

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ **ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ** <u>Εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας</u>



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: «ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

> **ΣΤΕΡΓΙΟΣ Α. ΤΣΙΛΙΟΣ** ΓΕΩΛΟΓΟΣ

### ΟΙ ΤΡΑΒΕΡΤΙΝΙΚΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ ΑΧΛΑΔΙΤΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥΣ (Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΒΕΡΤΙΝΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΩΝ "ΖΕΣΤΩΝ ΝΕΡΩΝ" ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟΥ)



<u>ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ</u>

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008

# ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

# ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΟΥ Στεργιου τΣιλιου

 $\text{ME}\ \Theta\text{EMA}$ 

## ΟΙ ΤΡΑΒΕΡΤΙΝΙΚΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ ΑΧΛΑΔΙΤΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΟΥΣ (Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΒΕΡΤΙΝΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΩΝ "ΖΕΣΤΩΝ ΝΕΡΩΝ" ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟΥ)



### υπό την επιβλέψη του Θεοδωρού αστάρα, καθηγητή

## ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΕΛΩΝ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΑΛΜΠΑΝΑΚΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΥ ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΕΛΙΣΣΑΒΕΤ ΝΤΟΤΣΙΚΑ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2008

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Αφιερωμένο στους γονείς μου Αθανάσιο & Καλλιόπη, στα αδέλφια μου Εμμανουήλ & Βασίλειο και στον αζιότιμο καθηγητή και δάσκαλό μου κ. Ελευθέριο Βαβλιάκη.

"Η μόρφωση μοιάζει με χρυσό στεφάνι, γιατί προσφέρει στον άνθρωπο και τιμή και ωφέλεια"

Πυθαγόρας



Η παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εκπονήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας, στον Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, κατά την ακαδημαϊκή περίοδο 2005 – 2008.

Με την ολοκλήρωση της, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον πρώτο επιβλέποντα της εργασίας, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας της Σ.Θ.Ε. του Α.Π.Θ., κ. ΦΕλευθέριο Βαβλιάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου την συγκεκριμένη εργασία, την ουσιαστική επιστημονική του καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και για τον χρόνο και την υπομονή που διέθεσε κατά την διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον μετέπειτα επιβλέποντα της εργασίας, τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. Θεόδωρο Αστάρα, για την συνεχή του επίβλεψη, τις πολύτιμες συμβουλές του, τις σημαντικές του διορθώσεις επί της εργασίας, για τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών και κυρίως για την αμέριστη ηθική υποστήριξη του για την ολοκλήρωση της Διατριβής.

Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας, κ. Κωνσταντίνο Αλμπανάκη, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τις πολύτιμες συμβουλές του, τις ουσιαστικές και σημαντικές διορθώσεις επί του κειμένου της εργασίας καθώς και για τον χρόνο που διέθεσε, την κατανόηση που υπέδειξε αλλά και για την άριστη συνεργασία που είχαμε σε πλήθος θεμάτων σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Πολλές και θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στην Ερευνήτρια του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δημόκριτος', κ. Ελισσάβετ Ντότσικα, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για τη κρίσιμη συμβολή της, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση των ουσιώδων τμημάτων της υδροχημείας της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. **ΦΑντώνιο** Ψιλοβίκο, για την άψογη καθοδήγηση της εκπαίδευσης μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών και για τις επιστημονικές γνώσεις που μου μεταφύτευσε.

Ευχαριστώ επίσης, τον γεωλόγο του Ι.Γ.Μ.Ε. Θεσ/νίκης, κ. Γεώργιο Σταϊκόπουλο, για την ευγενική παραχώρηση τμήματος του υπό έκδοση γεωλογικού φύλλου Σιδηρόκαστρου, κλίμακας 1/50.000, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο στη ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων της γεωλογικής χαρτογράφησης της περιοχής μελέτης που πραγματοποιήθηκε.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον χημικό και υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας, κ. Μιχαήλ Σωτηριάδη, για την συνεχή επίβλεψη και ορθή καθοδήγησή του κατά την διάρκεια εκτελέσεως των χημικών αναλύσεων, που απαιτήθηκαν για τις ανάγκες της Διατριβής.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τον φυσικό και υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε 'Δημόκριτος', κ. Ηλία Τζαβιδόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια του στην επεξεργασία και ορθή απεικόνιση, με τη βοήθεια κατάλληλων διαγραμμάτων, των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν για την εκπόνησης της Διατριβής.

Οφείλω ακόμη, να καταθέσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον μεταπτυχιακό φοιτητή και συνάδελφο γεωλόγο τον κ. Γεώργιο Γεωργιάδη για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκτέλεση της γεωλογικής χαρτογράφησης της περιοχής μελέτης τόσο στο πεδίο όσο και στην μετέπειτα ψηφιακή επεξεργασία των αποτελεσμάτων και των στοιχείων της εργασίας υπαίθρου.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον μεταπτυχιακό φοιτητή και συνάδελφο γεωλόγο τον κ. Γεώργιο Λαζαρίδη, μέλος της Ε.Σ.Ε. και του ΤΟ.Τ.Β.Ε., για την παραχώρηση πλήθους δεδομένων που αφορούσαν την σπηλαιολογική μελέτη και έρευνα του σπηλαίου στην θέση 'Ζεστά Νερά'.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Ματζούνη Κ., γραφίστα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., για την ηλεκτρονική επεξεργασία σχημάτων και χαρτών της Διατριβής, τον κ. Νίτσιου Κ., γραμματέα του Τομέα για την υποστήριξή του σε ποικίλα θέματα γραφειοκρατικής φύσεως, την κ. Μουντουρλή Μ., επίσης γραμματέα του Τομέα, για την ηλεκτρονική επεξεργασία και μορφοποίηση επιμέρους τμημάτων της εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, για την εξαίρετη συνεργασίας μας όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος οι θερμότερες ευχαριστίες πηγαίνουν στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου, Αθανάσιο και Καλλιόπη, τόσο για την υλική όσο και την ηθική υποστήριξή τους, η οποία ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της διατριβής μου.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η μελέτη της τραβερτινικής γέφυρας, στην κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού, στην θέση 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάστρου του Ν. Σερρών και ιδιαίτερα μάλιστα η μελέτη των φυσικοχημικών συνθηκών των υδάτων υπόθερμης καρστικής πηγής καθώς και οι μεταβολές τους, οι οποίες βαθμιαία οδήγησαν στην εκτεταμένη απόθεση ασβεστολιθικού τόφφου, στην δημιουργία μετώπων καταρρακτών, τραβερτινικών γεφυρών και τελικά στην δημιουργία πρωτογενούς σπηλαίου, το οποίο συνεχίζεται να αναπτύσσεται μέχρι τις μέρες μας. Η μοναδικότητα και η πρωτοτυπία της τραβερτινικής γέφυρας στην περιοχή μελέτης, σε πανελλήνια κλίμακα, έγκειται στο γεγονός ότι η διεύθυνση ανάπτυξής της συντελείται σήμερα παράλληλα στην ροή του ποταμού Αχλαδίτη.

Η λεκάνη απορροής του Αχλαδίτη βρίσκεται BBA της τ/φ του Στρυμόνα, με διεύθυνση BA–NΔ, δηλαδή είναι σχεδόν κάθετη στην διεύθυνση της τ/φ του Στρυμόνα, με συνολική έκταση 290 Km<sup>2</sup>. Αποστραγγίζει το νότιο τμήμα του Ορβήλου και Άγκιστρου όρους καθώς και όλη την βόρεια πλευρά των ορέων της Βροντούς. Αποτελείται ως επί το πλείστον από γρανιτικά (39,9%) και ασβεστολιθικά πετρώματα (14,7%), με τα πρώτα να κυριαρχούν, ενώ σημαντική είναι και η εμφάνιση νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων (συνολικά 24,6%). Χαρακτηριστικό γνώρισμα της λεκάνης είναι ο διαχωρισμός της σε τρεις γεωμορφολογικές ενότητες, την λεκάνη του Σιδηροκάστρου, την κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού και το καρστικό βύθισμα του Αχλαδοχωρίου. Η ρηξιγενής τεκτονική είναι ιδιαίτερα έντονη, με πλήθος ρηγμάτων ποικίλης διεύθυνσης να απαντώνται στην περιοχή.

Σε πρώτη φάση εκτιμήθηκε η γενικότερη γεωλογική - γεωμορφολογική κατάσταση στην οποία βρίσκεται σήμερα η λεκάνη και κυρίως η κοίτη του Αχλαδίτη - η οποία, πρέπει να σημειώσουμε εδώ, ότι εμφανίζει χαρακτηριστικά χειμάρρου - και κυρίως να διαπιστωθεί πως οι γεωλογικοί και γεωμορφολογικοί παράμετροι έχουν επηρεάσει τον σχηματισμό της πηγής, την διαμόρφωση του χημισμού των υδάτων της αλλά και πως έχουν «προετοιμάσει» την υπό μελέτη θέση να αναπτύξει και να διατηρήσει την συγκεκριμένη τραβερτινική γέφυρα, πραγματοποιήθηκε, πέρα από την γενικότερη γεωλογική και γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής, η γεωλογική χαρτογράφηση σε κλίμακα 1/25.000 της περιοχής γύρω από την πηγή, με την βοήθεια τοπογραφικού χάρτη της Γ.Υ.Σ., κλίμακας 1:100.000, γεωλογικών χαρτών του Ι.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50.000 αλλά και ζεύγους α/φιών, κλίμακας 1:42.000 (έτος λήψεως 1945) που βοηθούν στον καλύτερο εντοπισμό και χαρτογράφηση των ρηγμάτων αλλά κυρίως των ορίων και της έκτασης των υπό μελέτη γεωλογικών σχηματισμών (στερεοσκοπική ερμηνεία). Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων έγινε με την χρήση λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών καθώς και με την χρήση του προγράμματος Corel Draw Version 12.

Επιπλέον, με την βοήθεια των παραπάνω συστημάτων, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός ορισμένων μορφοτεκτονικών παραμέτρων, της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα τόσο του υδρογραφικού δικτύου όσο και των υψομέτρων που προήλθαν από τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ., κλίμακας 1:50.000. Οι μορφοτεκτονικοί παράμετροι αναλύθηκαν σύμφωνα με τους Keller & Pinter (2002). Σύμφωνα με το υπολογισμό του υψομετρικού ολοκληρώματος και την μορφή της υψομετρικής καμπύλης για την λεκάνη απορροής στο σύνολό της, προκύπτει ότι ενώ η τελευταία βρίσκεται στο στάδιο ωριμότητας διέπεται από ένα καθεστώς ανανέωσης των διεργασιών διάβρωσης. Ο παράγοντας ασυμμετρίας Af της λεκάνης απορροής υποδηλώνει την περιστροφή της κοίτης προς τα αριστερά (δηλαδή προς τα **N**) ή καλύτερα μια δεξιόστροφη περιστροφή της λεκάνης, γύρω από ένα άξονα ΒΔ–ΝΑ διεύθυνσης. Η διεύθυνση αυτή άλλωστε ταυτίζεται με την διεύθυνση ανάπτυξης των Άνω Πλειοκαινικών κανονικών ρηγμάτων που διαφοροποίησαν την λεκάνη του Σιδηροκάστρου από αυτήν του Στρυμόνα.

Σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία υδάτων, σε μηνιαία βάση, από τέσσερις (4) θέσεις, κατά μήκος της πορείας των υπόθερμων υδάτων της περιοχής μελέτης έτσι ώστε με την μετέπειτα χημική ανάλυση των δειγμάτων να εντοπιστούν οι απαραίτητες μεταβολές στην φυσικοχημική σύνθεση των υδάτων που οδηγούν στην απόθεση ανθρακικών αλάτων που συναντάμε σήμερα στην περιοχή. Το σύνολο των χημικών δεδομένων των χημικών αναλύσεων, διαχειρίστηκε και επεξεργάστηκε με το πρόγραμμα **EQL/EVP**, με το οποίο κατέστη δυνατή η δημιουργία του θερμοδυναμικού μοντέλου που διέπει τον χημισμό των υπό μελέτη υδάτων, ενώ με το πρόγραμμα Excel της Microsoft Office κατέστη εφικτή η ορθή απεικόνισή τους σε διαγράμματα και πίνακες, που περιγράφουν πλήρως την χημεία των υδάτων και τις μεταβολές τους τόσο μέσα στον χρόνο όσο κυρίως και κατά θέσεις.

Τέλος, γίνεται σημαντική και εκτενής αναφορά στον τρόπο με τον οποίο μεθοδεύεται από τις εκάστοτε επιφανειακές συνθήκες η απόθεση των παραπάνω ανθρακικών σχηματισμών σε συγκεκριμένες μόνο θέσεις, που εξασφαλίζουν επιπλέον εκείνες τις **φυσικές** και **γεωμετρικές** προϋποθέσεις που απαιτούνται για την εκδήλωση του φαινομένου της απόθεσης των συγκεκριμένων ανθρακικών αλάτων, κατά μήκος της πορείας των υδάτων, δημιουργώντας έτσι τις περίφημες τραβερτινικές γέφυρες

στην συγκεκριμένη θέση, βασιζόμενοι πάντα στην αντίστοιχη εγχώρια και κυρίως διεθνή βιβλιογραφία.

### Abstract

The objective of this paper is to study the travertine bridge situated in Achladitis River valley, position "Zesta Nera", Sidirokastro, Prefecture of Serres, and in particular, to study the physicochemical conditions of the lukewarm spring water and its changes, which have gradually led to the extensive deposition of calcareous tufa (calcareous sinter), formation of waterfall faces, travertine bridges, and finally, formation of a primary cave, which is still growing until now. The uniqueness and originality of the travertine bridge in the area under consideration, on a national scale, lies on the fact that its direction of development is also found parallel to the flow of Achladitis River.

Achladitis River Basin is situated NNE of Strymonas basin, following a NE–SW direction namely it is almost perpendicular to the direction of Strymonas basin, extending to an overall area of 290 km<sup>2</sup>. It drains the southern part of Orvilos and Angistro mountains, as well as the entire northern part of Vrontou mountain chains. Mostly consists of granite (39.92%) and calcareous rocks (14.66%) with the former ones being the dominant rocks, while the presence of neogenic and quaternary deposits is also considerable (overall 24.57%). A typical feature of the basin is that it is divided into three geomorphological units, i.e., Sidirokastro Basin, Achladitis River valley and the karstic sinkhole of Achladochori. The fault tectonics is extremely high, with a multitude of fault of variable direction found in the area.

In order to cast light on the overall geological conditions of the basin today, mainly those of Achladitis river bed – which, as it should be noted here, presents certain features of a torrent – mostly in order to establish that the geological and geomorphological parameters have affected the formation of the spring, the biochemical reactions of its waters, and the way they have "prepared" the site under discussion to develop and maintain this particular travertine bridge took place, apart from the general geological and geographical characterization of the area, the geological map of the area around the spring was drawn at 1/25000 scale, using a topographic map provided by the Hellenic Military Geographical Service, scale: 1:100000, some geological maps provided by the Hellenic Geological Institute (IGME), scale: 1:50000, and a pair of aerial photos, scale: 1:42000 (taken in 1945), which were of great help in order to better identify and map both the existing faults and the boundaries and the area of the geologic formations under consideration (stereoscopic

interpretation). Processing of these data was done through the use of GIS (Geographic Information System) software and Corel Draw, Version 12.

The determination of the major morphotectonic parameters of Achladitis' basin (Hypsometric Curve and Hypsometric Integral) revealed that the basin is under conditions of rejuvenation even though found to be in the stage of old age. This fact is confirmed also by the asymmetry factor (Af) of the river basin, which suggests rotation of the river bed to the left (i.e., to the South), or, more precisely, a clockwise rotation of the basin, round an axis following a NW-SE direction. In addition, this direction is identical to the direction of development of the Upper Pliocene normal faults, which have made Sidirokastro basin modified from Strymonas basin.

In addition, ground water sampling was performed, on a monthly basis, at four (4) positions, following the course of the lukewarm water of the area under consideration, so as to be able, through the subsequent chemical analysis of the samples, to detect the necessary changes in the physicochemical composition of the water resulting in the deposition of carbonates, which are still found nowadays in the area. The set of chemical data of the chemical analysis, was managed and processed with the use of software such as **EQL/EVP**, which made possible the creation of the therodynamic model which describe the chemistry of these waters, while with the help of Excel programm became true their right representation on charts and tables, describing in detail the chemistry of the water and any changes that have occurred in the course of time, mostly at certain positions.

In the end, we have an important and detailed dispatch as long as the way in which is approached the deposition of these formations from the superficial conditions, in specific only locations, where moreover provide those physical and geometrical prerequisites which are crucial for the initiation of these phenomena, creating gradually the famous travertine bridges on this particular place, depending of cource to the local and mainly to foreign bibliography.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	4-9
3.1. Μέθοδοι πεδίου	4
3.2. Μέθοδοι εργαστηρίου	6
3.3. Επεξεργασία Δεδομένων	8
4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	9-51
4.1. Γεωγραφία	9
4.1.1. Γεωγραφικά στοιχεία της λεκάνης Σιδηροκάστρου	9
4.2.2. Γεωγραφικά στοιχεία περιοχής μελέτης	11
4.2. Ιστορικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής μελέτης	13
<b>4.3.</b> Κλιματικά στοιχεία	14
4.3.1. Εισαγωγή	14
4.3.2. Θερμοκρασία αέρα	15
4.3.3. Κατακρημνίσματα	18
4.3.4. Ομβροθερμικό διάγραμμα	21
4.3.5. Το κλίμα της λεκάνης Σιδηροκάστρου	24
4.4. Γεωλογία λεκάνης Σιδηροκάστρου	25
4.4.1. Γενικά	25
4.4.2. Τεκτονικά στοιχεία λεκάνης	28
4.4.3. Πρόσφατη τεκτονική δράση	30
4.4.4. Λιθοστρωματογραφία λεκάνης	
4.4.4.1. Λιθολογία υποβάθρου της λεκάνης	
4.4.4.2. Λιθολογία των ιζημάτων της λεκάνης	34
4.4.5. Η κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού	41
4.4.6. Παλαιογεωγραφία ευρύτερης περιοχής μελέτης	45
4.4.7. Γεωθερμία ευρύτερης περιογής μελέτης	47
	••••••••••••••
5. ΛΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	52-87
5. ΛΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης	52-87
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> </ul>	<b>52-87</b> <b>52</b> 52
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> </ul>	<b>52-87</b> <b>52</b> 52 57
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> </ul>	<b>52-87</b> 52 52 57 58
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> </ul>	<b>52-87</b> 52 52 57 58 58 59 64
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4. Υδρογραφία</li> </ul>	<b>52-87</b> 52 57 58 58 58 64 64 69
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4. Υδρογραφία</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1 Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1 Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4. Υδρογραφία</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1 Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΛΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4. Υδρογραφία</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2. Φυσικοί παράγοντες απόθεσης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.4. Υδρογραφία</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1 Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3.1. Περιγραφή μηχανισμού απόθεσης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3.1. Περιγραφή μηχανισμού ανθρακικών ορυκτών φάσεων</li> </ul>	
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3.1. Περιγραφή μηχανισμού ανθρακικών ορυκτών φάσεων</li> <li>5.2.3.2. Μηχανισμού απόθεσης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.4. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Μηχανισμός σχηματισμού ανθρακικών ορυκτών φάσεων</li> <li>5.2.3.3. Αίτια μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3.1. Η επίδραση της απώλειας CO2</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης απόθεσης</li> <li>5.2.3.1. Περιγραφή μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3.2. Μηχανισμός σχηματισμού ανθρακικών ορυκτών φάσεων</li> <li>5.2.3.3.1. Η επίδραση της απώλειας CO2</li> <li>5.2.3.2. Η επίδραση της εξάτμισης</li> </ul>	<b>52-87</b> 
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3. Αίτια μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3.2. Η επίδραση της απώλειας CO2</li> <li>5.2.3.4. Δείκτης Κορεσμού LANGELIER</li> </ul>	
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Νηχανισμός σχηματισμού ανθρακικών ορυκτών φάσεων</li> <li>5.2.3.1. Η επίδραση της απώλειας CO2</li> <li>5.2.3.4. Δείκτης Κορεσμού LANGELIER</li> <li>6. AHIOTEΛΕΣΜΑΤΑ</li> </ul>	
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Μηχανισμό απόθεσης</li> <li>5.2.3. Μηχανισμό απόθεσης</li> <li>5.2.3. Η επίδραση της απώλειας CO2</li> <li>5.2.3.4. Δείκτης Κορεσμού LANGELIER</li> <li>6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</li> </ul>	
<ul> <li>5. ΑΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</li> <li>5.1. Φυσική γεωγραφία περιοχής μελέτης</li> <li>5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου</li> <li>5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του αναγλύφου της λεκάνης</li> <li>5.1.3.1. Γενικά</li> <li>5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου</li> <li>5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.1. Γενικά</li> <li>5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη</li> <li>5.1.4.3. Ποιστική ανάλυση του υ/δ – Μορφή του υ/δ</li> <li>5.2. Παράγοντες απόθεσης ανθρακικών αλάτων</li> <li>5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης</li> <li>5.2.3. Μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3. Αίτια μηχανισμού απόθεσης</li> <li>5.2.3.3.1. Η επίδραση της απάλειας CO2</li> <li>5.2.3.4. Δείκτης Κορεσμού LANGELIER</li> <li>6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</li> <li>6.1. Γεωλογία περιοχής 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάσττρου</li> </ul>	

6.1.3. Ανάπτυξη τοπικού γεωθερμικού πεδίου	94
6.1.4. Η καρστική πηγή 'Ζεστά Νερά'	97
6.1.4.1. Γενικά	97
6.1.4.2. Η πηγή 'Ζεστά Νερά'	99
6.2. Γεωμορφολογία περιοχής 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάστρου	103
6.2.1. Ανάγλυφο	103
6.2.2. Κλίση	104
6.2.3. Ταξινόμηση – Προσδιορισμός τύπου κοίτης	105
6.2.4. Υψομετρική καμπύλη και υψομετρικό ολοκλήρωμα	108
6.2.5. Ασυμμετρία Λεκάνης Απορροής και Παράγοντας Ασυμμετρίας F	111
6.3. Γεωχημική έρευνα υπόθερμων υδάτων περιοχής μελέτης	112
6.3.1. Γενικά	112
6.3.2. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων	113
6.3.3. Ταξινόμηση – Υδροχημικός προσδιορισμός υδάτων περιοχής μελέτης	116
6.3.4. Γραφικές παραστάσεις των χημικών αναλύσεων	120
6.3.5. Γεωχημική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων	126
6.3.5.1. Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (TDS)	126
6.3.5.2. Το pH των νερών της περιοχής μελέτης	128
6.3.5.3. Ιοντικές Συγκεντρώσεις	130
6.3.6. Θερμοδυναμικό μοντέλο	
6.3.6.1. Γενικά	
6.3.6.2. Τιμές pCO <sub>2</sub>	134
6.3.6.3. Τιμές Δεικτών Κορεσμού (Saturation Indexes) ανθρακικών ορυκτών.	
6.3.7. Συμπεράσματα	140
7. ΣΥΖΗΤΉΣΗ – ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	144-150
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	151-156
8.1. Διεθνή βιβλιογραφία	151
8.2. Ελληνική βιβλιογραφία	153
8.3. Ηλεκτρονικές διευθύνσεις	
9. ПАРАРТНИАТА	157-196
9.1. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ανθρακικές αποθέσεις	157
9.2. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Χημεία αέριας φάσης	160
9.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων	171

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τραβερτίνες και οι ασβεστολιθικοί τόφφοι είναι νεώτεροι ιζηματογενείς σχηματισμοί που τοποθετούνται πάνω από τις Πλειστοκαινικές αποθέσεις, εμφανίζονται άλλοτε συμπαγείς και άλλοτε πορώδεις ή καρστικοποιημένοι και ενίοτε έντονα ρηγματωμένοι. Ειδικότερα, όταν πρόκειται για σκληρούς, λεπτοκρυσταλλικούς, συμπαγείς ή μαζώδεις, μερικές φορές στρωματωμένους και συχνά συγκριμματικούς ασβεστόλιθους, χρώματος λευκού μέχρι καστανού χρησιμοποιείται ο όρος **τραβερτίνης** (travertine) ενώ όταν το ανθρακικό υλικό που αποτίθεται είναι πορώδες και εύθρυπτο χρησιμοποιείται ο όρος **τούφα** (tufa) (Pentecost & Viles, 1994).

Ο όρος «τραβερτίνης» χρησιμοποιείται ευρύτερα για όλες τις πλούσιες σε CaCO<sub>3</sub> αποθέσεις που προέρχονται από επιφανειακά και υπόγεια νερά τα οποία έχουν μετεωρική προέλευση και κυρίως χαρακτηρίζονται ως ψυχρά ή/και υπόθερμα (Pedley, 1990).

Οι τραβερτίνες και οι τόφφοι αποτίθενται από υδάτινα ρεύματα (ποτάμια, ρυάκια κ.α.) με σημαντική περιεκτικότητα διαλυμένων αλάτων Ca, Mg, κ.α. και κατόπιν έκλυσης σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub> το οποίο έχουν προσλάβει νωρίτερα. <u>Τα νερά αυτά</u> <u>προέρχονται είτε από μια καρστική πηγή, είτε από μια εν γένει θερμή πηγή ή αποτελούν</u> ένα ποταμό που δέχεται μεγάλη ποσότητα νερών με την παραπάνω προέλευση (Τσιραμπίδης, 1999). Η απόθεση ανθρακικών αλάτων (κυρίως CaCO<sub>3</sub>) των υδάτων των καρστικών πηγών συνδέεται άμεσα με την γένεση και την εξάπλωση των ασβεστολιθικών τόφφων και των τραβερτινών τόσο στο Ελληνικό χώρο όσο και σε παγκόσμια κλίμακα.

Κατά μήκος του ρέματος που δημιουργούν τα νερά της καρστικής πηγής 'Ζεστών Νερών' Σιδηροκάστρου, του Ν. Σερρών, και ειδικότερα λίγο πριν αυτά φθάσουν στην κοίτη του Αχλαδίτη, απαντούν μικροί καταρράκτες. Τόσο από προηγούμενες έρευνες όσο και από την παρούσα εργασία διαπιστώθηκε ότι τόσο τα τοιχώματα όσο και οι πυθμένες των καταρρακτών αποτελούνται από σύγχρονους ασβεστολιθικούς τόφφους. Οι τόφοι αυτοί προέκυψαν από την απόθεση κυρίως CaCO<sub>3</sub> πάνω σε προϋπάρχουσες προεξοχές της κοίτης. Η προοδευτική αύξηση του ύψους των προεξοχών της κοίτης εξαιτίας της συνεχούς απόθεσης των παραπάνω αλάτων πάνω σε αυτές, οδήγησε στο σχηματισμό των προαναφερθέντων καταρρακτών (Βαβλιάκης 1998) (βλ. περισσότερα στο Παράρτημα Α).

Η βαθμιαία αύξηση του μετώπου των καταρρακτών του ρέματος εγκάρσια στην κοίτη του Αχλαδίτη ποταμού οδήγησε, αρχικά, στην δημουργία μιας συγκεκριμένης γεωμορφής, που συνιστά μια ιδιαίτερης μορφής φυσική τραβερτινική γέφυρα, ενώνοντας έτσι τις δυο όχθες της κοίτης του ποταμού. Ουσιαστικά, με τον τρόπο αυτό, στην συγκεκριμένη θέση είχαμε την δημιουργία του ομώνυμου πρωτογενούς σπηλαίου (βλ. Παράρτημα Α). Η ανάπτυξη του τελευταίου συνεχίζεται μέχρι σήμερα, με την διαφορά όμως ότι πλέον η ανάπτυξη συντελείται παράλληλα με την κοίτη του Αχλαδίτη, δεδομένου τώρα ότι οι θέσεις των καταρρακτών τοποθετούνται κατά μήκος της κοίτης και συνεπώς η έπεκταση του σπηλαίου γίνεται κατά μήκος της τελευταίας, τόσο προς τα ανάντη όσο και προς τα κατάντη αυτής. Ασφαλώς ο προσδιορισμός των παραγόντων που καθορίζουν την περιεκτικότητα σε CaCO<sub>3</sub> και ΜgCO<sub>3</sub> των υδάτων των καρστικών πηγών, ένα πρόβλημα που είναι ανοιχτό μέχρι σήμερα.

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί μια προσπάθεια εκτίμησης εκείνων των παραγόντων που με την δράση τους προκαλούν την έναρξη των μηχανισμών απόθεσης των παραπάνω αλάτων σε φυσικά περιβάλλοντα που απαιτούν, σε πρώτη φάση τουλάχιστον, να πληρούν καλά καθορισμένες φυσικοχημικές συνθήκες. Επίσης, σχετικά πρόσφατες μελέτες (Bayari et al. 2002, Dramis et al. 1999 κ.α.) αναφέρουν ότι τόσο για την γένεση όσο κυρίως για την εξάπλωση των ασβεστολιθικών τόφφων και τραβερτινών παίζουν σημαντικό ρόλο και ορισμένες μηχανικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται από τα παραπάνω περιβάλλοντα και για τις οποίες γίνεται μνεία σε συγκεκριμένο κεφάλαιο της εργασίας, ανεξάρτητα από τις μεταβολές των φυσικοχημικών συνθηκών.

Τέλος, οι περίφημες τραβερτινικές γέφυρες, συνιστούν ιδιαίτερη κατηγορία φυσικών γεφυρών και έχουν παρατηρηθεί σε πολλά σημεία του πλανήτη, ωστόσο θεωρούνται σπάνιοι σχηματισμοί λόγω των πολλών και κάποιες φορές εξαιρετικά σπάνιων συνθηκών που πρέπει να υφίστανται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον έτσι ώστε να σχηματιστούν.

### 2. ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης επιχειρείται η μελέτη εκείνων των παραγόντων (γεωλογικών, φυσικών, μηχανικών και χημικών) που επιδρούν στο χημισμό και την γενικότερη συμπεριφορά των υδάτων υπόθερμων πηγών, στην τοποθεσία 'Ζεστά Νερά', στην περιοχή ανάντη του δήμου Σιδηροκάστρου του Ν. Σερρών, με απώτερη συνέπεια την απόθεση ανθρακικών σχηματισμών (κυρίως με την μορφή ασβεστολιθικού τόφφου), την δημιουργία τραβερτινικών γεφυρών και πρωτογενών σπηλαίων.

Με στόχο να διευκρινιστεί, σε πρώτη φάση, η γενικότερη γεωλογική – γεωμορφολογική κατάσταση στην οποία βρίσκεται σήμερα η λεκάνη και κυρίως η κοίτη του Αχλαδίτη ποταμού - η οποία, πρέπει να σημειώσουμε εδώ, ότι εμφανίζει χαρακτηριστικά χειμάρρου - και κυρίως να διαπιστωθεί πως οι γεωλογικοί και γεωμορφολογικοί παράμετροι έχουν επηρεάσει τόσο τον σχηματισμό της πηγής όσο και κατ' επέκταση την διαμόρφωση του χημισμού των υδάτων της, με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και του προγράμματος Corel Draw Version 12, πραγματοποιήθηκε:

- Χαρτογράφηση των παραπάνω αποθέσεων και γεωμορφών σε κλίμακα
   1:25.000, οι οποίες διακρίνονται ως επί το πλείστον σε α/φίες, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ταυτόχρονα μελετήθηκε και η εμφάνιση των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την υπό μελέτη θέση.
- Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου και του μορφολογικού αναγλύφου, της λεκάνης Σιδηροκάστρου, ως προς το σύνολο της, ενώ κατέστη επίσης δυνατός, ο προσδιορισμός ορισμένων κρίσιμων μορφοτεκτονικών παραμέτρων της λεκάνης.

Σε δεύτερη φάση, η διατριβή στηρίζεται στην χημική ανάλυση πλήθους δειγμάτων νερού από την υπό μελέτη πηγή. Με την βοήθεια προγραμμάτων όπως είναι το EQL/EVP και το πρόγραμμα Excel της Microsoft Office κατέστη δυνατή:

- Η στατιστική ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων
- 2. Η ορθή απεικόνισή τους σε διαγράμματα και πίνακες και
- Η ερμηνεία των μεταβολών τους τόσο μέσα στον χρόνο όσο και λόγω θέσης (απόσταση από την πηγή).

Ακόμη, λαμβάνει χώρα εκτενής αναφορά στους φυσικούς και μηχανικούς παράγοντες που με την σειρά τους ευνοούν την απόθεση των συγκεκριμένων ανθρακικών σχηματισμών σε μεμονωμένες μόνο θέσεις. Ασφαλώς οι φυσικοί παράγοντες είναι στενά συνδεδεμένοι με την χημεία των υδάτων, ενώ οι μηχανικοί παράγοντες εξαρτώνται κυρίως από την γεωλογία και την μορφολογία της εκάστοτε θέσης. Η συνδυασμένη δράση και αλληλεξάρτηση όλων των παραπάνω παραγόντων οδηγεί, με ασφαλή τρόπο, στα τελικά συμπεράσματα γύρω από τις διεργασίες δημιουργίας και ανάπτυξης των γεωμορφών που εξετάζονται, αποκλειστικά στη συγκεκριμένη θέση.

Τα αποτελέσματα της εργασίας συνιστούν ένα αξιόλογο σύνολο δεδομένων (γεωλογικών, γεωμορφολογικών, υδροχημικών) που μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερο χρήσιμο εργαλείο από τις διοικητικές υπηρεσίες, τόσο για τον ορθό έλεγχο της ποιότητας των υδάτων της πηγής, όσο και για την περαιτέρω αξιοποίηση (τουριστική ως επί το πλείστον) των ιδιαίτερων γεωμορφών που δημιουργεί.

### 3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 3.1. Μέθοδοι πεδίου

Στο στάδιο αυτό της εργασίας συμπεριλαμβάνεται κυρίως η υπαίθρια χαρτογράφηση τόσο των ασβεστολιθικων αποθέσεων εν γένει καθώς και της υπό μελέτη τραβερτινικής γέφυρας όσο και των υπόλοιπων γεωλογικών σχηματισμών και στοιχείων της χαμηλής ΝΔ ζώνης της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

Για την πραγματοποίηση της γεωλογικής - γεωμορφολογικής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο τοπογραφικός χάρτης Σιδηροκάστρου, κλίμακας 1:100.000, της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) - ο οποίος υπέστη κατάλληλη επεξεργασία ώστε να προκύψει το τμήμα που αφορούσε την περιοχή μελέτης σε κλίμακα 1:25.000 καθώς και ο αντίστοιχος γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000 (υπό έκδοση), του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε σε κάθε βήμα της συγκεκριμένης εργασίας, ως συμπληρωματικό μέσο, ζεύγος α/φιών από την περιοχή μελέτης, κλίμακας 1:42.000.

Η συλλογή των τεκτονικών στοιχείων έγινε με την βοήθεια πυξίδας CLAR, με έμφαση κυρίως στην περιοχή περιμετρικά της πηγής, αλλά και σε θέσεις που βρισκόταν κοντά στην επαφή των νεογενών ιζημάτων με τα ολισθοστρώματα, εκατέρωθεν μάλιστα της κοίτης ροής του Αχλαδίτη ποταμού.

Ακόμη για την λήψη των υψομέτρων και των συντεταγμένων που ορίζουν την περιοχή μελέτης και τις εκάστοτε θέσεις δειγματοληψίας, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή της GARMIN ακρίβειας < 3m.

Τέλος, έγινε η επιλογή των τεσσάρων θέσεων από όπου θα γινόταν η δειγματοληψία των υδάτων. Οι θέσεις αυτές βρίσκονται κατά μήκος του ρέματος που δημιουργεί η

πηγή και το οποίο καταλήγει με την μορφή υδατόποτωσης στην κοίτη του Αχλαδίτη. Η πρώτη θέση αφορά το σημείο εκφόρτισης της πηγής, η οποία πρέπει να πούμε ότι έχει υποστεί εκτενή υδρομάστευση με την μορφή γεωτρήσεων. Η δεύτερη θέση βρίσκεται σε απόσταση 100m περίπου από την πηγή και αφορά το τεχνητό κανάλι που συγκεντρώνει τα νερά του παραπάνω ρέματος και πιθανότα το εκτρέπει λίγο βορειότερα από την αρχική, φυσική του πορεία. Η τρίτη θέση βρίσκεται μόλις 50m περίπου από την δεύτερη και αφορά το τμήμα εκείνο των υδάτων που αφορούν την πτώση των υδάτων από τον καταρράκτη και συνιστά ουσιαστικά την ζώνη ανατάραξης των υπό μελέτη υδάτων. Η τέταρτη θέση ακολουθεί σε μια απόσταση 10m από την τρίτη, όπου τα νερά έχουν πλέον ολοκληρώσει την πτώση τους, ρέουν πάνω σε ασβεστολιθικούς τόφφους και είναι έτοιμα να εισέλθουν στην κοίτη του ποταμού.

Οι δειγματοληψίες ξεκίνησαν τον Αύγουστο του 2005 και ολοκληρώθηκαν τον Ιούνιο του 2006, σε μηνιαία βάση και περιλαμβάνουν αποκλειστικά βαθύτερα ψυχρά έως υπόθερμα νερά, δεδομένου ότι στις παραπάνω θέσεις έχουμε την ροή αποκλειστικά υπόθερμων – ψυχρών υδάτων. Επίσης πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες τον Νοέμβριο του 2006 και τον Φεβρουάριο του 2007 με σαφώς επαληθευτικό χαρακτήρα, ως προς επιβεβαίωση δηλαδή των αναλύσεων της πρώτης κύριας ομάδας δειγμάτων. Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας τόσο των νερών όσο και του αέρα.

Για τις θερμομετρήσεις στο ύπαιθρο χρησιμοποιήθηκε φορητό ψηφιακό θερμόμετρο με αντίσταση πλατίνης Pt 100 της Digitron (μοντέλο 3204) αναφορικά με την θερμοκρασία των δειγμάτων καθώς και ένα απλό συμβατικό θερμόμετρο για τις αντίστοιχες μετρήσεις του αέρα.

Οι θέσεις δειγματοληψίας επιλεχθήκαν αρχικά με βάση την ευκολία πρόσβασης και την απόστασή τους από την εκφόρτιση της πηγής αλλά και από τα σημεία εκδήλωσης των καταρρακτών.

Ειδικότερα για την επιλογή των σημείων δειγματοληψίας ελήφθησαν υπ' όψη κάποιες παράμετροι, όπως:

- Καλή χωρική κατανομή των δειγμάτων κατά μήκος της διαδρομής από την εκφόρτιση της πηγής μέχρι τα σημεία εκδήλωσης των καταρρακτών.
- Δειγματοληψία από θέσεις που να βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους
   προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν διαφοροποιήσεις στο χημισμό των νερών

λόγω της αλλαγής των φυσικοχημικών συνθηκών τους, που πιθανόν να οφείλονται στην εκάστοτε θέσης τους.

Τα δείγματα συλλέγονταν σε δύο φιάλες πολυαιθυλενίου του 1 lt, η μία εκ των οποίων οξινίζονταν με τη χρήση διαλύματος HCI έως ότου το pH γίνει ίσο ή περίπου ίσο με 2. αυτό αποσκοπούσε στην καλύτερη διατήρηση των κατιόντων και στην αποτροπή οποιασδήποτε αλλοίωσής τους (πιθανή καθίζηση) μέχρι τη στιγμή της πραγματοποίησης των χημικών αναλύσεων. Πριν την οξίνιση γινόταν σχολαστική διήθηση για την κατακράτηση των αιωρούμενων λεπτόκοκκων σωματιδίων και υλικών. Στην άλλη φιάλη το δείγμα δεν οξινίζονταν.

### 3.2. Μέθοδοι Εργαστηρίου

Στο τμήμα αυτό της εργασίας περιλαμβάνεται κυρίως η διεξαγωγή των χημικών αναλύσεων των λειφθέντων δειγμάτων. Ειδικότερα, οι μετρήσεις τόσο της αγωγιμότητας όσο και του pH για το σύνολο των δειγμάτων της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο.

Η αγωγιμότητα στο εργαστήριο μετρήθηκε με τα αγωγιμόμετρα της HACH (model 44600-00) και της HANNA (μοντέλα HI 8733 και HI 8033) ενώ για τις μετρήσεις του pH χρησιμοποιήθηκε η συσκευή HI 9024C της HANNA. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων  $CO_3^{2-}$ ,  $NH_4^+$  καθώς και του SiO<sub>2</sub> δεν προσδιορίστηκαν, δεδομένου ότι απαιτείται για τον προσδιορισμό τους ιδιαίτερος εξοπλισμός καθώς επίσης ο προσδιορισμός τους επιβάλλεται να πραγματοποιείται επί τόπου και κατά την στιγμή της δειγματοληψίας, λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης ευκολίας στις μεταβολές των συγκεντρώσεων των παραπάνω στοιχείων.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, αυτές προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο, αν και ο προσδιορισμός τους επιβάλλεται να γίνεται την στιγμή της δειγματοληψίας, μέσα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να μην σημειωθεί σε μεγάλη έκταση καταβύθιση των ιόντων και παρουσιαστούν αλλοιωμένα αποτελέσματα, κάτι το οποίο προσδιορίζεται και μετέπειτα άλλωστε από τον υπολογισμό του αναλυτικού σφάλματος των αναλύσεων, όπως θα δούμε παρακάτω.

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδρογεωλογίας και Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., κάτω από την επίβλεψη του χημικού και υποψήφιου διδάκτορα Υδρογεωλογίας κ. Μιχάλη Σωτηριάδη, τον οποίο ευχαριστώ θερμά. Προσδιορίστηκαν τα ιόντα Nα<sup>+</sup> , K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, CI<sup>-</sup> , HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> , NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Όσον αφορά τον αριθμό των δειγμάτων προς ανάλυση, αυτά αντιστοιχούν σε **4** δείγματα ανά μήνα, δηλαδή αριθμούνται 44 δείγματα από 11 συνεχείς μηνιαίες δειγματοληψίες καθώς και άλλα 8 δείγματα που αφορούσαν δυο δειγματοληψίες σε τριμηνία βάση με καθαρά επαληθευτικό χαρακτήρα ως προς τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας δειγματοληψιών (σύνολο 52 δείγματα).

