπεριλαμβάνοντας παράγοντες όπως το βάθος του χιονιού, τον προσανατολισμό της απορροής, το ποσοστό της κάλυψης των δέντρων, την κλίση του εδάφους και την εποχή

του χρόνου. Παρέχοντας τις παραπάνω πληροφορίες, είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί η μεταβλητή K, επειδή εξαρτάται από παράγοντες που είναι δύσκολο να προσδιορισθούν επαρκώς, για αυτό το λόγο μία σταθερή τιμή συμπεριλαμβάνεται συνήθως για την απορροή, ανάλογα με τα δεδομένα και τις συνθήκες, από τον παρακάτω πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Αξία του K στη μέθοδο ημερήσιας θερμοκρασίας.

Συνθήκες	K
Περιοχή χαμηλής απορροής	0.02
Πυκνά φυτοκαλυμμένες εκτάσεις Ανοιχτές πλαγιές βόριου μετώπου	0.04 – 0.06
Περιοχές μέσης απορροής	0.06
Πλαγιές νότιου μετώπου φυτοκαλυμμένων λεκανών μέσης απορροής	0.06 – 0.08
Περιοχές υψηλής απορροής	0.30

#### 4.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΗΞΗΣ

Ενώ οι μετρήσεις της απορροής, για περιόδους 30 ημερών ή περισσότερο χρονικό διάστημα, είναι συχνά οι βασικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση των αποθεμάτων του νερού από την απορροή της τήξης, πολλά μοντέλα χρησιμοποιούν μετρήσεις υγρασίας σε ημερήσια βάση. Βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τέτοια μοντέλα, βασίζονται σε μέσες ημερήσιες τιμές της υγρασίας. Όμως, οι ρυθμοί τήξης και απορροής, δεν είναι σταθεροί πάνω από ημερήσια βάση (24 ώρες). Το σχήμα δείχνει ότι όλο το νερό που τήκεται σε μία δεδομένη μέρα, δεν εμφανίζεται σαν απορροή την ίδια μέρα. Στην πραγματικότητα η τήξη μπορεί να εμφανιστεί μετά από περίοδο πολλών ημερών, σαν βασική απορροή, με την απορροή που προκαλείται από τη βροχή, και μπορεί να συμπεριληφθεί πάνω από μία μακρά περίοδο. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ότι το νερό που παράγεται από την τήξη μπορεί να αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό της ολικής απορροής. Για μικρές περιόδους, η ακρίβεια των υπολογισμών του ρυθμού της απορροής μπορεί να αυξηθεί, συμπεριλαμβάνοντας ένα συνθετικό μοντέλο

που παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μείωσης της απορροής. Ένας αριθμός μοντέλων έχει προταθεί. Ο Barnes (1930) πρότεινε μια εξίσωση δεκαετίας που έχει τον τύπο  $Q_t = Q_0 K^t$  (4.15), όπου

$Q_0$ : είναι ο αρχικός ρυθμός μείωσης της απορροής την ημέρα,

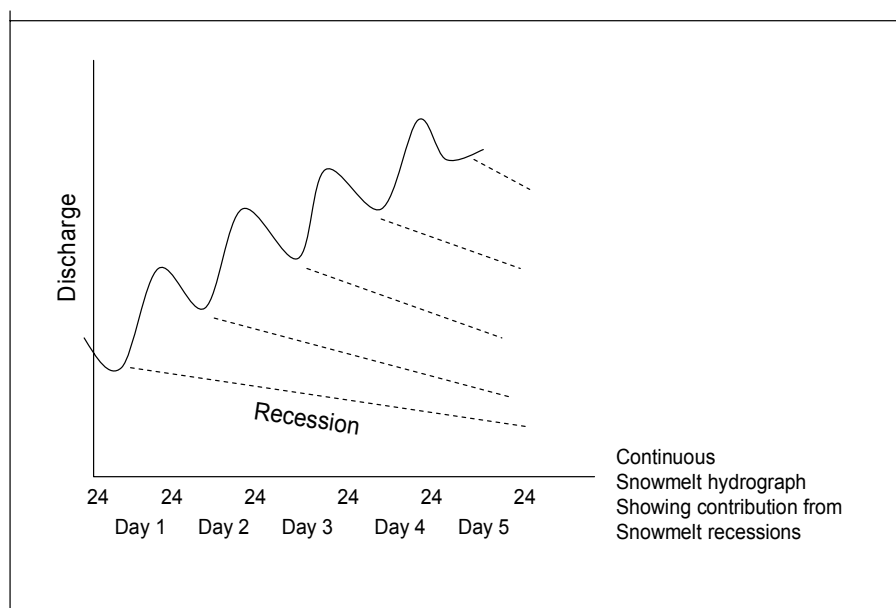
$t$ : είναι ο αριθμός των ημερών μέχρι την αρχή της μείωσης,

$Q_t$ : είναι ο ρυθμός υποχώρησης της απορροής την ημέρα  $t$  και

$K$ : είναι μια μεταβλητή ημερήσιας υποχώρησης της απορροής.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί επίσης να γραφτεί σαν :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (4.16)$$



ΣΧΗΜΑ 4.6: Συνεχόμενο υδρογράφημα τήξης που δείχνει τη συνεισφορά μείωσης της τήξης.

Οι παράμετροι  $k$  και  $K$  είναι συνδεδεμένοι με τη σχέση  $k = -\ln_e K$  (4.17). Άλλες συναρτησιακές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρουσιάζοντας την

μείωση, όπως το απλό δυναμικό μοντέλο  $Q_{t+1}=aQ_t^b$  (4.18). Η παραπάνω εξίσωση έχει το πλεονέκτημα ότι οι μεταβλητές μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας έτοιμο λογισμικό για τα ελάχιστα τετράγωνα, με λογαριθμική μεταβλητότητα των δεδομένων, (McCuen, 2005).

#### 4.4.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Ο σκοπός των μοντέλων αυτών είναι να υπολογίζουν την εισροή και την εκροή της λεκάνης. Ο όγκος του νερού που είναι αποθηκευμένος στο χιόνι υπολογίζεται ως εισροή όπως οι όγκοι των κατακρημνίσεων για μακρές περιόδους ή οι ισοδύναμες μετρήσεις της ποσότητας χιονιού-νερού. Μερικά μοντέλα μπορεί να επιτρέπουν απώλειες λόγω εξάτμισης, μεταφοράς και υπόγειας αποθήκευσης λόγω διήθησης. Ο Tangborn (1978) έφτιαξε ένα μοντέλο που μπορεί να θεωρηθεί ως μοντέλο ισοζυγίου. Το μοντέλο συνδέει την εποχιακή απορροή λόγω τήξης,  $Q_s$ , με την μετρούμενη χειμερινή κατακρήμνιση,  $P_w$  και τη χειμερινή απορροή  $Q_w$  με τη σχέση:

$Q_s=a+bP_w-Q_w$  (4.19) , όπου τα  $a$  και  $b$  είναι μεταβλητές που προσαρμόζονται. Οι μεταβλητές  $a$  και  $b$  μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας ελάχιστα τετράγωνα γιατί το  $Q_w$  δεν είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη μεταβλητή. Οι τύποι  $a$  και  $b$  είναι οι παρακάτω:

$$b = \frac{\sum Q_s P_w - (\sum Q_s \sum P_w / n) + \sum Q_w P_w - (\sum Q_w \sum P_w / n)}{\sum P_w^2 - [(\sum P_w)^2 / n]}$$

και

$$a = \bar{Q}_s + \bar{Q}_w - b\bar{P}_w$$

Οι παραπάνω εξισώσεις, είναι οι μέσες τιμές των  $Q_s$ ,  $Q_w$  και  $P_w$  αντίστοιχα. Για την μοντελοποίηση της εξίσωσης (4.19) είναι απαραίτητο να έχουμε τις τιμές των  $Q_s$ ,  $Q_w$  και  $P_w$  για καταγραφή  $n$  ετών. Αφού υπολογίσουμε τα  $a$  και  $b$ , τότε μπορούμε εύκολα να εξάγουμε συμπεράσματα για τον υπολογισμό του

$Q_s$ , που αποτελεί την απορροή λόγω τήξης του χιονιού. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των μετρήσεων των τιμών των  $Q_w$  και  $P_w$  από τις οποίες εξαρτώνται οι τιμές των συντελεστών  $a$  και  $b$ , (McCuen, 2005).

#### 4.4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

Μπορούμε να υπολογίσουμε έμμεσα την απορροή λόγω τήξης του χιονιού, μετρώντας την απαιτούμενη ενέργεια απορρόφησης, σε κάθε φάση της διαδικασίας τήξης. Τα μοντέλα που δημιουργούνται με την διαδικασία αυτή, περιγράφονται σαν «φυσικής βάσης» γιατί η ενεργειακή ισορροπία είναι μια θεμελιώδους σημασίας φυσική διεργασία και γιατί χρησιμοποιούνται εξισώσεις που περιγράφουν το φυσικό μέρος της διαδικασίας μετατροπής του στερεού χιονιού από τη μια μορφή στην άλλη (από στερεό σε υγρό). Το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα στοιχείο δίνεται από τον τύπο:

$$(\Delta t)S = \Delta Q, \quad (4.20) \text{ όπου:}$$

$S(\text{EL}^{-2}\text{T}^{-1})$ : είναι ο ρυθμός απορρόφησης ενέργειας που χρειάζεται για την μετατροπή του από τη μια φάση στην άλλη, σε μια περίοδο  $\Delta t$  (T), και

$\Delta Q(\text{EL}^{-2})$ : είναι η μεταβολή στην θερμική ενέργεια που απορροφάται από το χιόνι κατά τη διάρκεια της περιόδου ( $\Delta t$ ).

Οι εξισώσεις, προβάλλουν ένα μέσο για τη μοντελοποίηση της τήξης του χιονιού, βασισμένες σε πληροφορίες του ρυθμού εισροής ενέργειας  $S$ , κατά τη διάρκεια διαδοχικών περιόδων χρόνου. Κατά τη διάρκεια της θερμής φάσης,  $\Delta Q$ , αντικατοπτρίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας του στρωμένου χιονιού:

$$\Delta Q = c_i \rho_w h_m (\Delta T_s) \quad (4.21)$$

Η αντικατάσταση της εξίσωσης (4.20) στην (4.21) συσχετίζει την θερμοκρασιακή αλλαγή, με το δίκτυο του ρυθμού ενεργειακής εισροής:

$$\Delta T_s = \frac{(\Delta t)S}{c_i \rho_w h_m} \quad (4.22). \text{ Στη } 2^{\text{η}} \text{ και την } 3^{\text{η}} \text{ φάση, } \Delta Q, \text{ αντικατοπτρίζεται στην}$$

τήξη. Κατά τη διάρκεια της φάσης ωρίμανσης, αυτή η τήξη προκαλεί αύξηση στην ποσότητα νερού υγρής φάσης, που κατακρατείται στο χιόνι:

$$\Delta Q = \rho_w \lambda_f \Delta h_w \quad (4.23) \quad \text{και} \quad \Delta h_w = \frac{(\Delta t)S}{\rho_w \lambda_f} \quad (4.24).$$

Κατά τη διάρκεια της φάσης της απορροής:

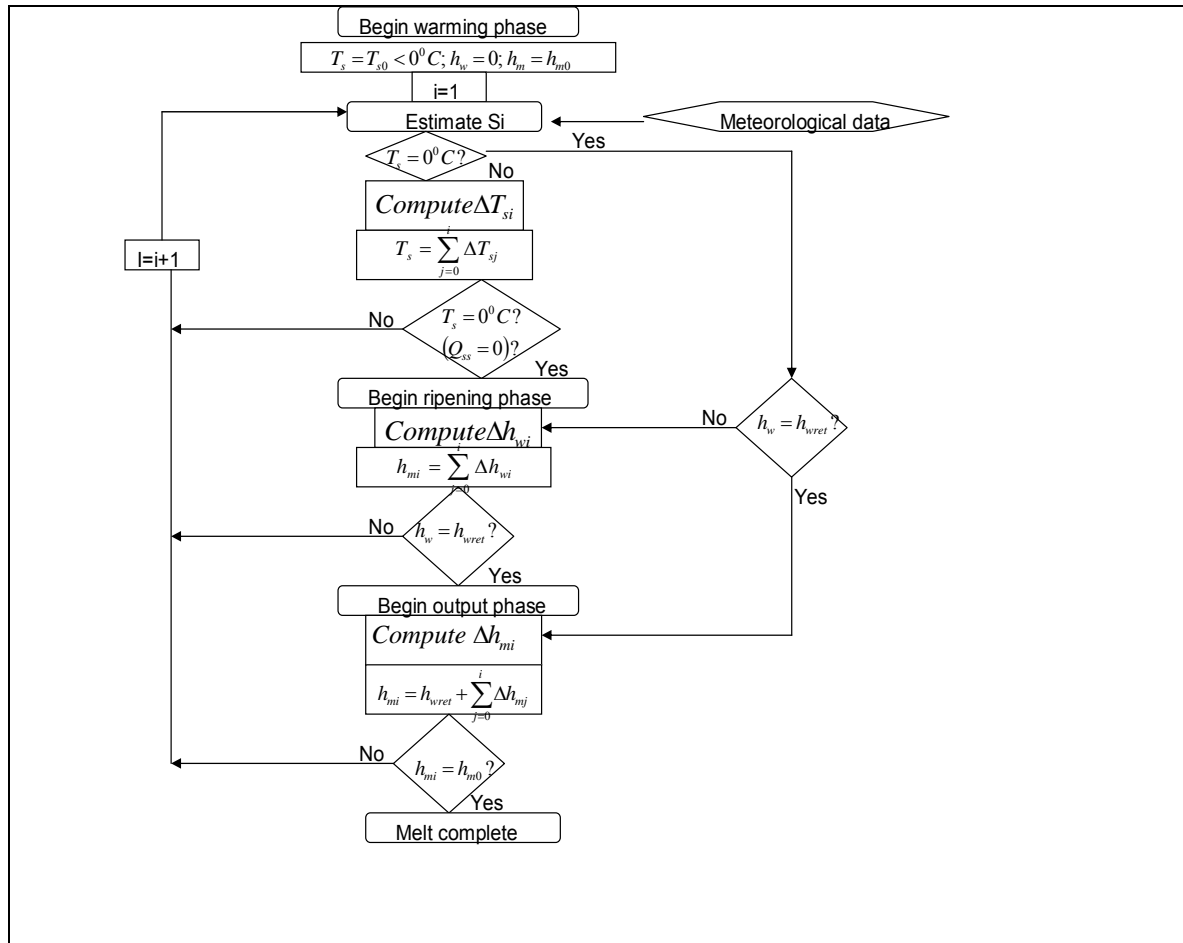
$$\Delta Q = -\rho_w \lambda_f \Delta h_m \quad (4.25) \quad \text{και} \quad \text{άρα,}$$

$$\Delta h_m = -\frac{(\Delta t)S}{\rho_w \lambda_f} \quad (4.26) \quad \text{και}$$

$$\Delta w = -\Delta h_m, \quad (4.27) \quad \text{όπου:}$$

το  $\Delta w$ : είναι η αύξηση της ολικής ποσότητας του νερού που απορρέει από το χιονόστρωμα, (Dingman, 1993).

Άμεσα κατανοητή η μοντελοποίηση της παραπάνω μεθόδου γίνεται με το λογικό διάγραμμα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο σχήμα αυτό είναι ευδιάκριτος ο διαχωρισμός των φάσεων της διαδικασίας για την τήξη του χιονιού, καθώς επίσης και οι παράμετροι και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε φάση:



ΣΧΗΜΑ 4.7: Το διάγραμμα δείχνει πως η ενεργειακή ισορροπία χρησιμοποιείται στο πρότυπο τήξης. Το γράμμα  $i$  είναι ο μετρητής για χρονικά διαδοχικές περιόδους του μήκους  $\Delta t$ .

**ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ:** Στη διαδικασία και τη δημιουργία ενός μοντέλου στον υπολογιστή βασισμένο στην εξίσωση  $(\Delta t)S = \Delta Q$ , πρέπει αρχικά να αποφασιστεί το χρονικό βήμα,  $\Delta t$ , που θα χρησιμοποιηθεί. Ο Anderson συνέκρινε τα αποτελέσματα (1976) χρησιμοποιώντας  $\Delta t = 1,3$  και  $6$  hrs, και βρήκε ελάχιστες διαφορές.

Για περιόδους πάνω από  $24$  hrs θα δώσει, πιθανότατα, λογικά - ικανοποιητικά αποτελέσματα γιατί τα στοιχεία της ενεργειακής ισορροπίας είναι γραμμικές ή περίπου γραμμικές συναρτήσεις μετεωρολογικών και άλλων ανεξάρτητων τιμών. Βασικές εξαιρέσεις για αυτή την «πλησίον γραμμικότητα» βρίσκονται στις εξισώσεις τυρβώδους ανταλλαγής, όπου η ταχύτητα του ανέμου πολλαπλασιάζεται από έναν άλλο παράγοντα.



**ΛΕΠΤΟΤΗΤΑ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ:** Το νερό και η ενέργεια μετακινούνται κάθετα στο χιονόστρωμα, γι αυτό το λόγο για τη δημιουργία ενός μοντέλου τήξης, απαιτείται μια απόφαση για το πάχος του χιονοστρώματος που θα συμπεριληφθεί σαν παράγοντας στο μοντέλο. Ο Anderson (1976) συγκρίνει αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας πάχη 1, 2, 5,5 και 10 cm και βρήκε ότι η προβλεπόμενη ποσότητα νερού που θα παραχθεί από την τήξη του χιονοστρώματος σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, αυξάνεται όσο το πάχος του στρώματος αυξάνεται. Αν και υπάρχουν λίγα επιπλέον στοιχεία που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για τη μελέτη του φαινομένου, σημαντικές διαφορές θα εμφανιστούν σε μοντέλα ενεργειακής ισορροπίας, χρησιμοποιώντας πάχος στρώματος που ξεπερνάει τα 50 με 100 cm. (Dingman, 1993).

**ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ:** Η χρήση της ενεργειακής ισορροπίας απαιτεί μέτρηση πολλών μεταβλητών συμπεριλαμβανομένων: θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ταχύτητα ανέμου, κάλυψη νέφους, ατμοσφαιρική κατακρήμνιση, θερμοκρασία στην επιφάνεια του χιονιού και ιδανική φυσική και απερχόμενη ακτινοβολία μακρού και βραχέως κύματος. Οι μετρήσεις αυτών των μεταβλητών πρέπει να γίνουν σε αντιπροσωπευτική θέση και με επαρκή συχνότητα, για να υπολογίζεται ο ημερήσιος μέσος όρος, (Dingman, 1993).

## **ΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΞΗΣ ΧΙΟΝΙΟΥ NWSRFS**

Οι φυσικές διαδικασίες που απαιτούνται για να προσομοιωθεί η συσσώρευση και τήξη του χιονιού περιλαμβάνουν, συσσώρευση χιονοστιβάδας, ανταλλαγή θερμότητας στη διεπιφάνεια αέρα-χιονιού, επιφανειακή έκταση χιονοκάλυψης, αποθήκευση θερμότητας μέσα στη χιονοστιβάδα, συγκράτηση και μεταφορά υγρού νερού, και ανταλλαγή θερμότητας στη διεπιφάνεια εδάφους-χιονιού. **Το διάγραμμα ροής των φυσικών συνιστωσών του ομοιώματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται με μαθηματικές εξισώσεις οι βασικές εξισώσεις του ομοιώματος.**

### **ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑΣ**

Η αντιστοίχιση της κατακρήμνισης σε βροχή ή χιόνι γίνεται βάση της θερμοκρασιακής παραμέτρου  $PXTEMP$ , έτσι ώστε:

Για,  $T_a > PXTEMP$  έχουμε βροχή

$T_a < PXTEMP$  έχουμε χιόνι

Όπου,

$T_a$  θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}C$ ), και

$PXTEMP$  παράμετρος ομοιώματος ( $^{\circ}C$ ).

Για να προσομοιωθεί σωστά η συσσώρευση χιονοστιβάδας πρέπει εκτός από την μορφή κατακρήμνισης (βροχή ή χιόνι) να προσδιοριστεί και το ακριβές μέγεθός της. Η σύλληψη κατακρήμνισης κατά τη διάρκεια χιονοπτώσεων από απροστάτευτους σταθμούς ή σταθμούς που εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους υπόκειται σε σοβαρά λάθη. Η παράμετρος SCF αποτελεί το διορθωτικό συντελεστή της ελλειπώς καταγεγραμμένης κατακρήμνισης σταθμού που ταξινομείται ως χιόνι:

$$P_{X_a} = SCF \times P_{X_g}$$

Όπου,

$P_{X_g}$  κατακρήμνιση καταγεγραμμένη από το σταθμό (mm), και

$P_{X_a}$  πραγματικό ισοδύναμο ύψος νερού χιονόπτωσης (mm).

### **ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΕΡΑ – ΧΙΟΝΙΟΥ**

Η ανταλλαγή θερμότητας στη διεπιφάνεια αέρα-χιονιού είναι ο κρισιμότερος παράγοντας ελέγχου της τήξης της χιονοστιβάδας. Το ομοίωμα χρησιμοποιεί τη θερμοκρασία αέρα ως δείκτη στο μηχανισμό ανταλλαγής θερμότητας ο οποίος ελέγχει τη ροή θερμότητας προς τα μέσα ή έξω της χιονοστιβάδας. Η ανταλλαγή θερμότητας εκτιμάται για δυο βασικές καταστάσεις:

- Όταν ο αέρας είναι θερμός ( $T_a > 0^{\circ}C$ ) έτσι ώστε η τήξη να λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του χιονιού, και,
- Όταν ο αέρας είναι πολύ ψυχρός ( $T_a < 0^{\circ}C$ ) για να συμβεί η τήξη.

## ΤΗΞΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΧΙΟΝΙΟΥ

Το ομοίωμα θεωρεί ότι η τήξη μπορεί να συμβεί στην επιφάνεια χιονιού όταν η θερμοκρασία αέρα είναι μεγαλύτερη από  $0^{\circ}\text{C}$ . Η σχετική σημασία των διαφόρων μηχανισμών ανταλλαγής θερμότητας ποικίλει ανάλογα με τις μετεωρολογικές καταστάσεις. Αφού μόνο η θερμοκρασία αέρα και η κατακρήμνιση θεωρούνται γνωστές για το ομοίωμα αυτό, είναι αδύνατον να ξεχωρίσουμε κάθε μία κατάσταση. Ωστόσο, ο ρυθμός της τήξης κατά τη διάρκεια βροχής μπορεί να διαχωριστεί από το ρυθμό της τήξης κάτω από πολλές συνθήκες. Στο ομοίωμα η εξίσωση της τήξης κατά τη διάρκεια βροχής χρησιμοποιείται όταν το μέγεθος της βροχής υπερβαίνει τα 2.5 mm το εξάωρο.

## ΤΗΞΗ ΧΙΟΝΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Κατά τη διάρκεια βροχής οι παραδοχές που τοποθετούνται για να υπολογιστεί η τήξη χιονοστιβάδας από το ενεργειακό ισοζύγιο είναι:

- Δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία
- Η εισερχόμενη ακτινοβολία μακρού μήκους κύματος είναι ίση με την ακτινοβολία μελανού σώματος στη θερμοκρασία του αέρα,  $T_a$
- Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του χιονιού είναι  $0^{\circ}\text{C}$ .
- Το σημείο δρόσου εξισώνεται με τη θερμοκρασία  $T_a$
- Η θερμοκρασία του νερού της βροχής είναι  $T_a$

Κάτω από τις παραδοχές αυτές το ενεργειακό ισοζύγιο περιγράφεται ως ακολούθως:

### Απώλειες θερμότητας τήξης χιονοστιβάδας, $\Delta Q$

Εκφράζονται από την εξίσωση:

$$\Delta Q = Q_n + Q_e + Q_h + Q_p \quad (4.28)$$

Όπου,

$Q_n$  ακτινοβολία μακρού μήκους κύματος,

$Q_e$  μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας λόγω συμπύκνωσης,

$Q_h$  μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγιμότητας (λόγος Bowen βάσει των παραπάνω παραδοχών), και

$Q_p$  μεταφορά θερμότητας από το νερό της βροχής.

Όλοι οι όροι της παραπάνω εξίσωσης (4.28) εκφράζονται σε  $mm_e \cdot Mm$  ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας,  $mm_e$ , ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για να λιώσει ή παγώσει 1mm πάγου ή νερού αντίστοιχα, στους  $0^\circ C$  (περίπου  $8 \text{ cal/cm}^2$ ).

### **Ακτινοβολία μακρού μήκους κύματος, $Q_n$**

Με βάση τις τοποθετημένες παραδοχές η  $Q_n$  εκφράζεται από την εξίσωση:

$$Q_n = \sigma T_{ak}^4 - \sigma T_{ok}^4 \quad (4.29)$$

όπου,

$\sigma$  σταθερά Stefan-Boltzman ( $1.7 \times 10^{-13} \text{ mm}_e \times \text{K}^{-4} \times \text{sec}^{-1}$ )

$T_{ak}$  θερμοκρασία αέρα ( $^\circ K$ ), και

$T_{ok}$  θερμοκρασία επιφάνειας χιονοστιβάδας ( $^\circ K$ ), (στην περίπτωση αυτή εδώ  $T_{ok}=273^\circ K$ )

Η παραπάνω εξίσωση (4.29) για εξάωρο χρονικό διάστημα ( $\Delta t = 6 \text{ hours}$ ) γράφεται:

$$Q_n = 3.67 \times 10^{-9} (T_a + 273)^4 - 20.4 \quad (4.30)$$

Μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας λόγω συμπύκνωσης,  $Q_e$

Η εξίσωση Dalton χρησιμοποιείται κυρίως για να υπολογιστεί η μεταφορά υδρατμών. Κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης πάνω σε χιονοστιβάδα έχουμε συμπύκνωση υδρατμών με αποτέλεσμα να η εξίσωση μεταφοράς υδρατμών να είναι:

$$V = f(u_a) (e_a - e_o) \quad (4.31)$$

Όπου,

$V$  μεταφορά υδρατμών (mm),

$f(u_a)$  συνάρτηση ταχύτητας ανέμου  $u_a$ , σε ύψος  $Z_a$ , πάνω από το χιόνι ( $\text{mm} \times \text{mb}^{-1}$ ),

$e_a$  τάση υδρατμών αέρα σε ύψος  $Z_a$  (mb), και

$e_o$  τάση υδρατμών στην επιφάνεια του χιονιού (mb) (θεωρείται ίση με την τάση κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία επιφάνειας του χιονιού).

Μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται όταν οι υδρατμοί, είτε φθάνουν στην επιφάνεια του χιονιού και συμπυκνώνονται, ελευθερώνοντας λανθάνουσα θερμότητα, είτε εγκαταλείπουν την επιφάνεια της χιονοστιβάδας με την εξάτμιση, αφαιρώντας θερμότητα από τη χιονοστιβάδα. Η μεταφερόμενη ποσότητα θερμότητας είναι ίση με τη μεταφερόμενη ποσότητα υδρατμών επί τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης,  $L_s$  ( $L_s = 677 \text{ cal} \times \text{gm}^{-1} = 8.5 \text{ mm}_e \times \text{mm}^{-1}$ ). Έτσι η μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας εκφράζεται από την εξίσωση:

$$Q_e = L_s V = 8.5 f(u_a) (e_a - e_o) \quad (4.32)$$

Αν θεωρηθεί ότι η πίεση των υδρατμών  $e_a$  είναι 90% της πίεσης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία του αέρα,  $e_{\text{sat}}$ , και η μέση συνάρτηση ανέμου γίνει παράμετρος του ομοιώματος προσδιορισμένη από τη διαδικασία της ρύθμισης, τότε η παραπάνω εξίσωση για εξάωρο χρονικό διάστημα γράφεται:

$$Q_e = 8.5 \text{ UADJ} (0.9 e_{\text{sat}} - 6.11) \quad (4.33)$$

Όπου,

UADJ μέση συνάρτηση ανέμου ( $\text{mm} \times \text{mb}^{-1} \times 6\text{hr}^{-1}$ ).

### **Μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγιμότητας, $Q_h$**

Συχνά θεωρείται ότι οι συντελεστές τυρβώδους μεταφοράς θερμότητας και υδρατμών είναι ίσοι. Με την παραδοχή αυτή ο λόγος  $Q_h/Q_e$  (λόγος Bowen) εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{Q_h}{Q_e} = \gamma \frac{T_a - T_0}{e_a - e_o} \quad (4.34)$$

όπου,

$T_a$  θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ), και

$\gamma$  ψυχομετρική σταθερά ( $\text{mb} \times ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) ( $\gamma = 0.00057 P_a$ ,

όπου  $P_a$  ατμοσφαιρική πίεση ( $\text{mb}$ )).

Η αντικατάσταση της παραπάνω εξίσωσης στην εξίσωση δίνει την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγιμότητας:

$$Q_h = 8.5 \gamma f(u_a) (T_a - T_0) \quad (4.35)$$

η οποία για την περίπτωση της τήξης χιονιού κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης και για εξάωρο χρονικό διάστημα γράφεται:

$$Q_h = 8.5 UADJ (0.00057 P_a T_a) \quad (4.36)$$

Στο ομοίωμα, η ατμοσφαιρική πίεση,  $P_a$ , εκτιμάται από τη σχέση μεταβολής υψόμετρου – πίεσης που προσεγγίζεται από την εξίσωση:

$$P_a = 1012.4 - 11.34 E_i + 0.00745 E_i^{2.4} \quad (4.37)$$

Όπου,  $E_i$  υψόμετρο (ανά 100 m)

Μεταφορά θερμότητας από το νερό της βροχής,  $Q_p$

Η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται στη χιονοστιβάδα από τη βροχή εξαρτάται από την ποσότητα, θερμοκρασία και ειδική θερμότητα του νερού της βροχής, βάσει της εξίσωσης:

$$Q_p = \frac{C_w}{80} P_x T_a \quad (4.38)$$

όπου,

$C_w$  ειδική θερμότητα νερού ( $C_w = 1.0 \text{ cal} \times \text{gm}^{-1} \times ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),

$P_x$  νερό βροχής (mm).

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.30), (4.32), (4.36) και (4.38) στην εξίσωση (7.28) προκύπτει η εξίσωση που υπολογίζει την ποσότητα λιωμένου χιονιού  $M_i$  (mm) κατά τη διάρκεια βροχής και για εξάωρο χρονικό διάστημα:

$$M = 3.67 \cdot 10^{-9} (T_a + 273)^4 - 20.4 + 0.0125 P_x T_a + 8.5 UADJ [(0.9 e_{sat} - 6.11) + 0.00057 P_a T_a]$$

Τέλος, αν η θερμοκρασία αέρα,  $T_a$ , είναι μικρότερη από  $0^{\circ}\text{C}$  θεωρείται ότι η κατακρήμνιση πέφτει με τη μορφή χιονιού, και δεν πραγματοποιείται τήξη.

## Τήξη κατά τη διάρκεια μη βροχερών περιόδων

Κατά τη διάρκεια μη βροχερών περιόδων η τήξη στην επιφάνεια της χιονοστιβάδας θεωρείται ότι είναι ανάλογη της διαφοράς μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας αέρα και της θερμοκρασίας βάσης, MBASE:

$$M = M_f (T_a - MBASE)$$

Όπου,

$M_f$  συντελεστής τήξης ( $\text{mm} \times ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Η MBASE είναι παράμετρος του ομοιώματος και συνήθως παίρνει τιμή  $0^\circ\text{C}$ .

Διάφορες έρευνες έδειξαν ότι ο συντελεστής τήξης,  $M_f$ , μεταβάλλεται με τις εποχές, λαμβάνοντας την ελάχιστη τιμή του, MFMIN, στις 21 Δεκεμβρίου και τη μέγιστη, MFMAX, στις 21 Ιουνίου. Για τις άλλες ημερομηνίες ο συντελεστής τήξης υπολογίζεται από την ακόλουθη ημιτονοειδή καμπύλη:

$$M_f = \frac{MFMAX + MFMIN}{2} + \sin\left(\frac{n2\pi}{366}\right) \frac{MFMAX - MFMIN}{2} \quad (4.39)$$

όπου,

MFMAX μέγιστος συντελεστής τήξης ( $\text{mm} \times ^\circ\text{C}^{-1} \times 6\text{hr}^{-1}$ )

MFMIN ελάχιστος συντελεστής τήξης ( $\text{mm} \times ^\circ\text{C}^{-1} \times 6\text{hr}^{-1}$ )

n αύξοντας αριθμός ημέρας αρχίζοντας από τις 21 Μαρτίου

Οι FMAX και FMIN είναι παράμετροι του ομοιώματος.

Ο Anderson (1978<sub>a</sub>) ότι η ημιτονοειδής μεταβολή (4.39) του συντελεστή τήξης,  $M_f$ , είναι ανεπαρκής για κλιματικές συνθήκες όπως αυτές που επικρατούν στην Αλάσκα. Έτσι εισήχθηκε ο τροποποιημένος συντελεστής τήξης,  $M_f^*$ :

$$M_f^* = (M_f - MFMIN) F + MFMIN \quad (4.40)$$

όπου,

F συντελεστής ρύθμισης.

Ο συντελεστής F ορίζεται για

$$x \leq 0.48 \quad F = 0.0$$

$$0.48 < x < 0.7 \quad F = \frac{x - 0.48}{0.22}$$

$$x \geq 0.7 \quad F = 1.0$$

όπου,

$x$  δεκαδικό ποσοστό του χρόνου μεταξύ 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου.

### **Ανταλλαγή θερμότητας κατά τη διάρκεια περιόδων χωρίς τήξη χιονιού**

Όταν η θερμοκρασία αέρα είναι μικρότερη από 0°C το ομοίωμα θεωρεί ότι δεν πραγματοποιείται τήξη. Στην περίπτωση αυτή η ανταλλαγή θερμότητας μπορεί να είναι θετική (η χιονοστιβάδα κερδίζει θερμότητα) ή αρνητική (η χιονοστιβάδα χάνει θερμότητα). Η κατεύθυνση της ροής τη θερμότητας εξαρτάται από το αν ο αέρας είναι θερμότερος ή ψυχρότερος από το επιφανειακό στρώμα της χιονοστιβάδας. Ο δείκτης προηγούμενης θερμοκρασίας,  $ATI$ , χρησιμοποιείται ως δείκτης θερμοκρασίας του επιφανειακού στρώματος της χιονοστιβάδας. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$ATI_2 = ATI_1 + TIPM (T_{a2} - ATI_1)$$

Όπου,

Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην αρχή και το τέλος της εξάωρης περιόδου,  $TIPM$  παράμετρος δείκτη προγενέστερης θερμοκρασίας ( $0.0 \leq TIPM \leq 1.0$ ) (4.41).

Για την εξίσωση (4.41) ισχύουν οι εξαιρέσεις:

A) αν ο δείκτης  $ATI$  είναι μεγαλύτερος από 0°C, τότε  $ATI = 0^\circ C$ .

B) αν η χιονοστιβάδα είναι ισόθερμη στους 0°C, τότε  $ATI = 0^\circ C$ .

Γ) αν πραγματοποιείται ισοδύναμο νερό χιονόπτωσης μεγαλύτερο από 5 mm το εξάωρο, τότε ο δείκτης  $ATI$  εξισώνεται με τη θερμοκρασία του νέου χιονιού, αφού το νέο χιόνι είναι τώρα το επιφανειακό στρώμα.

Η ανταλλαγή θερμότητας κατά τη διάρκεια περιόδου χωρίς τήξη θεωρείται ανάλογη της κλίσης της θερμοκρασίας που προσεγγίζεται από τη διαφορά τρέχουσας θερμοκρασίας αέρα,  $T_a$ , και δείκτη προηγούμενης θερμοκρασίας,  $ATI_1$ , στην αρχή της εξάωρης περιόδου. Συνεπώς η αλλαγή (κέρδος ή



απώλεια) στην αποθήκευση θερμότητας της χιονοστιβάδας, όταν  $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ , εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\Delta D = NM_f (AT_{11} - T_{a2}) \quad (4.42)$$

Όπου,

$\Delta D$  αλλαγή στο έλλειμμα θερμότητας χιονοστιβάδας ( $\text{mm}_e$ ), και

$NM_f$  αρνητικός συντελεστής τήξης ( $\text{mm}_e \times ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Η θερμική αγωγιμότητα της χιονοστιβάδας (θετική ή αρνητική) είναι βασική συνάρτηση της πυκνότητας χιονιού. Η πυκνότητα το επάνω στρώματος της χιονοστιβάδας τείνει να αυξηθεί καθώς το χιόνι ωριμάζει και η τήξη προχωρεί με αποτέλεσμα ο αρνητικός συντελεστής τήξης να μεταβάλλεται εποχιακά. Το ομοίωμα θεωρεί ότι η εποχιακή μεταβολή του αρνητικού συντελεστή τήξης,  $NM_f$ , είναι ίδια με εκείνη του συντελεστή τήξης,  $M_f$ , και εκφράζεται από την εξίσωση:

$$NM_f = \frac{M_f}{MFMAX} NMF \quad (4.43)$$

όπου,

$NMF$  μέγιστος αρνητικός συντελεστής τήξης ( $\text{mm}_e \times ^{\circ}\text{C}^{-1} \times 6\text{hr}^{-1}$ ). Είναι παράμετρος του ομοιώματος.

### **Επιφανειακή Έκταση Χιονοκάλυψης**

Το ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτεται με χιόνι πρέπει να εκτιμηθεί για να προσδιοριστεί η επιφάνεια πάνω στην οποία πραγματοποιείται ανταλλαγή ενέργειας, και για την περίπτωση της βροχόπτωσης πάνω σε μεταβαλλόμενη χιονοστιβάδα, να προσδιοριστεί η ποσότητα του νερού της βροχής που πέφτει πάνω σε γυμνό έδαφος.

Η επιφανειακή μείωση του χιονιού είναι βασική συνάρτηση της αρχικής χιονοκάλυψης που παραμένει (δεν λιώνει). Η κατανομή της χιονοκάλυψης κατά την εποχή συσσώρευσης χιονιού επηρεάζεται από συνθήκες τοπογραφίας, φυτοκάλυψης, μορφής καταιγίδων, και ανέμου. Επειδή οι αναφερόμενοι παράγοντες είναι παρόμοιοι από έτος σε έτος, τα διαγράμματα συσσώρευσης χιονοστιβάδας είναι και αυτά παρόμοια. Τα διαγράμματα λιωσίματος χιονιού επηρεάζονται από την τοπογραφία, φυτοκάλυψη και καιρικές συνθήκες και είναι επίσης παρόμοια από έτος σε έτος. Λόγω αυτών

των ομοιοτήτων στα διαγράμματα συσσώρευσης και τήξης χιονιού, κάθε περιοχή παρουσιάζει μια μοναδική καμπύλη επιφανειακής μείωσης.