Τα ιόντα HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> προσδιορίστηκαν με άμεση τιτλοδότηση του δείγματος νερού χρησιμοποιώντας μία σειρά χημικών αντιδραστηρίων της AQUAMERCK 11109. Ισχυρές ή ασθενείς βάσεις, ως χημικοί δείκτες, διαλύονται μέσα στο νερό και στη συνέχεια γίνεται τιτλοδότηση με υδροχλώρικό οξύ. Η αλλαγή του χρώματος του υδάτινου διαλύματος προσδιορίζει τη συγκέντρωση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Τα στοιχεία CI<sup>-</sup>,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^{-}$ , προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του φασματοφωτόμετρου (Spectrophotometer) HACH 2000. Το φασματοφωτόμετρο αυτό παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης άνω των 100 διαφορετικών αναλύσεων, δίνοντας στη συσκευή έναν κωδικό προγράμματος και επιλέγοντας το κατάλληλο για την ανάλυση μήκος κύματος. Το οπτικό του σύστημα χρησιμοποιεί πρίσμα υψηλού διαχωρισμού και πετυχαίνει ακρίβεια στην περιοχή μήκους κύματος από 400nm μέχρι 900nm. Για τον προσδιορισμό των  $SO_4^{2-}$  χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SulfaVer4, που περιγράφεται στο εγχειρίδιο χημικών αναλύσεων της εταιρείας HACH και λαμβάνει το όνομά της από το ομώνυμο χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιείται. Το αντιδραστήριο αυτό περιέχει βάριο (Ba) το οποίο, αντιδρώντας με τα υπάρχοντα SO4<sup>2-</sup>, σχηματίζει αδιάλυτο θεϊκό βάριο (BaSO<sub>4</sub>), που προκαλεί θολότητα του διαλύματος. Το μέγεθος της θολότητας είναι ανάλογο της συγκέντρωσης των SO42- και γι' αυτό η αναλυτική αυτή μέθοδος βασίζεται στη θολερομετρία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ένα εύρος τιμών από 0 έως 65 mg/l SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Αν το δείγμα νερού περιέγει SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> των οποίων η συγκέντρωση υπερβαίνει το παραπάνω ανώτατο όριο τότε γίνεται η σχετική αραίωση του με απιονισμένο νερό, κάτι το οποίο δεν χρειάστηκε για κανένα από τα δείγματά μας.

Τα αλκάλεα K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, προσδιορίσθηκαν με τη χρησιμοποίηση του φλογοφωτόμετρου (Flame Photometer) PFP 7 της εταιρίας JENWAY και τη χρήση κατάλληλων πρότυπων (standards) διαλυμάτων που περιείχαν γνωστές συγκεντρώσεις των στοιχείων που επρόκειτο να προσδιοριστούν. Η αρχή λειτουργίας του φλογοφωτόμετρου στηρίζεται στο γεγονός ότι η ένταση της φλόγας του οργάνου είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του ιόντος που απορροφάται. Η επιλογή του ιόντος που κάθε φορά προσδιορίζεται,

ρυθμίζεται με την χρήση του κατάλληλου φίλτρου. Με τη βοήθεια των πρότυπων διαλυμάτων κατασκευάζεται το διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων (σε ppm) και της ένδειξης της συσκευής, που χαρακτηρίζεται ως καμπύλη βαθμονόμησης. Μετά την κατασκευή της καμπύλης αυτής τοποθετούνται τα δείγματα του νερού και προσδιορίζονται οι πραγματικές συγκεντρώσεις τους από την ένδειξη του οργάνου. Αν οι συγκεντρώσεις κάποιων δειγμάτων υπερβαίνουν τα όρια της καμπύλης αυτής τότε συνήθως πραγματοποιείται αραίωση των δειγμάτων έτσι ώστε αυτά να τοποθετούνται μέσα στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε ιόν έχει τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη και συνεπώς πρέπει να κατασκευάζονται ξεχωριστές καμπύλες για το καθένα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε ότι έγινε ανάλυση μόνο για τα μισά περίπου δείγματα (20) του συνόλου που είχαμε στην διάθεσή μας για τα παραπάνω ιόντα (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), λόγω βλάβης του συγκεκριμένου οργάνου κατά την περίοδο των αναλύσεων. Τα παραπάνω δείγματα αναφέρονται στην περίοδο Αύγουστος 2005 – Δεκέμβριος 2005.

Τα ιόντα Ca<sup>+</sup> και Mg<sup>+</sup> προσδιορίστηκαν στο ίδιο εργαστήριο με τη διαδικασία προσδιορισμού της σκληρότητας με τη μέθοδο της ογκομέτρησης και τιτλοδότησης με EDTA με τη μέθοδο HACH και χρησιμοποιώντας τον φορητό τιτλοδότη που προτείνει και παρέχει η HACH.

### 3.3. Επεξεργασία Δεδομένων

Η επεξεργασία του συνόλου των γεωλογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων έγινε σε λογισμικό των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MapInfo 6.5. Ψηφιοποιήθηκε ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης, ο οποίος προέκυψε από την ένωση 4 τοπογραφικών χαρτών, σε ψηφιακή μορφή, κλίμακας 1:50.000 καθώς και το συνολικό υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης Σιδηροκάστρου. Το σύστημα προβολής που χρησιμοποιήθηκε κατά την ψηφιοποίηση και επεξεργασία των δεδομένων είναι το Ε.Γ.Σ.Α. 87 και το ελλειψοειδές αναφοράς GRS'80.

Η κατασκευή του γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης κατέστη δυνατή με την επεξεργασία του χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. με την χρήση του προγράμματος Corel Draw Version 12, όσον αφορά τα είδη των γεωλογικών σχηματισμών και των στοιχείων (ρήγματα, όρια, κλίσεις), αφού προηγουμένως προηγήθηκε στερεοσκοπική

παρατήρηση και επεξεργασία ζεύγους α/φιών από την περιοχή μελέτης κλίμακας 1: 42.000. Τόσο το τοπογραφικό υπόβαθρο όσο και το υδρογραφικό δίκτυο του χάρτη εισήχθησαν από την επεξεργασία με το πρόγραμμα MapInfo 6.5. του οποίου η χρήση προηγήθηκε χρονικά.

Με την βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Vertical Mapper 3.0., κατέστη δυνατή η κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM) με την μέθοδο παρεμβολής τριγωνισμού μέσω εξομάλυνσης (triangulation with smoothing).

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων που περιλαμβάνει την διόρθωσή τους για τα επιμέρους υπολογιζόμενα στοιχεία, την στατιστική τους ανάλυση, την ορθή απεικόνιση τους σε σχετικά διαγράμματα αλλά και την ερμηνεία τους με βάση την γεωλογία της περιοχής μελέτης, έγινε με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος EQL/EVP, σε συνδυασμό ασφαλώς με το υπολογιστικό φύλλο Excel της Microsoft Office.

Η διάθεση του προγράμματος EQL/EVP, έγινε από την ερευνήτρια κ. Ελισσάβετ Ντότσικα και το Ινστιτούτο 'Δημόκριτος', χάρη στο οποίο κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός πολύ κρίσιμων χημικών παραμέτρων των δειγμάτων που αναλύθηκαν, απολύτως απαραίτητων για την απόδειξη ή μη των διεργασίων απόθεσης στα υπό εξέταση δείγματα. Επίσης η επεξεργασία και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων τόσο των χημικών αναλύσεων όσο και εκείνων που προέκυψαν από την εφαρμογή του παραπάνω υπολογιστικού προγράμματος έγιναν υπό την εποπτεία της ίδιας ερευνήτριας.

### 4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 4.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ

4.1.1. Γεωγραφικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής μελέτης (λεκάνη Σιδηροκάστρου)

Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της λεκάνης Σιδηροκάστρου. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ο όρος «λεκάνη Σιδηροκάστρου», αφενός γιατί είναι όρος που αναφέρεται και από άλλους ερευνητές, αφετέρου λόγω του ομώνυμου δήμου του Ν. Σερρών, που καταλαμβάνει θέση περίπου στο ΔΝΔ τμήμα αυτής.

Η υδρολογική λεκάνη του Σιδηροκάστρου και το ποτάμιο σύστημα του Αχλαδίτη, στο οποίο απατώνται οι συγκεκριμένες τραβερτινικές αποθέσεις, αποτελούν το περιθωριακό κομμάτι προς τα BBA και BA της ευρύτερης ταφρολεκάνης (τ/φ) των Σερρών και του ποτάμιου συστήματος του Στρυμόνα αντίστοιχα (βλ. Σχ. 1). Η λεκάνη Σιδηροκάστρου χωροταξικά τοποθετείται στην Βόρεια Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στην Ανατολική Μακεδονία. Τα όριά της εμπεριέχονται μέσα στα διοικητικά όρια του Νομού Σερρών, ορίζεται δε από τις εξής συντεταγμένες, τα οποία ουσιαστικά αντιστοιχούν στις γωνίες του μαύρου πλαισίου του Σχήματος 1, που ακολουθεί:

**Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος**  $41^{\circ} 13'$  έως  $41^{\circ} 39'$ **Ανατολικό Γεωγραφικό μήκος**  $23^{\circ} 23'$  έως  $23^{\circ} 55'$ 



Σχήμα 1.: Χάρτης της Ελλάδας (κλίμακα 1:250.000) που απεικονίζει τον Ν. Σερρών με το ορεινό συγκρότημα που περιβάλλει την λεκάνη Σιδηροκάστρου που απεικονίζεται με την έντονη μαύρη γραμμή (url 1).

Στα B/BBΔ/BBA συνορεύει με τη Βουλγαρία. Ο Νομός Δράμας βρίσκεται στα BA/A/NA της λεκάνης. Η N/NΔ πλευρά της γειτνιάζει με την λεκάνη των Σερρών.

Η λεκάνη απορροής του Αχλαδίτη έχει έκταση 290,5 Km<sup>2</sup> και αποτελεί το 7,82% της συνολικής έκτασης της τ/φ των Σερρών (3714,8Km<sup>2</sup>) (βλ. Πίν. 1.).

ONOMA	EKTAΣH (Km²)	ΠΟΣΟΣΤΟ %
ΤΑΦΡΟΛΕΚΑΝΗ ΣΕΡΡΩΝ	3714,8	100
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΧΛΑΔΙΤΗ	290,5	7,82

Πίνακας 1.: Έκταση λεκάνης απορροής Αχλαδίτη σε σχέση με την ταφρολεκάνης Σερρών

Το ορεινό συγκρότημα που περιβάλλει την λεκάνη Σιδηροκάστρου αποτελείται (βλ. Σχ. 1):

- στα BBΔ/B/BBA και BA από το Άγκιστρο όρος, με υψόμετρο 1295 μέτρα
- στα ΒΑ από το όρος Όρβηλο, με υψόμετρο 2212 μέτρα
- στα Α/ΝΑ και ΝΝΑ από τα όρη της Βροντούς, με υψόμετρο 1849 μέτρα

Τον Δήμο Σιδηροκάστρου, έως το 1998, συνέθεταν μόνο ένας δήμος και τέσσερις οικισμοί. Σήμερα, μετά την εφαρμογή του Σχεδίου «Καποδίστριας» για την Τοπική Αυτοδιοίκηση, η Διοικητική Διαίρεση του Δήμου, περιλαμβάνει 1 δήμο, 4 οικισμούς και 5 κοινότητες.

### 4.1.2. Γεωγραφία περιοχής μελέτης

Στην ευρύτερη περιοχή Β και ΒΑ του Ν. Σερρών, στην Κεντρική Μακεδονία, πολύ κοντά στην πόλη του Σιδηροκάστρου (βλ. προηγούμενα Σχ. 1.) έχει καταγραφεί ένας μεγάλος αριθμός σπηλαίων (Λαζαρίδης Γ., 2004) κατά μήκος της λεκάνης του Αχλαδίτη, ήδη από το 2001. Ειδικότερα μάλιστα, η συστηματική μελέτη και έρευνα των παραπάνω σπηλαίων ξεκίνησε το 2001, από μέλη του Τ.Ο.Τ.Β.Ε. της Ε.Σ.Ε. Επίσης το 2002, ερευνητική ομάδα του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., με επικεφαλή τον Καθηγητή Ελευθέριο Βαβλιάκη, συνέχισαν πιο εμπεριστατωμένα την παραπάνω προσπάθεια μέσα στα πλαίσια συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος που εξέδωσε η Νομαρχία Σερρών

Ποικίλοι τύποι σπηλαίων έχουν επισημανθεί στην περιοχή, σύμφωνα με την λιθολογία και τον τρόπο ανάπτυξής τους. Το σπήλαιο όμως που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, στην περιοχή, είναι αυτό στην τοποθεσία 'Ζεστά Νερά' που σχηματίζεται από συγκεκριμένες ανθρακικές αποθέσεις (ασβεστολιθικούς τόφφους) και ανήκει σε εκείνη την ιδιαίτερη κατηγορία σπηλαίων (ή καλύτερα γεωμορφών), που ονομάζονται **Τραβερτινικές Γέφυρες** (Βαβλιάκης 1998, Bayari 2002).

Το σπήλαιο των Ζεστών Νερών βρίσκεται μέσα στην λεκάνη του Αχλαδίτη ποταμού και τοποθετείται μάλιστα πάνω από την κοίτη του στην συγκεκριμένη θέση, η οποία απέχει μόλις 2,5 Km BA από την πόλη του Σιδηροκάστρου του Ν. Σερρών (βλ. Σχ. 2.), πολύ κοντά στον λόφο με την ονομασία 'Μαύρος Βράχος'. Το σπήλαιο στην θέση 'Ζεστά Νερά' λοιπόν συνιστά τέτοιου είδους φυσική γέφυρα, μήκους 130μ., η οποία τοποθετήθηκε αρχικά εγκάρσια προς την κοίτη του Αχλαδίτη ποταμού και στην συνέχεια αναπτύχθηκε κατά μήκος της κοίτης, τόσο προς τα ανάντη όσο και προς τα κατάντη της τελευταίας. Ασφαλώς ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε κατ

αναπτύχθηκε η απόθεση των συγκεκριμένων ανθρακικών υλικών συνιστά μοναδικό φαινόμενο, ιδιαίτερα για τον ελληνικό χώρο.

Η ονομασία 'Ζεστά Νερά' προέρχεται από την παρουσία συγκεκριμένης υπόθερμης πηγής (Τ περίπου 25°C) σε απόσταση περίπου 300μ BA από το σπήλαιο, πλησίον της βάσης του λόφου 'Μαύρος Βράχος'. Ασφαλώς η απόθεση των ανθρακικών υλικών αποδίδεται στην παρουσία των κορεσμένων σε ασβεστίτη υδάτων της συγκεκριμένης πηγής. Το κυρίως τμήμα της συγκεκριμένης διατριβής πραγματεύεται την δημιουργία, τον τρόπο λειτουργίας και ιδιαίτερα τον χημισμό των υπόθερμων υδάτων της πηγής καθώς και τον μηχανισμό με τον οποίο πραγματοποιείται η απόθεση των ανθρακικών ιζημάτων από τα νερά της πηγής.

Τα όρια της περιοχής μελέτης γύρω από την πηγή και το ομώνυμο σπήλαιο, όπως φαίνονται άλλωστε παρακάτω στο Σχήμα 2, είναι τα εξής:





Σχήμα 2.: Χάρτης της Ελλάδας που απεικονίζει την θέση της περιοχής μελέτης (τροποποιημένο από Savvaidis et al., 1999).

### 4.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι τόπος με μακραίωνη Ιστορία. Υπάρχει μεγάλο πλήθος από μνημεία της παλαιολιθικής εποχής, αλλά και πολλές αναφορές του Ομήρου και του Ηροδότου για την ευρύτερη περιοχή. Αρχαιολογικά ευρήματα Νεολιθικών οικισμών στον ευρύτερο χώρο της λεκάνης του Στρυμόνα δείχνουν ότι ο άνθρωπος κατοίκησε και δραστηριοποιήθηκε σε αυτόν τον τόπο, από τα προϊστορικά ακόμη χρόνια

Ιστορικά κυρίως και κοινωνικο-πολιτικά στοιχεία, μας πληροφορούν ότι στην δύση της Β΄ χιλιετίας, στο χώρο της ευρύτερης περιοχής κατοικούσαν Θρακικά και Παιονικά φύλα (Σιροπαίονες, Παίοπλες, Οδόμαντες, Βισάλτες, Ηδωνοί, Σιντοί, Αγριάνες, Μαίδοι και Ζαιελέοι), που είχαν ανεξάρτητα κράτη αλλά τον ίδιο Βασιλιά. Ιδιαίτερα μάλιστα για την περιοχή του Σιδηροκάστρου πιστεύεται ότι οι αρχαίοι κάτοικοί του ήρθαν από την Λήμνο. Τα πλέον γνωστά και αξιόλογα παραπάνω κράτη ήταν η Βισαλτία, η Σιντική, η Ηδωνίς, η Μαιδική, η Παιονία (βλ. Σχ. 3) (στοιχεία Δ. Σαμσάρη – Γ. Καφταντζή, 1972, από Ε. Παπαφιλίππου – Πέννου 2004).

Ο Δήμος Σιδηροκάστρου διατηρεί μέχρι τις μέρες μας την αρχαία του ονομασία, δεδομένου ότι ανήκει στην επαρχία Σιντικής του Ν. Σερρών.



Σχήμα 3.: Διοικητική διαίρεση του χώρου της τ/φ Σερρών κατά την αρχαιότητα (στοιχεία Δ. Σαμσάρη - από Γ. Καφταντζή, 1972, από Ε. Παπαφιλίππου - Πέννου, 2004).

Αργότερα επί Φιλίππου, απέκτησαν ενιαία διοίκηση κάτω από την εξουσία των Μακεδόνων Βασιλέων. Πολλά από τα φύλα αυτά ακολούθησαν τον Μέγα Αλέξανδρο στην υπερπόντια εκστρατεία του (π.χ. οι Παίονες, οι Αγριάνες κ.α.).

Για την Βυζαντινή περίοδο της ευρύτερης περιοχής μελέτης, τα στοιχεία που υπάρχουν, αφορούν την πολιτική κατάσταση που επικρατούσε σ΄αυτήν. Είναι γνωστό, ότι υπαγόταν στο Β΄ Θέμα της Αυτοκρατορίας και βαθμιαία συγχωνεύθηκε στην Βυζαντινή Ολομέλεια.

Σταθμός στην ιστορία του Σιδηροκάστρου υπήρξε η θρυλική μάχη του Βασιλείου του Βουλγαροκτόνου, που με ορμητήριο την πόλη των Σερρών κατανίκησε τους Βουλγάρους το 1014 στη θέση "Κλειδί", στο Ρούπελ της Σιντικής, δίπλα σχεδόν στο Σιδηρόκαστρο. Υπήρξε ο ακρογωνιαίος ανασχετικός λίθος του οικοδομήματος του Ελληνισμού έναντι των βουλγαρικών επιδρομών.

Στις 20 Σεπτεμβρίου του 1383 το Σιδηρόκαστρο έπεσε στα χέρια των Τούρκων για να παραμείνει κάτω από την οθωμανική σκλαβιά 529 ολόκληρα χρόνια. Το 1912 έπαψε να υπάρχει ο τουρκικός ζυγός και το 1913 ο βουλγαρικός.

Τον Απρίλιο του 1941, ύστερα από την παράδοση των οχυρών του Ρούπελ και την είσοδο των Γερμανών στη χώρα μας, οι Βούλγαροι που τους ακολούθησαν κατέλαβαν ξανά το Σιδηρόκαστρο στις 3 Μαΐου. Η περιοχή απελευθερώθηκε το 1944 (στοιχεία Δ. Σαμσάρη – Γ. Καφταντζή, 1972, από Ε. Παπαφιλίππου – Πέννου 2004).

### 4.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 4.3.1. Εισαγωγή

Το κλίμα μιας περιοχής είναι ένας από τους κύριους παράγοντες των εξωγενών διεργασιών εξέλιξης της επιφάνειας της Γης. Αποτελεί το στοιχείο που προσδιορίζει την ταχύτητα και την ένταση των δυναμικών εξωγενών διεργασιών, στην αέναη προσπάθεια τους να προσεγγίσουν το θεωρητικό πανεπίπεδο (paneplain).

Επιπλέον η χωροχρονική κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η θερμοκρασία, η υγρασία κ.λ.π. είναι οι βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν τις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής με τις οποίες συνδέεται άμεσα η υδροφορία των εν δυνάμει υδροφόρων στρωμάτων και ο πλούτος των επιφανειακών και υπόγειων ταμιευτήρων της (Παπαφιλίππου Ε. 2004). Η έλλειψη ενός οργανωμένου και αντιπροσωπευτικού δικτύου σταθμών στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποταμού Στρυμόνα στην Ελλάδα αλλά και σε αυτή του Αχλαδίτη ποταμού καθώς και η έλλειψη δεδομένων ικανοποιητικής διάρκειας και πληρότητας, δυσκολεύει οποιαδήποτε ανάλυση, αφού πρόκειται για μια περιοχή με σημαντική έκταση και πολύπλοκο ανάγλυφο όπου οι κατά τόπους, διαφοροποιημένοι κλιματικοί χαρακτήρες, δημιουργούν τοπικά μικροκλίματα.

Τα διαθέσιμα στοιχεία θεωρούνται ανεπαρκή για λεπτομερή στατιστική ανάλυση, αλλά πιθανότατα επιτρέπουν τον προσδιορισμό των γενικών κλιματικών συνθηκών που επικρατούν σ'αυτές και ιδιαίτερα θα κάνουμε λόγο για την Α/ΒΑ πλευρά της τ/φ Σερρών, όπου άλλωστε εντοπίζεται και η ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Οι καταγραφές των κλιματικών παραμέτρων που πραγματοποιούνται από τον Μετεωρολογικό Σταθμό Σερρών της Ε.Μ.Υ (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία), διατίθενται πρόθυμα σε κάθε ενδιαφερόμενο ερευνητή από το εμπειρότατο και συνεργάσιμο προσωπικό του.

Για την εξαγωγή των επιθυμητών συμπερασμάτων, αποκλειστικά για την περιοχή μελέτης, έγινε επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από τις καταγραφές του Μ.Σ. Σερρών (Ε.Μ.Υ) και του Β.Σ. Σιδηροκάστρου (ΥΠ.Δ.Ε.), και από σχετικές επιστημονικές εργασίες που αφορούν την θερμοκρασία και το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. (βλ. Πίν. 2).

Είδος & Όνομα	Υπηρεσία	Υψόμετρο	Γεωγραφικές	Είδος και περίοδος
Σταθμού	εποπτείας	(m)	συντεταγμένες	παρατηρήσεων
ΜΣ. Σερρών	EMY	34	23° 32′, 41° 52′	Θερμοκρασία - Βροχόπτωση (1971 -2000)
Β.Σ. Σιδηροκάστρου	ΥΠΔΕ	99	23° 23′, 41° 14′	Βροχόπτωση (1964-1998)

Πίνακας 2.: Μετερεωλογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της κλιματολογίας και υδρολογίας της λεκάνης απορροής και το είδος και η περίοδος των παρατηρήσεων που διέθεταν (YBET, Δ/νση Υδατικού Δυναμικού & Φυσικών Πόρων 1987, από Καρακώστα Θ.)

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και παρατηρήσεις καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του κλιματικού τύπου που επικρατεί στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

### 4.3.2. Θερμοκρασία αέρα

Ο Μ.Σ. Σερρών της Ε.Μ.Υ. βρίσκεται σε υψόμετρο 34,5 m., περίπου στο μέσον της τ/φ Σερρών. Λειτούργησε αρχικά την περίοδο 1927-1938 και μετά από μια μικρή διακοπή λειτουργεί από το 1956 έως σήμερα, διαθέτοντας αξιόπιστα στοιχεία που καταγράφονται ηλεκτρονικά τουλάχιστον από το έτος 1971.

Από την επεξεργασία αυτών υπολογίσθηκε τελικά, η τιμή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα, *της τριακονταετίας 1971- 2000* και προέκυψε η μέση ετήσια τιμή (Μ.Ε.Τ.), 15,16 °C (βλ. Πιν. 3 & Σχ. 4).

		Χρονική													M.E.T.
Σταθμός	Υψόμετρο	περίοδος	Т	Φ	м	Α	м	I	I	Α	Σ	ο	Ν	Δ	(°C)
		1971													
Σερρών	34,5	2000	3,9	6,3	9,57	14,38	20	24,4	26,4	25,5	21,6	15,7	9,39	5,02	15,16

**Πίνακας 3.:** Μέση μηνιαία και ετήσια τιμή θερμοκρασίας αέρα (°C), (περίοδος 1971-2000 – χαμηλή ζώνη της τ/φ Σερρών.



Σχήμα 4.: Καμπύλη της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα (°C), περίοδος 1971-2000, από στοιχεία Μ.Σ Σερρών.

Από στοιχεία εργασιών άλλων ερευνητών [Μπαλαφούτης (1977), Χατζηαγοράκης & Ταουσιάνης 1989, από Ε. Παπαφιλίππου – Πέννου 2004], υπολογίζεται η τιμή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας αέρα για τον Μ.Σ. Σερρών στους (Μ.Ε.Τ.=) 15,4°C, η οποία διαφέρει ελάχιστα από την παραπάνω (15,16°C).

Από την ανάλυση του Σχήματος 4 διαπιστώνεται ότι στην υπολεκάνη Σερρών, η τιμή της θερμοκρασίας παρουσιάζει απλή κύμανση κατά την διάρκεια του έτους με μέγιστο τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και ελάχιστο τον μήνα Ιανουάριο, για τους πεδινούς σταθμούς τουλάχιστον.

Οι θερμοκρασίες αέρα για τις υψηλότερες περιοχές του αναγλύφου της τ/φ Σερρών, δεν είναι εύκολο να υπολογισθούν άμεσα, όπως αναφέραμε προηγούμενα στην εισαγωγή. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο εάν αναλογιστούμε ότι ο μετεωρολογικός σταθμός Σιδηροκάστρου είναι κατά αποκλειστικότητα βροχομετρικός. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να κάνουμε αναγωγή των τιμών θερμοκρασίας του Μ.Σ, Σερρών (υψ. 34m) στο υψόμετρο του σταθμού του Σιδηροκάστρου (υψόμ. περίπου 100m) για να έχουμε τις αντίστοιχες μέσες τιμές για την περιοχή κατάντη της λεκάνης του Σιδηροκάστρου. Η παραπάνω αναγωγή πραγματοποιήθηκε με βάση την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα, όπως έχει προσδιοριστεί αυτή για το Μενοίκιο από τον Ε. Βαβλιάκη (1981).

Ο Βαβλιάκης (1981), χρησιμοποίησε στοιχεία του Μ.Σ. του ιδρύματος Δασικών Ερευνών (ΥΠ.ΓΕ., περίοδος 1963-1969), για την Χρυσοπηγή (υψόμ. 605m) και στοιχεία από τον Μ.Σ (Ε.Μ.Υ.) Δράμας, (Μπαλαφούτης, 1977) και καθόρισε την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα για το όρος Μενοίκιο σε 0,5°C/100 m. (βλ. Πιν. 4).

I	Φ	М	A	М	Ι	Ι	A	Σ	0	N	Δ	M.O.
0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,3	0,1	0,5

Πίνακας 4.: Μέση κατακόρυφη θερμοβαθμίδα (°C/100m) για το Μενοίκιο όρος (από Βαβλιάκη, 1981).

Στον πίνακα που παρατίθεται παραπάνω, δίνονται οι μέσες μηνιαίες και οι μέσες ετήσιες τιμές για τον σταθμό του Σιδηροκάστρου με βάση την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα του Μενοικίου (Βαβλιάκης Ε., 1981) από τις αντίστοιχες τιμές του Μ.Σ. Σερρών για την ίδια περίοδο ασφαλώς και για υψομετρική διαφορά 70m. Ειδικά για τα ορεινά τμήματα της περιοχής έρευνας οι θερμοκρασίες μειώνονται αισθητά, λόγω αύξησης του απόλυτου υψομέτρου (βλ. Πίν. 5. & Σχ. 5).

Υψόμετρο													M.E.T.
Περιοχών (m)	I	Φ	м	Α	м	I	I	Α	Σ	0	Ν	Δ	(°C)
Σέρρες													
(34m)	3,9	6,3	9,57	14,38	19,71	24,39	26,4	25,5	21,6	15,66	9,39	5,02	15,16
Σιδηρόκαστρο													
(100 m)	3,69	6,02	9,22	13,96	19,29	23,90	25,91	25,01	21,18	15,31	9,18	5,01	14,81

**Πίνακας 5:** Μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα (°C) Μ.Σ. Σερρών & Σιδηροκάστρου μετά από αναγωγή για τον τελευταίο, σύμφωνα με την κατακόρυφη θερμοβαθμίδα που προτείνει ο Ε. Βαβλιάκης (1981) για την Α/ΒΑ πλευρά της τ/φ Σερρών.



Σχήμα 5.: Καμπύλες της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας αέρα (°C), για την περίοδο 1971-2000, από στοιχεία Μ.Σ Σερρών & Σιδηροκάστρου

Παρατηρούμε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα του Β.Σ. Σιδηροκάστρου, έχει τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 14,5 °C και 16 °C (Y.B.E.T., 1989), όρια που προφανώς περικλείουν και την Μ.Ε.Τ. θερμοκρασίας αέρα (°C), της ευρύτερης χαμηλής περιοχής της τ/φ Σερρών.

Λαμβάνοντας υπ'όψη τα ακόλουθα δεδομένα:

- Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες, ο δε Ιανουάριος ο ψυχρότερος, για την ευρύτερη περιοχή μελέτης
- η θερμοβαθμίδα στην περιοχή του Μενοικίου είναι 0,7°C/100m. για τον Ιούλιο και 0,3°C/100m. για τον Ιανουάριο (Πίν. 4) (Βαβλιάκης,1981)
- τον προσδιορισμό του Μ.Ο. της ετήσιας θερμοβαθμίδας για το Μενοίκιο όρος (Πίν. 4) (Βαβλιάκης,1981)
- τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα της χαμηλής
   περιοχής, της λεκάνης Σιδηροκάστρου

Γίνεται σαφές ότι το μέσο μηνιαίο όπως και το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος είναι αρκετά μεγάλο (περίπου 22,2°C) γεγονός εξαιρετικής σημασίας για τις συνέπειες που είναι δυνατόν να προκαλέσει στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης, όπως θα αποδείξουμε σε άλλο σημείο της συγκεκριμένης εργασίας.

### 4.3.3. Κατακρημνίσματα

Η πολυπλοκότητα του αναγλύφου της λεκάνης Σιδηροκάστρου απαιτεί επίσης προσεκτικό προσδιορισμό της παραμέτρου των κατακρημνισμάτων.

Τα δεδομένα των Β.Σ. της **Α/ΒΑ πλευράς** της τ/φ των Σερρών και τα πρόσφατα στοιχεία του Β.Σ. Σιδηροκάστρου (υψόμετρο 99m) θα δημιουργήσουν όσο το δυνατόν σαφέστερη αντίληψη, σε βάθος χρόνου, για τις πραγματικές τιμές των μέσων ετήσιων κατακρημνισμάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Έτσι έχουμε λοιπόν:

- Η συνοπτική Έκθεση του ΥΒΕΤ (Δ/νση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών πόρων, 1987) για τους υδατικούς πόρους, αναφέρει ότι στο ΥΔ11 (Ανατ. Μακεδονίας), το μέσο ετήσιο ύψος βροχής μεταβάλλεται από 500mm έως 600mm στις παράκτιες και πεδινές περιοχές, από 600mm έως 1000mm στο εσωτερικό και περισσότερο από 1000mm στα ορεινά.
- Πρόσφατες εργασίες του ΥΠ.ΓΕ (Υπουργείο Γεωργίας, Δ/νση Γεωλογίας-Υδρολογίας, Τμήμα Υδρολογίας, 2002, από Παπαφιλίππου-Πέννου Ε., 2004) σχετικές με τα βροχομετρικά στοιχεία πολυετίας, του χώρου της Μακεδονίας και Θράκης (Β.Ελλάδα) καταλήγουν:
  - στην μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης των 597,8mm για την Δυτική Κεντρική Μακεδονία
  - και των 669,3mm για την Ανατ.Μακεδονία Θράκη.

Στην συνέχεια παραθέτουμε παρακάτω πίνακες και διαγράμματα στα οποία δίνονται οι μέσες μηνιαίες και μέσες ετήσιες τιμές του αντίστοιχου Β.Σ. Σιδηροκάστρου (Πεταλάς Χ. κ.α., 2004), σε άμεση σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του Μ.Σ. Σερρών **(βλ. Πίν. 6 & Σχ. 6)**.

	Ι	Ф	М	Α	М	Ι	Ι	A	Σ	0	Ν	Δ	έτος
Σέρρρες	33,9	40,5	32,2	37,9	47,1	44,3	28	27,9	20,5	36,4	52,7	48,3	449,7
Σιδηρόκαστρο	49,1	36,6	47,5	55,4	61,4	67,8	43,6	18,8	25,4	43,9	84,1	65,5	599,1

Πίνακας 6.: Μέσα μηνιαία ύψη βροχής σε mm για τους σταθμούς Σερρών και Σιδηροκάστρου



**Σχήμα 6.:** Ετήσια πορεία της βροχής στις γειτονικές λεκάνες Σερρών και Σιδηροκάστρου για την περίοδο 1971 – 2000.

Οι αποκλίσεις των τιμών που παρατηρούνται στην έκθεση του YBET, από τις αντίστοιχες των σταθμών της τ/φ Σερρών, είναι αναμενόμενες, διότι τα στοιχεία της πρώτης αναφέρονται συνολικά στην έκταση: των Νομών Σερρών, Δράμας (νότιο τμήμα) Καβάλας (δυτ.- κεντρ. τμήμα) μικρό τμήμα των Ν. Θεσ/νίκης και Κιλκίς, που συγκροτούν το Υ.Δ.11 (Ανατ. Μακεδονίας).

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στον οριακό χώρο μεταξύ των δύο παραπάνω γεωγραφικών ενοτήτων και έχει ετήσιο μέσο όρο (Μ.Ο.) κατακρημνισμάτων (πολυετίας) **599,10** mm, δηλ. μέσα στα όρια που υπολόγισε και το ΥΠ.ΓΕ.

Από τα στοιχεία των παρατηρήσεων διαπιστώνεται περαιτέρω ότι κατά την περίοδο των αρδεύσεων από Απρίλιο μέχρι Σεπτέμβριο, σημειώνεται για μεν την υπολεκάνη των Σερρών το 39% περίπου των ετησίων βροχοπτώσεων, για δε την υπολεκάνη του Σιδηροκάστρου περίπου το 45%, ενώ το υπόλοιπο σημειώνεται κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου.

Προφανώς η ετήσια πορεία της βροχής είναι σχεδόν πανομοιότυπη με ελαφρώς αυξημένες τιμές για τον σταθμό του Σιδηροκάστρου, δεδομένου ότι βρίσκεται σε μεγαλύτερο απόλυτο υψόμετρο αλλά και πιο κοντά στους ορεινούς όγκους της Βροντούς και του Άγκιστρου.

Σε γενικές γραμμές η ετήσια πορεία της βροχής στο κάτω ρου της λεκάνης του Σιδηροκάστρου παρουσιάζει διπλή κύμανση (τριπλή για τον σταθμό των Σερρών). Έτσι το πρωτεύον μέγιστο σημειώνεται το **Νοέμβριο** (ή Δεκέμβριο για τον σταθμό των Σερρών). Το δευτερεύον μέγιστο υπολείπεται ελάχιστα σε τιμή του πρωτεύοντος και εμφανίζεται κατά τον Μάιο ή Ιούνιο, ενώ το τριτεύον το Μάρτιο (για τον σταθμό των Σερρών).

Σύμφωνα με τον Μπαλαφούτη (1977), το δευτερεύον μέγιστο οφείλεται σε καταιγίδες οι οποίες είναι πολύ συχνές και έντονες κατά την περίοδο αυτή στην Β. Ελλάδα. Η δράση των καταιγίδων συντελεί στην εκδήλωση ραγδαίων βροχοπτώσεων με μεγάλες εντάσεις και μικρές διάρκειες, οι οποίες κάτω από συγκεκριμένες συγκυρίες μπορούν να προκαλέσουν πλημμύρες. Σύμφωνα πάντα με τον ίδιο ερευνητή, το τριτεύον μέγιστο του Μαρτίου (για τον σταθμό των Σερρών) οφείλεται κυρίως στην δράση βροχοφόρων ανέμων που συνδέονται με τις υφέσεις Σαχαριανής προέλευσης, οι οποίες είναι συχνές την άνοιξη.

### 4.3.4. Ομβροθερμικό διάγραμμα

Τα πλέον αξιόπιστα κλιματικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής μελέτης, θεωρούνται ότι είναι αυτά της χρονικής περιόδου 1971-2000 (ηλεκτρονική καταγραφή των δεδομένων).

Βάσει αυτών είναι δυνατόν να κατασκευασθεί το αντίστοιχο ομβροθερμικό διάγραμμα, από το οποίο θα προσδιορισθεί η ξηροθερμική περίοδος, κυρίως της χαμηλής ζώνης της λεκάνης Σιδηροκάστρου.

Η γνώση της διάρκειας της ξηροθερμικής περιόδου, είναι απαραίτητη στην επιλογή των εφαρμοζόμενων ειδών καλλιέργειας, σημαντική στην διαχείρηση των υδάτινων πόρων καθώς και στην χρήση του αρδευτικού νερού.

Ο De Martonne πρότεινε τον τύπο I = P/T + 10 για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρότητας (I) μιας περιοχής, που εξαρτάται από το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (P) σε χιλιοστά, και την μέση ετήσια θερμοκρασία (T) σε °C.

Ο δείκτης ξηρότητας (Ι) για την περιοχή κατάντη της λεκάνης του Σιδηροκάστρου είναι I = 24,15, και η ξηροθερμική περίοδος διαρκεί περίπου το <sup>1</sup>/<sub>4</sub> του έτους.

Από τα κλιματικά στοιχεία που αφορούν την υπό μελέτη λεκάνη, υπολογίστηκε η μέση μηνιαία βροχόπτωση και η μέση μηνιαία θερμοκρασία της, για την χρονική περίοδο 1971 -2000. Με βάση τις τελευταίες παραμέτρους γίνεται η κατάταξη του κλίματος (βλ. Πίν. 7.), της περιοχής με την βοήθεια της σχέσης του De Martonne (από Φλόκα 1986):

### I = 12P/T + 10

ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ Ι	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΛΙΜΑΤΟΣ
I<5	Πολύ ξηρό
5 <i<15< td=""><td>Ξηρό</td></i<15<>	Ξηρό
15 <i<20< td=""><td>Ημίξηρο</td></i<20<>	Ημίξηρο
20 <i<30< td=""><td>Υφυγρο</td></i<30<>	Υφυγρο
30 <i<60< td=""><td>Υγρό</td></i<60<>	Υγρό
I>60	Πολύ Υγρό

Όπου Ι= δείκτης ο οποίος χαρακτηρίζει το κλίμα της περιοχής, Ρ= η μέση μηνιαία βροχόπτωση και Τ = η μέση μηνιαία θερμοκρασία

Πίνακας 7.: Χαρακτηρισμός του κλίματος από τα όρια τιμών του Ι

Στον Πίνακα 8 δίνεται ο χαρακτηρισμός του κλίματος του κάτω ρου της υδρολογικής λεκάνης του Σιδηροκάστρου, για κάθε μήνα, που βασίζεται στην εκτίμηση του δείκτη Ι του De Martonne. Από τον πίνακα προκύπτει ότι το κλίμα της περιοχής μελέτης από τον Νοέμβρη μέχρι και τον Ιούνιο είναι ύφυγρο, με εξαίρεση τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο που είναι ικανοποιητικά υγρό. Την περίοδο Ιουλίου– Οκτωβρίου είναι μάλλον ξηρό με τον Οκτώβριο να αποτελεί εξαίρεση και να σημειώνει ένα πιο υγρό χαρακτήρα.

ΜΗΝΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΟΡΑΣΙΑ	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	ΔΕΙΚΤΗΣ Ι	είδος κλιματός
	°C	(mm)		
Ι	3,69	49,1	43,04	Υγρό
Φ	6,02	36,6	27,42	Ύφυγρο
М	9,22	47,5	29,66	Ύφυγρο
Α	13,96	55,4	27,75	Ύφυγρο
М	19,29	61,4	25,16	Ύφυγρο
Ι	23,9	67,8	24,00	Ύφυγρο
Ι	25,91	43,6	14,57	Ξηρό – Ημίξηρο
Α	25,01	18,8	6,44	Ξηρό
Σ	21,18	25,4	9,78	Ξηρό
0	15,31	43,9	20,81	Ημίξηρο – Ύφυγρο
Ν	9,18	84,1	52,62	Υγρό
Δ	5,013	65,5	52,35	Υγρό

Πίνακας 8.: Μέση μηνιαία θερμοκρασία και βροχόπτωση για την περίοδο 1971 -2000 και χαρακτηρισμός του κλίματος με βάση τον δείκτη Ι για το κατάντη τμήμα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου. Στην συνέχεια δίνεται το ομβροθερμικό διάγραμμα για τον σταθμό Σιδηροκάστρου. Το παραπάνω διάγραμμα περιγράφει την μεταβολή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης κατά την διάρκεια του έτους. Στο Σχήμα 7 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα, για τον Β.Σ. Σιδηροκάστρου σε συνδυασμό με τις υπολογιζόμενες ανηγμένες τιμές θερμοκρασιών.



Σχήμα 7.: Ομβροθερμικό διάγραμμα κατά Gaussen, του κατάντη τμήματος της λεκάνης Σιδηροκάστρου (κλιματικά στοιχεία περιόδου 1971-2000, Ε.Μ.Υ).

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία είναι περίπου 26°C τον Ιούλιο, ενώ η αντίστοιχη ελάχιστη των 3,7°C παρατηρείται τον Ιανουάριο.

Επίσης παρατηρούμε ότι η ελάχιστη μηνιαία βροχόπτωση είναι 19mm περίπου και σημειώνεται τον Αύγουστο, ενώ η μέγιστη με 84mm περίπου παρατηρείται τον Νοέμβριο.

Το κλίμα αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για τον σχηματισμό αλλά και την διάβρωση του εδάφους. Μπορούμε να πούμε ότι ελέγχει την αποσάθρωση, τον τύπο των εδαφών, την βλάστηση, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα στον σχηματισμό των βιογενών ή χημικών ιζημάτων (Τσιραμπίδης Α., 1999). Δεδομένου ότι το κλίμα στην υπό μελέτη λεκάνη για ένα μεγάλο διάστημα χαρακτηρίζεται υγρό, η διάβρωση (μηχανική και χημική) από το νερό στα πετρώματα αλλά και στους ιζηματογενείς σχηματισμούς αναμένεται να είναι έντονη. Η παραπάνω διαπίστωση είναι ιδιαίτερης σημασίας διότι υποδηλώνει την έντονη παρουσία της καρστικής διάλυσης που λαμβάνει χώρα μέσα στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης.

#### 4.3.5. Το κλίμα της λεκάνης Σιδηροκάστρου

Μια από τις πιο γνωστές κατατάξεις κλιμάτων στην διεθνή βιβλιογραφία είναι του Köppen (1918) (από Μπαλαφούτης 1977), σύμφωνα με την οποία τα κλίματα κατατάσσονται σε συγκεκριμμένες ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. μέση μηνιαία θερμοκρασία θερμότερου ή ψυχρότερου μήνα, ετήσια βροχόπτωση βροχερότερου ή ξηρότερου μήνα κ.λ.π) και την σχέση των τιμών τους με τα αντίστοιχα όρια που τίθενται.

Η κατηγορία (C) με κλίμα θερμό-εύκρατο-βροχερό και με ήπιους χειμώνες θέτει ως προϋπόθεση ότι θα πρέπει η μέση μηνιαία θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (t<sub>o</sub>) να είναι μεγαλύτερη των 10°C (δηλ. t<sub>o</sub> > 10°C) και η μέση μηνιαία θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα (tw) να είναι μεταξύ των 18°C και 0°C (δηλ.18°C > tw > 0°C).

Αφού λοιπόν, ισχύουν όλα τα προηγούμενα, για το κατάντη τμήμα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου, καταλήγουμε στον κλιματικό τύπο **Csa**, δηλ. τον Μεσογειακό (συνήθως ενδοχώρας) με θερμό θέρος, με την προϋπόθεση ότι το κλίμα της υπό κατάταξη περιοχής θα πρέπει να έχει μέση μηνιαία θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (t<sub>o</sub>) μεγαλύτερη από 22°C (δηλ. t<sub>o</sub> > 22°C), το οποίο ισχύει.

Το μέγιστο της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης που σημειώνεται στο τέλος του φθινοπώρου (Νοέμβριος), το μεγάλο μέσο ετήσιο θερμομετρικό εύρος (≈22,21°C) η θερινή ξηρασία, επιτρέπουν την κατάταξη του κλίματος της σε υποδιαίρεση του Μεσογειακού τύπου, που κατά τον De Martonne είναι ο Ελληνικός (ή ηπειρωτικός) τύπος.

Επιπλέον η εκδήλωση του μεγίστου της βροχόπτωσης τον Νοέμβριο, είναι ένα χαρακτηριστικό του ωκεάνιου (θαλάσσιου) τύπου, επομένως, η υποδιαίρεση μπορεί να χαρακτηρισθεί ως ηπειρωτικός τύπος με θαλάσσιους χαρακτήρες.

Τελικά, το κλίμα της υπό μελέτη περιοχής, σύμφωνα με τα στοιχεία που εξετάσθηκαν (τριακονταετία 1971-2000) χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό, ηπειρωτικό, υγρό με θερμό - ξηρό θέρος και με θαλάσσιου τύπου επιρροές (μεταβατικός τύπος).

### 4.4. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟΥ

### 4.4.1. Γενικά

Η λεκάνη του Σιδηροκάστρου τοποθετείται στο δυτικό άκρο (περιθώριο) της Ροδοπικής μάζας, κοντά στην «γραμμή του Στρυμώνα» (Kockel et al., 1695) η οποία διαχωρίζει την Ροδόπη από την Σερβομακεδονική μάζα.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Ροδόπης που απαντώνται σε όλη την περιοχή που οριοθετείται από τους ποταμούς Στρυμώνα και Νέστου, αναφερόμενοι πάντα στην ελληνική επικράτεια, διακρίνονται σε τρεις πετρολογικές σειρές (Kronberg 1969, από Ψιλοβίκο κ.α. 1983):

- Την κατώτερη σειρά των σχιστογνευσίων
- Την ενδιάμεση σειρά των μαρμάρων και
- Την ανώτερη σειρά των σχιστογνευσίων

Η κατώτερη γνευσιακή σειρά αποτελείται από γνευσίους και σχιστογνευσίους με ανοιχτό γκρίζο χρώμα που άλλοτε εμφανίζονται με στρωσιγενείς δομές και άλλοτε όχι. Η συγκεκριμένη σειρά εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές Παγγαίου και Συμβόλου έχοντας ένα πάχος που ξεπερνά τα 1500μ.

Η σειρά των μαρμάρων υπέρκεινται της παραπάνω σειράς και καταλαμβάνει μεγάλες και σημαντικές εκτάσεις στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ Στρυμών και Νέστου. Πρόκειται για καθαρά ολοκρυσταλλικά μάρμαρα με μέσο πάχος που φτάνει τα 7000μ.

Η ανώτερη σχιστογνευσιακή σειρά αποτελείται από μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, πλακώδεις σχιστογνευσίους με παρεμβολές μαρμάρων και αμφιβολιτών. Το πάχος τους θεωρείται ότι ξεπερνά τα 3500μ. (Kronberg 1969, από Vavliaki et al. 1983).

Το υπόβαθρο της λεκάνης της κοιλάδας του Αχλαδίτη αποτελούν τα προνεογενή πετρώματα των εγγύς ορεινών όγκων. Το υπόβαθρο συναντάται κυρίως στα B και NA της λεκάνης. Τα πετρώματα που συνιστούν το υπόβαθρο ανήκουν ασφαλώς στην μάζα της Ροδόπης και προς τα B της λεκάνης κάνουμε λόγο για μαρμαρυγιακούς και γνευσιομαραμαρυγιακούς σχιστόλιθους, γνευσίους, οφθαλμογνεύσιους και φυσικά μάρμαρα. Στα NA της λεκάνης συναντάμε πυριγενή πετρώματα που αφορούν κυρίως χαλαζιακούς μονζονιτες και γνευσιοειδείς χαλαζιακούς μονζονιτες (βλ. Σχ. 8).

Τα μάρμαρα της νεότερης σειράς του υποβάθρου, εντοπίζονται στις παρακάτω θέσεις: καταλαμβάνουν την περιοχή μεταξύ Αχλαδοχωρίου μέχρι την ανατολική πλευρά του οικισμού των Μετάλλων, βρίσκονται επίσης ΝΔ του Καπνόφυτου στην
περιοχή του υψώματος 554 καθώς και ανατολικώς της Περιοχής του Σχιστολίθου κοντά στο ύψωμα 337 (Σωτηριάδης Λ. 1966).

Το μάρμαρο αυτό ως επί το πλείστον παρουσιάζεται χονδροκρυσταλλικό με ευδιάκριτους πολλές φορές αδρομερείς και λευκούς κρυστάλλους ασβεστίτη. Καταλαμβάνουν τα υψηλότερα σημεία όπως είδαμε μέσα στην λεκάνη και παρουσιάζουν μια υποτυπώδη κατεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Σε αρκετά σημεία εμφανίζονται έντονα καρστικοποιημένα με την τάση να σχηματίζουν υποτυπώδεις σπηλαιώδεις σχηματισμούς. Έχουν επίσης υποστεί ισχυρή τεκτονική καταπόνηση με συνέπεια να εμφανίζονται σε πολλές περιπτώσεις κατακερματισμένα, όπως είναι έκδηλο άλλωστε από το πλήθος των ρηγμάτων που φιλοξενούν καθώς και από τις μεταπτώσεις που τα συνοδεύουν. Δεν είναι σπάνιες και οι εμφανίσεις μυλωνιτιωμένων ρηξιγενών ζωνών.

Τα νεογενή ιζήματα που μετέπειτα πλήρωσαν την λεκάνη του Σιδηροκάστρου -Αγλαδογωρίου, κάλυψαν τους παραπάνω μαρμάρινους όγκους, γεγονός το οποίο καταδεικνύεται άλλωστε από την επαφή των μαρμάρων με τα ιζήματα αυτά στις προαναφερθείσες περιοχές. Εμφανίζονται ιδιαίτερα διαταραγμένα τεκτονικά και από θέση σε θέση μεταβάλλουν τόσο την διεύθυνσή όσο και την κλίση τους. Τα όξινα εκρηξιγενή πετρώματα, τα οποία συναντώνται στο Α και ΝΑ τμήμα της υπό μελέτη λεκάνης χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τον Παπαδάκη (1965), ως χαλαζιακοί μονζονίτες και γνευσιοειδείς χαλαζιακοί μονζονίτες και καταλαμβάνουν το ορεινό συγκρότημα της Βροντούς. Η ηλικία των πετρωμάτων αυτών, λόγω κυρίως της γεωλογικής θέσης που έγουν μέσα στο κρυσταλλοσγιστώδες της Ροδόπης αλλά και από ραδιοχρονολογικές μετρήσεις θεωρείται ηωκαινική. Η όξινη αυτή πλουτωνική εμφάνιση εντοπίζεται μέσα στους ανώτερους ορίζοντες της παλιότερης σειράς του υποβάθρου και έχει την μορφή τεράστιου σωρού, το βάθος του οποίου δεν έχει διευκρινιστεί. Επειδή η σχιστότητα που παρουσιάζει η πλουτωνική εμφάνιση είναι ΔΝΔ – ΑΒΑ καταλαβαίνουμε ότι κατά την κρυστάλλωση του συγκεκριμένου τμήματος δρούσαν δυνάμεις με διεύθυνση  $B\Delta - NA$ .



Σχήμα 8.: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Σιδηροκάστρου (από Ψιλοβίκο κ.α., 1981)

Τα τεκτονικά γεγονότα στην λεκάνη του Σιδηροκάστρου είναι παρόμοια με τα ίδια γεγονότα που έλαβαν χώρα στις ευρύτερες λεκάνες του Στρυμώνα και της Προμυγδονίας.

Τα συγκεκριμένα γεγονότα ξεκίνησαν πριν το Κάτω – Μέσο Μειόκαινο όπως υποδηλώνεται από το βασικό κροκαλοπαγές του Νεογενούς συστήματος στην περιοχή της λεκάνης του ποταμού Struma/Στρυμώνα (Vrablianski 1972, από Ψιλοβίκο 1981).

Τα τεκτονικά γεγονότα που έδρασαν πάνω στην συγκεκριμένη λεκάνη ξεκίνησαν την δράση τους κατά το χρονικό διάστημα του Ανώτερου Ολιγοκαίνου – Κάτω Μειοκαίνου και φυσικά επηρέασαν όλο το χώρο της Β και ΒΑ Ελλάδας.

Οι ρηξιγενείς δομές εμφανίζονται σε δύο κύριες διευθύνσεις, την BA – NΔ και την BΔ – NA, οι οποίες μάλιστα ακολουθήθηκαν από υποχώρηση κατά μήκος της γραμμής του Στρυμόνα. Ο κεντρικός άξονας της λεκάνης του Σιδηροκάστρου έχει διεύθυνση 60 - 70° BA και συμπίπτει ασφαλώς με την αρχική ρηξιγενή δομή που ήταν υπεύθυνη για την διάνοιξη της αρχικής λεκάνης.

Η επακόλουθη βύθιση και ιζηματογένεση της λεκάνης κατά την διάρκεια του Νεογενούς οδήγησε στην απόθεση συγκεκριμένων κλαστικών ιζημάτων πάχους 300μ. μέσα στην λεκάνη, κυρίως ποταμολιμναίας και λιμναίας φάσης. Από την σύγκριση του πάχους των νεογενών ιζημάτων αυτής της λεκάνης με το αντίστοιχο των ιζημάτων της λεκάνης των Σερρών, γίνεται αντιληπτή η μεγάλη διαφορά στους ρυθμούς βύθισης και ιζηματογένεσης ανάμεσα στις κεντρική περιοχή και την περιθωριακή θέση της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

Σήμερα το πακέτο των νεογενών ιζημάτων τόσο της λεκάνης του Σιδηροκάστρου όσο και κατά μήκος των ορέων της Βροντούς και του Μενοικίου που συνιστούν τα όρια της λεκάνης των Σερρών προς τα ΒΑ εντοπίζεται σε ένα υψόμετρο που κυμαίνεται από τα 500 – 700μ. Προφανώς οι νεογενείς ποταμολιμναίες και λιμναίες ιζηματογενείς αποθέσεις έχουν ανυψωθεί στα παραπάνω υψόμετρα. Η ανύψωση των συγκεκριμένων λεκανών αλλά και των ορεινών όγκων της Ροδόπης έχει εκτιμηθεί για την περιοχή του Πιρίν, στην βουλγαρική επικράτεια, περίπου στα 700μ. συνολικά σε όλη την διάρκεια του Βιλλαφραγκίου (Vrablianski 1972, από Ψιλοβίκο 1981). Όσον αφορά την ελληνική επικράτεια, η συνολική ανύψωση ήταν μικρότερη από 700μ. και μάλιστα παρουσίαζε μια βαθμιαία μείωση όσο πλησίαζε προς την θάλασσα του Αιγαίου. Η λεκάνη του Σιδηροκάστρου, ως περιθωριακή περιοχή ανάμεσα στα όρη της Βροντούς και του Όρβηλου, ανυψώθηκε κυρίως προς το τέλος του Νεογενούς, όπου και ουσιαστικά διαχωρίστηκε από την μεγαλύτερη λεκάνη του κάτω ρου του Στρυμώνα, δημιουργώντας έτσι μια μικρότερη, ανεξάρτητη και ξεχωριστή λεκάνη στα ΒΑ περιθώρια της λεκάνης του Στρυμώνα.

Ακολούθησε μια περίοδος νέας ρηξιγενούς δράσης κατά το Κάτω – Μέσο (Κ/Μ) Τεταρτογενές. Τα νέα αυτά ρήγματα επηρέασαν σαφώς τόσο τις νεογενείς ιζηματογενείς αποθέσεις όσο και τις τεταρτογενείς (ολισθοστρώματα). Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου τα συγκεκριμένα ρήγματα ευνόησαν τη μετακίνηση υλικών καθώς και την δημιουργία της κοιλάδας του Αχλαδίτη. Επίσης την ίδια περίοδο στα **BBA** της εξεταζόμενης λεκάνης σχηματίστηκε και το αρχικό βύθισμα του Αχλαδοχωρίου. Η συγκέντρωση μάλιστα λατυποπαγών πάχους περίπου 300μ. μέσα στο παραπάνω βύθισμα υποδηλώνει μεγάλους ρυθμούς βύθισης και ιζηματογένεσης κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς. Ο πυθμένας του βυθίσματος βρισκόταν κάποια χρονική στιγμή στο ίδιο ύψος με την λεκάνη του Σιδηροκάστρου και αποτελούσαν μάλιστα μια ενιαία επιφάνεια πάνω στην οποία τα ολισθοστρώματα είχαν καταφέρει να ολισθήσουν από την περιοχή του Όρβηλου όρους. Μετά την βύθιση όμως του συγκεκριμένου τμήματος της λεκάνης, αυτό λειτούργησε ως «παγίδα» για τα παγετώδη και περιπαγετώδη υλικά της ευρύτερης ορεινής περιοχής **(βλ. παρακάτω Σχ. 13).** 

Επομένως τα ρηξιγενή φαινόμενα καθώς και η βύθιση που έλαβαν χώρα κατά το Τεταρτογενές προκάλεσαν την διαίρεση της λεκάνης του Σιδηροκάστρου σε δύο τμήματα. Το ένα τμήμα αφορά το κλειστό βύθισμα του Αχλαδοχωρίου που χαρακτηρίζεται από υπόγεια αποστράγγιση, ενώ το άλλο τμήμα αποτέλεσε την ανοιχτή κοιλάδα του Αχλαδίτη κατά μήκος του κεντρικού άξονα της λεκάνης. Και τα δύο τμήματα είναι πληρωμένα με κλαστικά υλικά τα οποία βρίσκονται πλέον σε καθεστώς διάβρωσης. Ο μαιανδρισμός που εμφανίζει σήμερα ο ποταμός (άρα και η σύγχρονη κοιλάδα του) καθώς και οι αναβαθμίδες του (βλ. Εικ. 1) υποδηλώνουν μια σχετικά πρόσφατη αλλαγή στο καθεστώς της διάβρωσης, η οποία εν τέλει αποδίδεται σε μια πολύ πρόσφατη ανύψωση της συγκεκριμένης λεκάνης (Ψιλοβίκος κ.α. 1981). Είναι επίσης χαρακτηριστικό το γεγονός ότι παρόμοια φαινόμενα στις διεργασίες της διάβρωσης λαμβάνουν χώρα και μέσα στο βύθισμα του Αχλαδοχωρίου και ιδιαίτερα εντοπίζονται στα ανατολικά του βυθίσματος κοντά στην περιοχή του γρανιτικού υποβάθρου. Σήμερα το υδρογραφικό δίκτυο του βυθίσματος συνίσταται από χειμάρρους οι οποίοι συνδέονται με το κυρίως ρέμα του Αχλαδίτη κοντά στο χωριό Αχλαδοχώρι.



Εικόνα 1.: Στενή κοιλάδα που έχει διανοίξει ο Αχλαδίτης σε ολισθοστρώματα.

Τέλος, η ύπαρξη πολλών θερμών πηγών στο κέντρο (Ζεστά Νερά) αλλά και στα όρια της λεκάνης (Θερμοπηγή και Σιδηρόκαστρο) υποδηλώνουν ότι όλη η περιοχή βρίσκεται κάτω από ένα έντονο καθεστώς ενεργούς τεκτονικής.

# 4.4.3. Η πρόσφατη τεκτονική δράση

Το πρόσφατο γεωλογικά τεκτονικό εφελκυστικό καθεστώς (Μ/Α Πλειστόκαινο) είναι η τελική παραμόρφωση του Άνω Πλειοκαίνου και συνιστά ουσιαστικά την φυσική (κανονική) συνέχεια της εφελκυστικής διαδικασίας που λαμβάνει χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, με θραυσιγενή χαρακτηριστικά βέβαια, δημιουργώντας κανονικά και οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα (από Kontopoulou & Pavlides, 1990).

Στις μέρες μας η διεύθυνση του εφελκυστικού πεδίου είναι B – N, προκαλώντας κανονικά ρήγματα διεύθυνσης A – Δ και επαναδραστηριοποιώντας παλιότερες γραμμές διάρρηξης ως ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (Μουντράκης Δ. κ.α., 2002). Εξαιτίας της σπουδαιότητας των ρηγμάτων A-Δ διεύθυνσης με κανονική συνιστώσα και των ρηγμάτων **BA-NΔ διεύθυνσης με σημαντική δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα**, η πρόσφατη και ενεργός τεκτονική του B. Αιγαίου συγκεκριμένα αποδίδεται:

Είτε σε ένα εφελκυσμό B-N κάτω από συνθήκες οπισθότοξου χώρου (από Pavlides et al., 1990).

Είτε στην δράση μιας transtension δομής σε ενδοηπειρωτικές περιοχές, όπως συμβαίνει με τον τερματισμό του NAF (North Anatolian Fault) κατά μήκος του Β. Αιγαίου. Οι κύριες οριζόντιες συνιστώσες λαμβάνουν κυρίως χώρα κατά μήκος του NAT (North Anatolian Trough) ρηξιγενών ζωνών. Για την Τουρκία και για ολόκληρο το Αιγαίο η παραπάνω δομή στο σύνολό της χαρακτηρίζεται ως τεκτονική δραπέτευσης (escape tectonics), ενώ η ίδια τεκτονική μπορεί να προκληθεί και από τις σχετικές κινήσεις μεγαλύτερων πλακών (Segnor et al. 1988, από Pavlides et al., 1990).

Αν και η βόρεια ηπειρωτική χώρα του Ελληνικού χώρου θεωρείται σε γενικές γραμμές μια περιοχή που βρίσκεται κάτω από ένα ξεκάθαρο εφελκυστικό καθεστώς, σήμερα νέοι μηχανισμοί γένεσης, η σεισμικότητα εν γένει, παλαιομαγνητικές μετρήσεις (Kondopoulou P.D. & Pavlides B.S. 1990) καθώς και νέα γεωλογικά δεδομένα (Kilias & Mountrakis 1990) δείχνουν μάλλον ένα σύνθετο νεοτεκτονικό σχέδιο για την περιοχή , όπου λαμβάνει χώρα τόσο κατακόρυφη κίνηση όσο και πλάγια, ενώ πολλά τεμάχη που οριοθετούνται από βαθιά ρήγματα παρουσιάζουν ποικίλες περιστροφές (από Pavlides et al., 1990).

Ειδικότερα τα κανονικά ρήγματα (της περιόδου Α. Πλειοκαίνου/Κ. Πλειστοκαίνου) κατά μήκος των κυρίων ζωνών διάρρηξης (τεκτονική γραμμή Στρυμόνα, Αξιού, Νέστου και Β. Ανατολίας) είναι ίσως από τις κυριότερες διεργασίες που οδήγησαν στον κατακερματισμό του Β. Αιγιακού χώρου δημιουργώντας ένα σύνθετο μωσαϊκό από τεκτονικά τεμάχη (Dinter & Royden 1993). Τα τελευταία συνιστούν ένα ενιαίο σύνολο από τεκτονικά κέρατα και λεκάνες (horsts & grabens) όπου το καθένα έχει συμπεριφερθεί με διαφορετικό τρόπο στην γενικότερη γεωδυναμική κατάσταση που κυριαρχεί στην ευρύτερη περιοχή, εξαιτίας μάλλον και διαφόρων και ποικίλλων τοπικών παραγόντων, όπως είναι λ.χ. οι κληρονομημένες τάσεις ανύψωσης, στρέψης ή και περιστροφής (βλ. Σχ. 9).



Σχήμα 9.: Ενδεικτικό διάγραμμα που απεικονίζει την προτεινόμενη γεωμετρία κατά το Πλειο – Πλειστόκαινο για την λεκάνη του ΝΑΤ από τους Dinter & Royden (1993)

Στην περιοχή μελέτης μάλιστα, κυρίαρχη τεκτονική δομή συνιστά το ρήγμα αποκόλλησης – διαφυγής του Στρυμόνα (Strymon Valley Detachement Fault - SVDF), όπου σύμφωνα με τον Καρυστιναίο (1984) η συγκεκριμένη τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής αποδίδεται στη δράση ρήγματος οριζόντιας συστοφικής μετατόπισης, με επιφάνεια όχι επίπεδη που φέρει μάλιστα γιγάντιες ανωμαλίες. Οι ανωμαλίες αυτές προκαλούν κατά την κίνηση του ρήγματος τοπικές ζώνες συμπίεσης και εφελκυσμού (βλ. Σχ. 10).



Σχήμα 10.: Σχηματική διάταξη της βασικής αρχής δημιουργίας ζωνών συμπίεσης (ανυψούμενη ζώνη) και εφελκυσμού (βυθιζόμενη ζώνη) των περιοχών μετασχηματισμού (Καρυστιναίος Ν., 1988).

Η άποψη του Καρυστιναίου πάντως φαίνεται να ερμηνεύει πιο ικανοποιητικά την δημιουργία του βυθίσματος της λεκάνης του Στρυμώνα, της οποίας τα χαρακτηριστικά

καταρχήν δεν δικαιολογούνται από μια τυπική εφιππευτική κίνηση. Επιπλέον το τεκτονικό μοντέλο που προτείνει είναι ικανό να προκαλέσει τις μεγαδομές που περιγράφουν παραπάνω οι Dinter & Royden στις εργασίες τους.

Πάντως, και στις δυο παραπάνω περιπτώσεις είναι απαραίτητο (και αναγκαίο) να υπάρχουν ρηξιγενή τεμάχη γύρω από το NAT που χαρακτηρίζονται από οριζόντιες ρηξιγενείς ζώνες (περιοχές ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης δικαιολογούν την έκταση τέτοιων ρηξιγενών ζωνών) (από Pavlides et al., 1990).

#### 4.4.4. Λιθοστρωματογραφία λεκάνης

#### 4.4.4.1. Λιθολογία του υποβάθρου

Τα όρια της τ/φ περιφερειακά, υλοποιούνται από την υδροκριτική γραμμή της κορυφογραμμής των ορεινών όγκων που την περιβάλλουν και μπορούν να διακριθούν σε βόρειους και σε νότιους της οροσειράς της δυτικής Ροδόπης. Η θέση των ορεινών όγκων της λεκάνης (με άξονα τον ποταμό Αχλαδίτη) περιγράφηκε προηγούμενα, ενώ η λιθολογία τους ακολουθεί παρακάτω:

#### α) Βόρειοι ορεινοί όγκοι:

Στο BΔ/B/BA - Ανατολικό τμήμα της λεκάνης Σιδηροκάστρου υπάρχουν αντίστοιχα οι ορεινοί όγκοι Άγκιστρου και Όρβηλου, οι οποίοι συνιστούν τα παλαιότερα μεταμορφωμένα πετρώματα του υποβάθρου της Ροδόπης και αποτελούνται κυρίως από μάρμαρα σε εναλλαγές με μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και γνεύσιους (Παλαιοζωικής ηλικίας). Έχουν προσανατολισμό BA-NΔ.

### β) Νότιοι ορεινοί όγκοι:

Στο ΝΔ/Ν/ΝΑ τμήμα της λεκάνης Σιδηροκάστρου, συναντάμε τα όρη της Βροντούς, τα οποία συνιστούν ένα πλουτωνίτη ποικίλης σύστασης (γρανίτης, γρανοδιορίτης, χαλαζιακός μονζονίτης, μονζονίτης και γάββρος) ηλικίας Ηωκαινικής – Ολιγοκαινικής – Κάτω Μειοκαινικής (Theodorikas S.,1982). Ανάλογος σχηματισμός θεωρείται και ο μονζονίτης του Ελαιώνα, στο δυτικό άκρο του Μενοικίου όρους. Έχουν επίσης προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ.

### 4.4.4.2. Λιθολογία των ιζημάτων της λεκάνης Σιδηροκάστρου

Η λιθολογία των ιζηματογενών αποθέσεων της λεκάνης παρουσιάζει, ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για τον λόγο αυτό έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές (Osswald 1938, Freyberg 1951, Παρασκευαϊδης 1952, Kockel et al., 1965, Σωτηριάδης 1966, Armour – Brown et al., 1967, Βαβλιάκης 1981).

Ποικίλοι τύποι ιζηματογενών αποθέσεων πλήρωσαν την λεκάνη τόσο του Στρυμώνα όσο και αυτή του Σιδηροκάστρου κατά την διάρκεια του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Έτσι λοιπόν συναντάμε πλήθος ποτάμιων, ποταμολιμναίων, λιμναίων αποθέσεων να έχουν πληρώσει τις συγκεκριμένες κοιλάδες, κάτω από κλιματικές συνθήκες φυσικά που κυμαίνονταν σημαντικά με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου.

Οι ερευνητικές εργασίες, προσπάθησαν να δώσουν απαντήσεις σε στρωματογραφικά στοιχεία και εξελικτικές φυσικές διεργασίες που συντελέστηκαν στο χώρο της λεκάνης κατά την διάρκεια του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Από τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν, προέκυψε ο παραπάνω χάρτης, ο οποίος συνοψίζει τις απόψεις όλων των παραπάνω ερευνητών ως προς την στρωματογραφία, την λιθολογία και τις φυσικές διεργασίες κατά την διάρκεια εξέλιξης της λεκάνης Σιδηροκάστρου.

Οι συγκεκριμένες έρευνες πραγματοποιήθηκαν σε ιζηματογενείς σχηματισμούς ορισμένων μόνο περιοχών της λεκάνης και τα συμπεράσματα τους θεωρήθηκε ότι αφορούσαν ολόκληρη την έκταση ιδιαίτερα της χαμηλής ζώνης της λεκάνης.

Μέσα στην λεκάνη του Σιδηροκάστρου συναντάμε κυρίως δύο ομάδες ιζηματογενών αποθέσεων (βλ. προηγούμενα Σχ. 8):

- 1. Την ομάδα των Νεογενών ιζημάτων
- 2. Την ομάδα των Τεταρτογενών ιζημάτων

## <u>Νεογενείς αποθέσεις</u>

Η ομάδα αυτή αποτελείται από δύο σχηματισμούς:

Ο κατώτερος σχηματισμός (βλ. Σχ. 11) περιλαμβάνει στην βάση του ποτάμια κροκαλοπαγή με κυρίαρχο κλάσμα το γρανιτικό σε σύγκριση με το κλάσμα των κροκάλων από τα μάρμαρα του υποβάθρου. Η σύσταση της άμμου που πληρώνει τα κενά των κροκάλων είναι ως επί το πλείστον γρανιτικής σύστασης. Ακολουθεί η απόθεση ποταμολιμναίων ψαμμιτών και λιμναίων αμμωδών

μαργών καφετί χρώματος. Μεταξύ των δύο αυτών αποθέσεων εντοπίζονται αρκετοί λιγνιτικοί φακοί ή και πολύ λεπτά λιγνιτικά στρώματα όπου το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 60εκ. Μέσα στα στρώματα αυτά βρέθηκαν συγκεκριμένα φυτικά μικροαπολιθώματα (της οικογένειας των Χαροφύτων) όπου σύμφωνα με τον Σωτηριάδη (1960) πρέπει να θεωρηθούν μειοκαινικής ηλικίας. Παρόμοια λιγνιτικά στρώματα που έχουν βρεθεί βόρεια των Σερρών ανήκουν στην ίδια χρονική περίοδο (Freyberg 1951, Παρασκευαϊδης 1952, από Vavliaki et al. 1983). Το συνολικό πάχος των λιγνιτκών στρωμάτων στη συγκεκριμένη θέση φτάνει τα 200μ. και μάλιστα καλύπτονται από θαλάσσια ιζήματα του Ανώτερου Πλειοκαίνου – Κατώτερου Πλειστοκαίνου. Τέλος, ο κατώτερος σχηματισμός τελειώνει με την απόθεση λεπτού στρώματος κόκκινης ιλύος και αργίλου.

Ο ανώτερος σχηματισμός (βλ. Σχ. 11) αποτελείται από κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται με στρώματα από αμμώδη ιλύ και ιλυώδη άμμο. Το όλο πακέτο στρωμάτων εμφανίζει τα ίδια λιθολογικά χαρακτηριστικά με το αντίστοιχο του κατώτερου σχηματισμού. Το χρονικό διάστημα της απόθεσης του ανώτερου σχηματισμού δεν έχει πλήρως εξακριβωθεί, θεωρείται βέβαια νεώτερος του κατώτερου και τοποθετείται χρονικά μεταξύ του Κατώτερου και του Μέσου Πλειοκαίνου.



 Ψηφίδες, χαλίκια και άμμοι γρανιτικής προέλευσης 2. Ψαμμίτης 3. Λιγνιτικοί φακοί 4. Μάργα 5. Κόκκινη ιλύς / άργιλος (παλαιοέδαφος) 6. Αμμώδη ιλύς, ιλυώδη άμμο, άργιλος 7. Ολισθοστρώματα

Σχήμα 11.: Σχηματική τομή των ιζηματογενών αποθέσεων όπως αυτές εμφανίζονται στο ανατολικό τμήμα της κοιλάδας του Αχλαδίτη (τροποποιημένο από Vavliaki et al 1983).

Επίσης δεν έχει μέχρι σήμερα διαπιστωθεί ότι η θάλασσα είχε εισβάλει και στην λεκάνη του Σιδηροκάστρου κατά την διάρκεια του Νεογενούς. Το συνολικό πάχος των νεογενών ιζημάτων στην παραπάνω λεκάνη εκτιμάται περίπου στα 300μ.

### <u>Τεταρτογενείς αποθέσεις</u>

Οι αποθέσεις της περιόδου αυτής υπέρκεινται σαφώς των αντίστοιχων νεογενών με μια χαρακτηριστική κυματοειδούς μορφής διαβρωσιγενούς ασυνέχειας. Στο πακέτο αυτό των ιζημάτων συμπεριλαμβάνονται τα εξής: ολισθοστρώματα, ασβεστολιθικοί τόφφοι, κροκαλοπαγή (μέσα στην κοιλάδα του Αχλαδίτη) καθώς και λατυποπαγή στα οποία δεν πρόκειται να αναφερθούμε εκτενώς διότι εντοπίζονται εκτός περιοχής μελέτης.

## Α) ΟΛΙΣΘΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Τα ολισθοστρώματα είναι παχιά στρώματα από συγκολλημένα με CaCO<sub>3</sub> τεμάχη μαρμάρων ή ασβεστολίθων, τα οποία προέρχονται από το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου και ειδικότερα από το Όρβηλο όρος. Τα τεμάχη αυτά μετακινήθηκαν (ολίσθησαν) κατά μήκος μιας ενιαίας επιφάνειας που υπήρξε για αρκετό χρονικό διάστημα κατά την περίοδο του Νεογενούς. Σύμφωνα με τον Sotiriadis (1973) τα κλιματικά και τεκτονικά φαινόμενα που έλαβαν ώρα κατά το χρονικό διάστημα του Ανώτερου Πλειοκαίνου – Κατώτερου Πλειστοκαίνου ευνόησαν σε πολύ μεγάλο βαθμό την μηχανική καταρχάς διάβρωση των μαρμάρων του Όρβηλου όρους άρα και την παραγωγή των συγκεκριμένων τεμαχών (από Vavliakis et al. 1983). Αρχικά τα τεμάχη αυτά αποτέθηκαν επί τόπου (in situ) συγκολλήθηκαν με ασβεστιτικό συγκολλητικό υλικό και μετέπειτα ολίσθησαν προς τα νότια όπου βρίσκονται και τα χαμηλότερα τμήματα της λεκάνης με την γενικότερη μορφή των μετακινήσεων μαζών (mass movements). Ασφαλώς κατά την διάρκεια της μετακίνησής τους καθώς και της εναπόθεσης τους πάνω στα νεογενή προκάλεσαν την ισχυρή πολλές φορές παραμόρφωση των τελευταίων ιζημάτων δημιουργώντας μια χαρακτηριστική (ανώμαλη) επιφάνεια επαφής με τα νεογενή ιζήματα, η οποία μάλιστα είναι ευδιάκριτη στο σύνολο σχεδόν των φυσικών τομών που συναντήσαμε (βλ. Σχ. 12).



Σχήμα 12.: Η επαφή των έντονα ρηγματωμένων και καρστικοποιημένων ολισθοστρωμάτων με τα διαταραγμένα νεογενή στρώματα. Ασβεστολιθικοί τόφφοι έχουν αποτεθεί στην ΝΔ πλευρά της συγκεκριμένης θέσης (τροποποιημένο από Vavliakis et al. 1983).

Οι Sotiriadis (1973) και Psilovikos et al. (1980) εκτιμούν ότι η ρηγμάτωση των μαρμάρων και η γενικότερη ανύψωση του Όρβηλου όρους, σε συνδυασμό βέβαια με την δράση κρυογενετικών φαινομένων, ήταν υπεύθυνα για την δημιουργία και την μετέπειτα μετακίνηση των ολισθοστρωμάτων. Η απόσταση της ολίσθησης εκτιμάται ότι κυμάνθηκε από 5 – 10Km. Η σημερινή τους τοποθέτηση στις κορυφές πολλών λόφων καθώς και οι όποιες σπηλαιώδεις μορφές και τούννελ που έχουν δημιουργηθεί μέσα στον όγκο των ολισθοστρωμάτων είναι από μόνα τους ισχυρά στοιχεία που υποδηλώνουν την ύπαρξη ισχυρής ρωγμάτωσης των ίδιων των σχηματισμών όσο και των φαινόμενων της διάβρωσης και της αποσάθρωσης που υπέστησαν ασφαλώς μετά την εναπόθεσή τους (βλ. Εικ. 2).



Εικόνα 2.: Επαφή νεογενών (N) και τεταρτογενών (T) ιζημάτων κατά μήκος πλειστοκαινικής αναβαθμίδας του Αχλαδίτη.

### В) КРОКАЛОПАГН

Πολύ αδρομερή κλαστικά υλικά που περιέχουν μικρά και μεγάλα γρανιτικά τεμάχη, όπως επίσης χαλίκια και χονδρόκοκοκκη άμμο έχουν κατακλύσει σε μεγάλο βαθμό την κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού. Τα υλικά αυτά παρουσιάζονται τοποθετημένα πάνω στην ήδη διαβρωμένη επιφάνεια των νεογενών ιζημάτων με την μορφή διασταυρούμενων στρώσεων κατά μήκος της βάσης της κοιλάδας. Στις θέσεις αυτές λοιπόν συναντάμε γρανιτικά τεμάχη, ψηφιδοπαγή και αποστρογγυλωμένα χαλίκια, τα οποία άλλοτε τα βλέπουμε πιο σφαιρικό σχήμα και άλλοτε με πιο επιμήκες. Η χονδρόκοκκη άμμος αποτελείται από χαλαζία, Κ – ούχους αστρίους και από μαρμαρυγιούχα ορυκτά και χαρακτηρίζεται σαφώς από ορυκτολογική και ιστολογική ανωριμότητα. Είναι σημαντικό να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι στα συγκεκριμένα κροκαλοπαγή δεν παρατηρείται καθόλου ασβεστολιθικό κλαστικό υλικό. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα παραπάνω υλικά προέρχονται από το μη ασβεστολιθικό υπόβαθρό της λεκάνης του Σιδηροκάστρου και το οποίο έχει μάλιστα μεταφερθεί με την βοήθεια χειμάρρων που δρούσαν στα πλευρά της κοιλάδας, ιδιαίτερα μάλιστα σε περιόδους πολύ μεγάλης ροής αυτών που φυσικά ακολουθούσαν την εποχική διακύμανση των κατακρημνισμάτων που δεχόταν η επιμέρους μικρότερη λεκάνη του κάθε χειμάρρου. Προφανώς την ίδια χρονική περίοδο που συνέβαιναν όλα τα παραπάνω κανένα ασβεστολιθικό υλικό δεν ήταν εφικτό να μεταφερθεί προς την κοιλάδα του Αχλαδίτη από τον ορεινό όγκο του Όρβηλου όρους. Τα υλικά αυτά «παγιδεύτηκαν» στο βύθισμα του Αχλαδοχωρίου όπου και τα συναντάμε άλλωστε. Με βάση την παρατήρηση αυτή μπορούμε να πούμε γενικότερα ότι το BA τμήμα της εξεταζόμενης λεκάνης ήταν απομονωμένο κατά το Τεταρτογενές και λειτουργούσε ανεξάρτητα από την υπόλοιπη λεκάνη την περίοδο αυτή, δεδομένου μάλιστα ότι το σύνολο των υδάτων που αποστραγγίζουν το τμήμα αυτό συγκεντρώνονται στο Αχλαδοχώρι και από το σημείο αυτό και μετά η αποστράγγισή του ς γίνεται υπόγεια, με την βοήθεια πλειάδας υπόγειων καρστικών αγωγών.

## Γ) ΛΑΤΥΠΟΠΑΓΗ

Ως λατυποπαγή περιγράφονται στην εργασία αυτοί συγκεκριμένοι χονδρόκοκκοι ιζηματογενείς σχηματισμοί μεγάλου πάχους που εμφανίζονται με την μορφή αλλουβιακών κώνων και εντοπίζονται αποκλειστικά μέσα στο βύθισμα του Αχλαδοχωρίου (βλ. παρακάτω Σχ. 13).

Τα συγκεκριμένα λατυποπαγή αποτελούνται από μεγάλα γωνιώδη τεμάχη μαρμάρων τα οποία είναι συγκολλημένα με CaCO<sub>3</sub>, ιδιαίτερα μάλιστα στις κορυφές των αλλουβιακών κώνων. Το μέγεθος των υλικών καθώς κινούμαστε προς την βάση των σχηματισμών αυτών συνεχώς μειώνεται όπου εν τέλει καταλήγουμε σε ένα στρώμα χονδρόκοκκης και λεπτόκοκκης άμμου και ιλύος στην βάση των λατυποπαγών.

Τα παραπάνω περιγραφόμενα χαρακτηριστικά γύρω από την λιθολογία του βυθίσματος αλλά και η δομή των αλλουβιακών κώνων υποδεικνύουν την παρουσία κατά το παρελθόν επεισοδιακής ροής και μεταφοράς υλικού από την πλευρά των χειμάρρων. Το συνολικό πάχος των λατυποπαγών αυτών μέσα στο τεταρτογενές βύθισμα του Αχλαδοχωρίου εκτιμάται στα 300μ υποδηλώνοντας ισχυρούς ρυθμούς βύθισης και ιζηματογένεσης μέσα στο Τεταρτογενές (από Vavliakis et al., 1983).

Σύμφωνα με τον Σωτηριάδη (1966) το κλαστικό υλικό των λατυποπαγών προέρχεται από τον ορεινό όγκο του Όρβηλου λόγω της δράσης παγετωδών και περιπαγετωδών φαινομένων. Μορφογενετικές μελέτες πάνω στην επιφάνεια των υλικών αυτών δείχνουν μια πολύ στενή σχέση με τις γνωστές μοραινικές αποθέσεις των παγετώνων της Ευρώπης. Από ότι φαίνεται λοιπόν, στις υψηλότερες ζώνες του Όρβηλου όρους είχαν σχηματιστεί παγετώνες τοπικού χαρακτήρα φυσικά οι οποίοι ολίσθησαν κατά μήκος των ορεινών κοιλάδων μέχρι που έλιωσαν όπου και άφησαν τις συγκεκριμένες αποθέσεις (από Vavliakis et al., 1983).

## Δ) ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΟΙ ΤΟΦΦΟΙ

Ο όρος '**αβεστολιθικοί τόφφοι'** έχει αποδοθεί από τον Osswald (1938) για να χαρακτηρίσει συγκεκριμένες επιφανειακές αποθέσεις από CaCO<sub>3</sub>, οι οποίες τοποθετούνται είτε πάνω από τις νεογενείς αποθέσεις είτε επάνω στις τεταρτογενείς. Τους τόφφους αυτούς τους συναντάμε σε ποικίλα υψόμετρα που μπορούν να φτάσουν και τα 700μ., όπως συμβαίνει άλλωστε και BA του Σιδηροκάστρου με πάχη που επίσης κυμαίνονται πολύ και χωρίς καμιά ιδιαίτερη εσωτερική οργάνωση. Σε λίγα μόνο σημεία έχουν καταφέρει να αναπτύξουν κάποιου είδους στρώση με την κλίση αυτής να ποικίλλει πολύ (εμφανίζεται BA στην θέση Ρεύματα ενώ στο χωριό Θερμοπηγή εμφανίζονται με κλίση προς τα ΝΔ). Δεν έχουν επίσης επισημανθεί καθόλου κάποιου είδους απολιθώματα μέσα στις αποθέσεις αυτές. Σε άλλες θέσεις οι αποθέσεις αυτές παρουσιάζονται ως τραβερτίνες περιέχοντας και αρκετά φυτικά υπολείμματα μέσα στην δομή τους. Ακόμη τις συναντάμε συχνά γύρω από τα καρστικοποιημένα ολισθοστρώματα, μπροστά στα τούννελ και τις σπηλαιώδεις μορφές που έχουν δημιουργηθεί μέσα σε αυτά (βλ. Φωτ. 1). Η απόθεση του CaCO<sub>3</sub> και ο σχηματισμός των ασβεστολιθικών τόφφων στην υπό εξέταση περιοχή, μπορεί να αποδοθεί σε πολλούς και διάφορους παράγοντες, όπως π.χ. η παρουσία πολλών και μικρών λιμνών, η ύπαρξη θερμών πηγών καθώς και η παρουσία καταρρακτών. Η συγκέντρωση του CaCO<sub>3</sub> μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο καθώς και οι συνθήκες εξάτμισης θεωρείται ότι ήταν πολύ υψηλές κατά την διάρκεια της Τεταρτογενούς περιόδου.