Καμπύλη επιφανειακής μείωσης χιονιού, όπως χρησιμοποιείται στο ομοίωμα, είναι η απεικόνιση της επιφανειακής έκτασης της χιονοκάλυψης και ενός λόγου που δείχνει πόση από την αρχική χιονοκάλυψη παραμένει (δεν λιώνει) και εκφράζεται από το ισοδύναμο ύψος νερού επιφάνειας προς το δείκτη επιφάνειας  $A_i$ . Η τιμή του δείκτη  $A_i$  είναι μικρότερη από το μέγιστο ισοδύναμο νερό επιφάνειας από τότε που άρχισε να συσσωρεύεται το χιόνι (π.χ. από την έναρξη της εποχής του χιονιού), ή από ένα προκαθορισμένο μέγιστο,  $S_I$  (mm).

Έτσι, η παράμετρος του ομοιώματος  $S_I$  είναι το μέσο ισοδύναμο ύψος νερού επιφάνειας πάνω από το οποίο υπάρχει πάντοτε 100% επιφανειακή χιονοκάλυψη. Τυπική καμπύλη επιφανειακής μείωσης χιονιού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8.

Κατά τη μείωση της χιονοκάλυψης νέο χιόνι μπορεί να πέσει πάνω σε επιφάνεια που είναι μερικώς γυμνή από χιόνι. Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια επανέρχεται στο 100% της χιονοκάλυψης για ένα χρονικό διάστημα, και μετά επιστρέφει στην καμπύλη επιφανειακής μείωσης χιονιού. Στο ομοίωμα, η επιφάνεια παραμένει στο 100% της χιονοκάλυψης έως ότου λιώσει το 25% του νέου χιονιού. Τότε η επιφάνεια επιστρέφει, με ευθεία γραμμή, στο σημείο όπου ήταν πάνω στην καμπύλη μείωσης πριν από τη χιονόπτωση. Στην πραγματικότητα, η κατάσταση του 25% και η επιστροφή της ευθείας γραμμής στην καμπύλη μείωσης σπάνια συμβαίνει. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις αυτές είναι αιτιολογημένες και η επίδρασή τους στα αποτελέσματα του ομοιώματος δεν απαιτεί την εισαγωγή άλλων παραμέτρων.

### **ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΧΙΟΝΟΣΤΙΒΑΔΑΣ**

Η αποθήκευση θερμότητας στη χιονοστιβάδα εκφράζεται στο ομοίωμα από το έλλειμμα θερμότητας. Το έλλειμμα θερμότητας δείχνει την ποσότητα θερμότητας που πρέπει να προστεθεί στη χιονοστιβάδα για να επιστρέψει αυτή στην κατάσταση της ισόθερμου του  $0^{\circ}\text{C}$ , με το ίδιο περιεχόμενο ύψος υγρού νερού με εκείνο του μηδενικού ελλείμματος θερμότητας. Μετά την επιστροφή του ελλείμματος θερμότητας στο μηδέν, το επιφανειακά λιωμένο

χιόνι ή το νερό της βροχής μπορεί πάλι να συνεισφέρει στην αποθήκευση στην αποθήκευση υγρού νερού ή στην εκροή χιονοστιβάδας. Από φυσικής άποψης το έλλειμμα θερμότητας συνίσταται από υγρό νερό που παγώνει μέσα στη χιονοστιβάδα όταν χάνεται θερμότητα και το χιόνι βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη από 0°C.

Ο φυσικός σχηματισμός του ελλείμματος θερμότητας δεν είναι σημαντικός, μόνο το συνολικό έλλειμμα ενδιαφέρει.

Το ομοίωμα υπολογίζει συνεχώς, ανά εξάωρο διάστημα, το συνολικό έλλειμμα θερμότητας.

### **ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΥΓΡΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Οι κρύσταλλοι του χιονιού συγκρατούν το υγρό νερό όπως ακριβώς στα εδαφικά σωματίδια. Στο ομοίωμα, η μέγιστη ποσότητα υγρού νερού που μπορεί να κρατήσει η χιονοστιβάδα είναι:

$$LIQWMX = PLWHC \times WE \quad (4.44)$$

όπου,

PLWHC ποσοστιαία χωρητικότητα χιονοστιβάδας για τη συγκράτηση υγρού νερού,

WE ισοδύναμο νερό στερεού μέρους χιονοστιβάδας (πάγου) (mm).

Το ομοίωμα θεωρεί ότι η παράμετρος PLWHC είναι σταθερή για όλες τις καταστάσεις χιονοκάλυψης, αφού οι μεταβολές στη χωρητικότητα συγκράτησης υγρού νερού σε σχέση με την πυκνότητα και τη δομή των κρυστάλλων δεν είναι πλήρως ορισμένες.

Το υγρό νερό που περισσεύει από τη συγκράτηση της χιονοστιβάδας απορρέει μέσω αυτής και σχηματίζει εκροή. Υπάρχει υστέρηση και εξασθένηση του φαινομένου καθώς το πλεόνασμα υγρού νερού εκφράζεται από την εξίσωση:

$$L = 5.33 \left[ 1.0 - \exp\left(\frac{-0.03 WE}{E}\right) \right] \quad (4.45)$$

όπου,

L υστέρηση (hrs), και

E πλεόνασμα υγρού νερού (mm x 6hr<sup>-1</sup>),

Η εξασθένηση της διαδικασίας μεταφοράς υγρού νερού περιγράφεται από το ρυθμό απορροής  $R_1$  του αποθηκευμένου στη χιονοστιβάδα υγρού νερού, ο οποίος προσδιορίζεται από τα δεδομένα λυσίμετρου CSSL και, για χρονικό διάστημα 1 hr, εκφράζεται από την εξίσωση:

$$R_1 = \frac{1.0}{5.0 \exp\left[\frac{-500 E_{Is}}{W_s^{1.3}}\right] + 1.0} \quad (4.46)$$

όπου,

$R_1$  μίας ώρας ρυθμός απορροής ( $\text{hr}^{-1}$ ),

$E_{Is}$  μέση ποσότητα πλεονάσματος υγρού νερού σε υστέρηση πάνω στη χιονοστιβάδα για την τρέχουσα περίοδο (inches), και

$WE_s$  μέσο ισοδύναμο νερό στερεού μέρους χιονιού (πάγου) πάνω στη χιονοκαλυμμένη επιφάνεια (inches).

Οι εξισώσεις (4.45) και (4.46) παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα 4.9 και 4.10.

Η ωριαία εκροή χιονοστιβάδας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q_s = (S_1 + E_i) R_1$$

όπου,

$Q_s$  εκροή χιονοστιβάδας ( $\text{mm} \times \text{hr}^{-1}$ ),

$S_1$  ποσότητα πλεονάσματος υγρού νερού αποθηκευμένου στη χιονοστιβάδα στην αρχή της περιόδου (mm), και

$E_i$  ποσότητα πλεονάσματος υγρού νερού σε υστέρηση που εισέρχεται για αποθήκευση κατά τη διάρκεια της τρέχουσας περιόδου (mm).

Η αλλαγή στην ποσότητα του αποθηκευμένου στη χιονοστιβάδα

πλεονάσματος υγρού νερού είναι:

$$S_2 = S_1 + E_i - Q_s \quad (4.47)$$

όπου,

$S_2$  ποσότητα πλεονάσματος υγρού νερού αποθηκευμένου στη χιονοστιβάδα στο τέλος της περιόδου (mm).

Η εξάωρη εκροή της χιονοστιβάδας αποκτάται από την άθροιση των κατάλληλων ωριαίων εκροών.

### **Ανταλλαγή θερμότητας στη διεπιφάνεια χιονιού εδάφους**

Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ χιονιού και εδάφους συνήθως αμελείται συγκρινόμενη με την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και χιονιού. Σε μερικές λεκάνες, μικρή ποσότητα λιωμένου χιονιού συνήθων σχηματίζεται στη βάση της χιονοστιβάδας. Η ποσότητα αυτή αν και είναι μικρή σε ημερήσια βάση, γίνεται σημαντική ποσότητα νερού για όλη την περίοδο χιονιού. Το νερό του λιωμένου χιονιού πάνω στο έδαφος προστίθεται στην αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας και βοηθάει στη συντήρηση της βασικής ροής κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Το ομοίωμα θεωρεί ότι σταθερή ποσότητα χιονιού λιώνει κάθε μέρα στη διεπιφάνεια χιονιού-εδάφους. Ο σταθερός αυτός ρυθμός τήξης προσδιορίζεται από την παράμετρο DAYGM ( $\text{mm} \times \text{day}^{-1}$ ). Το νερό του λιωμένου στο έδαφος χιονιού προστίθεται στη εκροή χιονοστιβάδας και στη βροχή που πέφτει σε γυμνό (από χιόνι) έδαφος, για να αποκτηθεί το συνολικό νερό βροχής και τήξης το οποίο αποτελεί μεταβλητή εισόδου σε οποιοδήποτε ομοίωμα βροχόπτωσης-απορροής.

### **Παράμετροι ομοιώματος**

Για την προσομοίωση και τήξη χιονιού χρησιμοποιήθηκαν από το ομοίωμα διάφορες παράμετροι οι οποίες παρουσιάστηκαν διασκορπισμένες κατά την περιγραφή των συνιστωσών διαδικασιών του ομοιώματος. Παρακάτω, παρουσιάζονται όλες μαζί, περιγράφονται, και τοποθετούνται οι κλιματικοί και φυσιογραφικοί παράγοντες από τους οποίους προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές τους (οι τελικές τιμές που προσδιορίζονται από τη διαδικασία της ρύθμισης). Οι παράμετροι διακρίνονται σε κύριες και δευτερεύουσες ανάλογα με την επίδραση που εξασκούν στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

### **Κύριες παράμετροι ομοιώματος**

Οι παράμετροι αυτές είναι:

- SCF διορθωτικός συντελεστής δεδομένων κατακρήμνισης για ελλιπή σύλληψη σταθμού κατά τις περιόδους χιονοπτώσεων. Ο συντελεστής μετράει επίσης για απώλειες υδρατμών και συγκράτησης χιονιού στη φυτοκάλυψη.
- Κλιματικοί και φυσιογραφικοί παράγοντες που προσδιορίζουν το συντελεστή SCF είναι οι ταχύτητες ανέμου κατά τη διάρκεια

χιονοπτώσεων και η θέση του σταθμού μέτρησης της κατακρήμνισης. Για ασθενείς ανέμους και καλώς προστατευόμενους σταθμούς η τιμή του συντελεστή SCF είναι 1.0 ενώ για ανεμώδεις περιοχές με φτωχή προστασία σταθμών ο συντελεστής παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1.2.

- MFMAX Μέγιστος συντελεστής τήξης μη βροχερών περιόδων που συμβαίνει στις 21 Ιουνίου ( $\text{mm} \times ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}^{-1}$ ).
- MFMIN Ελάχιστος συντελεστής τήξης μη βροχερών περιόδων που συμβαίνει στις 21 Δεκεμβρίου ( $\text{mm} \times ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}^{-1}$ ).

Η δασική κάλυψη είναι ο συνηθέστερος παράγοντας ταξινόμησης των συντελεστών τήξης (MFMAX, MFMIN), λόγω της επίδρασης που εξασκεί σε πολλές μεταβλητές ενεργειακής ανταλλαγής στη χιονοκάλυψη. Έτσι διαφορές στη δασοκάλυψη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξηγήσουν μεταβολές στους ρυθμούς τήξης από περιοχή σε περιοχή. Οι κλιματικοί παράγοντες είναι ιδιαίτερα σημαντικοί όταν πρόκειται να ερμηνεύσουν διαφορές στους συντελεστές τήξης για περιοχές με ιδιαίτερες φυσιογραφικές καταστάσεις. Για παράδειγμα, οι συντελεστές τήξης στις αρκτικές περιοχές είναι ελαφρώς μικρότεροι από αυτούς στα μικρά γεωγραφικά πλάτη με ίδια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, λόγω της μικρότερης έντασης ακτινοβολίας και της σχετικά μικρότερης ταχύτητας ανέμου κατά την περίοδο τήξης του χιονιού.

#### 4.4.6 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΓΑΜΑ

Η μεθοδολογία SWE (Snow Water Equivalent): Η χρήση της ακτινοβολίας γάμα για να μετρήσουμε το SWE βασίζεται, στην εξασθένιση της φυσικής γήινης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται και διαπερνά τη μάζα του χιονιού, όταν φτάνει τα ανώτερα στρώματα χιονιού. Η ακτινοβολία γάμα εκπέμπεται από το ποτάσιο ( $^{40}\text{K}$ ), το ουράνιο ( $^{238}\text{U}$ ), ραδιοϊσότοπα ( $^{280}\text{T}_2$ ) στο έδαφος, με την περισσότερη εκπομπή να προέρχεται από τα 20 cm. της επιφάνειας. Η ένταση της ακτινοβολίας γάμα μετριέται χρησιμοποιώντας φασματόμετρο

ακτινοβολίας γάμα, το οποίο μεταφέρεται από αεροπλάνο για έρευνες στις μετρήσεις χιονιού, (Fritzsche, 1982).