Η έλλειψη εσωτερικής οργάνωσης στο μεγαλύτερο τμήμα των συγκεκριμένων αποθέσεων αποδίδεται στις συνθήκες στροβιλώδους ροής των υδάτων τόσο των πηγών όσο και στις θέσεις των καταρρακτών. Τέτοιες συνθήκες βέβαια επιτυγχάνονται ιδιαίτερα στις εξόδους των υδάτων από τα τούννελ και τις σπηλαιομορφές των ολισθοστρωμάτων (βλ. Φωτ. 1). Αντίθετα οι αποθέσεις αυτών των τόφφων που παρουσιάζονται με στρώση είναι αυτοί που αναπτύσσονται σε μικρές λίμνες λόγω των διεργασιών έντονης εξάτμισης που λαμβάνουν χώρα στα ρηχά κατά βάση νερά τους.



**Φωτ. 1:** Χαρακτηριστικές σπηλαιομορφές σε τραβερτινικές αποθέσεις μέσα στην κοιλάδα του Αχλαδίτη ποταμού. Το ύψος των αποθέσεων στην θέση αυτή φτάνει τα **20m**.

Η δημιουργία ασβεστολιθικών τόφφων στην εξεταζόμενη περιοχή συνδέεται ισχυρά με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν σε όλη την διάρκεια του Τεταρτογενούς. Παρόμοιες αποθέσεις και κυρίως τραβερτίνες της ίδιας ηλικίας υπάρχουν σε πολλές θέσεις σε όλη την Β. Ελλάδα, ιδιαίτερα μάλιστα σε θέσεις βυθισμάτων, όπως έχουν υποδείξει κατά καιρούς οι Osswald (1938), Sotiriadis (1974) κ.α. Στο σημείο αυτό

μπορούμε απλά να προχωρήσουμε στην διαπίστωση ότι οι συγκεκριμένοι ασβεστολιθικοί τόφφοι και οι τραβερτίνες σχηματίστηκαν από νερά λιμνών, θερμομεταλλικών πηγών, χειμάρρων και καταρρακτών κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς μέχρι και τις μέρες μας ακόμα (π.χ. οι καταρράκτες της Έδεσσας).

Μια σύγκριση ανάμεσα στους ασβεστολιθικούς τόφφους του Σιδηροκάστρου και τις αντίστοιχες αποθέσεις από άλλα σημεία και χώρους της Β. Ελλάδας θα μπορούσε να παράσχει πλήθος σημαντικών πληροφοριών για την ακριβή ηλικία σχηματισμού των υπό μελέτη σχηματισμών.

#### 4.4.5. Η κοιλάδα του Αχλαδίτη

Την φάση ανανέωσης του επιφανειακού αναγλύφου της λεκάνης του Σιδηροκάστρου που συνοδεύτηκε και από έντονη ρηγματογένεση (τα ρήγματα τέμνουν υπόβαθρο, νεογενή ιζήματα και ολισθοστρώματα), ακολούθησε μια νεώτερη φάση διάβρωσης. Τα επιφανειακά νερά συγκεντρώθηκαν στον κεντρικό τομέα της λεκάνης και ακολούθησαν τους δρόμους των ρηγμάτων κατά μήκος του κεντρικού άξονά της. Έτσι σταδιακά σχηματίστηκε ο Αχλαδίτης που άρχισε να δημιουργεί την αρχική ομώνυνη κοιλάδα του. Τα χαλαρά νεογενή ιζήματα στην ζώνη δράσης του ποταμού και των κλάδων του διαβρώθηκαν γρήγορα με συνέπεια να σχηματιστεί η κοιλάδα του Αχλαδίτη. Η κοιλάδα αυτή στις θέσεις όπου ο Αχλαδίτης εγκιβωτίστηκε μέσα στα ολισθοστρώματα ήταν στενή (βλ. προηγούμενα Εικ. 1), αλλά στο χώρο των νεογενών ιζημάτων είχε πλάτος περίπου 1,5χλμ. και βάθος 150μ. περίπου. Οι διαστάσεις αυτές προκύπτουν σήμερα από την μελέτη της θέσης της πορείας της γραμμής επαφής των νεογενών με τα τεταρτογενή ιζήματα (βλ. προηγούμενα Εικ. 2). Στα περιθώρια της αρχικής κοιλάδας του Αχλαδίτη συναντούμε ολισθοστρώματα, που έχουν την μορφή κάστρων στις κορυφές λόφων των νεογενών ιζημάτων. Τεμάχη ολισθοστρωμάτων έχουν επίσης μεταφερθεί μέσα στην νεώτερη κοιλάδα του Αχλαδίτη από την διάβρωση.

Στην έντονη αυτή διαβρωτική φάση ανήκουν και τα φαινόμενα διάνοιξης μεγάλων κοιλάδων κατά μήκος των ποταμών και χειμάρρων της Βροντούς (Ψιλοβίκος κ.α. 1981) και Μενοικίου (Βαβλιάκης 1981) σε ολόκληρη τη βόρεια πλευρά της λεκάνης των Σερρών.

Η αρχική κοιλάδα του Αχλαδίτη μετά την διαβρωτική φάση άρχισε να δέχεται μεγάλες ποσότητες χονδροκλαστικού υλικού. Τεμάχη χαλαζιακού μοζονίτη με μικρή επεξεργασία, μικρότερες λατύπες και κροκάλες, άμμος και αργιλικό υλικό, μεταφέρονταν από τις πλευρές της λεκάνης του Σιδηροκάστρου με την βοήθεια ενός

πολύπλοκου υδρογραφικού δικτύου και συγκεντρώνονταν μέσα στην κοιλάδα του Αχλαδίτη.

Οι εναλλαγές Παγετωδών – Μεσοπαγετωδών περιόδων φαίνεται ότι έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στον ρυθμό παραγωγής υλικού στην ψηλότερη ζώνη της λεκάνης και της απότομης χειμαρρώδους μεταφοράς του υλικού προς την κοιλάδα. Ο Σωτηριάδης (1966) εκφράζει την γνώμη ότι η μεταφορά των κροκαλών ήταν βίαιη και έγινε κάτω από συνθήκες στροβιλώδους ροής. Η εσωτερική διάταξη που έχουν τα υλικά αυτά χαρακτηρίζεται από ρυθμικότητα (διαβαθμισμένη στρώση). Η διεύθυνση και η κλίση των στρωμάτων όπως επίσης και ο προσανατολισμός των κροκαλών είναι ποικίλος. Οι ιζηματογενείς αυτοί χαρακτήρες επιβεβαιώνουν την ποταμοχειμάρρεια δράση στο χώρο της κοιλάδας του Αχλαδίτη κατά την φάση πληρώσεώς της από υλικά (από Ψιλοβίκο κ.α. 1981).

Η ηλικία της απόθεσης των υλικών αυτών, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια γιατί δεν βρέθηκαν απολιθώματα που να βοηθούν σε ένα τέτοιο προσδιορισμό. Τα μορφολογικά και ιζηματολογικά στοιχεία δείχνουν ότι η διάνοιξη της κοιλάδας του Αχλαδίτη πρέπει να έγινε μετά το Κατώτερο Πλειστόκαινο και η πλήρωσή της με υλικά στο Μέσο με Άνω Πλειστόκαινο.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό είναι η χαρακτηριστική απουσία τεμαχών και κροκάλων μαρμάρων μέσα στα υλικά που πλήρωσαν την κοιλάδα του Αχλαδίτη. Οι κλιματικές και οι τεκτονικές συνθήκες του Μ/Α Πλειστοκαίνου ευνοούσαν ιδιαίτερα την παραγωγή και μεταφορά τέτοιου υλικού από την ΒΔ πλευρά του Όρβηλου στο χώρο της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

Όπως θα εξηγήσουμε όμως αργότερα, το χονδροκλαστικό υλικό που σχηματίστηκε στο χώρο των μαρμάρων και κινήθηκε προς την κοιλάδα του Αχλαδίτη «παγιδεύτηκε» μέσα στο βύθισμα του Αχλαδοχωρίου που άρχισε να λειτουργεί ταυτόχρονα με την διάνοιξη της αρχικής κοιλάδας του Αχλαδίτη. Έτσι αποκόπηκε η μορφολογική συνέχεια (βλ. Σχ. 13) της επιφάνειας στη Β/ΒΔ πλευρά της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

Μετά την πλήρωση της κοιλάδας του Αχλαδίτη από κλαστικό υλικό, ολόκληρη η περιοχή άρχισε να ανυψώνεται και πάλι. Την ανανέωση αυτή του αναγλύφου ακολούθησε μια καινούργια φάση διάβρωσης. Ο Αχλαδίτης στην προσπάθειά του να φτάσει το βασικό επίπεδο της περιοχής (Στρυμώνας) άνοιξε μια καινούργια στενή κοιλάδα μέσα στα τεταρτογενή κλαστικά ιζήματα και εγκιβωτίσθηκε κανονικά (βλ. προηγούμενα Εικ. 1). Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις έχει χαρακτήρες εγκιβωτισμένου μαιάνδρου. Το μέσο βάθος εγκιβωτισμού μετρήθηκε σε 50 – 60μ. και μικραίνει σε 5 –15μ.κοντά στο Αχλαδοχώρι.

Ο Αχλαδίτης μέσα στην μαιανδρική του ζώνη σε περιοχές με σημαντική διαπλάτυνση έχει σχηματίσει και μια μικρότερη αναβαθμίδα που δείχνει ότι οι ανοδικές κινήσεις και η εκβαθυντική δράση του ποταμού συνεχίζεται ακόμη και σήμερα (Vavliakis et al., 1983).



Σχήμα 13.: Σημερινή μορφολογική και τεκτονική κατάσταση της λεκάνης του Σιδηροκάστρου (από Ψιλοβίκο κ.α., 1981).

### 4.4.6. Παλαιογεωγραφία της ευρύτερης περιοχής

Η παλαιογεωγραφία της λεκάνης αυτής ακολουθεί τους γενικούς χαρακτήρες της λεκάνης των Σερρών (Σωτηριάδης 1966) σε όλη την διάρκεια του Νεογενούς με την μόνη διαφορά ότι δεν δέχθηκε την επίδραση της θάλασσας. Έτσι η απόθεση ποταμολιμναίων και λιμναίων ιζημάτων στα χαμηλότερα τμήματα της λεκάνης θα πρέπει να συνεχίστηκε χωρίς διακοπή από το Κατώτερο – Μέσο Μειόκαινο, μέχρι το τέλος του Πλειοκαίνου όπως δείχνει η διαδοχή των αντίστοιχων ιζημάτων. Αν και η σημερινή θέση των ιζημάτων που φθάνουν μέχρι το υψόμετρο των 600μ. είναι αποτέλεσμα μεταποθετικών κινήσεων, η έρευνα έδειξε ότι αυτά δεν βρίσκονται βορειότερα από την νοητή γραμμή Αχλαδοχωρίου – Καρυδοχωρίου, απουσιάζουν μάλιστα τελείως από το χώρο του βυθίσματος του Αχλαδοχωρίου. Φαίνεται λοιπόν ότι το τελευταίο βύθισμα είναι νεώτερος σχηματισμός (Πλειστόκαινο) που κατά την διάρκεια του Νεογενούς αποτελούσε τμήμα της ενιαίας τότε πλευράς της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

Πότε ακριβώς τελείωσε η απόθεση των νεογενών ιζημάτων στη λεκάνη του Σιδηροκάστρου δεν είναι γνωστό με ακρίβεια, αλλά φαίνεται ότι κατά το χρονικό διάστημα των ορίων Πλειοκαίνου – Πλειστοκαίνου αρχίζει μια φάση τεκτονικών κινήσεων που είχε ιδιαίτερη ένταση στον ευρύτερο χώρο της Μακεδονίας.

Τα πρώτα κύρια τεκτονικά γεγονότα που αφορούν κυρίως ρηξιγενείς δομές και συνεπακόλουθη βύθιση κατά μήκος της γραμμής του Στρυμώνα προκάλεσαν την δημιουργία της ευρύτερης λεκάνης των Σερρών και του Στρυμώνα κατά επέκταση, με την έναρξη του Νεογενούς. Η λεκάνη του Σιδηροκάστρου συνιστά μια μικρότερων διαστάσεων περιθωριακή λεκάνη της ευρύτερης λεκάνης του Στρυμώνα μέσα στην ελληνική επικράτεια. Ποτάμια, ποταμολιμναία και λιμναία ιζήματα με ενδιάμεσες στρώσεις λιγνιτών αποτέθηκαν μέσα στην λεκάνη κάτω από συνθήκες ενός ζεστού και υγρού κλίματος, κατά την περίοδο του Μειοκαίνου. Στην συνέχεια το κλίμα γίνεται ξηρότερο ιδιαίτερα προς το τέλος του Μειοκαίνου. Την ίδια περίπου χρονική περίοδο σημειώθηκε μια διείσδυση της θάλασσας όπου κάλυψε κυρίως το νότιο τμήμα της λεκάνης του Στρυμώνα. Η επίκλυση όμως αυτή δεν έφτασε μέχρι την λεκάνη του Σιδηροκάστρου. Κατά το Πλειόκαινο επικράτησε κυρίως η ποταμολιμναία ιζηματογένεση μέσα στην υπό εξέταση λεκάνη κάτω από μάλλον θερμές και λιγότερο υγρές κλιματικές συνθήκες. Προς το τέλος του Πλειοκαίνου και κατά την διάρκεια κυρίως του Βιλλαφραγκίου η λεκάνη υπέστη μια ισχυρή ανύψωση με συνέπεια την αποκοπή της από την λεκάνη του Στρυμώνα και υπέστη φυσικά έντονη διάρρηξη και συνάμα διάβρωση κάτω από μάλλον ξηρές κλιματικές συνθήκες.

Η αύξηση αυτή του υψομέτρου στο χώρο των μαρμάρων του Όρβηλου στο ΒΔ τμήμα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου, σε συνδυασμό με την δημιουργία ρηγμάτων και την αλλαγή του κλίματος προς το ψυχρότερο είχαν σαν αποτέλεσμα την ένταση της μηχανικής αποσάθρωσης. Ο Σωτηριάδης (1966) δέχεται ότι σχηματίστηκαν μεγάλες ποσότητες λατυπών που αρχικά αποτέθηκαν επί τόπου (in situ) στο χώρο των μαρμάρων, αλλά αργότερα συγκολλήθηκαν με την επίδραση του CaCO<sub>3</sub> και σχημάτισαν μεγάλου βάρους συμπαγείς κόκκους λατυποπαγών. Τα λατυποπαγή αυτά με την βοήθεια της βαρύτητας ολίσθησαν επάνω στην επιφάνεια της λεκάνης (υπόβαθρο και νεογενή ιζήματα) και έφθασαν μέχρι το Σιδηρόκαστρο σε υψόμετρο δηλαδή 100μ. περίπου, αφού διένυσαν απόσταση 5 – 10χλμ. επάνω σε μια επιφάνεια. Προϋπόθεση για την μετακίνηση των ολισθοστρωμάτων (βλ. προηγούμενα Σχ. 13) ήταν η συνέχεια της επιφάνειας της λεκάνης από τον Όρβηλο μέχρι το Σιδηρόκαστρο, κατά την περίοδο μετακίνησης.

Το στοιχείο αυτό δείχνει ότι ούτε το βύθισμα του Αχλαδοχωρίου, ούτε και η κοιλάδα του Αχλαδίτη είχαν δημιουργηθεί κατά τον χρόνο της μετακίνησης των ολισθοστρωμάτων. Για το λόγο αυτό το βύθισμα και η κοιλάδα θα πρέπει να είναι νεώτεροι μορφολογικοί σχηματισμοί. Αργότερα ακολούθησε νέα ρηξιγενή δράση κυρίως στην περιοχή του Αχλαδοχωρίου που προκάλεσε την δημιουργία του ομώνυμου βυθίσματος και την διάνοιξη της κοιλάδας του Αχλαδίτη. Με τον τρόπο αυτό λοιπόν είχαμε ουσιαστικά την δημιουργία δύο ξεχωριστών λεκανών χωρίς καμία ποτάμια επικοινωνία μάλιστα.

Το βύθισμα του Αχλαδοχωρίου πληρώθηκε σχετικά γρήγορα με παγετώδη και περιπαγετώδη κλαστικά υλικά τα οποία μάλιστα αποτέθηκαν με την μορφή αλλουβιακών ριπιδίων μπροστά από το τμήμα εκείνο που υπέστη την βύθιση.

Όσον αφορά την κοιλάδα του Αχλαδίτη αυτή πληρώθηκε με χονδρόκοκκα κλαστικά υλικά που προέρχονταν ως επί το πλείστον από το γρανιτικό υπόβαθρο τη περιοχής μελέτης.

Η όλη λεκάνη του Σιδηροκάστρου έχει πρόσφατα υποστεί **νέα ανύψωση** με συνέπεια να έχουμε ανανέωση των διεργασιών της διάβρωσης τώρα πλέον στις Τεταρτογενείς αποθέσεις τόσο στην κοιλάδα του Αχλαδίτη όσο και στο βύθισμα του

Αχλαδοχωρίου που σημειωτέον διαρρέονται πλέον από το ίδιο υδρογραφικό δίκτυο μετά την τελευταία ρηξιγενή δράση.

Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανυψωτική κίνηση στο χώρο της λεκάνης του Σιδηροκάστρου εντατικοποιήθηκε και συνεχίστηκε σε όλη την διάρκεια του Βιλλαφραγκίου, οπότε ολόκληρη η περιοχή κατατμήθηκε από ένα πολύπλοκο δίκτυο ρηγμάτων. Η δραστηριοποίηση των ρηγμάτων αυτών που οδήγησε στη διαφοροποίηση του αναγλύφου και τον σχηματισμό νεώτερων βυθισμάτων και εξαρμάτων είναι νεώτερα γεγονότα.

4.4.7. Γεωθερμία ευρύτερης περιοχής μελέτης (λεκάνης Σιδηροκάστρου)

Οι θερμικές ανωμαλίες φαίνεται ότι είναι περισσότερο έντονες κατά μήκος μεγάλων ρηγμάτων, όπως συμβαίνει π.χ. με το σύστημα που αποτελεί την προέκταση της οριζόντιας μετατόπισης του ρήγματος της Ανατολίας. Το ρήγμα αυτό είναι φυσικό να έχει και μερικές διακλαδώσεις ή και παράλληλες ρηξιγενείς ζώνες, με το ίδιο θετικό για την γεωθερμία αποτέλεσμα. Τέτοια διακλάδωση με όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνιστά και η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του Στρυμώνα που ευνοεί την ανάπτυξη σημαντικού γεωθερμικού πεδίου (από Φυτίκα & Ανδρίτσο, 2004).

Όπως είναι γνωστό η δημιουργία ενός γεωθερμικού πεδίου που σχηματίζεται σε μεγάλο βάθος <u>προϋποθέτει</u> τα παρακάτω (βλ. Σχ. 14.):

- Την παρουσία ενός διαπερατού υδροφόρου στρώματος ικανού να δεχτεί και να μεταβιβάσει το νερό σε βαθύτερα σημεία.
- Την παρουσία ενός αδιαπέρατου καλύμματος πάνω από το αντίστοιχο υδροπερατό υδροφόρο στρώμα.
- Συνθήκες βαθιάς μεταφοράς του νερού μέσα στο στερεό φλοιό για την απόκτηση υψηλής θερμοκρασίας ή την παρουσία βαθιάς θερμικής ή μαγματικής εστίας που προσδίδει στο νερό υψηλή θερμοκρασία
- Κατάλληλες γεωλογικές, υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες, ικανές για τον ανεφοδιασμό, την κίνηση και την άνοδο του παραγόμενου γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια.



Σχήμα 14.: Γεωλογικό σκαρίφημα που δείχνει τις συνθήκες δημιουργίας γεωθερμικών ρευστών (από Γ. Δημόπουλο 1990).

Οι παραπάνω προϋποθέσεις είναι απαραίτητες για την δημιουργία ενός γεωθερμικού πεδίου που σχηματίζεται σε μεγάλο βάθος και μπορεί να εκδηλωθεί στην επιφάνεια εάν συντρέχουν οι κατάλληλες τεκτονικές συνθήκες. Αλλιώς, διαπιστώνεται με γεωφυσικές μεθόδους και μπορεί να εκμεταλλευτεί με την βοήθεια γεωτρήσεων.

Η μετάδοση της θερμότητας με συναγωγή είναι ταχύτερη και περισσότερο σημαντική εξαιτίας της σχετικά ταχείας κυκλοφορίας των υπόγειων ρευστών, που ανεβαίνουν προς τα πάνω λόγω της πρωτογενούς ή δευτερογενούς περατότητας. Η πρωτογενής περατότητα οφείλεται στη φύση πολλών τύπων πετρωμάτων και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά μερικών ευνοϊκών γεωλογικών σχηματισμών, ενώ η δευτερογενής περατότητα οφείλεται σε υδροθερμικούς και κυρίως σε τεκτονικούς παράγοντες.

Οι τελευταίοι μπορεί πράγματι να επηρεάσουν τη γεωθερμική κατάσταση μιας περιοχής, δημιουργώντας συνθήκες ταχύτερης κυκλοφορίας και ανόδου των βαθύτερων και θερμότερων ρευστών, τα οποία μεταφέρουν από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της γης μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας. Η κλίμακα έτσι της θερμικής ροής αλλάζει ριζικά, και γίνεται πολλαπλάσια εκείνης που πραγματοποιείται με το συνεχή ρυθμό της θερμικής αγωγής των πετρωμάτων.

Όπως είναι φυσικό, τα μεγάλα αυτά ρήγματα επιτρέπουν τη γρήγορη και μερικές φορές μαζική κυκλοφορία θερμών ρευστών προς τα πάνω, αφού ο μηχανισμός γένεσής τους αποδίδεται συνήθως στην τεκτονική εφελκυστικού τύπου. Αυτή η τεκτονική τάση, που έχει ως αποτέλεσμα την σχετική απομάκρυνση των τεμαχών, δημιουργεί ένα κενό διάστημα μεταξύ των διερρηγμένων επιφανειών, που «γεμίζει» αμέσως με θερμά ρευστά. Τα ρευστά αυτά επειδή έχουν μικρότερη πυκνότητα από τα ψυχρά νερά και περιέχουν διαλυμένα αέρια, έχουν την τάση να ανέρχονται με κάποια πίεση (φαινόμενο θερμοανύψωσης, thermolifting). Η μετεωρική ή επιφανειακή τους προέλευση προσθέτει επιπλέον και την υδροστατική πίεση. Εν τέλει επιταχύνουν την υδροθερμική κυκλοφορία και διευκολύνουν την δημιουργία των γεωθερμικών πεδίων κοντά ή επάνω στην επιφάνεια (βλ. Σχ. 15).

Ειδικότερα όσον αφορά τον τρόπο δημιουργίας των γεωθερμικών ρευστών, αυτός συντελείται ως εξής:

1. Με την βοήθεια της γεωθερμικής βαθμίδας (βλ. Σχ. 15α) και



Με την βοήθεια της θερμικής εστίας (βλ. Σχ. 15β).

Σχήμα 15: Γεωλογικό σκαρίφημα δημιουργίας γεωθερμικών ρευστών , (α) εξαιτίας της βαθιάς μεταφοράς του νερού στον στερεό φλοιό (β) με την βοήθεια της θερμικής εστίας (από Δημόπουλο Γ., 1990).

Πράγματι ο συνδυασμός κανονικών ρηγμάτων δημιουργεί πολλές φορές τεκτονικά κέρατα (horsts), που όταν καλύπτονται από στεγανούς σχηματισμούς, αποτελούν ιδανικές δομές σχηματισμού και ανάπτυξης γεωθερμικών κοιτασμάτων. Μια τεκτονική δομή τεκτονικού κέρατος έχει καλύτερες συνθήκες θερμοκρασίας, επειδή εκεί επικρατεί ικανοποιητική θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος. Στα ακραία τμήματα του κέρατος, εξαιτίας των ρηγμάτων, δημιουργούνται ακόμα καλύτερες συνθήκες κυκλοφορίας, λόγω και της δευτερογενούς περατότητας των σχηματισμών.

Γενικότερα τα τεκτονικά βυθίσματα του ελληνικού χώρου που πληρώθηκαν από πρόσφατα και χαλαρά ιζήματα είναι γεμάτα από μετεωρικά ή άλλα επιφανειακά νερά, που καταλαμβάνουν τους πόρους των υδροπερατών σχηματισμών. Τα ελαφρύτερα θερμά νερά τείνουν να ανεβούν στα περιθώρια του βυθίσματος, κατά μήκος ορισμένων μεγάλων ρηγμάτων εφελκυστικού τύπου, όπως αποτυπώνεται, για παράδειγμα, στην τομή με διεύθυνση A – Δ της τεταρτογενούς λεκάνης του Στρυμόνα του **Σχ. 16.** 



Σχήμα 16.: Σκαρίφημα του τεκτονικού βυθίσματος του Στρυμώνα που πληρώθηκε από νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα στα περιθώρια ή στο εσωτερικό του οποίου εγκλωβίζονται θερμά νερά (από Μ. Φυτίκα & Ν. Ανδρίτσο, 2004).

Είναι πιθανόν να συνδυάζονται δύο ευνοϊκά χαρακτηριστικά αυξημένης θερμικής ροής: τα χαρακτηριστικά των οπισθότοξων περιοχών με εφελκυσμό και αυτά των περιοχών υπόγειου όξινου πλουτώνιου μαγματισμού. Η δημιουργία βέβαια των παραπάνω γεωθερμικών πεδίων οφείλεται και στην ύπαρξη κατάλληλων γεωλογικώντεκτονικών δομών. <u>Τέτοια περίπτωση φαίνεται να αποτελεί η λεκάνη του Σιδηροκάστρου</u> δεδομένου ότι υπόκειται σε εφελκυστικού τύπου τεκτονική, όπως άλλωστε συμβαίνει για όλη την περιοχή της λεκάνης του Στρυμώνα, αλλά παράλληλα συναντώνται, σε μεμονωμένες θέσεις, ηφαιστειακά πετρώματα ως επί το πλείστον ρυολιθικής σύστασης και τεταρτογενούς ηλικίας όπως έχει δείζει πλήθος ερευνών (Σωτηριάδης 1966). Η παραπάνω έκταση, όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, ουσιαστικά συντελείται λόγω της δράσης οριζόντιων δεξιόστροφων κινήσεων.

Η παρουσία ή όχι στην επιφάνεια του γεωθερμικού ρευστού με μικρές ή μεγάλες παροχές εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες. Συχνά παρατηρούμε τα γεωθερμικά ρευστά να ανέρχονται στην επιφάνεια πάντα σε μια κανονική σχέση ως προς τις τοπικές γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες. Θα λέγαμε ότι είναι ζωτικής σημασίας η παρουσία ρηγμάτων στο χώρο των αναβλύσεων για την άνοδο των γεωθερμικών ρευστών.

Ιδιαίτερα η ύπαρξη θερμών πηγών επηρεάζεται από την παρεμβολή νεαρής ηλικίας ρηγμάτων ή από την φυσική εμφάνιση στην επιφάνεια των περατών στρωμάτων στα άκρα των συγκλίνων. Τα μεγάλα κανονικά ρήγματα είναι κατά κανόνα και οι βασικές αιτίες δημιουργίας των θερμών πηγών στην επιφάνεια. Η εύκολη όμως κυκλοφορία των θερμών ρευστών τα φέρνουν κατά την άνοδο σε επαφή με ψυχρότερα γεωλογικά πετρώματα, αλλά και με επιφανειακούς ψυχρούς υδροφόρους ορίζοντες (βλ. Σχ. 17). Αυτό επιφέρει σταδιακή ή και απότομη πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης τους, με αποτέλεσμα την απόθεση στο δρόμο ορισμένων από τα διαλυμένα άλατα (π.χ. ανθρακικά και πυριτικά). Έτσι με τον καιρό φράζουν οι δίοδοι των γεωθερμικών ρευστών και η ροή – κυκλοφορία επιβραδύνεται ή και σταματά εντελώς. Η ενεργός τεκτονική όμως μπορεί να δημιουργεί συνεχώς καινούργια ρήγματα ή/και μικροδιαρρήξεις, φτιάχνοντας νέες διόδους κυκλοφορίας.

Ειδικότερα για την περιοχή μελέτης, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο της υδροχημείας, δεν προκύπτει κάποιου είδους ανάμειξη με βαθύτερα γεωθερμικά ρευστά σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί. Ασφαλώς όμως η κυκλοφορία των ψυχρών – υπόθερμων υδάτων της περιοχής μελέτης είναι γίνεται ακριβώς με τον τρόπο που σε γενικές γραμμές περιγράψαμε παραπάνω.



Σχήμα 17.: Γεωλογικό σχήμα σύμφωνα με το οποίο εξασφαλίζεται η ανάμειξη ψυχρών και θερμών υδάτων καθώς και η ανανέωση των τελευταίων με την βοήθεια της ρηξιγενούς τεκτονικής (τροποποιημένο από Σούλιο Γ., 2006)

Συνοψίζοντας λοιπόν, η νεοτεκτονική δραστηριότητα όταν είναι ενεργός και εφελκυστικού τύπου μπορεί, σε συνδυασμό με άλλες ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, να δημιουργήσει διάφορες επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας και προπαντός, αξιόλογα γεωθερμικά πεδία.

# 5. ΛΗΨΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

# 5.1. ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1.1. Γενικά μορφολογικά στοιχεία λεκάνης Σιδηροκάστρου

Ως ευρύτερη περιοχή μελέτης ορίζεται η λεκάνη απορροής του Αχλαδίτη (Κρουσοβίτη) ποταμού που συνιστά ένα ενδοορεινό (ηπειρωτικό) τεκτονικό βύθισμα στα BBA της ευρύτερης υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Στρυμόνα (βλ. προηγούμενα Σχ. 1.). Η λεκάνη του Σιδηροκάστρου έχει ένα ορθογώνιο περίπου σχήμα με την μεγαλύτερη πλευρά αυτού να φτάνει τα 24Km και να παρουσιάζει μια γενική διεύθυνση 60° BA. Η μικρή πλευρά του σχήματος αυτού δεν ξεπερνά τα 14Km. Έχει διεύθυνση BA-NΔ και εκτείνεται κατά μήκος του άξονα Σιδηροκάστρου-Αχλαδοχωρίου. Επίσης η συνολική έκταση της λεκάνης ισοδυναμεί με 290 Km<sup>2</sup>.

Η υπό μελέτη λεκάνη οριοθετείται μεταξύ περιφερειακών ορεινών όγκων και στραγγίζεται στον κύριο υδρογραφικό άξονα του Αχλαδίτη και μετέπειτα στον ποταμό Στρυμόνα. Το βύθισμα αυτό αρχικά δημιουργήθηκε από νεοτεκτονικές διεργασίες, στον οριακό χώρο της μάζας της Ροδόπης (ανατολικά), με την Σερβομακεδονική μάζα (δυτικά). Στην συνέχεια διαμορφώθηκε από την δράση εξωγενών δυνάμεων, με κυρίαρχες αυτές του ποτάμιου συστήματος του Αχλαδίτη.

Στην ερευνητική προσπάθεια της παρούσας Διατριβής συμπεριλαμβάνεται όλο το υδρογραφικό δίκτυο που ανήκει στην λεκάνη απορροής του Αχλαδίτη ποταμού.

Στην πορεία της έρευνας και κυρίως κατά την ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Σιδηροκάστρου, προέκυψε ότι το υδρογραφικό δίκτυο της συγκεκριμένης λεκάνης αναπτύσσεται αυτοτελώς.

Η περιοχή περιβάλλεται, εκτός από το ΔΝΔ τμήμα της, από ένα σύνολο ορεινών όγκων, οι κορυφές και οι ράχεις των οποίων παρουσιάζονται με μια διεύθυνση BA – ΝΔ, ποικίλης πετρογραφικής σύστασης. Η ορεινή και σχεδόν μονότονη μορφολογία της εγγύς ορεινής περιοχής μεταβάλλεται απότομα προς το κέντρο και τις παρυφές της λεκάνης, όπου εξαφανίζεται ο ορεινός χαρακτήρας και κυριαρχεί η λοφώδης μορφολογία με πλήθος χαραδρώσεων, με γενική διεύθυνση κλίσης προς τα ΝΔ. Η μορφολογική αυτή αντίθεση είναι ασφαλώς αποτέλεσμα συγκεκριμένης γεωλογικής κατασκευής, δεδομένου μάλιστα ότι τα πετρώματα που αποτέθηκαν στο κέντρο και τις παρυφές της λεκάνης είναι κατά πολύ νεότερα των πετρωμάτων που βρίσκονται στην εγγύς ορεινή περιοχή. Επίσης τα πρώτα εμφανίζονται περισσότερο ψαθυρά και με ποικίλη τεκτονική τοποθέτηση (Σωτηριάδης Λ., 1966).

Ασφαλώς η κορυφογραμμή των ορεινών όγκων της εγγύς περιοχής καθορίζουν και την υδροκριτική γραμμή της λεκάνης.

Κατά τον Σωτηριάδη (1966) το χαμηλότερο τμήμα της περιοχής μέχρι υψόμετρο περίπου 600μ. κατέχεται από νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα που έχουν υποστεί έντονη τεκτονική και διαβρωσιγενή δράση. Το σύστημα των ρευμάτων που αποστραγγίζουν επιφανειακά την λεκάνη και τα οποία δημιουργούνται από τα κατακρημνίσματα που δέχεται η ίδια η λεκάνη καταλήγουν στο κέντρο της λεκάνης όπου βρίσκεται και η κοίτη του Αχλαδίτη, σχηματίζοντας μια πολύ στενή και ευθεία (ως επί το πλείστον) κοιλάδα με απότομες πλευρές και δύο ευδιάκριτες αναβαθμίδες. Χαρακτηρίζεται από χειμαρρώδη ροή και η κοίτη του απέχει πολύ από την τελική καμπύλη του ορίου κλίσεως αυτής. Στην προσπάθεια του λοιπόν ο ποταμός να φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας δημιούργησε ένα λαιμό στην θέση «Καμάρες», ενώ στην θέση «Ζεστά Νερά» κατόρθωσε εν μέρει μόνο να διαρρήξει το παρεμβαλλόμενο στην ίδια θέση φράγμα και να υπονομεύει σημαντικά την λειτουργία αυτού μέσω της υπόγειας κυκλοφορίας του. Η κοίτη επίσης του ποταμού απαντάται σήμερα αρκετά καλά διαμορφωμένη και σχεδόν στην πλήρη έκτασή της. Παρόλα αυτά όμως ο κώνος εκβολής του Αχλαδίτη είναι εντελώς υποτυπώδης, με συνέπεια το αλλουβιακό ριπίδιο που σχηματίζει να έρχεται σε άμεση επαφή με την κοίτη του, η οποία λαμβάνει αμέσως την μαιανδρική της μορφή μόλις εξέρχεται της λεκάνης στο χώρο των αλλουβιακών αποθέσεων (Ψιλοβίκος κ.α., 1981).

Οι υπόλοιποι χείμαρροι και γενικότερα ρεύματα, τα οποία μάλιστα διασχίζουν εγκάρσια την περιοχή, καταλήγουν ως επί το πλείστον άμεσα στον Αχλαδίτη, παρουσιάζουν γενική διεύθυνση ροής B–N, ασφαλώς λόγω νεοτεκτονικών αιτίων. Οι παρατηρούμενες χαραδρώσεις είναι απότομες και στενές με το χαρακτηριστικό σχήμα V να δηλώνει το σχετικά νεαρό της ηλικίας τους. Η διάβρωση βέβαια που συντελείται στις θέσεις αυτές είναι πολύ έντονη και προκαλεί σημαντική απογύμνωση των εδαφών. Η ένταση των παραπάνω φαινόμενων κυρίως οφείλεται στην σημαντική διαφορά ύψους μεταξύ της αφετηρίας και του τέρματος των ρέοντων υδάτων καθώς επίσης και στην μεγάλο βαθμό ψαθυρότητας των πετρωμάτων που διαρρέουν (αργιλοψαμμίτες και κροκαλοπαγή κυρίως). Μεταξύ όμως των παραπάνω υλικών παρεμβάλλονται συμπαγείς ψαμμίτες, οι οποίοι μάλιστα σχηματίζουν απότομες κλίσεις στην

μορφολογία και διακρίνονται εύκολα από τα υπόλοιπα στρώματα διότι κάνουν την εμφάνιση τους με την μορφή χαρακτηριστικών ταινιών. Πολλοί από τους παραπάνω χειμάρρους είναι ξηροί κατά την διάρκεια αρκετών μηνών μέσα στο έτος (Ψιλοβίκος κ.α., 1981).

Το σημερινό ανάγλυφο της περιοχής είναι στο σύνολο του αποτέλεσμα διάβρωσης που συνεχίζεται και σήμερα με ένταση στην περιοχή.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η παρουσία των ολισθοστρωμάτων (ισχυρά συγκολλημένα λατυποπαγή μαρμάρων) που κατέχουν τα υψηλότερα σημεία (Σωτηριάδης Λ., 1966). Η εικόνα αυτή δημιουργείται λόγω της διαφορικής διάβρωσης μεταξύ των ολισθοστρωμάτων και των νεογενών ιζημάτων που διαβρώνονται ευκολότερα, με αποτέλεσμα η ταπείνωσή τους να είναι γρηγορότερη και να μένουν οι ολισθόλιθοι εξέχοντες στα υψηλότερα σημεία. Επειδή ακριβώς οι σχηματισμοί αυτοί δίνουν την όψη σιδερένιων κάστρων στην κορυφή των λόφων, τόσο η πόλη του Σιδηροκάστρου όσο και η λεκάνη αυτής έχουν πάρει το όνομά τους λόγω της παρουσίας των παραπάνω ιδιαίτερων σχηματισμών.

Στους ορεινούς τομείς σε υψόμετρο μεγαλύτερο από τα 600μ. εμφανίζεται το υπόβαθρο που αποτελείται από μάρμαρα (ΒΔ), χαλαζιακό μονζονίτη (ABA) και γνευσιακά πετρώματα (Ν και ΝΑ).

Στην B/BA πλευρά της λεκάνης, μέσα στο χώρο των ανθρακικών πετρωμάτων και στην επαφή τους με τους μονζονίτες, έχει σχηματιστεί ένα ασύμμετρο βύθισμα με απότομες βόρειες και χαμηλές νότιες πλευρές παρουσιάζοντας μια επίπεδη βάση με έκταση μόλις 20Km<sup>2</sup> που έχει πληρωθεί από χαλαρά υλικά. Το βύθισμά αυτό διακόπτει την μορφολογική συνέχεια της επιφάνειας από B προς N (κλίνει προς το N) και αποτελεί ιδιαίτερο μορφολογικό σχηματισμό γνωστό σαν βύθισμα του Αχλαδοχωρίου. Όσον αφορά την υψομετρική διαφορά, μέσα στην οποία εντοπίζεται, αυτή κυμαίνεται μέσα στο διάστημα των 950 – 520μ. περίπου (βλ. Εικ. 3.).

Το νερό των χειμάρρων που αποστραγγίζουν το βύθισμα του Αχλαδοχωρίου διηθείται μέσα από τα χαλαρά κλαστικά ιζήματα που απαντώνται στην βάση αυτού με μόνη εξαίρεση τους Α και ΝΑ χείμαρρους οι οποίοι ρέουν είτε στην επαφή ή πάνω στο γρανιτικό τμήμα του υποβάθρου και οι οποίοι στο σύνολό τους καταλήγουν στον Αχλαδίτη ποταμό, κοντά μάλιστα στην περιοχή του Αχλαδοχωρίου. Άρα λοιπόν και από το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό ότι ο Αχλαδίτης πραγματικά αποστραγγίζει, με την βοήθεια των κλάδων του βέβαια, όλη την έκταση της ερευνούμενης λεκάνης. Τέλος, μέχρι πριν από μερικές δεκαετίες ο συγκεκριμένος ποταμός κατέληγε άμεσα στο φυσικό του βασικό επίπεδο που δεν είναι άλλο από αυτό του ποταμού Στρυμόνα, εντούτοις σήμερα καταλήγει σε ένα αποστραγγιστικό κανάλι που βρίσκεται κοντά στην πόλη του Σιδηροκάστρου.



Εικόνα 3.: Η πόλγη του Αχλαδοχωρίου (από Ε. Παπαφιλίππου – Πέννου, 2004)

Από γεωμορφολογική λοιπόν άποψη παρατηρούμε ότι στην περιοχή Σιδηροκάστρου – Αχλαδοχωρίου μπορούμε σήμερα να διακρίνουμε τρεις γεωμορφολογικές ενότητες:

- 1. Την λεκάνη του Σιδηροκάστρου
- 2. Την κοιλάδα του Αχλαδίτη και
- 3. Το βύθισμα του Αχλαδοχωρίου.

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης απορροής του Αχλαδίτη, όπου διακρίνεται καθαρά ο παραπάνω μορφολογικός διαχωρισμός. Το μοντέλο αυτό προέκυψε με υπέρθεση της ορθοδιορθωμένης σε ΕΓΣΑ '87, δορυφορικής εικόνας Landsat 7/ΕΤΜ<sup>+</sup>, στο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM).

Η ερευνούμενη λεκάνη του Σιδηροκάστρου συνιστά αντικείμενο μεγάλου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Ως περιοχή που χωροθετείται στα όρια μεγαλύτερων λεκανών, η οποία μάλιστα παρουσιάζει τόσο ένα ομαλό ανάγλυφο (0 – 300μ.) όσο και ένα αντίστοιχο ορεινό (1000 – 2212μ.), παρέχει την δυνατότητα στον ερευνητή να μελετήσει ποικίλα γεωμορφολογικά, κλιματικά και τεκτονικά φαινόμενα τόσο του παρελθόντος όσο και του παρόντος. Έτσι λοιπόν και η μελέτη της τραβερτινικής γέφυρας στην θέση 'Ζεστά Νερά', μπορεί αναμφίβολα να οδηγήσει σε συμπεράσματα όσον αφορά την μελέτη των παραπάνω φαινομένων, μέσα στα πλαίσια φυσικά και άλλων εργασιών.



**Σχήμα 18.:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της λεκάνης Σιδηροκάστρου που προήλθε από την υπέρθεση της ψευδοχρωματικής εικόνας Landsat 7/ETM<sup>+</sup> (7,4,2) RGB υπερυψωμένης κατά 2 φορές πάνω στο ψηφιακό μοντέλου αναγλύφου (από το αρχείο του Τομέα).

## 5.1.2. Γενικά στοιχεία για τους ορεινούς όγκους της λεκάνης Σιδηροκάστρου

Με άξονα τον ποταμό Αχλαδίτη, οι ορεινοί όγκοι που περιβάλλουν την λεκάνη Σιδηροκάστρου μπορούν να διακριθούν σε:

βόρειους που ανήκουν στη μάζα Ροδόπης και αποτελούν πτυχωσιγενείς δομές της,
έχοντας BA-NΔ προσανατολισμό των κυρίων αξόνων τους και

- νότιους, με τον ίδιο προσανατολισμό, που ανήκουν επίσης στη Ροδοπική μάζα.

Μεταξύ των ορεινών όγκων παρεμβάλλονται βαθιές, συγκλινικές κυρίως, κοιλάδες.

Οι Β και ΒΑ περιφερειακοί όγκοι της υπό μελέτη λεκάνης, συγκροτούνται από τα όρη Άγκιστρου (1295m) και Ορβήλου (2212m) αντίστοιχα. Στο ΒΑ ανώτερο και υψηλότερο τμήμα της υπάρχει το καρστικό βύθισμα (πόλγη) Αχλαδοχωρίου, ενώ στο κεντρικό της τμήμα αναπτύσσεται η κοιλάδα του χειμάρρου Αχλαδίτη (ή Κρουσοβίτη) (βλ. Φωτ. 2.), ως πλευρική κοιλάδα του ποταμού Στρυμόνα (Ψιλοβίκος κ.α.,1981).

Οι Ν και ΝΑ περιφερειακοί όγκοι της λεκάνης Σιδηροκάστρου, συγκροτούνται αποκλειστικά από την ορεινή μάζα της Βροντούς (1849m).



**Φωτ. 2.:** Κοιλάδα χειμάρρου Κρουσοβίτη ή Αχλαδίτη (ανάντη 'Ζεστών Νερών' Σιδ/στρου)

Γενικά οι ορεινοί όγκοι της μάζας Ροδόπης στο σύνολό τους παρουσιάζουν υψομετρική διαφορά από τους ορεινούς όγκους της Σερβομακεδονικής μάζας που δικαιολογείται με τις πρόσφατες ανυψωτικές κινήσεις της Ροδόπης. Οι κινήσεις αυτές προσεγγίζουν περίπου τα 1000m περισσότερο για την μάζα Ροδόπης από τη Σερβομακεδονική μάζα, μόνο κατά το νέο-Τεταρτογενές (Ψιλοβίκος & Βαβλιάκης, 1983).

Η διαμόρφωση των ορεινών όγκων που περιβάλλουν περιφερειακά την λεκάνη Σιδηροκάστρου, οφείλεται σε τεκτονική δράση επάνω στην προ-Νεογενή επιφάνεια της. Ειδικότερα η τεκτονική του Νεογενούς κατακερμάτισε την αρχική επιφάνεια, με τις θετικές κινήσεις να δημιουργούν τεκτονικά κέρατα (horsts), ενώ οι αρνητικές, τεκτονικές τάφρους (grabens).

Με τον τρόπο αυτό προκλήθηκε ο διαχωρισμός της λεκάνης Σιδηροκάστρου, από την αντίστοιχη των Σερρών, αποτελώντας έτσι περιθωριακό κομμάτι της τελευταίας προς τα ΒΑ. Αυτή η διαφοροποίηση όμως συνεχίστηκε όμως και μέσα στην ίδια την λεκάνη, κατά το Τεταρτογενές, με νέες ανυψωτικές και καθοδικές κινήσεις με ασφαλώς περισσότερο τοπικό χαρακτήρα.

Στην συνεχεία, οι κλιματικές συνθήκες που επικράτησαν βοήθησαν την διάβρωση.

Συνοδά γεωμορφολογικά φαινόμενα συνιστούν οι επιφάνειες διάβρωσης (peneplain), οι ανανεωμένες κοιλάδες, η αναστροφή του αναγλύφου οι συλλήψεις κοιλάδων, η δημιουργία νέων υδρογραφικών δικτύων και επιγενετικών κοιλάδων κ.λ.π. (Ε. Παπαφιλίππου-Πέννου 2004).

5.1.3. Συγκρότηση και κατανομή του ανάγλυφου

5.1.3.1. Γενικά

Για την μελέτη της μορφολογίας της λεκάνης Σιδηροκάστρου και για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις γεωμορφολογικές διεργασίες, οι οποίες έχουν διαμορφώσει το επιφανειακό ανάγλυφο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αναγλύφου της περιοχής μελέτης, με τη βοήθεια υψομετρικών δεδομένων. Βάση των δεδομένων αυτών και με την βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Vertical Mapper, 3.0, κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM). Για την κατασκευή του κανάβου (grid), χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος παρεμβολής τριγωνισμού μέσω εξομάλυνσης (triangulation with smoothing), στην οποία δημιουργείται ένα σύνολο από τρίγωνα, όπου στις κορυφές του καθενός, αντιστοιχεί και ένα σημείο (Vertical Mapper, tutorial, 2001).

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου, με την κατασκευή του χάρτη υψομέτρων, ενώ παράλληλα αναλύθηκε και η πρώτη παράγωγος του υψομέτρου, με την κατασκευή του χάρτη κλίσεων.

Επίσης, για την περαιτέρω ανάλυση της κατανομής του αναγλύφου της λεκάνης, προσδιορίστηκε το υψομετρικό ολοκλήρωμα, συνολικά για όλη τη λεκάνη απορροής, 6<sup>ης</sup> τάξης. Το υψομετρικό ολοκλήρωμα αποτελεί ως μαθηματική έκφραση, το εμβαδόν κάτω από την υψομετρική καμπύλη, δίνοντας στοιχεία για το στάδιο απογύμνωσης στο οποίο βρίσκεται μια περιοχή.

# 5.1.3.2. Ταξινόμηση αναγλύφου

Προκειμένου να χαρακτηριστεί το ανάγλυφο που παρατηρείται στη λεκάνη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ταξινόμησης των υψομέτρων (Dikau 1989, από Δομακίνη Χ., 2005). Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, μία περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ανάλογα με το υψόμετρο που παρουσιάζει πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (βλ. Πίν. 9).

Ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας (σε μέτρα).	Χαρακτηρισμός περιοχής		
< 150	Πεδινή		
150 - 600	Λοφώδης		
600 - 900	Ημιορεινή		
> 900	Ορεινή		



Οι ενότητες έχουν ιδιαίτερη σημασία στον χώρο του υπό μελέτη τεκτονικού βυθίσματος, διότι είναι αποτέλεσμα κυρίως κατακόρυφων κινήσεων.

Οι κινήσεις αυτές ήταν και παραμένουν συνυφασμένες με την εξέλιξη της λεκάνης και διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

 Τις ανυψωτικές ή ανοδικές κινήσεις, οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στους περιφερειακούς όγκους της λεκάνης και δημιουργούν συνθήκες διαρκούς ανανέωσης του ανάγλυφου.

Η ανανέωση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στην μετατόπιση των παλαιών γεωμορφών του αναγλύφου (π.χ. επιφάνειες επιπέδωσης) σε όλο και μεγαλύτερα υψόμετρα, αλλά ενεργοποιεί ταυτόχρονα και τις εξωγενείς φυσικές διεργασίες.

Αυτές με την σειρά τους προκαλούν σοβαρές αλλαγές στις παλαιές γεωμορφές του αναγλύφου μέχρι πλήρους σχεδόν καταστροφής των, ενώ ταυτόχρονα τροφοδοτούν με υλικά, τα χαμηλότερα τμήματα της λεκάνης. Για τον λόγο αυτό η υψομετρική κατανομή του επιφανειακού αναγλύφου, σε συνδυασμό και με τις γεωμορφές που παρουσιάζει αυτό, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες εξέλιξης μιας περιοχής, οπότε και για την λεκάνη Σιδηροκάστρου.

 Τις καθοδικές ή κινήσεις βύθισης, οι οποίες εντοπίζονται κατά κανόνα στον κεντρικό χώρο της λεκάνης και δημιουργούν χώρο εισροής και απόθεσης υλικών.

Ιδιαίτερη σημασία για την λεκάνη Σιδηροκάστρου έχει η γνώση των κινήσεων αυτών κατά την διάρκεια της εξέλιξης της. Υπάρχουν διαπιστωμένες καθοδικές κινήσεις στον κεντρικό τομέα της λεκάνης Σιδηροκάστρου καθώς και στο βύθισμα του Αχλαδοχωρίου, από πλήθος γεωτρητικών δεδομένων (Ψιλοβίκος κ.α., 1981) και γι΄αυτό είναι σημαντικοί παράγοντες της εξέλιξης της τόσο η συγκρότηση όσο και η κατανομή του επιφανειακού αναγλύφου.

 Με δεδομένο ότι ο ποταμός Αχλαδίτης με την κοίτη ροής του παρουσιάζεται να είναι ο κεντρικός άξονας της λεκάνης Σιδηροκάστρου (στο μεγαλύτερο μήκος του τουλάχιστον), μπορεί αυτή να χωρισθεί σε δύο τμήματα:

α) το βόρειο τμήμα (ή βόρεια πλευρά) και

β) το νότιο τμήμα (ή νότια πλευρά),

θεωρήθηκε απαραίτητο να δοθούν ποσοτικά στοιχεία του αναγλύφου ως προς τον άξονα αυτόν (βλ. Πίν. 10).

ΛΕΚΑΝΗ ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟΥ					
A/A	ΠΛΕΥΡΑ Ή ΤΜΗΜΑ	EKTAΣH (Km²)	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)		
1	BOPEIA	183,9	63,3		
2	NOTIA	106,6	36,7		
ΣΥΝΟΛΟ		290,5	100		



Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι:

η βόρεια πλευρά (τμήμα) έχει έκταση 183,9 km<sup>2</sup> και ποσοστό 63,3% στην συνολική έκταση (290,5 km<sup>2</sup>) της λεκάνης.

- η νότια πλευρά (τμήμα) έχει έκταση 106,6 km<sup>2</sup> και ποσοστό 36,7% στην συνολική έκταση (290,5 km<sup>2</sup>) της λεκάνης και συνεπώς η κοίτη του Αχλαδίτη δεν αποτελεί ακριβώς τον κεντρικό άξονα συμμετρίας της λεκάνης Σιδηροκάστρου, αφού οι εκτάσεις των δύο πλευρών διαφέρουν σημαντικά.

Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στον προβληματισμό ότι πιθανότατα η ανάπτυξη και η εξέλιξη της περιοχής δεν πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά σε συνάρτηση ως προς το κυρίαρχο φυσικο-γεωγραφικό στοιχείο, που είναι ο ποταμός Αχλαδίτης, στον χώρο του ομώνυμου βυθίσματος.

 Με βάση τους γεωγραφικούς όρους κατανομής του επιφανειακού αναγλύφου, χαρτογραφήθηκαν (βλ. παρακάτω χάρτη υψομέτρων) και υπολογίσθηκαν οι εκτάσεις της λεκάνης Σιδηροκάστρου, που περιλαμβάνονται μέσα στα όρια των γεωγραφικών ενοτήτων, ως εξής (βλ. Πίν. 11):

		ΕΚΤΑΣΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ	
ENOTHTA	ΥΨΟΜΕΤΡΟ	(Km²)	(%)	λογοΣ
ОРН	> 900	86,39	29,74	
				0,75
BOYNA	900 - 600	65,22	22,45	
				1,85
ΛΟΦΟΙ	600 – 150	120,76	41,57	
ΠΕΔΙΑΔΑ	<150	18,13	6,24	0,15
ΣΥΝΟΛΟ		290,5	100	M.O.= 0,91

Πίνακας 11: Τύποι αναγλύφου, εκτάσεις γεωμορφολογικών ενοτήτων και ποσοστά αυτών, όπως συναντώνται στη λεκάνη απορροής του Αχλαδίτη ποταμού.

Από την κατανομή του συνολικού αναγλύφου της λεκάνης Σιδηροκάστρου, κατά ενότητες προκύπτει ότι αυτό δεν θα λέγαμε ότι παρουσιάζει μια κανονικότητα στην κατά υψόμετρο εξάπλωση του, γεγονός άλλωστε που διαπιστώνεται και από τις τιμές του λόγου των εκτάσεων των ενοτήτων (βλ. Πίν. 11.). Δηλ. σε καμιά ενότητα, από τα όρη μέχρι την πεδιάδα, δεν παρατηρείται η πολλαπλάσια έκταση της μιας ενότητας από τη προηγούμενη της. Αυτή η μη κανονικότητα ανάπτυξης αφορά φυσικά και το σύνολο της λεκάνης.

Με αυτή την διαπίστωση και σε συνδυασμό με την προηγούμενη ότι δεν υπάρχει απόλυτη συμμετρική κατανομή ως προς τον άξονα της λεκάνης (κοίτη Αχλαδίτη), βεβαιώνεται μια γενικότερη ανομοιομερής και άνιση ανάπτυξη της λεκάνης Σιδηροκάστρου.

Χρησιμοποιώντας το εύρος υψομέτρων του Πίνακα 11, καθώς και το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM), κατασκευάστηκε ο χάρτης υψομέτρων για τη λεκάνη
Σιδηροκάστρου. Ο χάρτης υψομέτρων, παρουσιάζεται στο Σχ. 19. Επίσης, υπολογίστηκε η έκταση σε Km<sup>2</sup>, καθώς και το ποσοστό της έκτασης που καταλαμβάνει η κάθε περιοχή, ανάλογα με το χαρακτηρισμό που της έχει αποδοθεί (βλ. Πίνακα 11).

- Τα όρη της λεκάνης Σιδηροκάστρου συγκροτούν μία ενότητα (υψόμ.>900m.) που έχει έκταση 86,39 km<sup>2</sup>, σε ποσοστό 29,74 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης.
- Τα βουνά της λεκάνης Σιδηροκάστρου συγκροτούν μία ενότητα (υψόμ.900m -600m.) που έχει έκταση 65,22 km<sup>2</sup>, σε ποσοστό 22,45 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης.
- Οι λόφοι της λεκάνης Σιδηροκάστρου συγκροτούν μία ενότητα (υψόμ.600m -150m.) που έχει έκταση 120,76 km<sup>2</sup>, σε ποσοστό 41,57 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης.
- Η πεδινή περιοχή της λεκάνης Σιδηροκάστρου συγκροτεί μία ενότητα (υψόμ.<150m.) που έχει έκταση 18,13 km<sup>2</sup>, σε ποσοστό 6,24 % της συνολικής έκτασης της λεκάνης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι το ανάγλυφο της λεκάνης, στη μεγαλύτερη έκταση του, χαρακτηρίζεται **λοφώδες (41,57%) έως ορεινό (29,74%).** Οι πεδινές περιοχές, οι οποίες φαίνονται με έντονο γαλάζιο χρώμα στο χάρτη των υψομέτρων (βλ. Σχ. 19), παρατηρούνται κυρίως στο ΔΝΔ τμήμα της λεκάνης (Σιδηρόκαστρο).

Επίσης, στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης παρατηρούνται λοφώδεις περιοχές, με κορυφές χαμηλού υψομέτρου, με τον λόφο 'Μαύρος Βράχος' (380m), να ξεχωρίζει. Οι λοφώδεις περιοχές φαίνονται με κίτρινο χρώμα στο χάρτη των υψομέτρων της λεκάνης.

Οι ημιορεινές περιοχές, που αναπαρίστανται με ανοιχτό καφέ χρώμα στο Σχήμα 19, παρατηρούνται περιμετρικά, με την μορφή ζώνης, όλων των ορεινών όγκων της λεκάνης και για το λόγο αυτό άλλωστε είναι η τρίτη σε έκταση επιφάνεια της λεκάνης, με ποσοστό που φτάνει το 22,5% περίπου.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό, ότι η λεκάνη Σιδηροκάστρου παρουσιάζει μία ιδιαίτερη μορφολογία, με το **νότιο** και **βόρειο τμήμα** της λεκάνης να χαρακτηρίζονται γενικά από **υψηλό ανάγλυφο**, με το **νότιο** όμως να παρουσιάζει **ομαλότερη μορφολογία** και ανάμεσα τους το κεντρικό, χαμηλού αναγλύφου, τμήμα της λεκάνης, στο οποίο δραστηριοποιείται η κοίτη του Αχλαδίτη ποταμού.



Τελικά, από τα ποσοτικά στοιχεία της καθύψους κατανομής του αναγλύφου της λεκάνης Σιδηροκάστρου, προκύπτουν τα εξής σημαντικά συμπεράσματα:

 Ολόκληρη η λεκάνη παρουσιάζει μια όχι και τόσο συμμετρική κατανομή του επιφανειακού αναγλύφου, με άξονα συμμετρίας την κοίτη του ποταμού Αχλαδίτη.

2) Η έκταση των ενοτήτων που αφορούν την καθύψος κατανομή του επιφανειακού αναγλύφου, ακολουθεί ένα λόγο που κυμαίνεται από 0,15 – 1,85. Κυρίαρχη ενότητα είναι η λοφώδης ζώνη, με ποσοστό 41,57% και μικρότερη ενότητα είναι η πεδινή ζώνη με ποσοστό μόλις 6,24%.

Από την διαμορφωμένη κατάσταση συμπεραίνεται ότι: τόσο οι ενδογενείς, όσο και οι εξωγενείς φυσικές διεργασίες, συνέβαλλαν στο σχηματισμό μιας κανονικής, από πλευράς αναγλύφου, λεκάνης σχεδόν συμμετρικής ως προς τον Αχλαδίτη.

Όμως, οι ενδογενείς δυνάμεις και ιδιαίτερα οι έντονες ανυψωτικές κινήσεις, με διαφορετική ένταση μεταξύ των βόρειων και νότιων ορεινών όγκων της μάζας της Ροδόπης, δημιούργησαν μια μικρή ασύμμετρη ανάπτυξη και εξάπλωση των υψομετρικών ενοτήτων στις δύο πλευρές της λεκάνης.

Αν ληφθούν υπόψη ότι τα βαθύτερα τμήματα του αναγλύφου της πεδινής ζώνης (> 300m – βύθισμα Αχλαδοχωρίου), η οποία έχει πληρωθεί από ιζήματα, καθώς επίσης και τα κορυφαία τμήματα των ορέων (2212m - Όρβηλο όρος), τα οποία έχουν διαβρωθεί από τους εξωγενείς παράγοντες, τότε μπορεί να υπολογισθεί ότι η συνολική κατακόρυφη κίνηση ξεπερνά τα 2500m.

Η κίνηση αυτή έλαβε χώρα κατά το Μέσο-Ανώτερο Μειόκαινο, Πλειόκαινο και με ιδιαίτερη ένταση το Τεταρτογενές (χρόνος περίπου 15.000.000 έτη).

#### 5.1.3.3. Κλίση αναγλύφου

Μία σημαντική παράμετρος, για την περαιτέρω ανάλυση του αναγλύφου μιας περιοχής, αποτελεί η κλίση του αναγλύφου. Βάση αυτού, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το βαθμό διάβρωσης που συντελείται σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Για την ταξινόμηση των κλίσεων της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης της Διεθνούς Γεωγραφικής Εταιρίας (International Geographical Union/IGU) (Demek 1972). Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, οι τιμές της μέσης κλίσης του αναγλύφου χωρίστηκαν σε έξι ομάδες, οι οποίες χαρακτηρίζουν διαφορετικές επιφάνειες, καθώς και διαφορετικό τρόπο διάβρωσής τους (Demek, 1972, από Κούλα Ν., 2003).

Έτσι, τιμές κλίσεων από 0° έως 2° αντιπροσωπεύουν ένα ανάγλυφο επίπεδο έως ελαφρά κεκλιμένο και έναρξη διάβρωσης τύπου καλύμματος. Το εύρος αυτό των κλίσεων προσφέρει τις καλύτερες συνθήκες για την καλλιέργεια εκτάσεων με τη βοήθεια μηχανημάτων, ενώ προσφέρεται για κάθε είδος ανθρώπινων κατασκευών (δρόμοι, κτίρια κ.α.). Κλίσεις από 2° έως 5°, δείχνουν ένα ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο, διάβρωση τύπου καλύμματος και έναρξη της αυλακωτής διάβρωσης. Στις κλίσεις αυτές ευνοούνται επίσης, οι ανθρώπινες κατασκευές, ενώ όσο αφορά τις καλλιέργειες προτείνεται η καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών. Κλίσεις από 5° έως 15°, φανερώνουν ένα ισχυρά κεκλιμένο ανάγλυφο, όπου λαμβάνουν χώρα κινήσεις μαζών, ισχυρή διάβρωση τύπου καλύμματος και αυλακωτή διάβρωση. Στο εύρος αυτό των κλίσεων παρατηρούνται σημαντικές δυσκολίες στην κατασκευή υποδομών, καθώς και στο όργωμα των εκτάσεων. Κλίσεις από 15° έως 35°, αντιπροσωπεύουν ένα απότομο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο, όπου παρατηρούνται έντονες διεργασίες απογύμνωσης, ερπυσμοί εδαφών, λασπορροές, και έντονη αυλακωτή ή γραμμική διάβρωση. Στις κλίσεις αυτές κυριαρχούν οι δασικές εκτάσεις και οι βοσκότοποι. Κλίσεις από 35° έως 55°, δείχνουν ένα απόκρημνο ανάγλυφο, όπου παρουσιάζει ένα πολύ λεπτό ασυνεχές στρώμα εδάφους, και έντονη απογύμνωση του μητρικού πετρώματος. Τέλος, κλίσεις μεγαλύτερες των 55°, φανερώνουν ένα κάθετο ανάγλυφο, απουσία εδάφους, απογύμνωση πετρωμάτων και κατάρρευση βράχων, ενώ δεν είναι δυνατή η οποιαδήποτε οικονομική χρήση αυτών των περιοχών από τον άνθρωπο.

Βάση του συστήματος ταξινόμησης της Διεθνούς Γεωγραφικής Εταιρίας (Demek, 1972) κατασκευάστηκε ο χάρτης κλίσεων για την λεκάνη Σιδηροκάστρου, με τη βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM), ο οποίος φαίνεται στο Σχ. 20. Επίσης, προσδιορίστηκε η έκταση σε Km<sup>2</sup>, καθώς και το ποσοστό της έκτασης (%) των περιοχών, που αντιστοιχούν σε κάθε ομάδα κλίσεων, όπως φαίνεται στον πίνακα 12.

Εύρος κλίσεων	Έκταση σε Km <sup>2</sup>	Ποσοστό έκτασης (%)
$0^{\circ} - 2^{\circ}$	8,69	2,99
$2^{\circ} - 5^{\circ}$	13,86	4,77
$5^{\circ} - 15^{\circ}$	47,12	16,22
$15^{\circ} - 35^{\circ}$	93,74	32,27
$35^{\circ} - 55^{\circ}$	74,45	25,63
> 55°	52,64	18,12

Πίνακας 12.: Έκταση και ποσοστό έκτασης, που αντιστοιχεί σε κάθε ομάδα κλίσεων





Εταιρίας (IGU) (Demek 1972)

Προβολικό Σύστημα ΕΓΣΑ '87 Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 17., καθώς και το χάρτη κλίσεων του σχήματος 33, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης της λεκάνης (32,27%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις αναγλύφου που κυμαίνονται μεταξύ 15° έως 35°. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ένα απότομο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο, όπου παρατηρούνται έντονες διεργασίες απογύμνωσης, ερπυσμοί εδαφών, λασπορροές, και έντονη αυλακωτή ή γραμμική διάβρωση. Στις κλίσεις αυτές κυριαρχούν οι δασικές εκτάσεις και οι βοσκότοποι. Οι τιμές αυτές των κλίσεων παρατηρούνται σε όλη την έκταση της λεκάνης, σε υψόμετρα μέχρι τα 300 μέτρα περίπου, όπως προκύπτει από τη σύγκριση του σχήματος 33, με τον χάρτη των υψομέτρων (Σχ. 19).
- Ένα εξίσου σημαντικό ποσοστό της έκτασης της λεκάνης (25,63%) χαρακτηρίζεται από ένα εύρος κλίσεων 35° – 55°. Οι τιμές αυτές, δείχνουν ένα απόκρημνο ανάγλυφο, όπου παρουσιάζει ένα πολύ λεπτό ασυνεχές στρώμα εδάφους, και έντονη απογύμνωση του μητρικού πετρώματος. Οι τιμές αυτές κατανέμονται επίσης σε όλη την έκταση της λεκάνης, αλλά παρατηρούνται στα μεγαλύτερα υψόμετρα, μεταξύ 250 και 600 μέτρων περίπου (Σχ. 19).
- Οι μεγαλύτερες τιμές κλίσεων, >55°, παρατηρούνται στο νότιο και βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης και καταλαμβάνουν σημαντικά ποσοστά έκτασης (18,12%). Συγκεκριμένα, εντοπίζονται στις νοτιοανατολικές και νοτιότερες πλευρές της λεκάνης καθώς και στον ορεινό όγκο βορειανατολικά του Αχλαδοχωρίου, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι περιοχές αυτές έχουν υποστεί έντονη απογύμνωση και παρουσιάζουν ένα απόκρημνο, έως κάθετο ανάγλυφο. Παρατηρούνται σε υψόμετρο > των 600 μέτρων (Σχ. 19).
- Ένα σημαντικό ποσοστό της έκτασης της λεκάνης (16,22%) χαρακτηρίζεται από κλίσεις αναγλύφου που κυμαίνονται μεταξύ 5° έως 15°. Τέτοιες κλίσεις, φανερώνουν ένα ισχυρά κεκλιμένο ανάγλυφο, όπου λαμβάνουν χώρα κινήσεις μαζών, ισχυρή διάβρωση τύπου καλύμματος και αυλακωτή διάβρωση. Στο εύρος αυτό των κλίσεων παρατηρούνται σημαντικές δυσκολίες στην κατασκευή υποδομών, καθώς και στο όργωμα των εκτάσεων. Οι τιμές αυτές των κλίσεων παρατηρούνται σε όλη την έκταση της λεκάνης, σε υψόμετρα μέχρι τα 250 μέτρα περίπου όπως

προκύπτει από τη σύγκριση του σχήματος 33, με τον χάρτη των υψομέτρων (βλ. Σχ. 32). Είναι χαρακτηριστική η απουσία τους από την πόλγη του Αχλαδοχωρίου, γεγονός που υποδηλώνει το νεαρό της ηλικίας της.

◆ Οι χαμηλότερες τιμές των κλίσεων, από 0° έως 2°, καθώς και από 2° έως 5°, που δείχνουν ένα επίπεδο, έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο, αντιστοιχούν στα πλημμυρικά πεδία και σε επιφάνειες επιπέδωσης. Παρατηρούνται στις πεδινές περιοχές, του ΔΝΔ τμήματος της λεκάνης, σε υψόμετρα έως 150 μέτρων, καθώς και στην πόλγη του Αχλαδοχωρίου, σε ένα υψόμετρο 520 – 600 μέτρων. Μεγάλη εξάπλωση εμφανίζουν οι τιμές από 2° έως 5° κυρίως στον ορεινό όγκο της Βροντούς, σε διαδοχικά υψόμετρα μάλιστα, υποδηλώνοντας ξεκάθαρα τις επιμέρους θέσεις των επιφανειών επιπέδωσης. Το γεγονός αυτό συνιστά ενδεικτικό στοιχείο της ηπιότερης μορφολογίας της νότιας πλευράς της λεκάνης.

Από όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα, μπορεί να γίνει αντιληπτό, ότι οι κλίσεις των πρανών που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν μία ιδιαίτερη γεωγραφική κατανομή στην επιφάνεια της λεκάνης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί κατά ένα βαθμό, στην επίδραση της λιθολογίας. Έτσι οι περιοχές, στις οποίες επικρατούν τα καρστικοποιημένα ασβεστολιθικά και δολομιτικά μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι (Β και ΒΑ τμήμα της λεκάνης), χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές κλίσεων αναγλύφου, καθώς και από πολύ χαμηλές, που ανταποκρίνονται σε καρστικά επίπεδα (πόλγη Αχλαδοχωρίου). Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, που εντοπίζονται τα πιο επιδεικτικά στη διάβρωση πετρώματα (νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα), παρατηρούνται και οι μικρότερες κλίσεις του αναγλύφου. Από την άλλη, στο νότιο τμήμα της λεκάνης, που εντοπίζονται επίσης επιδεικτικά στη διάβρωση πετρώματα (γρανίτες, μονζονίτες), έχουμε τιμές κλίσεων που ανήκουν σε όλο το φάσμα των παραπάνω κατηγοριών, προσδίδοντας έτσι ένα υψηλό ανάγλυφο στην περιοχή με πιο ήπια χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το ανάγλυφο του BBA τμήματος της λεκάνης.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονιστεί και ο ρόλος που διαδραματίζει το είδος, αλλά και η κατανομή της βλάστησης στην επιφάνεια της λεκάνης. Όπως είναι γνωστό, η πυκνή βλάστηση μπορεί, ως ένα ποσοστό, να περιορίσει τις έντονες διαβρωτικές διεργασίες που οφείλονται στη δράση του νερού και του ανέμου, επιτρέποντας τη βραδεία κατείσδυση των υδάτων της βροχής, ενώ ταυτόχρονα μειώνει την επιφανειακή απορροή. Το είδος της βλάστησης διαφοροποιείται σημαντικά στο νότιο τμήμα της λεκάνης από το βόρειο και κεντρικό τμήμα. Το βόρειο τμήμα παρουσιάζει ένα υποτυπώδες είδος βλάστησης (κυρίως βοσκότοποι και εκτάσεις αραιής βλάστησης), γεγονός που ευνοεί την έντονη διάβρωση και απογύμνωση των μητρικών πετρωμάτων και τη δημιουργία ενός έντονου αναγλύφου, με μεγάλες μορφολογικές κλίσεις.

Γενικώτερα παρατηρήθηκε ότι:

- Το ανάγλυφο της επιφανειακής εμφάνισης του γρανιτικού (όρη Βροντούς) και ασβεστολιθικού (Όρβηλος) υποβάθρου, στην νότια και βόρεια πλευρά της λεκάνης αντίστοιχα, παρουσιάζει γενικές κλίσεις εδάφους με τιμές >55°.
- Ομαδοποιώντας τις επιμέρους τιμές των γενικών κλίσεων εδάφους του αναγλύφου της λεκάνης Σιδηροκάστρου, η έρευνα κατέληξε ότι:
  - υψηλές περιοχές του, θεωρούνται αυτές που έχουν το κατώτερο όριο τους σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 400m (ή >300m ή και >200m, σε ορισμένες περιοχές) και στην μεν βόρεια πλευρά οι τιμές γενικών κλίσεων εδάφους είναι >55°, στην δε νότια πλευρά οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται από 35 έως > 55°.
  - μέσες περιοχές του, είναι αυτές των οποίων το ανώτερο όριο είναι ≤400m και το κατώτερο 80m (ή 100m κατά περιοχές). Οι τιμές των γενικών κλίσεων εδάφους κυμαίνονται, από 5 έως 35° και σε ορισμένες περιπτώσεις ≥55°.
  - χαμηλές περιοχές του, είναι αυτές των οποίων το ανώτερο όριο έχει υψόμετρο 80m (ή 100m) και τιμές γενικών κλίσεων εδάφους από 0 - 5°.

Η μεγάλη ποικιλία τιμών κλίσεων στην μέση και χαμηλή περιοχή, της βόρειας πλευράς της λεκάνης, είναι αποτέλεσμα αφενός των ανυψωτικών κινήσεων και της διαρκούς ανανέωσης του αναγλύφου της, αφετέρου των καθοδικών κινήσεων και της δημιουργίας χώρων απόθεσης υλικών. Οι κινήσεις αυτές φαίνεται ότι δρούν ακόμη και σήμερα. Αντίθετα στην νότια πλευρά φαίνεται να είναι λιγότερο έντονες οι καταστάσεις.

#### 5.1.4. Υδρογραφία

#### 5.1.4.1. Γενικά

Το νερό που ρέει στην επιφάνεια μιας υδρολογικής λεκάνης συγκεντρώνεται σε κοίτες ροής και σχηματίζει ένα δίκτυο αυλακώσεων, ρεμάτων και χειμάρρων, πλευρικών κλάδων του ποταμού, του οποίου την λεκάνη αποστραγγίζουν. Το σύνολο αυτών σχηματίζει ένα υδρογραφικό δίκτυο.

# Από μορφολογική άποψη ένα υδρογραφικό δίκτυο με ομαλή ανάπτυξη έχει τη μορφή ενός δένδρου με κορμό και πλευρικά κλαδιά.

Η μορφή του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι (Ψιλοβίκος 1977):

- η λιθολογική και εδαφολογική σύσταση του σχηματισμού που διαρρέει το δίκτυο,
- η γεωλογική και τεκτονική δομή της λεκάνης,
- η συγκρότηση του επιφανειακού ανάγλυφου και των επιφανειακών κλίσεων,
- οι κλιματικές συνθήκες
- η ηλικία της λεκάνης σε σχέση με τις εξελικτικές φυσικές διεργασίες της περιοχής.
- και οπωσδήποτε οι ανθρώπινες παρεμβάσεις και δραστηριότητες.

Ο συνδυασμός όλων των παραγόντων οδηγεί σε μεγάλη ποικιλία μορφών δικτύων, των οποίων η διερεύνηση από μόνη της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα. Οποιαδήποτε μεταβολή ενός ή περισσοτέρων παραγόντων επηρεάζει την ροή του νερού, την ανάπτυξη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και του εμβαδού ή του μήκους των λεκανών απορροής.

Επομένως, ο προσδιορισμός των αποκλίσεων από μία κατάσταση ισορροπίας του υδρογραφικού δικτύου, θα δείξει ποίοι παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την διαταραχή της ισορροπίας αυτού.

Η μελέτη των δικτύων είναι πολύ σημαντική και χρήσιμη για την ερμηνεία των γεωμορφών. Η εξέταση και η ανάλυσή τους συχνά εφαρμόζεται στην πράξη για την αναγνώριση των δομικών και λιθολογικών στοιχείων από τα οποία ελέγχεται η εξέλιξη των γεωμορφών (Παπαπέτρου–Ζαμάνη, 1993).

# 5.1.4.2. Μεθοδολογία έρευνας - ανάλυσης του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη

Προϋπόθεση της ποσοτικής ανάλυσης ενός υδρογραφικού συστήματος είναι η μέτρηση ορισμένων μορφομετρικών ιδιοτήτων του και ο υπολογισμός των αντίστοιχων μορφομετρικών παραμέτρων τους, ώστε να ακολουθήσει η στατιστική επεξεργασία τους και να προσδιοριστούν οι θετικές ή αρνητικές αποκλίσεις τους από τις τιμές που αντιπροσωπεύουν ένα ιδανικά αναπτυσσόμενο υδρογραφικό δίκτυο.

Ως εκ τούτου, η ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Αχλαδίτη στην λεκάνη Σιδηροκάστρου, περιλαμβάνει μετρήσεις, υπολογισμούς και επεξεργασία των μορφομετρικών εκείνων ιδιοτήτων και παραμέτρων, που κρίθηκαν απαραίτητες για την εξαγωγή συμπερασμάτων και αφορούν την εξέλιξη του. Με βάση τα προαναφερόμενα, ολόκληρο το υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης, με όλους τους κλάδους του:

Αποτυπώθηκε σε κλίμακα 1:100.000 (για την μελέτη) & 1:250.000 (για την παρουσίαση).

Ως βασικό τοπικό επίπεδο της κύριας κοίτης καθορίστηκε η τεχνητή κοίτη ποταμού
Στρυμόνα.

 Επίσης χαράχθηκε η υδροκριτική γραμμή της υπό μελέτη λεκάνης απορροής, στον παραπάνω χάρτη.

Με τη βοήθεια των Γ.Σ.Π., μετρήθηκαν η έκταση (Au) της λεκάνης απορροής.

• Μετρήθηκαν επίσης, τα υψόμετρα των ακραίων τμημάτων της (z & q) κ.ά.

Ακολούθησαν οι υπολογισμοί των εξής μορφομετρικών παραμέτρων: η αναλογία πλάτους – βάθους, ο Μ.Λ. (S.I.) & η μέση αξονική κλίση (Jku) της κοίτης (Lykoudi & Angelaki 2004, Βουβαλίδης 2006).

Η μελέτη ενός υδρογραφικού δικτύου περιλαμβάνει τόσο την ποιοτική, όσο και την ποσοτική ανάλυσή του. Η ποιοτική ανάλυση πραγματοποιείται με τον καθορισμό της μορφής του δικτύου, η οποία μπορεί να είναι το συνδυασμένο αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων, όπως γεωλογικών, τεκτονικών, κλιματολογικών κ.α. Η ποσοτική ανάλυση, συντελείται με τον καθορισμό ορισμένων μορφομετρικών παραμέτρων του υδρογραφικού δικτύου, που μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την υδρολογική συμπεριφορά του.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά πραγματοποιήθηκε η ψηφιοποίηση των κλάδων συνολικά της λεκάνης απορροής του υδρογραφικού δικτύου, με τη βοήθεια του προγράμματος MapInfo 6.5. Η ψηφιοποίηση έγινε στους τοπογραφικούς χάρτες της Γ.Υ.Σ, της ευρύτερης περιοχής μελέτης, κλίμακας 1:50.000.

Στη συνέχεια καθορίστηκε η μορφή του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτή απεικονίζεται στους παραπάνω τοπογραφικούς χάρτες και έπειτα υπολογίστηκαν μορφομετρικές παράμετροι για τον κύριο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου.

5.1.4.3. Ποιοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου

#### Μορφή υδρογραφικού δικτύου

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 21, αποτελείται από αυτόνομες μονάδες, που αποστραγγίζουν τμήματα της επιφάνειας αυτής καταλήγοντας στη ευρύτερη λεκάνη του Στρυμόνα. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός, ότι η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου δεν συντελείται ομοιόμορφα στο σύνολο της λεκάνης. Οι λεκάνες που αποστραγγίζουν το Ν, Α και ΝΑ τμήμα της λεκάνης είναι πιο αναπτυγμένες, με πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο, σε σύγκριση με τις λεκάνες του Β και του ΒΑ τμήματος, όπου παρατηρούνται λεκάνες με αραιή ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου (βλ. Σχ. 21).

Στη μεγαλύτερη έκταση του το υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζει παράλληλη μορφή, γεγονός που υποδεικνύει ένα υψηλό ανάγλυφο, με μεγάλες μορφολογικές κλίσεις. Η συγκεκριμένη μορφή πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι το δίκτυο ελέγχεται από την τεκτονική δομή της περιοχής.

Ιδιαίτερα όμως στο νότιο τμήμα της λεκάνης εμφανίζεται ένας δευτερεύων χαρακτήρας του δικτύου, που χαρακτηρίζεται ως δενδριτικός (υποδενδριτική μορφή, με την ακανόνιστη διακλάδωση των παραποτάμων προς διάφορες κατευθύνσεις, από Αστάρα Θ. 1980), Η μορφή αυτή ευνοείται κυρίως στο συγκεκριμένο τμήμα της λεκάνης, όπου το ανάγλυφο είναι πιο ομαλό από το βόρειο καθώς και από την λιθολογία, η οποία ευνοεί την επιφανειακή απορροή και επιτρέπει την ομοιόμορφη ανάπτυξη των κλάδων του δικτύου.

Χαρακτηριστική επίσης είναι και η κεντρομόλος μορφή του δικτύου, όπου τα ρέματα συγκλίνουν προς μία ταπείνωση της επιφάνειας. Η μορφή αυτή παρουσιάζεται στις περιοχές εκείνες της λεκάνης (B/BA αυτής) που εντοπίζεται το καρστικό βύθισμα (πόλγη) του Αχλαδοχωρίου.

Τα υδρογραφικό δίκτυο στο σύνολο του παρουσιάζει περιοδική ροή. Εξαίρεση αποτελεί το ρέμα Κυδωνιές, που περνά δίπλα από το Αχλαδοχώρι, στο BA τμήμα της λεκάνης, το οποίο εμφανίζει μόνιμη ροή σε απόσταση περίπου 8,5 Km. Επίσης, μόνιμη ροή, παρατηρείται στα ρέματα που περνούν κοντά από το Καρυδοχώρι (Γατόρεμα και Φλαμούρι ρέμα), σε απόσταση περίπου 4 και 3 Km αντίστοιχα, στο ANA τμήμα της λεκάνης και τα οποία ουσιαστικά τροφοδοτούν τον Αχλαδίτη ποταμό. Ακόμη μόνιμη ροή σε σημαντικό μήκος (12,2 Km) συναντάμε και στο Μαύρο ρέμα στο ΝΔ και Ν τμήμα, το οποίο αποστραγγίζει το μεγαλύτερο τμήμα των ορέων της Βροντούς.



Σχήμα 21.: Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης Σιδηροκάστρου.

#### 5.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ

#### 5.2.1. Γεωμετρικοί παράγοντες απόθεσης

Πέρα από την ύπαρξη κορεσμένων υδάτων σε CaCO<sub>3</sub>, απαιτείται και η ικανοποίηση δυο γεωμετρικών συνθηκών για την ανάπτυξη και την διατήρηση των τραβερτινικών γεφυρών. <u>Πρώτον η γέφυρα πρέπει να τοποθετείται τοπογραφικά υψηλότερα από το</u> αντίστοιχο ύψος της κοίτης των ποταμών – που συνεπάγεται την δημιουργία υδατοπτώσεων - και δεύτερον το πλάτος της κοίτης πρέπει να είναι μικρό έτσι ώστε η πλευρική ανάπτυξη της τραβερτινικής γέφυρας να μπορεί να επικαλύψει το δεδομένο εύρος της κοίτης.

Για να μπορέσει να ικανοποιηθεί η πρώτη γεωμετρική συνθήκη είναι γεγονός ότι ο ρυθμός ταπείνωσης του καρστικού επιπέδου πρέπει να είναι πολύ χαμηλότερος από τον ρυθμό διάβρωσης της κοίτης. Αυτό κυρίως μπορεί να αποδοθεί στην παύση τροφοδοσίας του υπόγειου νερού κατά την διάρκεια των Πλειστοκαινικών παγετώνων για υψόμετρα μεγαλύτερα από 1500m. Κατά την διάρκεια των παγετώνων αυτών η παροχή CO<sub>2</sub> από το έδαφος μειώνεται δραστικά όπως και η παροχή σε νερό αφού αυτό δεσμεύεται υπό μορφή πάγου με άμεση συνέπεια την σημαντική μείωση στην απόθεση υλικών αν όχι και στην πλήρη παύση του φαινομένου (Baker et al., 1993). Από τα γεγονότα αυτά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν σημειώνεται ιδιαίτερη κυκλοφορία νερού και κατά συνέπεια απόθεση υλικών κατά την περίοδο αυτή. Παρόλα αυτά όμως η ποτάμια διάβρωση συνεχίζεται κανονικά για υψόμετρα χαμηλότερα των 1500m εξαιτίας και της μερικής τήξης πάγου που λαμβάνει στα μέτωπα και την βάση των παγετώνων η οποία είναι αρκετή για να διατηρήσει τα φαινόμενα της ποτάμιας διάβρωσης φυσικά.