Οι γάμα μετρήσεις μέσω αέρος του SWE σε μια λεκάνη απορροής, συνήθως απαιτούν ένα καθιερωμένο δίκτυο πτήσεων. Μια πρώτη πτήση (χωρίς χιόνι) διεξάγεται το φθινόπωρο, πριν τη συσσώρευση χιονιού και κατόπιν οι ίδιες πτήσεις γίνονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν η περιοχή έχει καλυφθεί από χιόνι. Οι εναέριες SWE μετρήσεις με τη χρήση ακτινοβολίας γάμα προκύπτουν από τη σχέση που δίνεται στην εξίσωση (4.28), (Carroll, 1990):

$$SWE = \frac{1}{A} \left( \ln \frac{C_0}{C} - \ln \frac{100 + 1.11M}{100 + 1.11M_0} \right) \quad (4.28)$$

όπου:

SWE: αντίστοιχη ισοδύναμη ποσότητα που προκύπτει από την τήξη του χιονιού, g/cm<sup>2</sup>

C και C<sub>0</sub>: χερσαίες μετρήσεις γάμα σε χιονισμένο και γυμνό έδαφος αντιστοίχως

M και M<sub>0</sub>: ποσοστό υγρασίας εδάφους σε καλυμμένες από χιόνι και γυμνές περιοχές αντιστοίχως

A: συντελεστής εναλλαγής ακτινοβολίας στο νερό, cm<sup>2</sup>/g

Η χρήση εναέριων γάμα μετρήσεων για την ανάκτηση του SWE είναι μια αξιόπιστη τεχνική η οποία έχει αποδειχθεί αποτελεσματική και έτοιμη προς χρήση για υδρολογικές μετρήσεις σε πολλές χώρες έχοντας πολλά **πλεονεκτήματα**. Οι έρευνες σε λεκάνες μπορούν να ολοκληρωθούν σε λίγες ώρες, δίνοντας πληροφορίες για την κατανομή του χιονιού στο χώρο (χιονοκάλυψη) και μια ενδεικτική εκτίμηση της ποσότητας του χιονιού που απορρέει στη λεκάνη (SWE). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιοχές όλων των μεγεθών. Όπως περιγράφεται από το πρόγραμμα NWS για την έτοιμη προς χρήση εναέρια έρευνα χιονιού με ακτινοβολία γάμα (Carroll, 1990), οι πληροφορίες που προκύπτουν για το SWE μπορούν να διατεθούν σε πρακτορεία μέσα σε λίγες ώρες από την εναέρια έρευνα, παρέχοντας έτσι

έγκαιρες πληροφορίες για υδρολογικές προβλέψεις, (Schultz – Engman EDS, 2000).

Υπάρχουν όμως και κάποια **μειονεκτήματα** που σχετίζονται με τη μέθοδο αυτή. Δεδομένου ότι η ακτινοβολία γάμα μειώνεται όταν διαπερνά το νερό σε όλες τις φάσεις, οι μετρήσεις ακτινοβολίας θα περιλαμβάνουν την επίδραση της υγρασίας στο έδαφος όπως και την επίδραση της μάζας του χιονιού και επομένως η συμβολή της υγρασίας του εδάφους πρέπει να συμπεριληφθεί. Ανακριβείς εκτιμήσεις της υγρασίας του εδάφους θα αποφέρει υπερβολικές εκτιμήσεις ή υποεκτιμήσεις του SWE. Με τη διεξαγωγή μιας βασικής εναέριας γάμα πτήσης το φθινόπωρο πριν τη συσσώρευση χιονιού, η βασική υγρασία του εδάφους μπορεί να μετρηθεί, αλλά δε θα είναι αντιπροσωπευτική εάν οι επακόλουθες βροχοπτώσεις αυξήσουν την υγρασία στο έδαφος ή εάν η υγρασία μεταφερθεί πάνω από το έδαφος στο χιόνι κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Οι μετρήσεις της υγρασίας του εδάφους, που έγιναν πάνω σε αυτό, κατά μήκος της πτήσης κατά τη διάρκεια των χειμερινών πτήσεων, μπορούν να συνεισφέρουν σε ένα πιο ακριβές SWE (Carroll et al. 1983).

#### **4.5 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΕΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΤΗΞΗΣ**

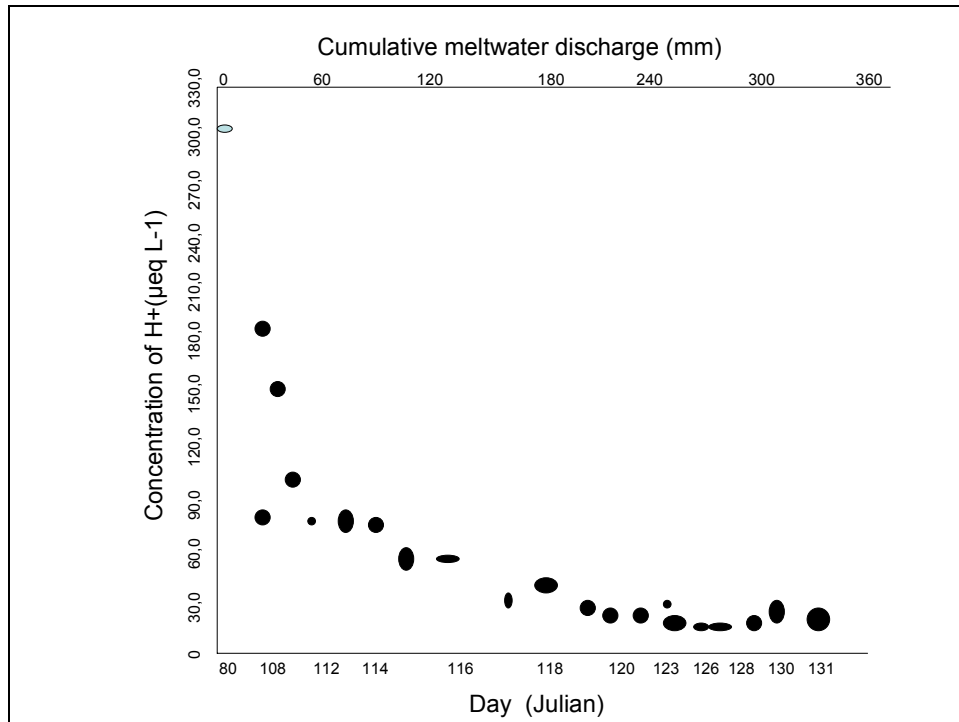
Η ποιότητα της ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης είναι καθορισμένη από τα στοιχεία που σχηματίζουν τον πυρήνα κάθε μορφής κατακρήμνισης (σταγόνα βροχής, χιονονιφάδα), που εκτός από νερό αποτελούνται συνήθως και από άλλα υλικά όπως: (α) θαλασσινό αλάτι, (β) γήινη ή αιωρούμενη σκόνη, (γ) ηφαιστειακά θραύσματα, (δ) μόρια καπνού ή ποικίλες ρυπαντικές ουσίες. Η διαλυτότητα των παραπάνω στοιχείων στον πάγο είναι πολύ λιγότερη από ότι στο νερό υγρής μορφής, επομένως έχουν ελάχιστη επίδραση στην ποιότητα της χιονόπτωσης. Όμως, οι χιονονιφάδες έχουν μεγάλες επιφάνειες, οι οποίες μπορούν να σχηματίσουν δεσμούς υδρογόνου με συστατικά της ατμόσφαιρας και συνεπώς συλλέγουν φυσικά και ανθρωπογενή ατμοσφαιρικά συστατικά καθώς κατακρημνίζονται.



Τα χιονοστρώματα, στις απόμερες ορεινές περιοχές, τυπικά έχουν  $pH > 5,2$  και χαμηλή συγκέντρωση από ρευστοποιημένα ιόντα, καθώς αυτά σε περιοχές επηρεασμένες από ανθρωπογενείς εκκρίσεις έχουν  $pH < 3,8$  και αντοχή ιόντων 10 έως 25 φορές, μεγαλύτερη. Παραλλαγές, στη σχετική συγκέντρωση από ποικίλα συστατικά, στο χιόνι, εξαρτώνται από την συγκέντρωση ιόντων στην καταιγίδα και από την απόσταση εστιών μόλυνσης. Σε τοπική κλίμακα, η σύσταση μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με το αν το χιόνι πέρασε διαμέσου πυκνά φυτοκαλυμένου δάσους ή έπεσε στο ύπαιθρο.

Μετά τη χιονόπτωση, η χημεία του χιονιού είναι ευρύτερα μεταβλητή από φυσικές και ανθρωπογενείς ιδιαιτερότητες που συσσωρεύονται στην επιφάνεια (ξηρή κατάθεση) και καλύπτονται από διαδοχικές κατακρημνίσεις (χιονοπτώσεις ή βροχή). Το φιλτράρισμα της βροχής και της τήξης του νερού, καθώς επίσης και το πάγωμά του, για δεύτερη φορά, σε βάθος μέσα στο χιονόστρωμα, μεταβάλουν ευρύτερα την κατανομή των χημικών συστατικών μέσα σε αυτό.

Στο μικροσκοπικό επίπεδο, η διαδικασία γρήγορων μεταπτώσεων της θερμότητας, και η συνακόλουθη εξάτμιση, κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσης, έχει σαν αποτέλεσμα την αποβολή ιόντων από το εσωτερικό των χιονόκοκκων. Επομένως, η συγκέντρωση των ιόντων από την πρώτη φάση τήξης του νερού, είναι συνήθως υψηλότερη, από τη μέση συγκέντρωση στο χιονόστρωμα: τυπικά τα πρώτα 20-30% της τήξης του νερού παράγουν το 50-80% των γνήσια ρευστοποιημένων συστατικών του χιονοστρώματος. Ο βαθμός της διαφορετικότητας φιλτραρίσματος, είναι μεγαλύτερος σε τοποθεσίες και έτη με μοναδική περίοδο τήξης, και ελάχιστος όταν υπάρχουν πολλές περίοδοι τήξης. Επίσης ποικίλει ανάλογα με τα είδη των ιόντων, για συγκεκριμένη περιοχή και περίοδο. Η διαφορετικότητα φιλτραρίσματος φαίνεται καθαρά για το ιόν υδρογόνου ( $H^+$ ) στο παρακάτω σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 4.8: Συγκέντρωση ιόντος υδρογόνου συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της τήξης στο Quebec, στον Καναδά, δείχνοντας τη διαφορετικότητα φιλτραρίσματος που μπορεί να παράγει η «όξινη κρούση» στα υδρόβια οικοσυστήματα, (Στοιχεία Stein et.al. 1986).

Η «όξινη κρούση» που παράγεται από το υψηλό ιόν υδρογόνου ( $H^+$ ), η οποία είναι συγκεντρωμένη στο τηκόμενο νερό και εισρέει στα ποτάμια πολλών περιοχών, μπορεί να ελαττώσει την αναπαραγωγική ικανότητα ψαριών και αμφίβιων και να προκαλέσει μαζικούς θανάτους ψαριών. Το θειικό άλας ( $SO_4^{2-}$ ), το χλώριο ( $Cl^-$ ), τα νιτρικά ( $NO_3^-$ ), ίχνη μετάλλων και οργανικά μίγματα, είναι επίσης διαφορετικά φιλτραρισμένα και μπορούν να συμβάλουν σε ισχυρά «όξινες κρούσεις» στην υδρόβια χλωρίδα και πανίδα, κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης τήξης, (Dingman, 1993).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΞΗΣ**

### **5.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΤΗΞΗΣ ΣΤΟ DANVILLE,VT**

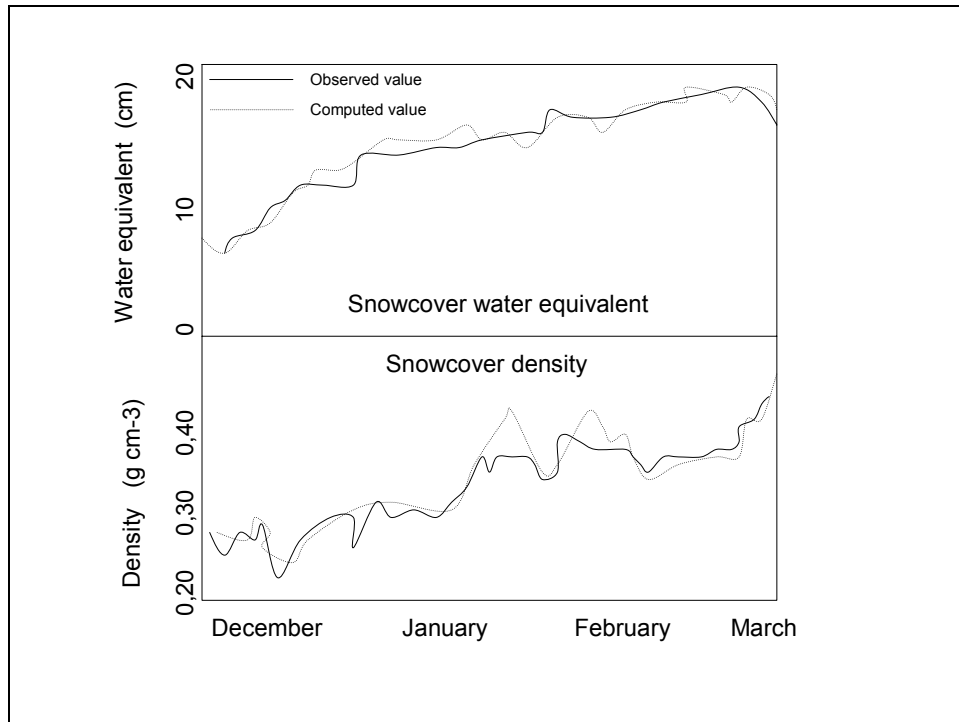
Η αναφορά του Anderson (1976), καλύπτοντας έξι περιόδους τήξης στο Danville VT, είναι η πιο πλήρης αντιπαράθεση δύο μοντέλων:

(α) του ενεργειακού ισοζυγίου και

(β) του μοντέλου ημερήσιας θερμοκρασίας, με πραγματικά δεδομένα. Το μοντέλο περιελάμβανε: (α) εξομοίωση της κατάστασης του χιονοστρώματος

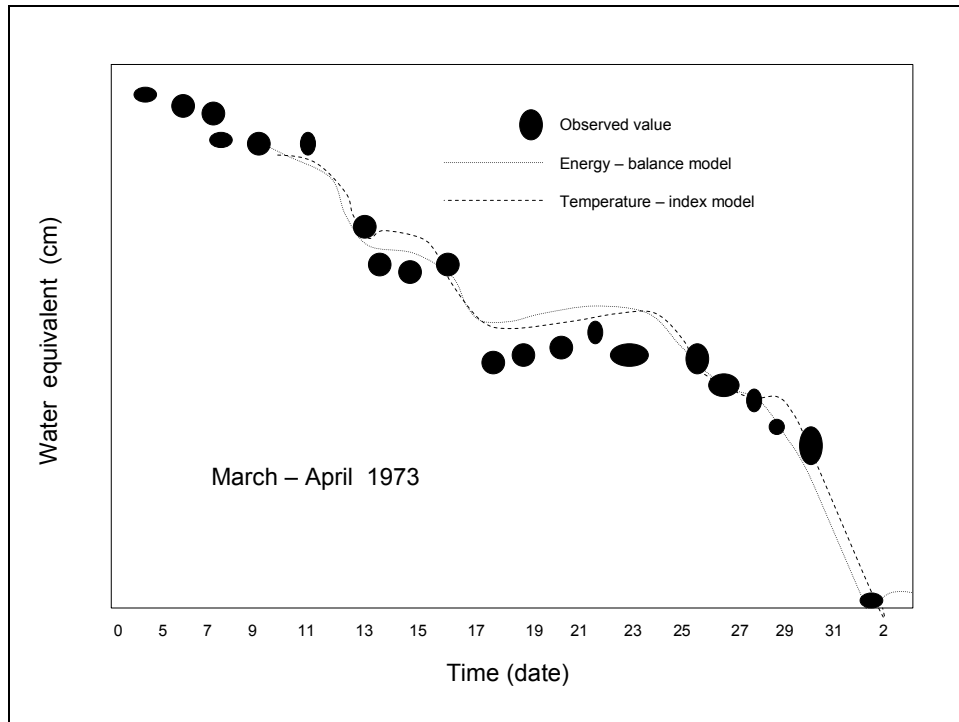
(πυκνότητα – ύψος χιονιού), καθώς και (β) ενεργειακό ισοζύγιο χιονοστρώματος και χρησιμοποιήθηκε σε περιόδους τήξης και πήξης. Το μοντέλο της ημερήσιας θερμοκρασίας, προσαρμοσμένο για την περιοχή Danville, είναι εφαρμόσιμο μόνο για την παραγωγική φάση της περιόδου τήξης (κατά την περίοδο που το χιόνι αλλάζει φάση και προσφέρει με την απορροή του στον υδρολογικό κύκλο). Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματά του για την περίοδο 1972-1973.

Το σχήμα 5.1 συγκρίνει, τις τιμές του ύψους της ισοδύναμης ποσότητας νερού που παράγεται με το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου με τις παρατηρούμενες τιμές ύψους, όπως επίσης συγκρίνονται στο ίδιο σχήμα, οι τιμές της πυκνότητας που εξάγονται από το συγκεκριμένο μοντέλο, με τις τιμές της πυκνότητας από τοπικές μετρήσεις - παρατηρήσεις που έχουν γίνει. Οι μετρήσεις του Anderson έχουν γίνει για τις θερμές και ώριμες φάσεις της περιόδου τήξης.



ΣΧΗΜΑ 5.1: Σύγκριση παρατηρούμενης και δημιουργούμενης (μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου) ισοδυναμίας νερού (ύψος) – χιονοστρώματος και πυκνότητας για τα έτη 1972 -1973 (περίοδος υπολογισμού) κατά τη θερμή φάση και κατά τη φάση ωρίμανσης σε εποχή τήξης στο Danville, VT, (Στοιχεία από Anderson, 1976).

Το σχήμα 5.2 δείχνει μια παρόμοια σύγκριση για την παραγωγική φάση και περιλαμβάνει τις εκτιμήσεις του μοντέλου ημερήσιας θερμοκρασίας.



ΣΧΗΜΑ 5.2: Σύγκριση μεταξύ παρατηρούμενης και εκτιμούμενης, μέσω των δύο μοντέλων, (ενεργειακό ισοζύγιο και μοντέλο ημερήσιας θερμοκρασίας) ισοδυναμίας ύψους νερού από τη φάση τήξης του χιονοστρώματος για την περίοδο τήξης 1973, για το Danville, VT, (Στοιχεία από Anderson, 1976).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Τα δυο μοντέλα, αποδίδουν πολύ καλά στον υπολογισμό φαινόμενης πυκνότητας χιονοστρώματος και τιμών ύψους ισοδύναμου νερού που παράγεται μέσω τήξης, για την περίοδο 1972-1973.

Το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου, έδωσε ποιο ακριβή αποτελέσματα, ενώ το μοντέλο ημερήσιας - θερμοκρασίας ήταν ακριβέστερο κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Οι προβλέψεις παραγωγής ισοδύναμης ποσότητας νερού ήταν επίσης ικανοποιητικές. Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι γνώσεις μας για την χρονική εξέλιξη του χιονοστρώματος είναι καλά θεμελιωμένες, και ότι μπορούν να εξομοιωθούν σε υψηλό βαθμό ακριβείας, με προσεκτική εφαρμογή των μοντέλων υπολογισμού (Dingman, 1993).

## 5.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ SWE ΚΑΝΑΔΙΚΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ

Στον Καναδά, ένα ομοσπονδιακό κυβερνητικό πρόγραμμα (Climate Research Branch, Atmospheric Environment Service) συνεχίζεται από τις αρχές του '80 για να αναπτύξει, να επικυρώσει και να εφαρμόσει παθητικά μικροκυματικά δορυφορικά δεδομένα για τον καθορισμό της έκτασης του χιονιού (χιονοκάλυψης), του SWE, την κατάσταση του χιονοστρώματος (υγρό / ξηρό) σε Καναδικές περιοχές, για σχεδόν πραγματικό χρόνο και λειτουργική χρήση σε υδρολογικές και κλιματολογικές εφαρμογές. Οι Goodison και Walker, 1995 παρέχουν την έρευνα και ανάπτυξη των αλγορίθμων για τον ακριβή υπολογισμό των ανωτέρω παραγόντων. Για μια περιοχή ένας SWE αλγόριθμος βγήκε εμπειρικά με τη χρήση εναέριων μικροκυματικών ραδιομετρικών δεδομένων (Goodison et al. 1986), και ελέγχθηκε και επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα Nimbus-7 SMMR και DMSP SSM/I (Goodison, 1989).

Με την εκτόξευση του πρώτου SSM/I στο δορυφόρο DMSP F-8 το 1987, προέκυψε η ικανότητα να προσεγγιστούν τα δεδομένα παθητικών μικροκυμάτων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και να παραχθούν μετρήσεις χιονοκάλυψης για χρήστες. Από το 1989, το Climate Research Branch prairie SWE αλγορίθμων έχει εφαρμοστεί σε σχεδόν πραγματικό χρόνο δεδομένων SSM/I για να δημιουργηθούν εβδομαδιαίοι χάρτες, απεικονίζοντας τρέχουσες συνθήκες SWE για τις επαρχίες της Alberta, Saskatchewan και Matitoba στο δυτικό Καναδά. Ο Thirkettle et al. (1991) περιγράφει τις διαδικασίες για την απόκτηση δεδομένων επεξεργάζοντας και χαρτογραφώντας τις πληροφορίες SWE.

Μετά από λειτουργία 10 χειμώνων, το καναδικό πρόγραμμα για την χαρτογράφηση του SWE σε λεκάνες έδειξε με επιτυχία τη χρήσιμη εφαρμογή του SSM/I που απορρέει από πληροφορίες για τη χιονοκάλυψη για λειτουργικές υδρολογικές αναλύσεις. Είναι επίσης συμβατό πρόγραμμα από την άποψη ότι οι πληροφορίες του χρήστη εξυπηρετούν στην εγκυρότητα και βελτίωση του SSM/I SWE αλγορίθμου (Goodison και Walker, 1995). Μια βελτίωση είναι η δημιουργία ενός δείκτη για υγρό χιόνι (Goodison και Walker, 1993), ο οποίος έχει υπερνικήσει ένα μεγάλο εμπόδιο της τεχνικής παθητικών μικροκυμάτων που περιγράφονται δίνοντας την ικανότητα διάκρισης των

περιοχών που περιέχουν χιόνι «υγρής μορφής», από τις περιοχές χωρίς χιόνι, και επομένως να έχουμε μια πιο ακριβή ανάλυση της έκτασης του χιονιού (χιονοκάλυψης) και της διάρκειας της τήξης. Το γεγονός αυτό συμβαίνει γιατί ένα μεγάλο ποσοστό σφαλμάτων στην εκτίμηση της χιονοκάλυψης προκύπτει από την αδυναμία διάκρισης υγρού και ξηρού χιονιού με αποτέλεσμα να υπερεκτιμούνται ή να υποεκτιμούνται χιονοκαλυμμένες εκτάσεις και κατ' επέκταση να προκαλείται σφάλμα στον υπολογισμό της ισοδύναμης ποσότητας νερού που προέρχεται από αυτό (SWE).

Ο αλγόριθμος Climate Research Branch prairie SWE έχει εφαρμοστεί στα δεδομένα Nimbus-7 SMMR και DMSP SSM/I για να δημιουργήσει χάρτες 20ετίας που απεικονίζουν τις συνθήκες χειμερινού SWE πάνω από канаδικές λεκάνες, με σκοπό την έρευνα εποχιακής και διαχρονικής μεταβλητότητας του χιονοστρώματος, μαζί με τις δραστηριότητες του Climate Research Branch για την εκτίμηση κλιματολογικής μεταβλητότητας.

### **5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΗ ΝΟΡΒΗΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Η Νορβηγία χρησιμοποιεί δορυφορικά δεδομένα χιονοκάλυψης για το σχεδιασμό παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από το 1980. Αυτή η προσέγγιση είναι ένας απλός ψηφιακός καταμερισμός όπου μετατρέπεται σε μια αναλογία χιονοκάλυψης από pixel (εικονίδια) στο υπό μελέτη λιμάνι (Anderson 1991, 1995). Ο NOAA-AVHRR έχει χρησιμοποιηθεί ξανά σαν πηγή δεδομένων γι' αυτό το σύστημα εξαιτίας της ημερήσιας του κάλυψης. Οι χάρτες χιονοκάλυψης σχεδιάστηκαν για ποικίλα λιμάνια, αλλά και για τη χαρτογράφηση της χιονοκάλυψης σε λεκάνες απορροής. Τα δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί και σαν εισαγωγή στα μοντέλα απορροής τήξης για τη πρόβλεψη υπερχείλισης χειμάρρου, (Andersen, 1995).