Όσον αφορά τη δεύτερη συνθήκη, εάν τυχόν δεν ικανοποιείται αρχικά θα μειωθεί σε κάποιο βαθμό η απόθεση υλικού με απώτερη συνέπεια την κατάρρευση του όλου σχηματισμού, ιδιαίτερα κατά την εκδήλωση πλημμυρικών επεισοδίων. Η μέγιστη πλευρική επέκταση των σχηματισμών αυτών ουσιαστικά καθορίζεται από την διατμητική αντοχή (σ<sub>t</sub>) που αναπτύσσουν. Όταν λοιπόν το φορτίο του τραβερτίνη είναι μεγαλύτερο από την τιμή της σ<sub>t</sub> επόμενο είναι ο σχηματισμός να υποστεί διάρρηξη και να πέσει μέσα στην κοίτη, ιδιαίτερα όταν δεν υποστηρίζεται στην βάση του ή από το απέναντι άκρο της κοίτης. <u>Η μέγιστη πλευρική επέκταση που μπορεί να έχει μια</u> συγκεκριμένη απόθεση μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια ενός ογκομετρικού αριθμητικού μοντέλου. Το μοντέλο αυτό αφορά το σχήμα μιας πυραμίδας, η οποία έχει κοπεί διαγώνια στην τετράγωνη βάση της και η οποία θεωρείται ότι είναι η πιο σταθερή κατασκευή για την περίπτωση της πλευρικής ανάπτυξης. Ο όγκος V (σε m<sup>3</sup>) και το εμβαδόν βάσης A (σε m<sup>2</sup>) του ογκομετρικού στοιχείου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις (βλ. Εικ. 13):

$$V = 0,220*L^3*n$$
  
A = 0,667\* L<sup>2</sup>\*n

Όπου L (σε m) είναι το μήκος της πλευρικής ανάπτυξης κατά πλάτος του κυρίου ρέματος και n (αδιάστατο) είναι το πορώδες.

Έπειτα η αναλογία της μάζας προς το εμβαδόν (V\* $\rho$ /A) μπορεί να συσχετιστεί με την πλευρική ανάπτυξη με την παρακάτω σχέση: **0,330**\*L όπου ρ είναι η πυκνότητα του τραβερτίνη (σε Kg/m<sup>3</sup>).



Εικόνα 13.: Ογκομετρικό αριθμητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πλευρικής επέκτασης (α) στάδια ανάπτυξης της πυραμίδας (β) σχέση ανάμεσα στην πλευρική ανάπτυξη και την διατμητική τάση (από Bayari 2002).

<u>Η διατμητική αντοχή του τραβερτίνη εξαρτάται από την υφή και τον βαθμό διαγένεσης</u> αυτού. Στην περίπτωση ασβεστολιθικών τόφφων από ψυχρά νερά, εγκλείσματα από ζύλα ενισχύουν τον βαθμό διαγένεσης άρα και την διατμητική αντοχή. Αντίθετα οι πορώδεις γενικά ασβεστολιθικοί τόφφοι, έχουν πολύ μικρότερες τιμές αντοχής.

Για έναν τραβερτίνη σχετικά μέσης πυκνότητας (ρ = 2,5g/cm<sup>3</sup>), η υπολογιζόμενη βάσει του αριθμητικού μοντέλου πλευρική ανάπτυξη L ποικίλλει μεταξύ των τιμών 5 –

15m για πορώδεις και πιο συνεκτικούς τραβερτίνες αντίστοιχα. Παλαιότερες αποθέσεις με την ίδια πυκνότητα μπορεί να δώσει L = 25m. Προφανώς οι τιμές του L θα είναι μικρότερες για τραβερτίνες με μεγαλύτερη πυκνότητα, λόγω της μεγαλύτερης μάζας της βάσης άρα και βάρους αυτής. Το μοντέλο αυτό επίσης προϋποθέτει ότι το ύψος H από την θέση των αποθέσεων μέχρι την επιφάνεια του ρέματος αντιστοιχεί ουσιαστικά στην μέγιστη τιμή της πλευρικής επέκτασης (δηλ. L $\leq$ H).

Τα διάφορα τεμάχη τραβερτινών που συνήθως πέφτουν μέσα στην κοίτη είτε λόγω βάρους είτε λόγω της διαβρωτικής δράσης του ρέματος, πολλές φορές βοηθούν στον σχηματισμό των τραβερτινικών γεφυρών παρέχοντας είτε μηχανική υποστήριξη είτε προστατεύοντας τον σχηματισμό από την περαιτέρω διάβρωση.

Το όλο μοντέλο αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι η διατμητική αντοχή των τραβερτινικών αποθέσεων αυξάνει με την αύξηση της ηλικίας απόθεσης αυτών εξαιτίας των διεργασιών διαγένεσης και της δευτερεύουσας καταβύθισης ασβεστίτη στο πρωτογενές πορώδες.

#### 5.2.2. Φυσικοί παράγοντες απόθεσης

Η απόθεση ασβεστολιθικών τόφφων από την παρουσία και δράση καταρρακτών συμβαίνει σε όλα τα μέρη του πλανήτη και ιδιαίτερα σε τροπικές και υποτροπικές καρστικές περιοχές. Σε αυτές τις τελευταίες τα νερά των ποταμών είναι γενικά κορεσμένα ως προς CaCO<sub>3</sub> και η απόθεση αυτού σημειώνεται κυρίως στις θέσεις των καταρρακτών και γενικά των κατακόρυφων πτώσεων που κάνουν τα ποτάμια αυτά κατά μήκος της κοίτης τους. Η ανάπτυξη τέτοιων αποθέσεων θεωρείται με απλά λόγια ότι οφείλεται στην στροβιλώδη κίνηση του νερού στις παραπάνω θέσεις. Παρόλο το γεγονός αυτό που ασφαλώς υφίσταται, θεωρούμε ότι κυρίως τρεις φυσικοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση των παραπάνω αποθέσεων στα συγκεκριμένα σημεία της κοίτης (Zhang et al., 2000):

#### 1. Ο έντονος αερισμός των υδάτων αυτών στις θέσεις των καταρρακτών

- 2. Οι πολύ μεγάλες τιμές ταχυτήτων ροής των υδάτων και
- Τα φαινόμενα χαμηλών πιέσεων που σημειώνονται κατά κόρον στις θέσεις αυτές.

Οι τρεις αυτοί κύριοι παράγοντες ουσιαστικά ελέγχονται από δύο σημαντικές αλλαγές που προαπαιτούνται να συμβούν στα νερά των ποταμών για να οδηγηθούμε στην απόθεση των συγκεκριμένων τόφφων (βλ. Σχ. 22):

- Μια γενικά επιταχυνόμενη κίνηση των υδάτων (στροβιλισμός) και
- Μια αύξηση του μετώπου επιφανείας υδάτων και ατμόσφαιρας.

Οι παραπάνω αλλαγές, όταν υλοποιηθούν, προκαλούν μεγάλη αύξηση στον ρυθμό απώλειας CO<sub>2</sub> από τα νερά με συνέπεια σε αυτά να παρατηρούνται πολύ υψηλές τιμές SI<sub>C</sub> άρα να φτάνουμε σε κατάσταση πλέον υπερκορεσμού των υδάτων σε ιόντα Ca<sup>+2</sup>, τα οποία αναγκάζονται να καθιζάνουν ως CaCO<sub>3</sub>, δημιουργώντας βαθμιαία τις συγκεκριμένες αποθέσεις. Εδώ είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι αποθέσεις αυτές δεν παρατηρούνται σε τέτοια έκταση και βαθμό σε άλλες θέσεις της κοίτης των ποταμών αλλά μόνο στις αντίστοιχες των καταρρακτών.

Τέλος, η εξάτμιση μπορεί και αυτή ασφαλώς να οδηγήσει σε υπερκορεσμό τα νερά των ποταμών και να προκαλέσει την καταβύθιση CaCO<sub>3</sub>, γεγονός όμως που παρουσιάζει υπολήψιμα ποσά απόθεσης μόνο στις θέσεις των καταρρακτών όπου εκεί μάλιστα έχουμε τόσο την αύξηση της επιφάνειας επαφής υδάτων – ατμόσφαιρας όσο και την στροβιλώδη ροή που ευνοούν την έκλυση σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub>.





#### 5.2.3. Υδροχημικοί παράγοντες απόθεσης

Στην κεντρική Ευρώπη υπάρχουν σημαντικά αποθέματα από πορώδεις βράχους (τραβερτίνες) που περιέχουν ασβέστιο τα οποία εντοπίζονται σε συγκεκριμένα σημεία σαν γεμίσματα κοιλάδας, τα οποία συνεχίζουν να σχηματίζονται ακόμη και σήμερα, όμως με πολύ πιο αργούς ρυθμούς από ότι στο παρελθόν λόγω κυρίως της αλλαγής των ιδιαίτερων κλιματικών συνθηκών σε τοπική κλίμακα ασφαλώς αλλά και λόγω της δράσης του ανθρώπινου παράγοντα. <u>Μια τόσο έντονη εναπόθεση είναι μονάχα δυνατόν να συμβεί κατά την διάρκεια θερμών και υγρών περιόδων, όταν η μεγάλη βιολογική δραστηριότητα συμπίπτει με τον αυζημένο ρυθμό αντίδρασης στο σύστημα CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub> (Bogli 1980).</u>

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το παραπάνω σύστημα είναι συνυφασμένος σε απόλυτο βαθμό με την όποια μεταβολή των φυσικοχημικών συνθηκών που με την σειρά της προκαλεί την διαφυγή του CO<sub>2</sub> και την καθίζηση του CaCO<sub>3</sub> και των άλλων αλάτων σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Η μεταβολή των φυσικοχημικών συνθηκών μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια (π.χ. αλλαγή θερμοκρασίας, πίεσης κ.α.).

Οι αιτίες στις οποίες αποδίδεται η παραπάνω αλλαγή για την έναρξη των διαδικασιών απόθεσης, εκτός από τις αναφερόμεμες παραπάνω, συνιστούν επίσης η ανατάραξη των υδάτων, ο αερισμός αυτών και πολλές φορές ο στροβιλισμός των υδάτων στις θέσεις των καταρρακτών (Zhang et al., 2000).

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύεται ο μηχανισμός της απόθεσης των ανθρακικών αλάτων και περιγράφεται πλήρως (σε στάδια) ο τρόπος με τον οποίο συντελείται η απόθεση.

#### 5.2.3.1. Περιγραφή μηχανισμού

Τα ανθρακικά άλατα αποτίθενται μέσω αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην διεπιφάνεια υγρού/στερεού μέσου και αφορούν το σύστημα MeCO<sub>3</sub> - CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O όπου Me = Ca, Mg. Η ισορροπία του συστήματος αυτού περιγράφεται από πλήθος χημικών εξισώσεων και επιμέρους ισορροπιών που βοηθούν στην περαιτέρω φυσική του λειτουργία. <u>Κάθε αλλαγή που σημειώνεται στην θερμοκρασία ή την συγκέντρωση οποιουδήποτε ιόντος του συστήματος (ή συνιστώσας αυτού) προκαλεί μεταβολή στην συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην διεπιφάνεια υγρού/στερεού με άμεση συνέπεια την αυτορύθμιση όλου του συστήματος. Ειδικότερα, σε ένα τέτοιο σύστημα που βρίσκεται αρχικά σε ισορροπία, εάν σημειωθεί απώλεια CO<sub>2</sub> επέρχεται κορεσμός του διαλύματος</u>

<u>σε Ca<sup>+2</sup> και τελικά έχουμε απόθεση CaCO<sub>3</sub>, ώστε το σύστημα να επέλθει σε νέα</u> ισορροπία.

Τα πειράματα του Roque (1964) έχουν δείξει ότι υφίσταται μια μετασταθής κατάσταση όσον αφορά την γενική παρατήρηση υπερκορεμένων διαλυμάτων στην φύση (Thrailkil, 1968). Ειδικότερα στοιχειοθετείται από τα πειράματα αυτά ότι όσο πιο μικρό είναι το ποσό υπερβολής ιόντων  $Ca^{+2}$  και  $CO_3^{-2}$  από τα όρια που αντέχει ένα διάλυμα κάτω από σταθερές πάντοτε συνθήκες τόσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια παραμονής της μετασταθούς αυτής κατάστασης ( από Bogli, 1980).

Πρακτικά, όταν και η θερμοκρασία του συστήματος είναι σταθερή, μόνο η οποιαδήποτε μεταβολή στην pCO<sub>2</sub> είναι ο κυριότερος παράγοντας που μπορεί να ανατρέψει την επιθυμητή ισορροπία με άμεση συνέπεια την καταβύθιση ιζήματος ή την περαιτέρω διάβρωση υλικού. Η γενική αντίδραση είναι η εξής:

#### $Ca^{+2} + 2HCO_3 \Rightarrow CO_2 + H_2O + CaCO_3 \downarrow$

Οι απώλειες CO<sub>2</sub> είναι δυνατόν να γίνουν μόνο σε συνθήκες αερισμού (με κάποιο τρόπο επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα ή δημιουργείται εάν είναι δυνατόν) και ιδιαίτερα μόνο όταν η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στο νερό είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση που υπαγορεύεται από την pCO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Εάν οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται τότε σημειώνεται κορεσμός του διαλύματος σε Ca<sup>+2</sup> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> και μετά το πέρας της μετασταθούς κατάστασης πραγματοποιείται η απόθεση CaCO<sub>3</sub>. Εκτός από τα παραπάνω, οι φυτικοί οργανισμοί που φωτοσυνθέτουν απορροφούν σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> από τα νερά και μάλιστα σε μεγαλύτερη αναλογία από το αντίστοιχο της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό οδηγεί άμεσα στην καταβύθιση ασβεστίτη. <u>Η τελευταία γίνεται πολύ γρήγορα και για αυτό άλλωστε εμφανίζει πορώδη</u> χαρακτήρα, σχηματίζοντας εύθρυπτα ιζήματα τα οποία μάλιστα περιέχουν πολυάριθμα κομμάτια (τεμάχη) φυτικά. Με τους τρόπους αυτούς λοιπόν καταλήγουμε στην δημιουργία των ασβεστολιθικών τόφφων.

Αλλαγές στην θερμοκρασία μπορούν επίσης να διαταράξουν την ισορροπία του συστήματος. Ειδικότερα, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε κορεσμό του διαλύματος με συνέπεια φυσικά την καταβύθιση ιζήματος. Όπου ρέει ψυχρό νερό (T < 16°C) είτε σε πηγές είτε στις εισόδους των σπηλαίων οι οποίες θερμαίνονται ισχυρά κατά την θερινή περίοδο προκαλείται σε σημαντική έκταση απόθεση ασβεστολιθικών τόφφων.

Η εξάτμιση των διαλυμάτων μπορεί επίσης να προκαλέσει την απόθεση ανθρακικών υλικών, λόγω του περιορισμού του όγκου του εκάστοτε διαλύματος με άμεση συνέπεια την αύξηση της συγκέντρωσης των συγκεκριμένων κατιόντων άρα οδηγούμαστε σε

κορεσμό του διαλύματος και απόθεση ανθρακικών αλάτων. <u>Εδώ φυσικά έχουμε</u> απόθεση ασβεστίτη όχι όμως με την μορφή ασβεστολιθικού τόφφου απαραίτητα (προϋποθέτει την παρουσία φυτικών ειδών).

Οι κυριότερες αιτίες όμως αφορούν αλλαγές στην πίεση του συστήματος που μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή φάσης, είτε με βρασμό (εκτόνωση), είτε με απελευθέρωση των διαλυμένων αερίων. <u>Με το βρασμό και το διαχωρισμό της αέριας</u> φάσης μειώνεται ο όγκος της υγρής φάσης και η θερμοκρασία της, με συνέπεια την ταυτόχρονη αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων στερεών και τη μείωση της διαλυτότητας των αλάτων με ομαλή διαλυτότητα. Από την άλλη μεριά, η μερική ή ολική απελευθέρωση των διαλυμένων αερίων αερίων (κυρίως του CO<sub>2</sub>) από το υγρό, με βρασμό ή χωρίς βρασμό, μπορεί να επιδράσει δραστικά στο pH του υγρού και επιθράσει δραστικά στο pH του υγρού και



Σχήμα 23.: Διαλυτότητα του CaCO<sub>3</sub> ως συνάρτηση του pH και της πίεσης του CO<sub>2</sub>, η οποία ελέγχει το pH του συστήματος (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

5.2.3.2. Μηχανισμός σχηματισμού ανθρακικων ορυκτών φάσεων

Στις γεωγραφικές περιοχές όπου το μετεωρικό νερό έρχεται σε άμεση επαφή με το υπόγειο και στην συνέχεια το μείγμα αυτό υδάτων ρέει πάνω σε ανθρακικά πετρώματα, σημειώνονται φαινόμενα χημικής αποσάθρωσης. Στα φαινόμενα αυτά είναι δυνατόν να

οφείλεται και η ποσοτική συμμετοχή ανθρακικών και όξινων ανθρακικών αλάτων στα φυσικά νερά σε ποσοστό μέχρι και 50%. Σε νερά που διαρρέουν μη καρστικές περιοχές τα παραπάνω άλατα προέρχονται σχεδόν εξολοκλήρου από την ατμόσφαιρα και το CO<sub>2</sub> του εδάφους. Οι συγκεντρώσεις Ca<sup>+2</sup> σε φυσικά νερά μη καρστικών περιοχών σπάνια ξεπερνούν τα 15mg/l. Αντίθετα σε καρστικές περιοχές η αντίστοιχη συγκέντρωση κυμαίνεται από 30 – 100mg/l. Σε φρέσκα νερά οι συγκεντρώσεις ióντων Mg<sup>+2</sup> κυμαίνονται από 1 έως > από 100 mg/l (Dilsiz et al., 2004).

Τόσο η ανθρακική  $(CO_3^{-2})$  όσο και η όξινη ανθρακική ρίζα  $(HCO_3^{-})$  προέρχονται από την άμεση διάλυση του ανθρακικού οξέος  $(H_2CO_3)$ , το οποίο σχηματίζεται σε μικρά ποσά φυσικά κατά την εισαγωγή και διάλυση  $CO_2$  μέσα στο υδατικό διάλυμα.

Τα ανθρακικά άλατα σχηματίζονται μόλις το  $H^+$  της όξινης ανθρακικής ρίζας αντικατασταθεί ακόμα και σε ποσοστό 50% από κάποιο μέταλλο. Ειδικότερα οι συγκεντρώσεις των ιόντων CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> αλλά και του H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> εξαρτώνται ισχυρά από το pH του διαλύματος (βλ. Παράρτημα B). Κατά την διάρκεια των φαινομένων της χημικής αποσάθρωσης όπου κυριαρχούν προφανώς τα όξινου χαρακτήρα διαλύματα έχουμε σαφέστατη επικράτηση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Οι συγκεντρώσεις μάλιστα αυτού στα επιφανειακά νερά δεν ξεπερνούν τις τιμές των 500mg/l. Αντίθετα οι συγκεντρώσεις των ανθρακικών ιόντων είναι εξαιρετικά χαμηλές στα νερά αυτά και για pH ασφαλώς όξινο, με εξαίρεση τα υπόγεια νερά όπου εκεί οι συγκεντρώσεις τους είναι κάπως υψηλότερες δεδομένου ότι το pH των υδάτων αυτών είναι πιο αλκαλικό.

Ο σχηματισμός του ασβεστίτη (CaCO<sub>3</sub>) ακολουθεί κάποια στάδια προτού εκδηλωθεί. Το πρώτο αφορά την περίοδο εισαγωγής στο διάλυμα η οποία ουσιαστικά έχει να κάνει με τον χρόνο που απαιτείται για να ξεκινήσει η απόθεση CaCO<sub>3</sub> στην επιφάνεια απόθεσης. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον βαθμό κορεσμού του διαλύματος, την θερμοκρασία, το pH, την ταχύτητα ροής των υδάτων καθώς και από το υλικό της επιφάνειας απόθεσης (από Φυτικά & Ανδρίτσο 2004).

Καθώς το pH του διαλύματος αυξάνεται επιταχύνεται και ο ρυθμός μετατροπής των ιόντων  $HCO_3^-$  σε ιόντα  $CO_3^{-2}$ , γεγονός που ευνοεί την απόθεση ασβεστίτη ιδίως για το διάστημα pH από 8.8 – 10. Επίσης πειράματα που πραγματοποίησε ο Dawson (1990) εξετάζοντας παράλληλα την επίδραση της θερμοκρασίας αλλά και της αύξησης του pH του διαλύματος στον κορεσμό αυτού σε σχέση με το CaCO<sub>3</sub> βρήκε ότι μια αύξηση του pH από την τιμή 7 μέχρι την τιμή 8 προκάλεσε μεγαλύτερη καταβύθιση από την

αντίστοιχη που θα προκαλούσε μια αύξηση της θερμοκρασίας στους 70°C (από Φυτικά & Ανδρίτσο 2004).

Οι Yoshimura et al. (2004), απέδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C ελαττώνει την περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> στο νερό με ρυθμό 1,6 mg/l. Η αύξηση της διαλυτότητας των ανθρακικών πετρωμάτων με την θερμοκρασία λαμβάνει χώρα μέχρι τους 70 - 80°C και μετά ελαττώνεται.

Γενικά η επίδραση της θερμοκρασίας επάνω στα διαλύματα θεωρείται υποδιαίστερη από την αντίστοιχη μεταβολή που προκαλεί η έστω και μικρή αλλαγή της τιμής του pH των διαλυμάτων. Όσον αφορά όμως την καταβύθιση του CaCO<sub>3</sub> η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο αφού αυξάνοντας την αυξάνει και η τάση για την καταβύθιση CaCO<sub>3</sub>. Ιδιαίτερα μάλιστα για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 60°C η τάση αυτή αυξάνεται πλέον εκθετικά.

Σχεδόν όλα τα γεωθερμικά ρευστά περιέχουν διαλυμένες σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub>, το οποίο βρίσκεται με την μορφή CO<sub>2</sub> (aq.) και HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Σύμφωνα με τα πειράματα του Roque (1964) που έχουν γίνει στο εργαστήριο έχει βρεθεί για την περίπτωση όπου η pCO<sub>2</sub> στο διάλυμα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ατμόσφαιρα (συνήθη περίπτωση) ότι με την έκθεση και μόνο ενός τέτοιου διαλύματος (ανεξάρτητα δηλαδή από το πεδίο των θερμοκρασιακών τιμών) συντελείται ένας μετασταθής καταρχήν κορεσμός του διαλύματος λόγως της αυθόρμητης έκλυσης CO<sub>2</sub> (από Bogli 1980). <u>Η</u> απώλεια αυτή ακολουθείται πρώτα από την άμεση απόθεση ασβεστίτη και ακολούθως από την απόθεση βατερίτη που μεταπίπτει σε δευτερογενή αραγωνίτη. Στο στάδιο αυτό λοιπόν δεν έχουμε τον σχηματισμό πρωτογενή αραγωνίτη.

Με την εκτόνωση λοιπόν της αέριας φάσης και την απελευθέρωση CO<sub>2</sub>, συντελούνται τα παρακάτω φαινόμενα (από Φυτίκα & Ανδριτσο 2004):

$$\rm CO_2 (aq) \rightarrow \rm CO_2 \uparrow$$

Η αντίδραση ισορροπίας των ανθρακικών ιόντων:

$$2 \operatorname{HCO}_3 \Leftrightarrow \operatorname{H_2O} + \operatorname{CO}_2 \uparrow + \operatorname{CO}_3$$

μετατοπίζεται προς τα δεξιά, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ανθρακικών ιόντων. Συγχρόνως λόγω μερικής υδρόλυσης των ανθρακικών ιόντων:

$$CO_3^- + H_2O \Leftrightarrow HCO_3^- + OH^-$$

Αυξάνει το pH του διαλύματος. Συνέπεια των παραπάνω είναι να δημιουργηθεί υπερκορεσμός και να καταβυθιστεί ανθρακικό ασβέστιο:

$$Ca^{+2} + CO_3^- \Leftrightarrow CaCO_3 \downarrow$$

Ο βαθμός υπερκορεσμού μπορεί να υπολογισθεί μέσω των εξισώσεων που περιγράφουν την ισορροπία των ανθρακικών στο διάλυμα, του γινομένου διαλυτότητάς και της σύστασης του διαλύματος. Σήμερα υπάρχουν διάφορα λογισμικά προγράμματα (π.χ. WATEQ, EQL/EVP) ακόμη και ελεύθερης διακίνησης, μέσω του διαδικτύου, με τα οποία υπολογίζεται ο βαθμός υπερκορεσμού ενός διαλύματος.

#### 5.2.3.3. Αίτια μηχανισμού απόθεσης

#### 5.2.3.3.1. Η επίδραση της απώλειας CO2

Η ποσότητα του CaCO<sub>3</sub> που θα αποτεθεί από τα νερά της πηγής καθορίζεται από την απόσταση ροής από την θέση της πηγής, από την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και από την μορφολογία της κοίτης και της κοιλάδας του Αχλαδίτη, που αποστραγγίζει άλλωστε τα νερά της πηγής (Βαβλιάκης και Αρβανίτης 1994). Ειδικότερα η μορφολογία της κοίτης και της κοιλάδας του ποταμού (έντονη κατά βάθος διάβρωση, εγκιβωτισμός κοίτης, δημιουργία μετώπων καταρρακτών) καθορίζει την επιφάνεια αντίδρασης της υδάτινης μάζας του με την ατμόσφαιρα και συνεπώς έμμεσα την ταχύτητα διαφυγής του <u>CO<sub>2</sub> από την υδάτινη μάζα προς την ατμόσφαιρα.</u>

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων -όπως αναλύονται εκτενώς σε άλλο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας- των υπόθερμων υδάτων της πηγής διαπιστώθηκε ότι: α) Η περιεκτικότητα του νερού σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> εμφανίζει μια τάση μείωσης με την αύξηση της απόστασης από την υπό μελέτη πηγή β) Η ποσότητα του αποτιθέμενου CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> κατά μήκος της κοίτης του ρέματος που δημιουργεί η πηγή εξαρτάται από την εκάστοτε αρχική περιεκτικότητα σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> του νερού της πηγής γ) Η περιεκτικότητα του νερού σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> ελαττώνεται με την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ατμόσφαιρας και υπόθερμων υδάτων δ) Η ύπαρξη καταρρακτών μειώνει την περιεκτικότητα των υδάτων του ρέματος που δημιουργεί η πηγή σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> εξαιτίας της αύξησης της επιφάνειας αντίδρασης της υδάτινης μάζας με την ατμόσφαιρα στις θέσεις αυτές.

Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση γίνεται κατανοητό, σύμφωνα με όλα όσα έχουμε αναφέρει προηγούμενα, ότι οφείλεται κυρίως στην απώλεια σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub> από τα νερά εξαιτίας ασφαλώς και των βιογενών διεργασιών, δεδομένου ότι οι τελευταίες δεσμεύουν υπολήψιμες ποσότητες CO<sub>2</sub>.

Εξετάζοντας τις διαφορές περιεκτικότητας σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> μεταξύ της αρχικής και της τελικής θέσης δειγματοληψίας στην πορεία του χρόνου διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική τιμή των υδάτων των καρστικών πηγών τόσο μεγαλύτερη ποσότητα CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> αποτίθεται κατά μήκος της κοίτης του ρέματος της πηγής, ανεξάρτητα από την επίδραση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.

Αναφορικά με την τρίτη περίπτωση έχει γίνει προηγούμενως εκτενής λόγος για την επίδραση των θερμοκρασιακών συνθηκών, οι οποίες αναγκάζουν τα νερά να μεταβάλλουν τον χημισμό τους για να έρθουν σε ισορροπία με τις νέες εξωτερικές συνθήκες, γεγονός ασφαλώς που προκαλεί σειρά διεργασιών και αντιδράσεων με τελική συνέπεια την απόθεση των ανθρακικών αλάτων τους.

Ότι πράγματι, η θερμοκρασία δεν είναι ο μόνος ή ότι δεν είναι ο αποφασιστικότερος παράγοντας απόθεσης CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub>, φαίνεται από τις διαφορές των τιμών στις θέσεις που αντιστοιχούν στα σημεία εκδήλωσης καταρρακτών. Οι μεταβολές της περιεκτικότητας του νερού σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> οφείλονται στη μορφολογική διαφορά των θέσεων δειγματοληψίας. <u>Η μείωση της περιεκτικότητας του νερού σε CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> στις θέσεις 2 (ή 1) και 3 της δειγματοληψίας οφείλεται στην αύζηση τη επιφάνειας αντίδρασης της υδάτινης μάζας του ρέματος των υπόθερμων υδάτων με την ατμόσφαιρα εζαιτίας της παρεμβολής των καταρρακτών.</u>

Σύμφωνα με τους Wagner (1954), Stirn (1963) και Gruninger (1969) σε ορισμένους καταρράκτες έχουμε απόθεση CaCO<sub>3</sub> επειδή στις θέσεις αυτές προκαλείται αύξηση της επιφάνειας αντίδρασης της υδάτινης μάζας των ποταμών με την ατμόσφαιρα (από Bogli, 1980).

Η σχετική αύξηση της περιεκτικότητας των ανθρακικών αλάτων που παρατηρείται μετά την πτώση των υδάτων του καταρράκτη είναι πρόσκαιρη και οφείλεται σε διεργασίες και φαινόμενα επαναδιαλυτοποίησης, που συντελούνται πάνω στους παλαιότερους ασβεστολιθικούς τόφφους, μέχρι τα νερά να εισέλθουν στην κοίτη του Αχλαδίτη.

Κατά μήκος της κοίτης του ρέματος των υπόθερμων υδάτων απαντούν μικροί καταρράκτες. Από επιτόπια μελέτη διαπιστώθηκε ότι τόσο τα τοιχώματα των καταρρακτών όσο και οι πυθμένες τους αποτελούνται από σύγχρονους ασβεστολιθικούς τόφφους. Οι τόφοι αυτοί προέκυψαν από την απόθεση CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> πάνω σε προϋπάρχουσες προεξοχές της κοίτης (βλ. Παράρτημα A). Η προοδευτική αύξηση του ύψους των προεξοχών της κοίτης εξαιτίας της συνεχούς απόθεσης των παραπάνω αλάτων πάνω σε αυτές, οδήγησε στο σχηματισμό των προαναφερθέντων καταρρακτών (από Bogli, 1980).

Εφόσον τα νερά συναντήσουν εμπόδια κατά την πορεία τους στην κοίτη (μπλοκ πετρωμάτων, ρίζες δένδρων, θάμνους κλπ), αποθέτουν σε αυτά μέρος των διαλυμένων αλάτων επειδή μειώνεται η ταχύτητα ροής τους. Εξαιτίας της απόθεσης αυτής με την πάροδο του χρόνου μεγαλώνουν οι διαστάσεις των εμποδίων τόσο κατά ύψος όσο και κατά την οριζόντια έννοια. Έτσι σταδιακά δημιουργούνται φράγματα από αποθέσεις ασβεστολιθικών τόφφων. Εφόσον τα φράγματα αποκτήσουν ορισμένο ύψος από τη μια πλευρά τους σχηματίζονται λίμνες και έλη και από την αντίθετη καταρράκτες (από Bogli, 1980).

Σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει προηγούμενα διαπιστώνουμε ότι τα κυριότερα φυσικοχημικά αίτια για την έναρξη των διαδικασιών απόθεσης των ανθρακικών αλάτων είναι η απώλεια CO<sub>2</sub> από την υγρή φάση προς την ατμόσφαιρα με ή χωρίς την συμμετοχή των μεταβολών της θερμοκρασίας, οι ημερήσιες και εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα καθώς επίσης και τα όποια φαινόμενα εξάτμισης που συντελούνται κυρίως στην διεπιφάνεια υγρού και αέριου μέσου που προκαλούνται από την διαφορά θερμοκρασίας αέρα και υπόθερμων υδάτων.

Όσον αφορά τα δύο πρώτα αίτια έχει προηγηθεί εκτενή αναφορά στον τρόπο με τον οποίο επιδρούν πάνω στις φυσικοχημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στα μελετούμενα υδατικά διαλύματα. Για το λόγο αυτό κυρίως γίνεται αμέσως παρακάτω πιο ειδική αναφορά στον τρόπο επίδρασης του φαινομένου της εξάτμισης στις διεργασίες απόθεσης των ανθρακικών αλάτων που σχετίζεται άλλωστε και με τα παραπάνω φαινόμενα στις θέσεις των λιμνών και των καταρρακτών.

#### 5.2.3.3.2. Η επίδραση της εξάτμισης

Αρχικά η εξάτμιση επιφέρει μια αύξηση στη συγκέντρωση και συνάμα ένα κορεσμό του διαλύματος σε  $Ca^{+2}$  καθώς και στο διαλυμένο στο νερό  $CO_2$  γεγονός που προκαλεί περαιτέρω έκλυση  $CO_2$ . Όταν οι συνθήκες είναι σταθερές (θερμοκρασία και υγρασία) ο λόγος της επιφάνειας εξάτμισης (A) προς τον όγκο του διαλύματος (V) προσδιορίζει το συνολικό χρόνο που απαιτείται για την πλήρη εξάτμιση του διαλύματος άρα και τον χρόνο για να σημειωθεί η μέγιστη συγκέντρωση ιόντων  $Ca^{+2}$ .

### $\mathbf{V}_t = \mathbf{V}_0 - \mathbf{K}_{\mathrm{E}} * \mathbf{t}$

#### Στην φύση όμως η επιφάνεια εξάτμισης συχνά συνιστά μια πολύ λεπτή μεμβράνη.

Ο λόγος **A/V** στην περίπτωση αυτή είναι πολύ υψηλός ενώ και η τιμή του K<sub>E</sub> είναι επίσης μεγάλη. Επιπλέον όσο δεν συντελείται καταβύθιση ασβεστίτη ισχύει η παρακάτω ισότητα (από Bogli 1980):  $V_t / V_0 = [Ca^{+2}]_0 / [Ca^{+2}]_t$ 

ή καλύτερα 
$$[Ca^{+2}]_t = [V_0/V_0 - K_E * t] * [Ca^{+2}]_0$$

Προφανώς η μορφή της καμπύλης της συγκέντρωσης των ιόντων Ca<sup>+2</sup> είναι υπερβολική και πλησιάζει ασυμπτωτικά το χρόνο t<sub>max</sub>, κατά την διάρκεια πάντα του φαινομένου της εξάτμισης και μάλιστα μέχρι εκείνο το χρονικό όριο όπου δεν έχει ξεκινήσει η καταβύθιση υλικών (βλ. Εικ. 14).

Μόλις η τελευταία ξεκινήσει η  $[Ca^{+2}]$  πέφτει απότομα και η καμπύλη πλέον αποκλίνει σημαντικά από την ασυμπτωτική της πορεία. Εάν από αυτό το σημείο και πέρα συνεχιστεί η εξάτμιση του διαλύματος, έχουμε την πολύ γρήγορη συρρίκνωση αυτού άρα και την απότομη αύξηση της  $[Ca^{+2}]$  εκ νέου και φυσικά την διακοπή της απόθεσης. Όποτε από εδώ και πέρα έχουμε υπερβολή της  $[Ca^{+2}]$  από τα όρια της μετασταθούς κατάστασης σημειώνεται απόθεση κολλοειδούς ασβεστίτη το οποίο αμέσως μεταπίπτει σε βατερίτη και αυτός με την σειρά του σε δευτερογενή ασβεστίτη (βλ. Εικ.15).



**Εικόνα 14.:** Η συγκέντρωση των ιόντων  $Ca^{+2}$  σε συνάρτηση με τον χρόνο εξάτμισης t (Bogli 1980)

#### 5.2.3.4. Δείκτης Κορεσμού Langelier



**Εικόνα 15.:** Καμπύλη συγκέντρωσης ιόντων Ca<sup>+2</sup> (Bogli 1980).

Από πολύ νωρίς έγιναν προσπάθειες για την εύρεση ορισμένων δεικτών, οι οποίοι να μπορούν να προβλέψουν την τάση ενός νερού για την δημιουργία ανθρακικών επικαθίσεων. Ο δείκτης κορεσμού Langelier (Langelier Saturation Index, LSI) είναι ο αρχαιότερος και ο γνωστότερος από αυτούς τους δείκτες και παράγεται από την θεωρητική έννοια του κορεσμού ενός διαλύματος. Ο συγκεκριμένος δείκτης λοιπόν ορίζεται ως εξής (από Φυτίκα & Ανδρίτσο 2004):

#### $LSI = pH - pH_S$

Όπου pH είναι η μετρημένη τιμή στο νερό και pH<sub>S</sub> είναι το pH στο οποίο ο ασβεστίτης βρίσκεται σε ισορροπία. Ειδικότερα νερό με LSI = 1,0 σημαίνει ότι το pH του είναι μια μονάδα του pH μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή κορεσμού (ή καλύτερα ισορροπίας). Με μείωση του pH κατά μια μονάδα λοιπόν, το νερό θα έλθει σε συνθήκες ισορροπίς, δηλαδή δεν θα υπάρχει τάση για κρυστάλλωση του CaCO<sub>3</sub>. επομένως λοιπόν για τον δείκτη LSI ισχύουν τα παρακάτω:

- Εάν LSI < 0, δεν υπάρχει τάση για επικαθίσεις, το νερό θα διαλύσει το CaCO3
- Εάν LSI > 0, υπάρχει τάση για επικαθίσεις και πιθανόν να καταβυθιστεί CaCO<sub>3</sub>.

Ο δείκτης LSI χρησιμοποιείται σε γεωθερμικά νερά χαμηλής ενθαλπίας για να δώσει μια ένδειξη της τάσης ενός νερού να σχηματίσει επικαθίσεις CaCO<sub>3</sub>. Ο δείκτης αυτός βέβαια δεν μπορεί να προβλέψει πόσο CaCO<sub>3</sub> θα καταβυθιστεί πραγματικά.

Για να υπολογιστεί ο δείκτης LSI είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την αλκαλικότητα του νερού (εκφρασμένη σε mg/l ως προς CaCO<sub>3</sub>), τη σκληρότητα ως προς το ασβέστιο (mg/l Ca<sup>+2</sup> ως προς CaCO<sub>3</sub>), το ΣΔΑ, το pH και την θερμοκρασία του νερού (°C). Αν και παλαιότερα υπολογιζόταν με την βοήθεια νομογραμμάτων, το pH<sub>s</sub> μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (από Φυτίκα & Ανδρίτσο 2004):

$$pH_{s} = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

 $C = log_{10} [Ca^{+2} ως προς CaCO_3] - 0,4$   $D = log_{10} [αλκαλικότητα ως προς CaCO_3]$ 

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα απαιτείται ένα μικρό χρονικό διάστημα πριν ξεκινήσει η απόθεση του ασβεστίτη από το διάλυμα, αλλά και των υπόλοιπων ανθρακικών αλάτων γενικότερα, από την στιγμή που θα διαμορφωθούν οι κατάλληλες συνθήκες. Λόγω ακριβώς της συγκεκριμένης μετασταθούς κατάστασης, δεχόμαστε ότι πρακτικά συντελείται η απόθεση για τιμές LSI > 0,5.

# 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

# 6.1. Γεωλογία της περιοχής 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάστρου

## 6.1.1. Λιθοστρωματογραφία

Στη συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντούν στη περιοχή 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάστρου, όπως αυτοί περιγράφονται στο γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (το υπό έκδοση φύλλο Σιδηροκάστρου), κλίμακας 1:50.000 καθώς και από τις υπαίθριες εργασίες και παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή αλλά και την μελέτη και επεξεργασία α/φιών. Στο **Σχήμα 24**, παρουσιάζεται ο ψηφιακός γεωλογικός χάρτης της θέσης 'Ζεστά Νερά', ο οποίος κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Corel Draw 10 και του MapInfo 6.5. Η ψηφιοποίηση έγινε στο γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. και δημιουργήθηκαν αντίστοιχα επίπεδα (layers) για τους γεωλογικός σχηματισμούς και για τα τεκτονικά στοιχεία (ρήγματα).



Σχήμα 24.: Ψηφιακός γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής στην θέση 'Ζεστά Νερά' (κλίμακας 1:25.000) που προήλθε από την ψηφιοποίηση

του αναλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο Σιδηροκάστρο), κλίμακας 1:50.000.

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

# Διεύθυνση κλίσης και γωνία κλίσης στρωμάτων

# Προβολικό Σύστημα ΕΓΣΑ '87

Από τα παλαιότερα προς τα νεώτερα στρώματα συναντώνται :

#### Α) Ανώτερο Μειόκαινο

Ποταμοχερσαίες αποθέσεις (M<sub>S</sub>.c,st): Τα ιζήματα αυτά αποτελούν την βάση των νεογενών σχηματισμών και αποτέθηκαν στην περιοχή υπο μορφή αλλουβιακών ριπιδίων. Αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών, κροκαλολατυποπαγών, άμμων, χαλαρών κροκαλών, καστανόχρωμων πηλών και αργίλων ή αμμούχων αργίλων και ψαμμιτών με κατά τόπους παρουσία ολισθολίθων. Οι κροκάλες είναι από γρανιτικά πετρώματα, μάρμαρα γνευσίους και αμφιβολίτες, έχουν ποικίλο μέγεθος, που φτάνει μέχρι τα 50εκ. Το πάχος των ενστρώσεων των ψαμμιτών και των αργίλων κυμαίνεται από 0,5 έως 2μ.

Απολιθώματα: Από τους Η. De Bruun & Van De Weerd (1978) προσδιορίστηκε η παρακάτω πανίδα μικροθηλαστικών (τρωκτικών) Progonomys cathalai που είναι από τα παλιότερα γνωστά της κατηγορίας των Muridae. Ηλικία: Ανώτερο Μειόκαινο (Βαλλέζιο – Τουρόλιο).

Πάχος: 300μ.

#### **Β) Κατώτερο Πλειόκαινο**

Λιμναίες - ποταμοχερσαίες αποθέσεις περιοχών Κάτω και Άνω Σπηλιάς:

1) Κάτω Σπηλιά (Pl.c.st): εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, κρακαλο-ψαμμιτών, αμμούχων αργίλων, αργίλων, πηλών, χαλαρών κροκαλών και άμμων με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τη δημιουργία διασταυρωμένων στρώσεων. Κατά θέσεις έχουμε την παρουσία φακοειδών ενστρώσεων τραβερτινών, καθώς και ανθρακομιγών αργίλων χρώματος σκοτεινότεφρου και λεπτών λιγνιτικών ενστρώσεων, που έχουν σημαντική περιεκτικότητα σε ουράνιο. Απολιθώματα: μικροθηλαστικά (τρωκτικά).

#### Πάχος: 150-250m περίπου.

2) Ανω Σπηλιά (Pl.st,J): τα παραπάνω ιζήματα μεταβαίνουν πλευρικά και προς τα πάνω στις ποταμοχερσαίες αποθέσεις της Άνω Σπηλιάς που αποτελούνται από εναλλαγές ψαμμιτών, πηλιτών, αργίλων κοκκινωπού χρώματος, αμμούχων αργίλων, χαλαρών κροκαλών σε λεπτές στρώσεις και μη συνεκτικών κροκαλοπαγών.

**Απολιθώματα:** μικροθηλαστικά (τρωκτικά) της οικογένειας M u r i d a e; Ηλικία: **Μέσο Ρουσσίνιο** (A. Armour-Brown et al.,1977).

Πάχος: 100m περίπου.

3) Στα ανώτερα μέλη των παραπάνω αποθέσεων παρατηρούνται ολισθοστρώματα και ολισθόλιθοι (ol) ανθρακικής σύστασης. Τα ιζήματα αυτά είναι λατυποπαγείς σχηματισμοί και ογκόλιθοι μαρμάρων ισχυρά συγκολλημένοι. Οι λατύπες αποτελούνται από μάρμαρα αδροκρυσταλλικά, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από μερικά εκατοστά μέχρι μισό μέτρο περίπου, πιθανώς να προήλθαν από κρυογενετικά φαινόμενα. Το συνδετικά υλικό τους αποτελείται από ασβεστιτικό υλικό.

Ηλικία: Οι Sotirisdis 1973 και Psilovikos A. et al., 1981 δίνουν πιθανή ηλικία Βιλλαφράγκιο. Πιθανότατα τα ιζήματα αυτά να έχουν ολισθήσει στα ανώτερα μέλη των λιμναίων αποθέσεων.

#### Πάχος: μέχρι 100m.

#### Γ) Πλειο-Πλειστόκαινο;

**Τραβερτίνες:** ανθρακικά ιζήματα που προέρχονται από τις θερμές πηγές, που προήλθαν από ρήγματα που βρίσκονται κατά μήκος των περιθωρίων της λεκάνης. Έχουν χρώμα ανοικτό καστανό, πορτοκαλοκίτρινο ή λευκό, πορώδη υφή και έχουν υποστεί εξαλλοίωση από τη υδροθερμική δραστηριότητα. Χαρακτηριστικό των ιζημάτων αυτών είναι η παρουσία αποτυπωμάτων από φυτικά λείψανα και οι στρώσεις που το πάχος τους κυμαίνεται από 5-45m.

#### <u>Δ) Πλειστόκαινο</u>

1) Ογκόλιθοι, λατύπες και κροκάλες διαφόρων διαστάσεων από γρανοδιορίτη μονζονίτη και γνευσιοειδή χαλαζιακό μονζονίτη (Pt.c) καθώς επίσης, αλλά σε μικρότερη κλίμακα όπως, λατύπες και κροκάλες από μάρμαρα ή άλλα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα αδιαβάθμητα, άτακτα αποθεμένα και χαλαρά συνδεδεμένα. Ενδιάμεσα παρεμβάλλονται ερυθροπηλοί και αμμούχοι άργιλοι.

2) Διαβάθμισμενα σε οριζόντιες στρώσεις (Ptl.c): ερυθρογαίες, πηλοί, αμμούχοι άργιλοι, χάλικες και κροκάλες. Συνολικό πάχος σχηματισμού: 100m περίπου.

#### <u>Ε) Ολόκαινο</u>

 Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα (H.cs,sc): πρόκειται για χαλαρά αδιαβάθμητα αδροκλαστικά υλικά από γρανίτες, γνευσίους, αμφιβολίτες και μάρμαρα.
Στις περιοχές που η τροφοδοσία γίνεται από τις αποθέσεις των νεογενών σχηματισμών τα ιζήματα αποτελούνται από άμμους, αργιλούχους άμμους και αργίλους, ερυθροκάστανου χρώματος.

**2) Αλλουβιακές αποθέσεις** (H.al): χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά αναβαθμίδων, άμμοι και κροκάλες στις κοίτες των χείμαρρων και καστανόχρωμα υλικά κλειστών λεκανών.

3) Ασβεστολιθικοί τόφφοι (ct): Ο συγκεκριμένος όρος έχει αποδοθεί από τον Osswald (1938) για να χαρακτηρίσει συγκεκριμένες επιφανειακές αποθέσεις από CaCO<sub>3</sub>, οι οποίες τοποθετούνται είτε πάνω από τις νεογενείς αποθέσεις είτε επάνω στις τεταρτογενείς. Τους συναντάμε σε ποικίλα υψόμετρα και πάχη. Η έλλειψη εσωτερικής οργάνωσης στο μεγαλύτερο τμήμα των συγκεκριμένων αποθέσεων αποδίδεται στις συνθήκες στροβιλώδους ροής των υδάτων τόσο των πηγών όσο και στις θέσεις των καταρρακτών. Σε λίγα μόνο σημεία έχουν καταφέρει να αναπτύξουν κάποιου είδους στρώση με την κλίση αυτής να ποικίλλει πολύ. Δεν έχουν επίσης επισημανθεί καθόλου κάποιου είδους απολιθώματα μέσα στις αποθέσεις αυτές. Σε άλλες θέσεις οι αποθέσεις αυτές παρουσιάζονται ως τραβερτίνες περιέχοντας και αρκετά φυτικά υπολείμματα μέσα στην δομή τους. Ακόμη τις συναντάμε συχνά γύρω από τα καρστικοποιημένα ολισθοστρώματα, μπροστά στα τούννελ και τις σπηλαιώδεις μορφές που έχουν δημιουργηθεί μέσα σε αυτά. Η δημιουργία ασβεστολιθικών τόφφων στην εξεταζόμενη περιοχή συνδέεται ισχυρά με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν σε όλη την διάρκεια του Τεταρτογενούς. Οι συγκεκριμένοι σχηματισμοί και οι τραβερτίνες σχηματίστηκαν από νερά θερμομεταλλικών πηγών κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς μέχρι και τις μέρες μας ακόμα. Το πάχος τους κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως και τα 30m κατά θέσεις. Αντίθετα η οριζόντια εξάπλωσή τους στην υπό μελέτη θέση φτάνει μέχρι και τα 130m.

6.1.2. Ρηξιγενές Τεκτονικό καθεστώς

Τα ρήγματα που εντοπίστηκαν κατά την υπαίθρια χαρτογράφηση και δεσπόζουν στην περιοχή μελέτης, μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει ρήγματα BBΔ – NNA διεύθυνσης, ενώ η δεύτερη ρήγματα Α – Δ διεύθυνσης. Όπως βλέπουμε και στο **Σχήμα 25** τα ρήγματα που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της γεωλογικής χαρτογράφησης, κατά μήκος του δρόμου συμφωνούν με τα παραπάνω.

Ακόμη, παρατηρώντας τον χάρτη της περιοχής μελέτης αλλά και το Σχήμα 26 διαπιστώνουμε και την παρουσία ορισμένων ρηγμάτων ΒΑ – ΝΔ διεύθυνσης, που μάλλον αντιπροσωπεύουν φαινόμενα επαδραστηριοποίησης παλαιότερων γραμμών διάρρηξης (Μουντράκης κ.α. 2002).



Σχήμα 25.: Διάγραμμα πυκνότητας πόλων (προβολή Schmidt, κάτω ημισφαίριο) των ρηγμάτων που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της γεωλογικής χαρτογράφησης της περιοχής μελέτης.

Ρήγματα BBΔ – NNA διεύθυνσης

Πρόκειται για μικρού μήκους κανονικά ρήγματα που κλίνουν με συνήθως μεγάλες γωνίες κλίσης (> 65°) προς τα ΝΝΔ ως επί το πλείστον. Γενικά το μήκος τους μπορεί να ξεπεράσει το 1,5 Km, ενώ συχνά σχηματίζουν μικρές τάφρους και κέρατα, όπως αυτό στην περιοχή Μαύρος Βράχος.

#### Ρήγματα Α – Δ διεύθυνσης

Τα ρήγματα αυτά έχουν ουσιαστικά διευθύνσεις από BΔ – NA έως ΔBΔ – ANA. Η πρώτη υποομάδα περιλαμβάνει κανονικά ρήγματα της περιοχής μελέτης που κλίνουν με μεγάλες κλίσεις (>60°) προς τα BA, ενώ το μήκος τους σπάνια ξεπερνά το 1Km. Η δεύτερη υποομάδα περιλαμβάνει και αυτή ρήγματα κανονικής διάρρηξης με μικρές γωνίες κλίσεις (<30°) (λιστρικού χαρακτήρα) και τα οποία κλίνουν προς B και BA (βλ. Σχήμα 27). Πρόκειται για τα μεγαλύτερα σε μήκος ρήγματα της περιοχής μελέτης, τα οποία μπορούν να φτάσουν και τα 3 Km. Επίσης αυτά τα κλιμακωτού χαρακτήρα ρήγματα είναι υπεύθυνα για την περιστροφή των γεωλογικών σχηματισμών που διαρηγνύουν.

Η ύπαρξη και η δράση των ρηγμάτων της δεύτερης υποομάδας έχουν επιβεβαιωθεί και από δεδομένα ηλεκτρικών βυθοσκοπίσεων (Vertical Electrical Sounding/VES) που πραγματοποίησαν οι Savvaidis et al. (1999), στην περιοχή του 'Maúpou Bpáχou'. Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν τον λιστρικο χαρακτήρα των συγκεκριμένων ρηγμάτων ενώ συγχρόνως μαρτυρούν έμμεσα την αναστροφή του αναγλύφου που δημιουργούν, λόγω της περιστροφικής κίνησης του κάτω τεμάχους (οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιλαμβάνονται στο κάτω τέμαχος του ρήγματος τοποθετούνται υψηλότερα τοπογραφικά και κλίνουν αντίθετα, δηλαδή προς τα Β και ΒΑ σε σχέση με τους ίδιους σχηματισμούς του άνω τεμάχους).



Σχήμα 26.: Ροδοδιαγράμμα παρατάξεων των ρηξιγενών επιφανειών που καταγράφηκαν. Αριθμός μετρήσεων: 17



Σχήμα 27.: Ροδοδιαγράμμα διευθύνσεων κλίσεων των ρηξιγενών επιφανειών που καταγράφηκαν. Αριθμός μετρήσεων:17

6.1.3. Ανάπτυξη τοπικού γεωθερμικού πεδίου

Με την πλειο – πλειστοκαινική εφελκυστική τεκτονική στον ελλαδικό χώρο, συνδέονται πολλές πηγές της Ελλάδας. Η δημιουργία ρηγμάτων επέτρεψε την δημιουργία κλειστών λεκανών και τον σχηματισμό λιμναίων κυρίως ιζημάτων. Συγχρόνως δημιούργησε και προϋποθέσεις σχηματισμού γεωθερμικών ρευστών, που με την συνεχιζόμενη ενεργό τεκτονική έφτασαν μέχρι την επιφάνεια και δημιούργησαν θερμές πηγές. Αποτέλεσμα της δράσης τέτοιων πηγών αποτελεί η παρουσία στην περιοχή, πολλές φορές χημικών ιζημάτων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν πολλές πηγές της Ελλάδας, όπως της Νιγρίτας, του Λαγκαδά, της Ν. Κεσσάνης, των Κρηνίδων κ.α.

Όπως είναι γνωστό για να δημιουργηθεί γεωθερμικό πεδίο θα πρέπει να υπάρχουν θετικές υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες. Έτσι π.χ. ένας καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος που επικαλύπτεται από ένα άλλο αδιαπέρατο ίζημα θα πρέπει να βυθιστεί στη συνέχεια με τη βοήθεια μεταπτωτικών ρηγμάτων, ώστε να βρεθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Γεννιέται όμως το ερώτημα αφού συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο, γιατί δεν έχουμε εμφανίσεις γεωθερμικών ρευστών σε όλο το μήκος του ρήγματος, αλλά αυτές εκδηλώνονται σε συγκεκριμένες θέσεις; Για να ερμηνεύσουμε αυτό το φαινόμενο αρκεί να παρατηρήσουμε την θέση της πηγής στον χάρτη αλλά και τις διευθύνσεις των ρηγμάτων που την δημιουργούν. Μια προσεχτική παρατήρηση λοιπόν στον χάρτη (βλ. προηγούμενα Σχ. 24) δείχνει πως η πηγή εκδηλώνεται σε διασταύρωση ρηγμάτων με ANA – Δ<br/>BΔ διεύθυνση με άλλα ρήγματα διεύθυνσης BBΔ – NNA και BA – NΔ (βλ. χάρτη). Πιστεύουμε πως το παραπάνω γεγονός δεν είναι τυχαίο, αφού οι εκδηλώσεις των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια σε θέσεις διασταυρωμένων ρηγμάτων, λαμβάνουν χώρα σε περιοχές, όπου έχουμε χαλαρά ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Θέλοντας να δώσουμε μια εξήγηση στα παραπάνω φαινόμενα δεχόμαστε ότι, τα γεωθερμικά ρευστά ανέβηκαν αρχικά κατά μήκος των ΒΔ - ΝΑ ρηγμάτων που είχαν δημιουργηθεί τοπικά μέχρι και το Άνω Πλειόκαινο. Με την ιζηματογένεση του Πλειστοκαίνου και το σχηματισμό στρωμάτων κροκαλοπαγών και άμμων τα γεωθερμικά αυτά ρευστά εμπότισαν τα παραπάνω στρώματα και σχημάτισαν ταμιευτήρες γεωθερμικών ρευστών κατά μήκος αυτών των ρηγμάτων. Με την ιζηματογένεση όμως αργιλλικών και άλλων σχηματισμών που ακολούθησε εγκλωβίστηκαν μέσα στα στρώματα του Νεογενούς.

Ως επιβεβαίωση των όσων αναφέρουμε παραπάνω έρχεται το γεγονός της απόθεσης, με διάχυτη μορφή, χαρακτηριστικών φλεβιδίων ασβεστίτη, με σαφή δευτερογενή χαρακτήρα, μέσα στις πλειοκαινικές αποθέσεις, περιμετρικά της πηγής και σε μια απόσταση μέχρι 100μ. από αυτήν, στην βάση του 'Μαύρου Βράχου'. και οφείλεται στην δράση του ρήγματος με διεύθνση BBΔ – NNA (βλ. Φωτ. 3).



**Φωτ. 3.:** Χαρακτηριστικά ασβεστιτικά φλεβίδια, δευτερογενούς χαρακτήρα, στην βάση του 'Μαύρου Βράχου', μέσα στις πλειοκαινικές αποθέσεις που οφείλονται στον εγκλωβισμό και την διάχυτη ροή των υπόθερμων υδάτων.

Κατά την διάρκεια του Μ/Α Πλειστοκαίνου είχαμε μια νέα ρηξιγενή δραστηριότητα στον ελλαδικό χώρο με την δημιουργία νέων ρηγμάτων ΑΝΑ – ΔΒΔ που διέρρηξε ασφαλώς τα όλα τα παραπάνω ιζήματα καθώς και αυτά του Πλειστοκαίνου. Τα γεωθερμικά αυτά ρευστά στις θέσεις διασταυρώσεων με τα παλαιοτέρα ή τα επαναδραστηριοποιηθέντα ΒΔ – ΝΑ διεύθυνσης ή ΒΑ – ΝΔ διεύθυνσης ρήγματα, απεγκλωβίζονται και φτάνουν στην επιφάνεια. Η δράση τέτοιων θερμών εκδηλώσεων τόσο κατά το παρελθόν όσο και σήμερα συχνά υποδηλώνεται και από την παρουσία χημικών ιζημάτων γύρω από τις θέσεις εκφόρτισής τους, ενώ μπορούν να επαληθευτούν οριστικά με την εκτέλεση γεωτρήσεων ως επί το πλείστον μέσα σε χαλαρά πλειο – πλειστοκαινικά (όπως π.χ. οι χαρακτηριστικές περιπτώσεις Νιγρίτας, Λουτρών Σιδηροκάστρου και Ν. Απολλωνίας).

Τα νερά αυτά ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των υπόθερμων πηγών με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 20 - 35°C. Πρόκειται για πηγές που οφείλουν την δημιουργία τους στην άνοδο του γεωθερμικού ρευστού διαμέσου ρηγμάτων μέχρι την επιφάνεια. Η χαμηλή τους θερμοκρασία, οφείλεται στον καθαρά υποεπιφανειακό τους χαρακτήρα και στη μικρή θετική αποκλιση της γεωθερμική βαθμίδας από την μέση τιμή της στην εκάστοτε περιοχή. Τα συγκεκριμένα υδροφόρα στρώματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαπερατότητα και υδατοκινητικότητα (Σχ. 28), καθώς και από το σχετικά μικρό πιεζομετρικό φορτίο του γεωθερμικού ρευστού. Στην περίπτωση αυτή ανήκουν μερικές πηγές της Νιγρίτας, της Ν. Κεσσάνης στην Ξάνθη κ.α. καθώς και η υπό μελέτη πηγή

Ειδικότερα στο σημείο αυτό, μπορούμε να πούμε ότι η ισχυρή παρουσία CO<sub>2</sub> στην σύσταση των γεωθερμικών ρευστών σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία που κατέχουν προκαλούν αδιαβατική εκτόνωση των τελευταίων δίνοντας, με τον τρόπο αυτό, γένεση σε φαινόμενα θερμοανύψωσης (thermolifting). Επίσης η υδροστατική πίεση που χαρακτηρίζει τα συγκεκριμένα ρευστά (μετεωρικής προέλευσης) συντελούν στην δημιουργία μιας συνεχούς αρτεσιανής ροής των γεωθερμικών ρευστών (Αρβανίτης Α., 2001).



Σχήμα 28.: Σχηματική παράσταση δημιουργίας υπόθερμων πηγαίων υδάτων που απεικονίζει την τροφοδοσία και την άνοδο των γεωθερμικών ρευστών με συμμετοχή CO<sub>2</sub> καθώς και την τελική έξοδος των υπόθερμων υδάτων (τροποποιημένο από Σούλιο Γ., 2006)

6.1.4. Καρστική πηγή 'Ζεστά Νερά'

6.1.4.1. Γενικά

<u>Ως πηγή ορίζουμε μια συγκεντωμένη εκροή υπόγειου νερού, που εμφανίζεται στην</u> επιφάνεια του εδάφους σαν ένα ρεύμα νερού που ρέει ελεύθερα (Todd, 1980, από <u>Σούλιο Γ., 2006)</u>. Πρέπει να γίνει αντιδιαστολή της πηγής από την διαρροή (seepage), η οποία είναι μια πιο αργή κίνηση υπόγειου νερού προς την επιφάνεια του εδάφους και συνήθως μη σημειακή, αλλά εκτενής (γραμμικά ή διδιάστατα).

Υδρογεωλογικά οι πηγές είναι στην πραγματικότητα «υπερχείληση» υδροφόρων στρωμάτων. Εκφορτίζουν τα υδροφόρα στρώματα. Αυτά τροφοδοτούνται με την
κατείσδυση ή την διήθηση από τα κατακρημνίσματα και ανεβαίνει η στάθμη τους. Οι πηγές εμφανίζονται εκεί όπου η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους. Είναι ο γεωμετρικός τόπος της τομής του υδροφόρου ορίζοντα με την στάθμη του εδάφους. Για αυτό εμφανίζονται γεωμορφολογικά στα χαμηλότερα σημεία, στο επίπεδο βάσης, εκτός από εκείνες τις πηγές που συνδέονται με επικρεμάμενους υδροφορείς.

Στην περίπτωση ανθρακικών σχηματισμών τα πολλά επίπεδα καρστικής διάβρωσης, αποτελούν επίπεδα βάσης για την ροή του υπόγειου καρστικού νερού. Το γεγονός ερμηνεύεται από την ύπαρξη πληθώρας καρστικών πηγών με την συντριπτική τους πλειοψηφία να εκδηλώνονται στην βάση των ανθρακικών μαζών ή πλησίον υπάρχουσας τεκτονικής επαφής (ρήγματα). Πρόκειται ουσιαστικά για καρστικές πηγές επαφής ή υπερπλήρωσης μεταξύ των υδροπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών. Ισως το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα των πηγών αυτών συνιστά η έμμεση εξάρτηση τους από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Έτσι η παροχή τους κατά κανόνα, βρίσκεται σε στενή σχέση με αυτά.

Πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο, η εκφόρτιση του υδροφορέα να μην γίνεται σημειακά αλλά διάχυτα. Το γεγονός αυτό οφείλεται πρωταρχικά στην ύπαρξη αρκετών ρηγμάτων και διακλάσεων καθώς και ταυτόχρονη εκδήλωση ροής κατά μήκος των επιφανειών τους, γεγονός που με την σειρά του οφείλεται συχνά στην ύπαρξη πολλών επιπέδων βάσης σε κλίμακα λιθολογικής ενότητας.

Η τεκτονική δηλαδή καθώς και ο βαθμός ανάπτυξης του κάρστ καθορίζουν την εμφάνιση και τον αριθμό των πηγών, όπου στην καρστική υδρογεωλογία μπορεί να είναι ανεξάρτητες η μια από την άλλη (Παπαδοπούλου – Βρυνιώτη Κ., 1993).

Λόγω της εμφάνισης σημαντικού επιφανειακού υδρογραφικού δικτύου, της καλής ανάπτυξης καρστικών πηγών (λίγων σε αριθμό και μεγάλων σε τιμές παροχής) και υπόγειου κάρστ, της ατελούς δε ανάπτυξης επιφανειακού κάρστ και της υπάρχουσας βλάστησης, το κάρστ της περιοχής μελέτης κατατάσσεται στον Μεταβατικό τύπο (Ενδιάμεσο ή Transitional karst) κατά Cvijic (1926) ή στο ημικαρστ (Halbkarst) κατά Grund (1903) (από Vavliakis et al. 1983).

Ως μεταλλικές πηγές, σύμφωνα με την ευρέως αποδεκτή άποψη του Crunhut (από Πολύζου Ο. κ.α., 2002), χαρακτηρίζονται εκείνες των οποίων το νερό διαφέρει από τα κοινά πόσιμα νερά, διότι περιέχει σύνολο διαλυμένων αλάτων μεγαλύτερο από 1000mg/l. Επίσης, ως μεταλλικό θεωρείται και κάθε νερό που δεν πληρεί την παραπάνω προϋπόθεση αλλά περιέχει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω στοιχεία και ενώσεις: CO<sub>2</sub>, Li+, Sr+, Ba+, Fe+++, Fe+++, Br-, J-, F-, HAsO<sub>4</sub>, HAsO<sub>2</sub>, HBO<sub>2</sub>.

Σύμφωνα με τη θερμοκρασία τους τα θερμομεταλλικά νερά διακρίνονται σε (Καλλέργης Γ., 2001):

- Υπέρθερμα με Θερμοκρασία = 50°-100°C
- Μεσόθερμα με Θερμοκρασία = 35°-50°C
- Υπόθερμα με Θερμοκρασία = 19°-35°C

Υπάρχει προφανής σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων των θερμομεταλλικών νερών εφόσον η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τη διαλυτική ικανότητα του νερού. Έτσι με την κυκλοφορία του νερού μέσα από τα πετρώματα του υπεδάφους, συντελείται μεγαλύτερος εμπλουτισμός αυτού στα διάφορα συστατικά.

## 6.1.4.2. Η πηγή των «ΖΕΣΤΩΝ ΝΕΡΩΝ»

Η πηγή βρίσκεται σε απόσταση 2,3 χλμ. επί του δρόμου Σιδηροκάστρου – Αχλαδοχωρίου, σε απόσταση 280m προς τα ΝΑ αυτού, σε υψόμετρο περίπου 180m, κοντά στην βάση του λόφου με την ονομασία 'Μαύρος Βράχος'. Πρόκειται για μια υπόθερμη πηγή, τα νερά της οποίας έχουν μέγιστη θερμοκρασία 25°C (βλ. Φωτ. 4). Η συγκεκριμένη πηγή ανήκει στο ευρύτερο χώρο του υδροθερμικού πεδίου του Σιδηροκάστρου.



**Φωτ. 4.:** Η υπόθερμη πηγή στην θέση 'Ζεστά Νερά' Σιδηροκάστρου μετά τα πρόσφατα έργα υδρομάστευσης που υπέστη.

Ειδικά για την περιοχή έρευνας θεωρείται ότι μάλλον συναντάμε την κατηγορία των πηγών επαφής (Κνιθάκης 1985), όπου εδώ αναπτύσσεται αρχικά ψυχρή -υπόθερμη υπόγεια ροή στην επαφή ενός υδροπερατού σχηματισμού (ολισθόλιθοι και μάρμαρα) με ένα αδιαπέρατο ή καλύτερα ένα ελάχιστο διαπερατό σχηματισμό (μάργες). Είναι δεδομένη όμως και η παρουσία και η δράση ρηγμάτων που βοηθούν στην άνοδο των ψυχρών - υπόθερμων ρευστών, τα οποία είναι πλούσια σε CO<sub>2</sub>. Η κοινή δράση των ρηγμάτων είναι άλλωστε και ο λόγος που δικαιολογεί και τις σημαντικές τιμές παροχής της πηγής τόσο πριν όσο και μετά την υδρομάστευση που έχει υποστεί.

Στην περίπτωση της περιοχής μελέτης, η θέση εκφόρτισης της πηγής βρίσκεται πάνω ή καλύτερα πολύ κοντά στην διασταύρωση ως επί το πλείστον κανονικών ρηγμάτων, όπως διαπιστώνεται άλλωστε και από την γεωλογική χαρτογράφηση, κλίμακας 1/25.000, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

Έτσι λοιπόν η θέση της πηγής συνιστά «σημείο» μιας τέτοιας ευνοϊκής διασταύρωσης σημαντικών ρηξιγενών επιφανειών, όπως άλλωστε δικαιολογείται και από την σημαντική της παροχή (25m<sup>3</sup>/h), που τέμνουν όμως ρηχούς υπόθερμους υδροφόρους σημαντικής δυναμικότητας και αποθηκευτικής ικανότητας. Εδώ, πρέπει να σημειώσουμε το σημαντικό γεγονός ότι η παραπάνω τιμή παροχής προέκυψε μετά από συγκεκριμένα έργα υδρομάστευσης, μεσαίας κλίμακας, δεδομένου ότι η παροχή της ήταν ακόμη μεγαλύτερη, πριν την εκτέλεση των παραπάνω έργων, που έφτανε τα 0,2 m<sup>3</sup>/sec ή τα 720 m<sup>3</sup>/h, (μέγιστες τιμές παροχής, από Κνιθάκη 1985).

Ειδικότερα τα νερά της πηγής διαπιστώνουμε ότι εύκολα βρίσκουν διέξοδο προς τα πάνω και μάλιστα ξεπηδούν μέσα από το σώμα αλλουβιακών προσχώσεων, δημιουργώντας σημαντικής παροχής πηγή, η οποία τροφοδοτείται από υποεπιφανειακους ψυχρούς υδροφόρους που πληρώνονται από μετεωρικής προέλευσης ύδατα από την περιβάλλουσα ορεινή περιοχή.

Η παραπάνω διέξοδος επιτυγχάνεται μέσω της διασταύρωσης της επιφάνειας ενός πιθανού κανονικού ρήγματος ΔΒΔ – ΑΝΑ διεύθυνσης, που οριοθετεί τη ΒΔ πλευρά του λόφου «Μαύρος Βράχος», με παλιότερα και πιθανόν επαναδραστηριοποιηθέντα ρήγματα BBΔ – ΝΝΑ και BA – ΝΔ διεύθυνσης (βλ. Εικ. 16 & Εικ. 17). Το παραπάνω πιθανό κανονικό ρήγμα φέρνει τα μάρμαρα του υποβάθρου που βρίσκονται στο λατομείο στην θέση με το τοπωνύμιο «Μαύρος Βράχος» στην BBA κλιτύ του, στο ίδιο υψόμετρο με τις νεογενείς αποθέσεις, στην ΝΝΔ κλιτύ του. Η δημιουργία της πηγής σχετίζεται με τη νεοτεκτονική δράση της λεκάνης του Σιδηροκάστρου - Αχλαδίτη αλλά και γενικότερα με αυτή της δημιουργίας της κοιλάδας του Στρυμόνα. Για τη λεκάνη του Σιδηροκάστρου, οι τραβερτινικές αποθέσεις που οφείλονται στα νερά των θερμών πηγών, τοποθετούνται στο Πλειστόκαινο (Σωτηριάδης 1966).



**Εικόνα 16.:** Ενδεικτικό γεωλογικό σκαρίφημα γύρω από την θέση του πρωτογενούς τραβερτινικού σπηλαίου στην θέση 'Ζεστά Νερά',συμπεριλαμβανομένου και της ομώνυμης πηγής.



Εικόνα 17.: Ενδεικτική γεωλογική τομή στην θέση της πηγής των 'Ζεστών Νερών'(τροποπιημένη από Κνιθάκη 1985).

Η παροχή της πηγής (βλ. Πίν. 13) κατά το διάστημα των ετών 2002-2003 έχει παρουσιάσει μέγιστο 101 l/sec και ελάχιστο 75 l/sec (κάνουμε λόγο για τιμές παροχής που αγγίζουν τα 270 – 367 m<sup>3</sup>/h). Οι τιμές όμως αυτές αφορούν την παροχή της πηγής πριν τα εντατικά έργα υδρομάστευσης, διότι κατά την διάρκεια των δειγματοληψιών που πραγματοποιήσαμε την περίοδο 2005 -2006, η τιμή της παροχής ήταν μόλις 7-8 1/sec (δηλαδή περίπου 26m<sup>3</sup>/h)! Τα όσα ακολουθούν παρακάτω αφορούν τις τιμές παροχής πριν την εντατική υδρομάστευση και κατ' επέκταση της εκμετάλλευσης που έτυχε η συγκεκριμένη πηγή.

<b>ΕΤΗ\ΜΗΝΕΣ</b>	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	0	N	Δ
2002				75				85	78	91	101	
2003					87				96	95	87	

**Πίνάκας 13:** Μετρήσεις παροχών της πηγής «Ζεστά Νερά» σε l/sec, της Διεύθυνσης Εγγείων Βελτιώσεων (Δ.Ε.Β.) του νομού Σερρών (από Λαζαρίδη Γ., 2004).

Συνήθως πηγές μεγάλου μεγέθους απαντούν στις ηφαιστειακές και καρστικές περιοχές. Η παροχή μιας πηγής πρωτίστως εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής τροφοδοσίας του υδροφόρου που εκφορτίζεται από την πηγή και την ένταση της τροφοδοσίας (Σχήμα 29). Οι περισσότερες πηγές παρουσιάζουν διακύμανση της παροχής τους. Οι διακυμάνσεις αυτές αντανακλούν τις μεταβολές στην ένταση του εμπλουτισμού, με διάρκεια εμπλουτισμού που κυμαίνεται από λεπτά της ώρας μέχρι χρόνια και βρίσκονται σε στενή σχέση με τις γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες.

Είναι κάτι παραπάνω από εμφανές ότι η παροχή της πηγής (δηλαδή οι τιμές παροχής πριν την υδρομάστευσή της) εξαρτάται έμμεσα από την ένταση και την συχνότητα των κατακρημνισμάτων που δέχεται η περιοχή τροφοδοσίας της, γεγονός που επιπλέον συνιστά χαρακτηριστικό καρστικό γνώρισμα.



Σχήμα 29.: Σχέση της έκτασης της λεκάνης απορροής μιας πηγής και της αντίστοιχης παροχής της (από Καλλέργη Γ., 1986).

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πηγές με μεγάλες εποχικές διακυμάνσεις έχουν κατά κανόνα μικρή αποθήκη (υδρογεωλογική λεκάνη). Όσον αφορά την πηγή των «Ζεστών Νερών» τόσο από το γεγονός των μικρών σχετικά διακυμάνσεων της παροχής της από

μήνα σε μήνα (αναφερόμαστε στην περίοδο που προηγήθηκε της υδρομάστευσης) και ιδιαίτερα για την περίοδο 2002 - 2003 (0,07- 0,1m<sup>3</sup>/sec), καταλαβαίνουμε ότι εκφορτίζει σημαντικής έκτασης λεκάνη (υπόγεια και επιφανειακή), μια ενδεικτική τιμή της οποίας παρέχεται με την βοήθεια του **Σχ. 29** και αγγίζει τα 5Km<sup>2</sup> περίπου. Δεδομένου επίσης ότι η πηγή δίνει νερό όλο τον χρόνο μπορεί να χαρακτηριστεί αδιαμφισβήτητα ως μόνιμη.

Τα χημικά χαρακτηριστικά των υδάτων της πηγής θα εξεταστούν εκτενώς σε ξεχωριστό κεφάλαιο, που ακολουθεί παρακάτω.

6.2. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

### 6.2.1. Ανάγλυφο

Το ανάγλυφο της περιοχής Ζεστά Νερά, όπως αυτό απεικονίζεται στον τοπογραφικό χάρτη κλίμακας 1:50.000 του φύλλου ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟΥ (1970) ανήκει ως επί το πλείστον στις λοφώδεις περιοχές και δευτερευόντως στις πεδινές περιοχές, σύμφωνα πάντα με την κατάταξη που δίνει ο Dikau (1989) (βλ. προηγούμενα Πίν. 9).

Επίσης, η περιοχή μελέτης εντοπίζεται κοντά στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης στο οποίο παρατηρούνται ως επί το πλείστον λοφώδεις περιοχές, με κορυφές χαμηλού υψομέτρου, με τον λόφο 'Μαύρος Βράχος' (υψ. 380m), να ξεχωρίζει. Οι λοφώδεις περιοχές φαίνονται με κίτρινο χρώμα στο χάρτη των υψομέτρων της λεκάνης (βλ. προηγούμενα Σχ. 19).

Στην βάση του παραπάνω λόφου εντοπίζεται η υπό μελέτη πηγή σε υψόμετρο που αγγίζει τα 150m περίπου (βλ. Σχ. 30), τα νερά της οποίας έχοντας μια γενική κατεύθυνση ABA – ΔΝΔ και αφού διανύσουν μια οριζόντια απόσταση 150m μέσα σε τεχνητή κοίτη, πέφτουν στην κοίτη του Αχλαδίτη ποταμού που τοποθετείται τοπογραφικά σε χαμηλότερη θέση, σε ένα υψόμετρο δηλαδή που φτάνει τα 120m περίπου.

Το παραπάνω γεγονός εξασφαλίζει ασφαλώς την απαραίτητη εκδήλωση μετώπων καταρρακτών, μπροστά από τα οποία συντελείται ουσιαστικά και σχεδόν αποκλειστικά το φαινόμενο της απόθεσης των ανθρακικών αλάτων στην συγκεκριμένη θέση.



Σχήμα 30.: Ενδεικτική μορφολογική τομή της πηγής, στην οποία παρουσιάζεται η μεταβολή του αναγλύφου γύρω από την θέση της πηγής

## 6.2.2. Κλίση

Όσα αναφέρθηκαν ασφαλώς στη παράγραφο 3.1.4.3. ισχύουν εστιάζοντας την προσοχή μας σε δύο κυρίως σημεία (βλ. προηγούμενα Σχ. 20):

- Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης παρατηρούμε ένα σύνολο ανυψωμένων επιφανειών επιπέδωσης (γωνία κλίσης 0-2°) στην περιοχή της πόλγης του Αχλαδοχωρίου και σε υψόμετρο 520-550m. Η επιφάνεια αυτή αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα ενός παλαιού κύκλου απογύμνωσης (Ψιλοβίκος, Βαβλιάκης, 1982)
- 2. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, παρατηρείται μια ζώνη με διεύθυνση Α-Δ, στην οποία έχουμε ισχυρά κεκλιμένο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο (γωνία κλίσης 5-35°). Η ζώνη αυτή αντιστοιχεί στην ζώνη με το μεγαλύτερο βάθος εγκιβωτισμού της κύριας κοίτης του Αχλαδίτη. Η περιοχή μελέτης μας ανήκει στην συγκεκριμένη ζώνη, επομένως αναμένονται σημαντικά βάθη εγκιβωτισμού της κοίτης στην περιοχή.

Οι θέσεις αυτές καταρχήν δηλώνουν σαφέστατα μια ισχυρή μεταβολή του βασικού επιπέδου, που εκφράζεται με την ανύψωση της ξηράς, λόγω ηπειρογενετικών κινήσεων και είχε ως αποτέλεσμα την έναρξη ενός νέου κύκλου απογύμνωσης (ανανέωση), ενώ η λεκάνη απορροής βρισκόταν πιθανότατα στο στάδιο προχωρημένης ωριμότητας ή στο

στάδιο γήρατος. Οι ανυψωτικές κινήσεις τοποθετούνται από τους Ψιλοβίκο και Βαβλιάκη (1983) στο Νεογενές-Τεταρτογενές και οδήγησαν στην ανύψωση της επιφάνειας επιπέδωσης, από τη ζώνη ενεργούς επιπέδωσης. Έτσι ''διασώθηκε'' από την παλαιότερη αυτή φάση η επιφάνεια επιπέδωσης στη πόλγη του Αχλαδοχωρίου μετά την ανύψωσή της.

Η μεταβολή του βασικού επιπέδου συνεχίστηκε και στο Μέσο Πλειστόκαινο και η νέα διαβρωτική δράση του χειμάρρου είχε ως αποτέλεσμα τον εγκιβωτισμό της κοίτης του και τον σχηματισμό δυο νέων εμφανών σειρών αναβαθμίδων και δυο νέων κοιλάδων, στην κύρια κοίτη του Αχλαδίτη. Το μέγιστο βάθος του εγκιβωτισμού της κοίτης παρατηρείται, όπως αναφέραμε στην περιοχή με το ισχυρά κεκλιμένο έως εξαιρετικά απότομο ανάγλυφο, στην οποία απαντώνται και οι δυο ποτάμιες κοιλάδες.

Σύμφωνα με τους Vavliakis et al. (1983), η κοιλάδα του Αχλαδίτη έχει υποστεί μια νέα πρόσφατη ανύψωση (Ολοκαινική;), όπως προκύπτει από τον σχηματισμό μικρής αναβαθμίδας μέσα στην μαιανδρική του ζώνη, σε περιοχές με σημαντική διαπλάτυνση, γεγονός που δείχνει ότι οι ανοδικές κινήσεις και η εκβανθυτική δράση του ποταμού συνεχίζεται μέχρι σήμερα (βλ. Σχ. 31).



Σχήμα 31.: Μορφολογική τομή της κοίτης στην περιοχή μελέτης στην οποία διακρινονται οι δύο κύριες αναβαθμίδες, το μεγάλο βάθος εγκιβωτισμού της καθώς και η πρόσφατη (ολοκαινική;;) αναβαθμίδα

6.2.3. Ταξινόμηση – Προσδιορισμός τύπου κοίτης

Όλα τα παραπάνω στοιχεία επιβεβαιώνονται και από τον καθορισμό – χαρακτηρισμό της ίδιας της κοίτης του Αχλαδίτη ποταμού, όπως εξηγείται αμέσως παρακάτω. Στα πλαίσια της ταξινόμησης των κοιτών των ποταμών, το διάγραμμα που κατασκεύασε ο Rosqen (1994) καλύπτει όλο το σύνολο των τύπων των κοιτών ποταμών και συστείνεται για την ταξινόμηση της μορφολογίας τους στην εφαρμοσμένη μηχανική. Είναι ίσως το πιο περιεκτικό σύστημα ταξινόμησης που έχει επινοηθεί ως τώρα.

Το παραπάνω σύστημα χωρίζει του ποταμούς σε εφτά κύριους τύπους με βάση το βαθμό εγκιβωτισμού (entrenchement), την κλίση, την αναλογία πλάτους/βάθους και την καμπυλότητα. Μέσα σε κάθε κύρια κατηγορία υπάρχουν έξι υποκατηγορίες και εξαρτώνται από τον κύριο τύπο του υλικού πυθμένα και όχθεων.

Το βασικό πλαίσιο εργασίας της μεθόδου του Rosgen φαίνεται στο Σχήμα 32. Τα κριτήρια του συστήματος ταξινόμησης και οι περιγραφές των κύριων μορφών και χαρακτηριστικών κάθε τύπου έχουν καταγραφεί σε ξεχωριστό πίνακα. Η εξέταση των κριτηρίων, των τύπων και των χαρακτηριστικών που βρίσκονται σε αυτό τον πίνακα δείχνουν ότι συνδυάστηκαν πολλά από τα στοιχεία που περιγράφονται παραπάνω (κλίση, πλάτος, βάθος εγκιβωτισμού κλπ). Το αποτέλεσμα είναι μια ταξινόμηση γεωμορφολογική, η οποία είναι πολύ περιεκτική αλλά απαιτεί μια πλατιά γεωμορφολογική γνώση και κατανόηση για να εφαρμοστεί με συνέπεια και χρήσιμα.



Σχήμα 32.: Επιμήκεις, εγκάρσιες διατομές και κατόψεις των κυρίων τύπων ποταμών, συμφώνα με τον Rosgen (1994) (από Βουβαλίδη Κ., 2006).

Ειδικότερα για την περιοχή μελετης προσδιορίστηκαν τα παραπάνω στοιχεία και βρέθηκε ότι, η αναλογία πλάτους – βάθους στην συγκεκριμένη θέση είναι 11,5, ο Μ.Λ.

1,13 και τέλος η μέση αξονική κλίση της κοίτης 4,27° ή καλύτερα 7,46%, δηλαδή μεταξυ 0.04 και 0.10.

Τα στοιχεία αυτά κατατάσουν την κοίτη του Αχλαδίτη, αναφορικά πάντα με την θέση της περιοχής μελέτης, στο τύπο Α, ο οποίος με την σειρά του περιλαμβάνει απότομους ποταμούς, εγκιβωτισμένους, που παρουσιάζουν καταρράκτες και λίμνες κατά τόπους. Πρόκειται για υψηλής ενέργειας ποταμούς που μεταφέρουν χονδρόκοκκο υλικό ως επί το πλείστον το οποίο και αποθέτουν κατά τόπους. Οι κοίτες των ποταμών που ανήκουν στον συγκεκριμένο τύπο θεωρούνται και είναι πολύ σταθερές.

Οι κοίτες του συγκεκριμένου τύπου απαντούν σε περιοχές με γενικά υψηλό ανάγλυφο, στις οποίες συντελείται έντονη χαραδρωτή διάβρωση. Οι διαβρωσιγενείς και αποθετικές μορφές είναι πολλές και σε χαρακτηριστική συχνή εναλλαγή (Rosgen 1994, από Βουβαλίδη Κ. 2006).

Ασφαλώς όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνονται πλήρως από την γεωμορφολογική μελέτη της περιοχής μελέτης, η οποία έχει προηγηθεί νωρίτερα και έχει γίνει εκτενής λόγος.