### **5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΣΤΗΝ ΙΣΠΑΝΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

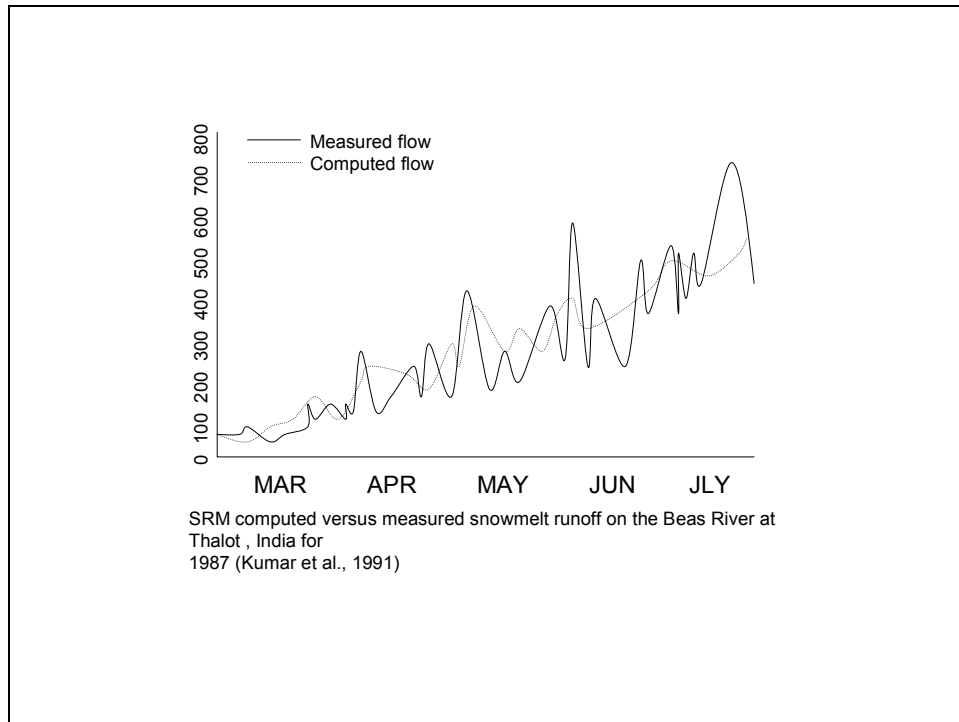
Η Ισπανία χρησιμοποιεί επίσης τα δεδομένα χιονοκάλυψης NOAA-AVHRR για τη πρόβλεψη απορροής τήξης κατά τη διάρκεια των μηνών της άνοιξης και του καλοκαιριού στην περιοχή Pyrenees. Η ανάπτυξη των τεχνικών



αναλύσεων των sub - pixel (Gomez-Landesa, 1997) έχει επιτρέψει στη χαρτογράφηση της χιονοκάλυψης σε λιμάνια μικρά όσο 10 km<sup>2</sup> χρησιμοποιώντας τα δεδομένα AVHRR. Τα δεδομένα χιονοκάλυψης για κάθε λιμάνι ή ζώνη, είναι εισαγωγή δεδομένων στο SRM για χρήση στην πρόβλεψη εποχιακής απορροής τήξης στη περιοχή Pyreness για να βοηθήσει στο σχεδιασμό υδροηλεκτρικής παραγωγής (Schultz – Engman EDS, 2000).

## **5.5 ΤΑ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΝΔΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ**

Μερικά καλά παραδείγματα της λειτουργικής εφαρμογής των δεδομένων της έκτασης του χιονιού, βρέθηκαν στην Ινδία. Αρχικά ο Ramamoorthi (1983, 1987) ξεκίνησε να χρησιμοποιεί τα δεδομένα NOAA-AVHRR σε μια απλή προσέγγιση για εμπειρικές προβλέψεις της εποχιακής απορροής τήξης στο Sutlej River Basin (43,230 km<sup>2</sup>). Ο Ramamoorthi (1987), χρησιμοποίησε δορυφορικά δεδομένα σαν εισροή στο μοντέλο απορροής τήξης, για προβλέψεις μικρότερης χρονικής περιόδου. Αυτή η ιδέα αναπτύχθηκε από τον Kumar et al. (1991) και τα δορυφορικά δεδομένα εισήχθησαν στο SRM για χρήση σε λειτουργικές προβλέψεις ημερήσιας και εβδομαδιαίας απορροής τήξης στα ποτάμια Beas (5144 km<sup>2</sup>) και Parbatti (1154 km<sup>2</sup>) της Ινδίας. Ο Kumar et al. (1991) συμπέρανε ότι αυτά τα μοντέλα απορροής μικρής χρονικής περιόδου, όπως το SRM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές που ήδη χρησιμοποιούνται ή μπορούν να αναπτυχθούν για σχεδιασμένες ή υπό-κατασκευή μελέτες. Ο μόνος τρόπος για να γίνουν οι προβλέψεις σε αυτή την περιοχή είναι με τη χρήση απόμερων αισθητήριων δεδομένων.



ΣΧΗΜΑ 5.3: SRM υπολογισμένες τιμές μέτρησης της απορροής λόγω τήξης στον ποταμό Beas στο Thalot, Ινδία 1987 (Kumar et al. 1991)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

1. Κατά την διάρκεια ανεύρεσης του υλικού για τη διεξαγωγή της εργασίας, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι υπάρχει ελληνική βιβλιογραφία με ελάχιστες αναφορές στο χιόνι. Υπάρχει αναφορά για την κατακρήμνιση του χιονιού (διεργασία δημιουργίας) και για την σημειακή του μέτρηση (χιονοτράπεζες) με πολύ λίγες αναφορές και παραδείγματα. Αξιοσημείωτη είναι η διδακτορική διατριβή της κ. Διονυσίας Παναγούλια, καθηγήτριας Ε.Μ.Π. Αγρονόμος Τοπογράφος, που μας δίνει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την εκτίμηση του χιονιού αλλά και γενικότερα για την «Ανάλυση ευαισθησίας υδρολογικής απόκρισης λεκάνης σε κλιματικές αλλαγές». Παρέχονται επίσης και πληροφορίες μέσα στη διδακτορική αυτή διατριβή για το ενεργειακό ισοζύγιο του χιονιού, μια δύσκολα προσεγγίσιμη ερευνητικά διαδικασία. Όμως γενικότερα δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην διερεύνηση του χιονιού, όπως έχει δοθεί στο εξωτερικό. Η απορροή του χιονιού αποτελεί μικρό ποσοστό του ετήσιου ισοζυγίου γεγονός το οποίο δεν μπορεί να μείνει χωρίς σημασία. Αποτελεί έναν μόνιμο παράγοντα, ο οποίος "περιμένει" τις κατάλληλες συνθήκες για να απορρεύσει και να μπει στον υδρολογικό κύκλο. Συνεπώς σε ορισμένες περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η μορφή αυτή κατακρήμνισης στην κατασκευή έργων μηχανικού όπως φράγματα, γέφυρες κ.τ.λ. για την μείωση της πιθανότητας αστοχίας των κατασκευών αυτών.

Σε χώρες του εξωτερικού, που το ποσοστό των κατακρημνίσεων του χιονιού είναι μεγαλύτερο, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα και μέθοδοι για την ασφαλή εκτίμηση της χιονόπτωσης και την έκταση που καταλαμβάνει η χιονοκάλυψη γεγονός που είναι πολύ σημαντικό για την ορθή εκτίμηση της απορροής. Υπάρχουν μοντέλα γραμμικά, παλινδρόμησης, θερμοκρασίας, που εισάγοντας τοπικούς παράγοντες ως δεδομένα, εξάγουν συμπεράσματα για το ύψος του χιονιού, την ποσότητα του ισοδύναμου νερού που παράγεται κατά την τήξη (SWE) καθώς επίσης μπορούν να δώσουν και μελλοντικές εκτιμήσεις για την αναμενόμενη συμπεριφορά των παραπάνω αποτελεσμάτων στο χρόνο

(στους επόμενους μήνες). Ένα πολύ σημαντικό βήμα στην προσπάθεια αυτή είναι και η μέτρηση της χιονοκάλυψης. Η μέτρηση αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας πτητικά μέσα (αεροσκάφη) που πετώντας σε κατάλληλο ύψος και με συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, γίνεται συλλογή δεδομένων και μπορεί να εκτιμηθεί η έκταση της χιονοκάλυψης. Παλαιότερα η εκτίμηση γινόταν μέσω χαρτογράφησης με το μάτι. Σήμερα όμως η ανάπτυξη μηχανικών μέσων και η πρόοδος της τεχνολογίας με την εφαρμογή του G.I.S. έχει καταστήσει την μέθοδο πιο ακριβή και συνεπή στα αποτελέσματά που εξάγονται. Τέλος αρωγός στην προσπάθεια αυτή είναι και τα μετεωρολογικά RADAR που μετρούν κάθε είδους κατακρήμνιση και προβλέπουν, με μια σχετική αστοχία, την ενδεχόμενη χρονική στιγμή της πτώσης και το είδος της κατακρήμνισης.

2. Από την μελέτη μοντέλων χιονοκάλυψης και τήξης έχει προκύψει ένας πίνακας με τον οποίο συγκεντρώνονται οι βασικότερες παράμετροι που αφορούν τα μοντέλα αυτά. Στον πίνακα 6.1 που φαίνεται παρακάτω γίνεται αναφορά στο είδος του μοντέλου, στα δεδομένα που εισάγονται, είσοδοι (inputs), καθώς επίσης και στα αποτελέσματα που απορρέουν από το καθένα, έξοδοι (outputs). Σκοπός του πίνακα, είναι η καλύτερη κατανόηση των μοντέλων αυτών υπολογισμού, και η ενδεχόμενη σύγκριση της αποτελεσματικότητας του καθενός, δηλαδή του κατά πόσο τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι ακριβή και ορθά. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό γιατί μας δίνει τη δυνατότητα, ανάλογα με την κρισιμότητα των μετρήσεων, να επιλέξουμε το κατάλληλο προς υπολογισμό μοντέλο. Ο πίνακας 6.1 φαίνεται παρακάτω:

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Παρουσιάζονται τα είδη των μοντέλων υπολογισμού της απορροής, ο βασικός τύπος υπολογισμού, καθώς επίσης και οι είσοδοι (inputs) και οι έξοδοι (outputs) από κάθε μοντέλο.

ΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	ΒΑΣΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΕΙΣΡΟΗ	ΕΚΡΟΗ
ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΞΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ	$\hat{y} = \bar{y} \left( \frac{C_u}{C_g} \right)$	$\bar{y}$ : ύψος χιονιού, c: χαρακτηριστικό απορροής (M. O . ύψους χιονιού ή ποσοστό απορροής με χιόνι ) για μετρημένη και μη περιοχή	$\hat{y}$ : ύψος χιονιού σε περιοχή που δεν έχω μετρήσεις
ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	$Q = M A = K D A$  $M = K D$	M : ύψος απορροής λόγω τήξης σε ίντσες/ ημέρα, A : εμβαδόν χιονοκαλυμμένης έκτασης ή αν δεν έχω μετρήσεις της υπό εξέταση περιοχής, K: σταθερά αναλογίας που παίρνω από πίνακα, D: τιμές θερμοκρασιών για μια δεδομένη μέρα	Q: ρυθμός απορροής τήξης
ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΞΗΣ	$Q_t = Q_0 K^t$ ή $Q_t = Q_0 e^{-kt}$	$Q_0$ : αρχικός ρυθμός μείωσης της απορροής, t: αριθμός ημερών μέχρι την αρχή της μείωσης, K: μεταβλητή ημερήσιας μείωσης της απορροής	$Q_t$ : ρυθμός μείωσης της απορροής την ημέρα t
ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	$Q_s = a + b P_w - Q_w$	a, b : μεταβλητές που υπολογίζονται από τύπο, $P_w$ : μετρούμενη χειμερινή κατακρήμνιση, $Q_w$ : χειμερινή απορροή	$Q_s$ : εποχιακή απορροή λόγω τήξης
ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ	$(\Delta t)S = \Delta Q,$ $\Delta Q = c_i \rho_w h_m (\Delta T_s)$ $\Delta T_s = \frac{(\Delta t)S}{c_i \rho_w h_m}$ $\Delta Q = \rho_w \lambda_f \Delta h_w$ $\Delta h_w = \frac{(\Delta t)S}{\rho_w \lambda_f}$	$\Delta t$ : διάρκεια περιόδου, S: ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας,	$\Delta Q$ : μεταβολή στη θερμική ενέργεια που απορροφάται από το χιόνι ή αύξηση της θερμοκρασίας του στρωμένου χιονιού

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΓΑΜΑ	ΜΕ $SWE = \frac{1}{A} \left( \ln \frac{C_0}{C} - \ln \frac{100 + 1.1 M}{100 + 1.1 M_0} \right)$	C, C <sub>0</sub> : μετρήσεις σε χιονισμένο και γυμνό έδαφος M, M <sub>0</sub> : ποσοστό υγρασίας εδάφους σε χιονοκαλυμμένες και γυμνές εκτάσεις A: συντελεστής εναλλαγής ακτινοβολίας στο νερό, cm <sup>2</sup> /g.	SWE αντίστοιχη ισοδύναμη ποσότητα που προκύπτει από την τήξη του χιονιού, g/cm <sup>2</sup>

3. Δόκιμο είναι να γίνει και αναφορά στις μεθόδους σημειακής και επιφανειακής μέτρησης και για τον σκοπό αυτό να πινακοποιηθούν τα αποτελέσματα. Ο πίνακας 6.2 αποτελείται από τα αντίστοιχα όργανα που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης και σχόλια με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας μεθόδου μέτρησης. Η σύνοψη αυτή έχει σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων, καθώς επίσης και την ευκολία επιλογής της αντίστοιχης μεθόδου, ανάλογα με τη σημασία (ακρίβεια) των εξαγομένων αποτελεσμάτων. Ο πίνακας 6.2 που φαίνεται παρακάτω αποτελείται από στήλες που δείχνουν: το είδος του οργάνου μέτρησης, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επίσης ο πίνακας 6.3 αποτελείται από στήλες που δείχνουν μεθόδους υπολογισμού της χιονοκάλυψης, με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτητά τους, καθώς επίσης δίνει και στοιχεία για σύγχρονες εφαρμογές και για μελλοντικές κατευθύνσεις των παραπάνω μεθόδων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: Αναφέρονται τα όργανα μέτρησης του χιονιού, καθώς επίσης και οι μέθοδοι υπολογισμού της χιονοκάλυψης με τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά τους.

ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΑ	άμεση μέθοδος μέτρησης, οικονομική	λάθη ακριβείας που οφείλονται κυρίως στον άνεμο
ΧΙΟΝΟΤΡΑΠΕΖΕΣ	γρήγορη, οικονομική και εύκολα εφαρμοζόμενη μέθοδος, αύξηση της ακρίβειας μέσω ζυγαριάς και μανομέτρου	στερείται ακρίβειας (1/10), χρειάζεται συχνές αναγνώσεις και έμπειρο μελετητή
ΠΙΑΣΣΑΛΟΙ ΧΙΟΝΙΟΥ	εύκολη μέτρηση μέσω ζύγισης δείγματος χιονοσωλήνα και ανάγνωση ύψους μέσω σταδίας	προβλήματα σε ακρίβεια, απαιτούνται συχνές μετρήσεις και δειγματοληψία, επιρροή ακρίβειας από τοπικούς παράγοντες
ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ	Ακριβής μέθοδος που δίνει επιπλέον και τη χιονοκάλυψη	δαπανηρή μέθοδος αφού απαιτούνται και εναέριες πτήσεις
ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ακρίβεια μέτρησης του ύψους του χιονιού μέσω τηλεμετρίας	δαπανηρή μέθοδος που απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για την καταγραφή των αποτελεσμάτων και την επεξεργασία τους, μπορεί μέσω πτήσεων να δώσει στοιχεία και για τη χιονοκάλυψη

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ RADAR	ακρίβεια, μέτρηση και μέσω σύννεφων, μπορεί και να δώσει πληροφορίες σχετικά με την έκταση της χιονοκάλυψης και της κατάστασης του χιονοστρώματος (μέγεθος κόκκων, περιεκτικότητα νερού)	απαιτούνται εδαφολογικές πληροφορίες, πάνω από ακτίνα 200km μειώνεται η ακρίβεια
------------------------------	--	--

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: Αναγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού της χιονοκάλυψης, σύγχρονες εφαρμογές και μελλοντικές κατευθύνσεις, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ	Φωτογραφία στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα που μου δίνει τη θερμοβαθμίδα των σύννεφων, εμπειρικά μοντέλα και μοναδική πηγή πληροφοριών σε περιοχές που δεν έχουν σταθμούς (ωκεανοί)	Χονδροειδείς μετρήσεις και όχι τόσο μεγάλης ακριβείας
ΟΡΑΤΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ	Εύκολο σε ερμηνεία και ανάλυση και μπορεί να γίνει εύκολα διαχωρισμός περιοχών με ή χωρίς χιόνι, επίσης με τη μέθοδο της ψηφιοποίησης μπορούν να χαρτογραφηθούν και περιοχές που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα λόγω κάλυψης των σύννεφων	Η κάλυψη των σύννεφων περιορίζει τη συχνότητα των παρατηρήσεων και άρα των μετρήσεων, δεν μπορούν να γίνουν μετρήσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΥΠΕΡΥΘΡΕΣ	Μπορούν να γίνουν μετρήσεις και κατά τη διάρκεια της νύχτας	Μικρή δυνατότητα χαρτογράφησης και υπολογισμός του SWE, παρεμπόδιση από τα σύννεφα, δύσκολος διαχωρισμός περιοχών καλυμμένων με χιόνι και μη λόγω σύγχυσης που παρατηρούνται στα όργανα
ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ	Παρακολούθηση χιονοκάλυψης με τη βοήθεια τεχνικών μικροκυμάτων εξ' αποστάσεως	Απαιτούνται για τις μετρήσεις συνθήκες στεγνού χιονιού, χρειάζονται τακτικές



		παρακολουθήσεις για την κατάσταση του χιονοστρώματος, πρόχειρη ανάλυση για μεγάλης έκτασης λεκάνες, αλλαγή των συνθηκών του χιονοστρώματος επηρεάζει τις μετρήσεις, αδυνατούν να επεξεργαστούν τη διάχυση που προκαλείται από το τραχύ στρώμα
ΧΑΡΤΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟΙ ΣΤΟ ΧΕΡΙ	Μέθοδος ιδιαίτερα εύκολη στην κατανόηση και στην εφαρμογή,	Όχι ιδιαίτερα ακριβής, μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως σε μικρές λεκάνες με σχετική ακρίβεια, δεν είναι οικονομική όταν πραγματοποιείται με εναέρια μέσα
ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑ	Εύκολη στη κατανόηση και στην εφαρμογή, οικονομική	Όχι ακριβής και δεν χρησιμοποιείται ευρύτερα σήμερα
<b>ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>		
<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
ΝΟΗΡSC – ΟΡΓΑΝΑ ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΝΕΡΟΥ	Λειτουργική χαρτογράφηση για υδρολογικές εφαρμογές, ανάπτυξη GIS, εναέρια γάμα ακτινοβολία για τη μέτρηση του SWE, εύκολη πρόσβαση και διάθεση χαρτών των ισοϋψών του SWE της αντίστοιχης κοιλάδας	Όχι ιδιαίτερα οικονομική μέθοδος στην ανάπτυξή της, απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την παρατήρηση και ανάλυση των δεδομένων
<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ</b>		
<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ	Βελτίωση της ανάλυσης στα παθητικά μικροκύματα μέσω του Microwave Scanning Radiometer (AMSR), βελτίωση αποτελεσμάτων	Όχι οικονομική μέθοδος που απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό στην ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων
ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ	Εξαγωγή της παγκόσμιου αλγορίθμου που θα δίνει πληροφορίες σχετικά με τη χιονοκάλυψη και το SWE της υπό εξέταση περιοχής, αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα (Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions»)	Όχι οικονομική, οι τοπικοί παράγοντες επηρεάζουν την αξιοπιστία των δεδομένων (θερμοκρασία, μέγεθος κόκκων, υψόμετρο κτλ)

ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΓΙΑ RADAR	Σύστημα πολύ-συχνότητας και πολύ-πόλωσης που δίνει την δυνατότητα διάκρισης υγρού και στεγνού χιονιού, βελτίωση της πληροφορίας χιονοκάλυψης και συνδυασμός της με υδρολογικές πληροφορίες (τήξη, απορροή, SWE)	Ανάλυση και επεξεργασία των παραπάνω πληροφοριών απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό
---------------------	---	--

4. Ένας άλλος επίσης σημαντικός παράγοντας που εξετάστηκε κατά τη διεξαγωγή της εργασίας ήταν και η ποιότητα του νερού που απορρέει κατά τη διαδικασία τήξης του χιονιού. Κατά τη διάρκεια πτώσης της χιονονιφάδας, λόγω μεγάλης επιφάνειας, κατακρατεί διάφορα ατμοσφαιρικά συστατικά όπως: θαλασσινό αλάτι, γήινη ή αιωρούμενη σκόνη, ηφαιστειακά θραύσματα, μόρια καπνού ή ποικίλες ρυπαντικές ουσίες που επηρεάζει την ποιότητα που παραγόμενου νερού. Έτσι παρατηρείται το φαινόμενο ότι απομακρυσμένες χιονοκαλυμμένες εκτάσεις από βιομηχανικά και αστικά κέντρα παράγουν νερό (SWE) μεγαλύτερου pH (λιγότερο όξινο) από ότι περιοχές που βρίσκονται κοντά σε κέντρα που επηρεάζονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι απομακρυσμένες περιοχές έχουν μια τυπική τιμή  $pH > 5,2$  έναντι των περιοχών που επηρεάζονται από ανθρωπογενείς εκκρίσεις και έχουν  $pH < 3,8$ . Το γεγονός αυτό της επιρροής της ποιότητας του χιονιού και κατ' επέκταση του νερού που παράγεται από αυτό οφείλεται στους δεσμούς υδρογόνου που δημιουργούν οι χιονονιφάδες, λόγω της μεγάλης τους έκτασης, με συστατικά της ατμόσφαιρας. Αυτές οι «όξινες κρούσεις» που δημιουργούνται από τα ιόντα υδρογόνου ( $H^+$ ), με την τήξη του χιονιού εισρέει σε ποταμούς και λίμνες προκαλώντας ελάττωση της αναπαραγωγικής ικανότητας των ψαριών και αμφιβίων καθώς επίσης μπορεί να προκαλέσει και μαζικό θάνατο ψαριών. Επίσης συστατικά όπως: το θειικό άλας ( $SO_4^{2-}$ ), το χλώριο ( $Cl^-$ ), τα νιτρικά ( $NO_3^-$ ), ίχνη μετάλλων και οργανικά μίγματα, μπορούν να συμβάλουν σε ισχυρά «όξινες κρούσεις» στην υδρόβια χλωρίδα και πανίδα, κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης τήξης.
5. Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα το οποίο προέκυψε από την εργασία είναι ότι η μέτρηση του χιονιού και κατ' επέκταση του

ισοδύναμου νερού είναι δυο παράγοντες που υπολογίζονται δύσκολα και με μεγάλα ποσοστά αβεβαιότητας. Το χιόνι «λιώνει» είτε αμέσως μόλις έρθει σε επαφή με το έδαφος, είτε μετά από λίγο χρονικό διάστημα ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμός αέρας, ανάγλυφο) με αποτέλεσμα να προκαλείται δίλημμα στον παρατηρητή για το αν θα αναφέρει κατακρήμνιση ή αν θα αναφέρει μηδενική τιμή, αφού το έδαφος είναι καθαρό από χιόνι. Επίσης το χιόνι δεν αποτίθεται ομοιόμορφα στο έδαφος με αποτέλεσμα στην ίδια περιοχή να έχω εκτάσεις που έχει συσσωρευτεί μεγάλη ποσότητα χιονιού ενώ οι γειτονικές εκτάσεις να είναι καθαρές. Το γεγονός αυτό δυσκολεύει κατά πολύ την εκτίμηση της χιονοκάλυψης και επομένως και τον προσδιορισμό του νερού της τήξης. Για να μειωθεί το σφάλμα σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα και το πλήθος των παρατηρήσεων. Επίσης κατά την επεξεργασία των δεδομένων με τα μοντέλα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν όλοι οι μη σταθεροποιητικοί παράγοντες (τοπογραφικό ανάγλυφο, πυκνότητα χιονιού, υγρασία εδάφους, ξηρό – υγρό χιόνι, έκταση χιονοκάλυψης) και ειδικά σε κάθε περίπτωση να προσαρμόζονται οι μεταβλητές των μοντέλων για τη μείωση του σφάλματος. Τέλος η υγρασία του εδάφους είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την τήξη και ο ποιο δύσκολος να υπολογιστεί. Κατακρημιζόμενο χιόνι το οποίο έχει «λιώσει » και φαινομενικά δεν επηρεάζει τον υδρολογικό κύκλο, έχει μεταβάλλει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την εδαφική υγρασία και παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην υπολογιστική επεξεργασία μιας ενδεχόμενης κατακρήμνισης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Δ. Κουτσογιάννης και Θ. Ξανθόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας υδατικών πόρων, Έκδοση 3 Αθήνα 1999.

Ναλμπάντης Ι. Σημειώσεις του μαθήματος «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 1999

Gert A. Schultz – Edwin T. Engman (EDS.), Remote sensing in Hydrology and water management, Springer, first edition, June 8, 2000.

Anderson Department of geography, University of Bristol and T.P. Burt, School of Geography University of Oxford, Hydrological forecasting, published by John Wiley and Sons (Ltd), Copyright, 1985.

Richard H. McCuen, Hydrologic analysis and design, third edition, Prentice Hall, April 5, 2004.

S. Lawrence Dingman-MacMilan, Physical Hydrology, publishing company, 1993.

Μαρία Α. Μιμίκου, καθηγήτρια (Ε.Μ.Π.), Τεχνολογία υδατικών πόρων, Έκδοση 2, Αθήνα 1994.

Διονυσία Παναγούλια, καθηγήτρια Ε.Μ.Π. (Αγρονόμος Τοπογράφος), διδακτορική διατριβή με τίτλο "Ανάλυση ευαισθησίας υδρολογικής απόκρισης λεκάνης σε κλιματικές αλλαγές".

Peter E. Black, Watershed Hydrology, publishing by CPC, second edition, May 1, 1996.

Paul Spirakis edition, Lecture notes in computer science, Algorithms-ESA'95, third annual European Symposium, Corfu, Greece, September, 1995.

W. Gareth Rees, Remote sensing of snow and ice, published by CRC Press, Talor-Francis Group, first edition, 2006.

Antony Orme, Physical Geography of North America, publishing Oxford University Press, USA, first edition, December 15, 2001.

John G. Lyon, Wetland Landscape characterization:GIS, Remote Sensing and Image Analysis, published by CRC, first edition, January 1, 2001.

H.G. Jones, J.W. Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems, first edition, January 15, 2001.

H.C.Chang and E.A. Demekhin, Complex Wave Dynamics on Thin films (Studies in interface Science), first edition, March 14, 2002.

Young Shi-Milan Zeleny, New Frontiers of Decision Making for the information technology Era, first edition, May 15, 2000.

John C. Hudson, Across this Land: A Regional Geography of the United States and Canada (creating the north America landscape), first edition, March 1, 2002.

## **ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ (INTERNET)**

[www.avalanche.com](http://www.avalanche.com)

[www.snow.com](http://www.snow.com)

[www.snow models.com](http://www.snow models.com)

[www.amazon.com](http://www.amazon.com)

[www.snowflackes.com](http://www.snowflackes.com)