Ιδιαίτερα όσον αφορά τα σημεία των καταρρακτών κατά μήκος της κοίτης, ουσιαστικά κάνουμε λόγο για παρουσία των λεγόμενων σημείων καμπής (Knickpoints), τα οποία οφείλουν την παρουσία τους είτε σε στρωματογραφικά αίτια, όπως π.χ. εναλλαγές μαλακών και σκληρών πετρωμάτων είτε αποδίδονται στην τεκτονική δράση.

Σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω, το βασικό επίπεδο διάβρωσης για τον άνω ρου του ποταμού έχει μεταβληθεί (ταπεινωθεί) στις θέσεις των σημείων καμπής. Επειδή πλέον ο ποταμός δεν βρίσκεται σε ισορροπία, θα αρχίσει να ρυθμίζει ξανά την καμπύλου του ορίου κλίσης της κοίτης (προφίλ ισορροπίας). Κατά μήκος του σημείου καμπής η υδραυλική δράση θα αυξηθεί από την αυξανόμενη κλίση και η διάβρωση της κοίτης θα ενισχυθεί τοπικά. Η επίδραση αυτή της διάβρωσης προκαλεί την μετανάστευση ή την διάδοση του σημείου καμπής προς τον άνω ρου του ποταμού (από Βουβαλίδη Κ., 2006).

Μια τέτοια γεωμορφολογική κατάσταση θα μπορούσε αρχικά να προκαλέσει την έντονη κατά βάθος διάβρωση στο τμήμα της κοίτης του Αχλαδίτη που δέχεται τα νερά της υπό μελέτη πηγής η οποία σε συνδυασμό με την στρωματογραφία της περιοχής μελέτης, δικαιολογούν τα σημαντικά βάθη εγκιβωτισμού στην θέση αυτή. Ας μην ξεχνάμε άλλωστε ότι η κοίτη του Αχλαδίτη δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Ασφαλώς η έντονη τεκτονική δράση των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης ενοχοποιείται για την δημιουργία των συγκεκριμένων σημείων, γύρω από τα οποία ενισχύθηκαν τοπικά οι διεργασίες διάβρωσης, με αποτέλεσμα να βλέπουμε σήμερα την κοίτη να είναι εγκιβωτισμένη κατά μήκος των συγκεκριμένων τμημάτων και ιδιαίτερα στενή (με σχετικά μιρό πλάτος) εκεί όπου η φύση των γεωλογικών σχηματισμών το επιτρέπει.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, μια τέτοια θέση εγκιβωτισμού όχι απαραίτητα σημαντικού βάθους, αρχικά τουλάχιστον, αλλά κυρίως σχετικά μικρού πλάτους φαίνεται να συνιστούσε εκείνο το τμήμα της κοίτης που δεχόταν τα νερά της πηγής, τα οποία βρισκόταν τοπογραφικά λίγο υψηλότερα, γεγονός φυσικά στο οποίο οφείλεται η εκδήλωση της υδατόπτωσης στην συγκεκριμένη θέση. Επομένως δεν θα είναι λάθος να θεωρήσουμε ότι η λειτουργία της πηγής και της υδατόπτωσης στην υπό μελέτη θέση θα πρέπει να είναι σύγχρονη ή μεταγενέστερη του εγκιβωτισμού της κοίτης στο ίδιο σημείο.

Η τελευταία διαπίστωση γίνεται πιο κατανοητή εάν αναλογιστούμε το γεγονός ότι η ποτάμια διάβρωση συντελείται και κατά την διάρκεια των παγετωδών περιόδων του Τεταρτογενούς σε αντίθεση με την καρστική διαλύση, η οποία σχεδόν σταματά σε τέτοια περιβάλλοντα.

Ασφαλώς το όλο θέμα χρήζει αντικείμενο πιο ειδικής και εμπεριστατωμένης μελέτης, κάτι το οποίο όμως δεν συνιστά κύριο σκοπό της παρούσας εργασίας.

# 6.2.4. Υψομετρική Καμπύλη και Υψομετρικό Ολοκλήρωμα (Hypsometric Curve and Hypsometric Integral) (Keller & Pinter 2002).

Η κατανομή των υψομέτρων σε μία υδρολογική λεκάνη μπορεί να εκφραστεί από την υψομετρική καμπύλη. Για την κατασκευή της χρειάζεται ο υπολογισμός του σχετικού υψομέτρου  $\frac{h}{H}$  και του σχετικού εμβαδού  $\frac{a}{A}$ . Για μία δεδομένη λεκάνη απορροής, το H αποτελεί το τοπικό ανάγλυφο της λεκάνης (διάφορα υψηλότερου σημείο της λεκάνης από το χαμηλότερο σημείο της) και το h, είναι το ύψος της βάσης κάθε τμήματος από τη βάση της λεκάνης. Το A, αποτελεί το συνολικό εμβαδόν της λεκάνης και το a, είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που βρίσκεται από το υψόμετρο h, μέχρι το ανώτερο σημείο της λεκάνης (βλ. Σχ. 33). Οι τιμές του λόγου  $\frac{a}{A}$ , κυμαίνονται

από 1, στο στόμιο της λεκάνης (όπου ο λόγος  $\frac{h}{H}$  είναι ίσος με το μηδέν), έως 0.0, στο υψηλότερο σημείο της λεκάνης (όπου ο λόγος  $\frac{h}{H}$  είναι ίσος με τη μονάδα) (Keller& Pinter 2002).

Η χαρτογράφηση των τιμών των λόγων  $\frac{h}{H}$  και  $\frac{a}{A}$ , δίνει την υψομετρική καμπύλη, η οποία είναι ανεξάρτητη από την κλίμακα του χάρτη, του μεγέθους και του αναγλύφου των λεκανών και για το λόγο αυτό βοηθάει σε συγκριτικές παρατηρήσεις.



Σχήμα 33.: Υπολογισμός υψομετρικής καμπύλης. (Keller & Pinter 2002).

Με βάση τον Strahler (1952, 1957, 1964, από Αστάρα Θ., 1980), η μορφή που παρουσιάζει η υψομετρική καμπύλη καθώς και η τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος, μπορούν να δώσουν στοιχεία για το στάδιο απογύμνωσης στο οποίο βρίσκεται μία λεκάνη απορροής. Έτσι, υψηλή τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος χαρακτηρίζει μία περιοχή που βρίσκεται στο στάδιο της νεότητας, όπου το ανάγλυφο είναι τραχύ και κυριαρχούν οι απότομες και βαθιές κοιλάδες σχήματος V. Μία ενδιάμεση τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος και σιγμοειδής μορφή της υψομετρικής καμπύλης, αναπαριστά ένα ώριμο στάδιο εξέλιξης, όπου οι γεωμορφολογικές διεργασίες βρίσκονται σε μία σχετική ισορροπία. Τέλος, η παρουσία πλατώματος και η χαμηλή τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος, δείχνει ότι η περιοχή βρίσκεται στο στάδιο του γήρατος, όπου κυριαρχούν οι πεπλατυσμένες κοιλάδες, καθώς και ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται από τεκτονική αδράνεια, αφού οι διεργασίες διάβρωσης υπερισχύουν για μεγάλο χρονικό διάστημα των διαδικασιών ανύψωσης.

Η μετάβαση από το στάδιο της νεότητας στο στάδιο ωριμότητας ανταποκρίνεται κατά προσέγγιση σε τιμή υψομετρικού ολοκληρώματος 60 %, ενώ η μετάβαση από το στάδιο της ωριμότητας σε αυτό του γήρατος, ανταποκρίνεται σε τιμή υψομετρικού ολοκληρώματος 35 % (Strahler 1957, από Αστάρα Θ., 1980).

Από την μορφή της υψομετρικής καμπύλης για την λεκάνη Σιδηροκάστρου (βλ. Σχ. 34), συμπεραίνουμε ότι η λεκάνη Σιδηροκάστου βρίσκεται σε στάδιο γήρατος, ενώ από τον υπολογισμό του εμβαδού του γραφήματος (με καταμέτρηση των εκατοστών σε μιλιμετρέ χαρτί) βρέθηκε ότι το υψομετρικό ολοκλήρωμα είναι 28,8%. Συνεπώς μετακινήθηκε το 72,2% της μάζας της λεκάνης και είμαστε πράγματι σε στάδιο γήρατος (Strahler 1957, από Αστάρα. Θ., 1980).

Τόσο η υψομετρική καμπύλη όσο και η τιμή του υψομετρικού ολοκληρώματος, υποδηλώνουν το προφανές, ότι δηλαδή η κοίτη του Αχλαδίτη δεν έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας, γεγονός που δικαιολογεί την διαβρωτική της δράση μέχρι σήμερα καθώς και τα χαρακτηριστικά χειμάρρου που εμφανίζει.



ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΕΚΑΝΗΣ

Σχήμα 34.: Γραφική παράσταση των λόγων α/Α και h/Η για το σύνολο της λεκάνης στο οποίο απεικονιζεται και η θέση ενός ισχυρού 'σημείου καμπής' που εντοπίζεται μάλιστα κοντά στο Αχλαδοχώρι, ενδεικτικό των διεργασιών ανανέωσης που υπόκειται η λεκάνη.

6.2.5. Ασυμμετρία λεκάνης απορροής (Drainage Basin Asymmetry), (Keller & Pinter 2002)

Ο παράγοντας ασυμμετρίας είναι το % ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνει το τμήμα της λεκάνης που βρίσκεται δεξιά από τον κύριο κλάδο του ποταμού ή ρέματος (ως προς τα κατάντη), προς όλη την επιφάνεια της λεκάνης.

## AF=100 (Ar/At)

Όπου Ar:το εμβαδό της υπολεκάνης δεξιά (κοιτάζοντας προς τα κατάντη) του κύριου ποταμού, At: το ολικό εμβαδό της λεκάνης

Ο παράγοντας ασυμμετρίας (Asymmetry Factor AF) δείχνει την τεκτονική περιστροφή ή κλίση (tilting) μιας λεκάνης απορροής ή μιας άλλης ορισμένης (μεγαλύτερης ή μικρότερης) περιοχής. Όταν το ποτάμιο σύστημα δημιουργείται και παραμένει σε σταθερή θέση, τότε ο AF είναι περίπου 50. Περιστροφή (Tilt) προς τα αριστερά του κύριου ποταμού δίνει τιμές μεγαλύτερες από 50.

Στο παράδειγμα του Σχήματος 35 φαίνεται ότι ο κύριος ποταμός ρέει προς τα βόρεια και η τεκτονική περιστροφή είναι προς τα δυτικά, άρα οι παραπόταμοι στη δεξιά πλευρά του κύριου ποταμού είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με αυτούς στην αριστερή πλευρά. Άρα ο AF θα είναι μεγαλύτερος από 50.



**Σχήμα 35.:** Ασυμμετρία λεκάνης και κλίση τεκτονικού τεμάχους (Τροποποιημένο σχήμα από Keller & Pinter 2002).

Η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει ότι ούτε οι λιθολογικοί παράγοντες (όπως αλλαγή πετρώματος, κλίσεις των στρωμάτων κ.α) ούτε το τοπικό κλίμα μεταβάλλονται, παρά μόνο η τεκτονική περιστροφή (tilting) επηρεάζει την ασυμμετρία της λεκάνης.

Σύμφωνα με τον Πίν. 10., στην αρχή της παραγράφου αυτής, προκύπτει ότι παράγοντας ασυμμετρίας, για την υπό μελέτη λεκάνη είναι:  $AF_{Sidir.} = 183,9/290,5 = 0,633>0,50$  ή καλύτερα 63,3% και επειδή ο Αχλαδίτης ρέει προς τα NA, σύμφωνα με

τα παραπάνω έχουμε μια τεκτονική περιστροφή της κοίτης προς τα Α και ΝΑ. Η συγκεκριμένη διεύθυνση περιστροφής της κοίτης, όπως διαπιστώσαμε σε άλλη παράγραφο προηγούμενα, συμφωνεί με τα νεοτεκτονικά δεδομένα της περιοχής μελέτης.

Τέλος, ο παράγοντας αυτός επιβεβαιώνει επίσης το σενάριο της ανανέωσης που υπόκειται η λεκάνη κάνοντας λόγο δηλαδή για κοιλάδες που συνδέονται ή σχετίζονται με γεγονότα ανύψωσης (uplift). Ειδικότερα μάλιστα υποδηλώνει την ύπαρξη ασθενούς (με την έννοια της αργής διαδικασίας) τεκτονικής περιστροφής της λεκάνης, με κατεύθυνση προς τα A και NA μάλιστα.

#### 6.3. Γεωχημική έρευνα υπόθερμων υδάτων περιοχής μελέτης

#### 6.3.1. Γενικά

Η χημική σύσταση των γεωθερμικών ρευστών είναι αποτέλεσμα του τρόπου σχηματισμού τους. Τα φυσικά υπόγεια νερά είναι συνήθως σχεδόν ουδέτερα στο pH και ελαφρώς δισανθρακικά (περιέχουν ποσότητες όξινων ανθρακικών ιόντων, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) στο χαρακτήρα. Όταν τα νερά αυτά θερμαίνονται σε ένα γεωθερμικό σύστημα, τείνουν να γίνούν περισσότερο πλούσια σε NaCl. Εάν μέρος του ρευστού εξατμίζεται σε κάποιο βάθος, τότε τα μη συμπυκνώσιμα αέρια (π.χ. CO<sub>2</sub>) διαχωρίζονται μέσα στη φάση του ατμού και μεταναστεύουν, ανεξάρτητα από το νερό, προς την επιφάνεια.

Η γνώση του χημισμού των γεωθερμικών ρευστών συντελεί στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την προέλευση αυτών, για την προέλευση των διαλυμένων μέσα σε αυτά στοιχείων και αερίων, για τις συνθήκες του ταμιευτήρα, για τις χημικές διεργασίες που έλαβαν χώρα μέσα σ' αυτόν, για την εκτίμηση της θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, για τις διόδους κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών, για την πιθανή ανάμιξη των γεωθερμικών ρευστών με επιφανειακότερα, μη γεωθερμικά νερά και για τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην χημεία των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα και στο χημισμό των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας γύρω από την περιοχή μελέτης, που συνιστά περιθωριακό τμήμα της λεκάνης του Στρυμόνα πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερών από 4 θέσεις, όπως πηγές, μικρά αρδευτικά κανάλια, θέσεις καταρρακτών καθώς και στα σημεία πτώσεις αυτών.

## 6.3.2. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων

Για την αξιολόγηση των γεωχημικού χαρακτήρα των νερών της εξεταζόμενης περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από συνολικά 52 δείγματα. Στους Πίνακες 1 έως 13 του Παραρτήματος Γ, δίνονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων.

Τα δεδομένα εκφράζονται σε mg/l, meq/l και %meq/l. Η μονάδα έκφρασης meq/l χιλιοστοϊσοδύναμο ανά λίτρο) δίνεται από τη σχέση (Λαμπράκης 1994):

όπου

Εκτός από τις χημικές παραμέτρους παρατίθενται, στον ίδιο πίνακα τιμών και οι σημαντικότερες φυσιοχημικές παράμετροι κάθε δείγματος, όπως θερμοκρασία, αγωγιμότητα, PH, Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (Σ.Δ.Α ή TDS), **αλκαλικότητα P**, **αλκαλικότητα M**, ολική σκληρότητα (σε f<sup>°</sup>), ανθρακική σκληρότητα (παροδική) (σε f<sup>°</sup>) και η μη ανθρακική σκληρότητα (μόνιμη) (σε f<sup>°</sup>).

Το Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (ΣΔΑ ή TDS) είναι η συνολική συγκέντρωση διαλυμένων στο νερό αλάτων (Καλλέργης 1986), η οποία συνήθως είναι μικρότερη από 500mg\l και κυμαίνεται δε μεταξύ 100-100.000mg\l και υπολογίζεται από την άθροιση των συγκεντρώσεων των μεμονωμένων ιόντων, συμπεριλαμβανομένου και του διαλυμένου SiO<sub>2</sub>. Δεν περιλαμβάνονται τα αιωρούμενα σωματίδια, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα αέρια (Καλλέργης Γ., 1986). Το Σ.Δ.Α. αποτελεί ασφαλή δείκτη της περιεκτικότητας σε άλατα των υπογείων νερών.

Αλκαλικότητα είναι η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει οξέα και οφείλεται στην παρουσία των όξινων ανθρακικών ( $HCO_3^-$ ), των ανθρακικών ( $CO_3^2$ ) και υδροξυλικών ( $OH^-$ ) ιόντων. Η ποσότητα του διαλυμένου  $CO_2$  με τη μορφή  $CO_3$  και διαλυμένου  $H_2CO_3$  ποικίλλει, ανάλογα με το pH. Τα  $HCO_3$  παρουσιάζονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό έναντι των άλλων. Όταν το pH είναι 4.5 έως 8.3, η αλκαλικότητα οφείλεται στα  $HCO_3$  και 10.5 η αλκαλικότητα που οφείλεται στα  $HCO_3$ ,  $CO_3^{2-}$  και

ΟΗ ονομάζεται αλκαλικότητα P ή αλκαλικότητα φαινολοφθαλεϊνης επειδή προσδιορίζεται με το δείκτη phenolopthalein (Καλλέργης 1986, Λαμπράκης 1994). Η αλκαλικότητα M που οφείλεται στα όξινα ανθρακικά (HCO<sub>3</sub>) αντιστοιχεί στη συγκέντρωση σε meq/I των HCO<sub>3</sub>, ενώ η αλκαλικότητα P στη συγκέντρωση σε meq/I των CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Πρώτος χρησιμοποίησε τους όρους σκληρό και μαλακό νερό ο Ιπποκράτης (460-354 π.Χ.). Η σκληρότητα του νερού οφείλεται σε διάλυση σε αυτό αλάτων του  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$ . Τα ιόντα αυτά αντιδρούν με το σαπούνι και σχηματίζουν ίζημα και μαζί με ορισμένα ανιόντα, που βρίσκονται στο νερό, δημιουργούν κρούστα. Τα νερά αυτά για τους πιο πάνω λόγους είναι ακατάλληλα για οικιακή χρήση, για πλύσιμο και κατά κανόνα πρέπει να υπόκεινται στην διαδικασία της αποσκλήρυνσης. Η διάλυση διευκολύνεται από το  $CO_2$  που ελευθερώνεται από την βακτηριακή δράση σε οργανικές ουσίες του εδάφους, εμπλουτίζοντας έτσι το διηθούμενο νερό σε  $CO_3^{-2}$  (Sawyer-McCarthy, 1967, από Καλλέργη Γ., 1986).

Χαμηλό pH προκαλεί την διάλυση των αδιάλυτων ανθρακικών του εδάφους και των ασβεστόλιθων και την μετατροπή τους σε διαλυτά όξινα ανθρακικά άλατα. Διάφορες προσμείξεις που περιέχονται στους ασβεστόλιθους, όπως π.χ., θειικά, χλωριούχα και πυριτικά άλατα διαλύονται επίσης. Έτσι σε περιοχές όπου παχύ έδαφος υπέρκειται ασβεστολιθικών σχηματισμών, το νερό αποκτά μεγάλη σκληρότητα και ιδιαίτερα μάλιστα στο εσωτερικό των συγκλινικών κοιλάδων, όπου τα πάχη των στρωμάτων είναι ακόμη μεγαλύτερα. Η τελευταία είναι γνωστή και ως ολική σκληρότητα HT, η οποία συνήθως εκφράζεται σε ισοδύναμο CaCO<sub>3</sub> σε mg/l (γαλλικός βαθμός σκληρότητας <sup>ο</sup>f). Ολική σκληρότητα είναι το άθροισμα της παροδικής και μόνιμης σκληρότητας. Η ολική σκληρότητα υπολογίζεται από τη σχέση (Bower 1978, από Καλλέργη 1986):

$$\mathbf{HT} = ([C\alpha^{2^{+}}] + [Mg^{2^{+}}]) \ge 5,$$

όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων  $\mathrm{Ca}^{2+}$ και  $\mathrm{Mg}^{2+}$ είναι εκφρασμένες σε meq/I.

Η σκληρότητα του ύδατος οφείλεται στην παρουσία ανθρακικών, διττανθρακικών και θειϊκών αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου. Η σκληρότητα διακρίνεται σε ανθρακική και σε μη ανθρακική.

**1.** Η **ανθρακική σκληρότητα** αποβάλλεται κατά το βρασμό και για αυτό την ονομάζουμε και παροδική σκληρότητα:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O_3$$

Η παροδική ανθρακική σκληρότητα είναι αυτή που οφείλεται στη διάλυση του CaCO<sub>3</sub> και MgCO<sub>3</sub> κατά την κυκλοφορία του υπογείου νερού και συνεπώς οφείλεται στα όξινα ανθρακικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου [Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> και Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>].

**2.** Η μη ανθρακική σκληρότητα δεν αποβάλλεται κατά το βρασμό και γι αυτό την ονομάζουμε και μόνιμη σκληρότητα. Η μόνιμη ανθρακική σκληρότητα οφείλεται στα θειϊκά και τα χλωριούχα άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου.

Η ανθρακική σκληρότητα (σε °f), που οφείλεται στην παρουσία των HCO<sub>3</sub> υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την συγκέντρωση των HCO<sub>3</sub> (εκφρασμένη σε meq/1) επί 5. Αν το γινόμενο που προκύπτει είναι μικρότερο της ολικής σκληρότητας (HT) τότε η διαφορά (Ολική Σκληρότητα- Ανθρακική Σκληρότητα) δίνει την Μη Ανθρακική Σκληρότητα. Αν όμως το γινόμενο [HCO<sub>3</sub>] \*5, που δίνει την ανθρακική σκληρότητα είναι μεγαλύτερο από την υπολογισθείσα ολική σκληρότητα , τότε λαμβάνεται η ανθρακική σκληρότητα ίση με την ολική σκληρότητα και η μη ανθρακική σκληρότητα ίση με 0 (Ε. Ντότσικα, προφορική επικοινωνία).

Η μόνιμη σκληρότητα είναι πάντα μικρότερη από την ολική σκληρότητα και η διαφορά τους δίνει την παροδική σκληρότητα που οφείλεται στα ευδιάλυτα άλατα. Η σχέση μεταξύ αυτών είναι η εξής: Ολική = Παροδική + Μόνιμη

Ανάλογα με την ολική σκληρότητα του νερού εκφρασμένη σε ισοδύναμο CaCO<sub>3</sub> σε mg/l, έχουν προταθεί οι δύο πιο κάτω ταξινομήσεις (βλ. Πίν. 14):

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	KATA SAWY	ER-McCARTHY	HEM 1970		
NEPOY	(1	.967)			
	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ	ΓΑΛΛΙΚΟΙ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ	ΓΑΛΛΙΚΟΙ	
	CaCO <sub>3</sub> σε	BAOMOI	CaCO <sub>3</sub> σε	BAOMOI	
	mg/l		mg/l		
ΜΑΛΑΚΟ	0-75	0-7,5	0 - 60	0-6	
ΜΕΤΡΙΑ ΣΚΛΗΡΟ	76 - 150	7,6 – 15	61 - 120	6,1 – 12	
ΣΚΛΗΡΟ	151 - 300	16 - 30	121 - 180	12,1 – 18	
ΠΟΛΥ ΣΚΛΗΡΟ	>300	>30	>180	>18	

Πίνακας 14.: Οι συνήθεις ταξινομήσεις του πόσιμου νερού με βάση την ολική σκληρότητα (τροποποιημένο από Καλλέργη Γ., 1986).

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 14 του Παραρτήματος Γ, για την περιοχή μελέτης, η σκληρότητα εκφρασμένη σε γαλλικούς βαθμούς κατά μέσο όρο δίνει τιμές 46,98 °f, 44,12 °f, 41,08 °f και 39,04 °f για τις θέσεις 1 - 4 αντίστοιχα. Επομένως

λοιπόν (σύμφωνα και με τον Πίνακα 14) κάνουμε λόγο ασφαλώς για πολύ σκληρά νερά.

Η παρουσία των παρακάτω αλάτων με την σειρά συχνότητας έχουν σχέση με την σκληρότητα:

1.	$CaCO_3 - Ca(HCO_3)_2$	5. $CaCI_2$
2.	$Ca(NO_3)_2$	6. $MgCO_3 - Mg(HCO_3)_2$
3.	CaSO <sub>4</sub>	7. $Mg(NO_3)_2$
4.	MgCl <sub>2</sub>	8. MgSO <sub>4</sub>

Ασφαλώς, τα νερά της υπό μελέτη πηγής πρέπει να υποστούν συγκεκριμένη επεξεργασία ενός ισχυρού βαθμού αποσκλήρυνσης (και όχι μόνο), όταν και εφόσον αξιοποιηθούν, ιδίως όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για πόση.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των αναλύσεων προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθότητα της αναλυτικής διαδικασίας και να διαπιστωθεί τυχόν σφάλμα αυτής. Βασίζεται στην βασική αρχή ότι τα δείγματα του υπογείου νερού είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και συνεπώς το συνολικό θετικό φορτίο που λαμβάνεται από το άθροισμα των ισοδυνάμων των κατιόντων θα είναι ίσο με το συνολικό αρνητικό φορτίο που λαμβάνεται από το άθροισμα των ισοδυνάμων των ανιόντων (Λαμπράκης 1994, από Ε. Ντότσικα 1991). Το σφάλμα από το ισοζύγιο των θετικών και των αρνητικών

δηλ.: Σφαλαμα ισοζυγιου= $\frac{\Sigma \kappa \alpha \tau \text{iontwing} \Sigma \alpha \text{iontwing}}{\Sigma \kappa \alpha \tau \text{iontwing} + \Sigma \alpha \text{iontwing}} \times 100$ 

Το σφάλμα ισοζυγίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5-7%, προκειμένου το αποτέλεσμα της χημικής ανάλυσης να θεωρηθεί αξιόπιστο. Το σφάλμα ισοζυγίου (ή αναλυτικό σφάλμα) αναγράφεται στην τελευταία σειρά των αντίστοιχων πινάκων (βλ. Πίνακες 1-13 του Παράρτηματος Γ).

6.3.3. Ταξινόμηση - Υδροχημικός προσδιορισμός των νερών της περιοχής μελέτης

Μια ταξινόμηση του νερού με βάση υδροχημικά χαρακτηριστικά γίνεται κατά διάφορους τρόπους, αλλά πάντα όχι πλήρως παραστατικά. Η πιο απλή και συνηθισμένη περίπτωση είναι η διάκριση του νερού σε 'γλυκό' και 'αλμυρό' νερό. Η διάκριση αυτή προκύπτει με βάση την περιεκτικότητα του νερού σε Cl. Σαν όριο για τον διαχωρισμό αυτό τοποθετείται συνήθως η τιμή των 250mg Cl/l. Αυτό το όριο συνήθως είναι αυθαίρετο, εκλέγεται όμως γιατί τα νερά που παρουσιάζουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα από την παραπάνω, αρχίζουν να αποκτούν μια αλμυρή γεύση. Βασικά

στα υπόγεια νερά υπάρχουν όλες οι μεταβάσεις της συγκέντρωσης του Cl από 5-10mg Cl/l μέχρι ακόμα και πολλαπλάσια συγκέντρωση Cl από εκείνη που υπάρχει στο νερό της θάλασσας (περίπου 2.000mg Cl/l).

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 15 του παραρτήματος Γ, για την περιοχή μελέτης, οι τιμές του Cl κατά μέσο όρο για τις θέσεις 1-4, αντίστοιχα είναι 5,46, 5,52, 5,35 και 4,84 mg/l. Δεδομένου των αποτελεσμάτων αυτών το νερό χαρακτηρίζεται ως 'γλυκό'.

Ακόμη διάφορες ταξινομήσεις έχουν προταθεί ανάλογα με την περιεκτικότητα των υπογείων νερών σε TDS.

## Ταξινόμηση κατά Hem (1970)

Γλυκό νερό:	TDS	< 1000 mg\l
Μέτρια αλατούχο νερό:	TDS	3000-10.000 mg\l
Πολύ αλατούχο νερό:	TDS	10.000-35.000 mg\l
Υπεραλμυρό ('σαλαμούρα'):	TDS	> 35.000 mg\l.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 16 του παραρτήματος Γ, για την περιοχή μελέτης, οι τιμές του TDS κατά μέσο όρο για τις θέσεις 1-4, αντίστοιχα είναι 1189, 952, 623 και 862 mg/l. Συνεπώς θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως νερά 'γλυκά' με μικρή επιβάρυνση σε άλατα, αφού η τιμή του ΣΔΑ είναι κοντά στην οριακή τιμή των 1000 mg/l.

Αν και δεν υπάρχει κάποια γενικά αποδεκτή ταξινόμηση των γεωθερμικών νερών, συχνά τα γεωθερμικά νερά διαχωρίζονται σε σχέση με το <u>κυρίαργο ανιόν</u>. Σύμφωνα πάντα με το είδος των ιόντων που κυριαρχούν στη σύσταση των υπόγειων νερών, διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες (βλ. Πίν. 15):

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΝΕΡΟΥ	ПЕРІОХН рН	<b>KYPIA IONTA</b>
Υπόγεια	6-7.5	λίγα HCO3
Πλούσια σε χλωριόντα	4-9	Cl, λίγα HCO <sub>3</sub>
Πλούσια σε χλωριόντα-ανθρακικά	7-8.5	Cl, HCO <sub>3</sub>
Πλούσια σε θειικά ιόντα	1-3	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , λίγα Cl
Πλούσια σε θειικά-χλωριόντα	1-5	$Cl, SO_4^{-2}$
Πλόυσια σε όξινα ανθρακικά	5-7	HCO <sub>3</sub>
Αραιά χλωριούχα	6.5-7.5	Cl, λίγα HCO <sub>3</sub>

Πίνακας 15.: Σύνοψη των διαφόρων τύπων νερού στα γεωθερμικά συστήματα (τροποποιημένο από Φυτίκα & Ανδρίτσο, 2004)

Σύμφωνα με τις τιμές των Πινάκων 17 και 18 του Παραρτήματος Γ, διαπιστώνεται καθαρά ότι τα νερά της περιοχής μελέτης αναφέρονται στην έκτη κατηγορία (νερά πλούσια σε όξινα ανθρακικά ιόντα) από τις γενικές κατηγορίες του παραπάνω πίνακα.

Οι κύριοι τύποι των νερών, με βάση την φθίνουσα περιεκτικότητα σε ανιόντα και κατιόντα, είναι:

ANOPAKIKA:	$HCO_3 > SO_4^{-2} > CI^{-2}$
	$Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}$
ΧΛΩΡΙΟΥΧΑ:	$Cl^{-2} > SO_4^{-2} > HCO_3^{-1}$
	$Na^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$

Το ανιόν που επικρατεί καθορίζει την μεγάλη γεωχημική ομάδα στην οποία ανήκει το νερό. Ο βαθμός επικράτησης των άλλων ιόντων δείχνει πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά, τα οποία θα ερμηνευτούν παρακάτω σε σχέση με τις πραγματικές συγκεντρώσεις και τα υδρογεωλογικά δεδομένα.

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 19 του Παραρτήματος Γ διαπιστώνεται καθαρά ότι τα νερά της περιοχής μελέτης αναφέρονται στην πρώτη κατηγορία (ανθρακικά νερά) από τις παραπάνω δύο πολύ γενικές κατηγορίες.

<u>Από όλα τα παραπάνω αναμφισβήτητα μπορούμε να κατατάζουμε τα νερά της</u> <u>περιοχής μελέτης στην πρώτη κατηγορία της παραπάνω ταζινόμησης, των **οζινων** <u>ανθρακικών υδάτων (Ca – HCO<sub>3</sub> νερά).</u></u>

Όπως είναι ευρέως γνωστό, τόσο οι ασβεστολιθικοί τόφφοι όσο και οι τραβερτινικοί σχηματισμοί συνιστούν χερσαίες ανθρακικές αποθέσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται καταρχήν στην επικράτηση HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ιόντων στην σύσταση των υδάτων (όπως διαπιστώσαμε παραπάνω άλλωστε) που ρέουν στην ξηρά και είναι μετεωρικής προέλευσης φυσικά, σε αντίθεση με την σύσταση των θαλάσσιων υδάτων όπου η συγκέντρωση των παραπάνω ιόντων κυμαίνεται περίπου στα 160 mg/l.

Η οποιαδήποτε λοιπόν συμμετοχή θαλασσινού νερού στα νερά της περιοχής μελέτης, δεν θα επέτρεπε την απόθεση των παραπάνω σχηματισμών. Για να καταστεί σαφής ο αποκλεισμός της θαλάσσιας φάσης παραθέτουμε παρακάτω ορισμένα συγκριτικά διαγράμματα (βλ. Σχ. 36). Σε αυτά παρουσιάζονται τα επιμέρους ιόντα που προσδιορίστηκαν στα υπό μελέτη ύδατα ως προς τα ιόντα Cl, σε σύγκριση όμως με την ποσοτική συμμετοχή των εκάστοτε ιόντων στην σύσταση του θαλάσσιου νερού. Η τελευταία δίνεται κατά παραδοχή στο Πίνακα 16 που ακολουθεί:

Sea Water	SO4	Na	Κ	CI	Ca	Mg	HCO3
(mg/l)	2965	11840	452	20560	420	1390	160

Πίνακας 16.: Η χημική σύσταση του θαλάσσιου νερού σε βασικά ιόντα (από Dotsika E. 1991).



Σχήμα 36.: Συγκριτικά διαγράμματα ανάμεσα στην σύσταση των υπό μελέτη υδάτων και την σύσταση του θαλάσσιου νερού (Sea Water) στα επιμέρους βασικά ιόντα

Στο σύνολο των παραπάνω διαγραμμάτων διαπιστώνουμε την σαφή μετεωρική προέλευση των υπό μελέτη υδάτων, ιδιαίτερα μάλιστα για τα ιόντα HCO<sub>3</sub>, δεδομένου ότι τα νερά σε κάθε διάγραμμα τοποθετούνται σε εντελώς διάφορη θέση από αυτή του θαλάσσιου νερού. Επομένως, μπορεί να αποκλειστεί η οποιαδήποτε συμμετοχή της θαλάσσιας φάσης στην σύσταση των νερών της περιοχής μελέτης, γεγονός που δικαιολογεί επιπρόσθετα την κυριαρχία των ιόντων HCO<sub>3</sub> σε αυτά.

Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε, εάν κάνουμε ένα σύνθετο συγκριτικό διάγραμμα Langelier – Ludwig για το σύνολο όμως των ιόντων αυτή την φορά, που περιέχονται στα υπό μελέτη ύδατα, και το θαλάσσιο νερό (βλ. Σχ. 37).



**Σχήμα 37.:** Συγκριτικό σύνθετο διάγραμμα ανάμεσα στην σύσταση των υπό μελέτη υδάτων και την σύσταση του θαλάσσιου νερού (Sea Water) στο σύνολο των βασικών ιόντων που περιέχουν.

#### 6.3.4. Γραφικές παραστάσεις των χημικών αναλύσεων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων σε πίνακες δεν είναι εποπτική και κατά κανόνα δεν προσφέρεται σε συγκρίσεις, συσχετισμούς, ερμηνεία.

Διάφορα συστήματα έχουν επινοηθεί για να παραστήσουν σχηματικά, με την μορφή διαγραμμάτων το χημισμό του νερού. Οι τεχνικές αυτές αποβλέπουν στην ταξινόμηση πολλών δειγμάτων νερών σε ένα διάγραμμα και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με ομοιότητες ή διαφορές των νερών, καθώς και ποια νερά αποτελούν προϊόντα ανάμειξης ή όχι. Επίσης μπορούν να χρησιμεύσουν στο χαρακτηρισμό των νερών ανάλογα με τα συστατικά που κυριαρχούν σε αυτά π.χ. οξυανθρακούχα νερά, πλούσια σε θειικά κτλ.

Ανάλογα με το σκοπό και τα υπάρχοντα στοιχεία χρησιμοποιούμε και διαφορετικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί κατανέμονται βασικά σε τρεις τύπους:

- Στα διαγράμματα εκείνα στα οποία παριστάνουμε τις τιμές της ανάλυσης ενός μόνο δείγματος.
- Στα διαγράμματα εκείνα στα οποία πολλές αναλύσεις διαφόρων δειγμάτων είναι δυνατόν να συγκριθούν απευθείας και γρήγορα μεταξύ τους και
- 3. Επιφανειακές παραστάσεις πάνω σε χάρτες ή τομές.

Όσον αφορά την περιοχή μελέτης παραθέτουμε στην συνέχεια πλήθος διαγραμμάτων και γραφικών παραστάσεων σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα των

χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, όπως αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 έως 13 του Παραρτήματος Γ.

 Τα ραβδοδιαγράμματα, στα οποία κάθε ανάλυση παρουσιάζεται σαν μια κατακόρυφη στήλη. Το ύψος της, με βάση κάποια κατακόρυφη κλίμακα, είναι ανάλογο προς την ολική συγκέντρωση ανιόντων ή κατιόντων.

Με πολύ απλή μορφή μπορούν να παρασταθούν οι διάφορες τιμές μιας ανάλυσης για ιόντα σε στήλες που το μήκος τους εκλέγεται με μια ορισμένη κλίμακα σύμφωνα με την συγκέντρωση των ιόντων (βλ. Σχ. 38).

Ο συνηθέστερος τρόπος των στηλοειδών διαγραμμάτων αποδίδει τις τιμές των ανιόντων και κατιόντων σε απόλυτες τιμές (meq/l ή meq/kg). Το συνολικό μήκος της στήλης αποτελεί ένα μέτρο της συνολικής ποσότητας σε ανιόντα και κατιόντα ως mg% ή meq% (σε σχέση με το σύνολο των κατιόντων και των ανιόντων). Η σειρά από κάτω προς τα πάνω είναι:  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $NO_3^-$  (βλ. Σχ. 39).







Σχήμα 39.: Χαρακτηριστικά ραβδοδιαγράμματα, ως προς το σύνολο των ιόντων των υδάτων της περιοχής μελέτης όπως προκύπτουν από τις χημικές αναλύσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα εύκολα διαπιστώνουμε την επικράτηση δύο κυρίως ιόντων στις χημικές αναλύσεις που διεξήχθησαν, δηλαδή του Ca και του HCO<sub>3</sub>, δεδομένου ότι ο κύριος γεωλογικός σχηματισμός που διαρρέουν είναι τα περίφημα ολισθιστρώματα (ασβεστολιθικά κροκαλολατυποπαγή) της λεκάνης του Σιδηροκάστρου.

2) Τα κυκλικά διαγράμματα, στα οποία τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, σε meq/l, παρουσιάζονται σαν τομείς κύκλων. Η ακτίνα του κάθε κύκλου, πάντοτε σε σχέση με κάποια κλίμακα, είναι ανάλογη της ολικής συγκέντρωσης ιόντων της συγκεκριμένης ανάλυσης. Οι τομείς κάθε κύκλου δείχνουν το κλάσμα των διαφόρων ιόντων, εκφρασμένων σε meq/l. Συνήθως χρησιμοποιείται η ποσοστιαία αναλογία των διαφόρων ιόντων, έτσι τα τόξα του κύκλου είναι ανάλογα προς το % καθενός ιόντος και η ακτίνα προς την συνολική συγκέντρωση ιόντων (βλ. Σχ. 40). Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές κυκλικών διαγραμμάτων. Τα πιο απλά είναι τα κυκλικά διαγράμματα του Hem (1962).



Σχήμα 40.: Χαρακτηριστικά κυκλικά διαγράμματα, ως προς τα κατιόντα και ανιόντα αντίστοιχα, για τα νερά της υπό μελέτη πηγής %meq/l.

Σύμφωνα και με το Σχήμα 40, διαπιστώνεται ξεκάθαρα για μια ακόμη φορά η επικράτηση των ιόντων Ca και HCO<sub>3</sub> στη χημική σύσταση των υδάτων των δύο συστημάτων, σε meq/l αυτή τη φορά όμως.

3) Τα τριγραμμικά διαγράμματα, τα οποία είναι τα πιο εύχρηστα, διότι η σύγκριση διαφόρων ποσοτήτων νερού είναι άμεση με αυτά. Στα διαγράμματα αυτά που προτάθηκαν από τον Piper (1944), τα κατιόντα εκφρασμένα επί τοις % του συνόλου των κατιόντων σε meq/l, προβάλλονται σαν ένα σημείο στο αριστερό τρίγωνο, ενώ τα ανιόντα, εκφρασμένα επί τοις % του συνόλου των ανιόντων, εμφανίζονται σαν ένα σημείο στο δεξιό τρίγωνο. Τα δύο αυτά σημεία προβάλλονται στη συνέχεια στο κεντρικό ρόμβο, παράλληλα προς τις δύο πάνω πλευρές του. Το σημείο αυτό παρουσιάζει την ολική ιοντική κατανομή και παριστάνεται με ένα κύκλο, του οποίου η ακτίνα, σε σχέση με κάποια κλίμακα, είναι ανάλογη προς το TDS (βλ. Σχ. 41).

Τα διαγράμματα αυτά, επίσης παρουσιάζουν το πλεονέκτημα, ότι είναι άμεση η αναγνώριση των ομοιοτήτων και των διαφορών που παρουσιάζουν διάφορα δείγματα νερού, καθώς και της ανάμειξης δύο διαφορετικών νερών.

Σύμφωνα λοιπόν με τις τιμές των συγκεντρώσεων των τιμών των Πινάκων 20 και 21 του παραρτήματος Γ, εκφρασμένες σε % meq/l προβάλλονται αυτές πάνω σε ένα διάγραμμα Piper. Στο Σχήμα 41, που ακολουθεί, απεικονίζονται οι προβολές του μ.ο. των δειγμάτων των νερών της περιοχής μελέτης.





Από την μεταφορά των τιμών των χημικών αναλύσεων πάνω στο συγκεκριμένο διάγραμμα, προκύπτει ότι τα νερά, της περιοχής μελέτης, είναι νερά που ανταποκρίνονται στον γενικό τύπο Ca – HCO<sub>3</sub> και ειδικότερα στην υποκατηγορία Ca,(Mg)-HCO<sub>3</sub>.

Προφανώς τα νερά και των τεσσάρων θέσεων δειγματοληψίας ανήκουν ποιοτικά στην ίδια κατηγορία νερού, αφού οι θέσεις τους σχεδόν συμπίπτουν στο παραπάνω διάγραμμα, γεγονός που αναμένεται δεδομένου ότι έχουν και τα δύο συστήματα κοινή πηγή τροφοδοσίας και διαρρέουν ασφαλώς τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η όποια απόκλιση σημειώνεται (μικρή σε βαθμό) θα πρέπει να αποδοθεί κυρίως στο γεγονός ότι όλες οι παραπάνω θέσεις, εκτός από αυτή της πηγής, επηρεάζεται πιο γρήγορα και ίσως πιο έντονα από τις όποιες συνθήκες επιφανείας διαμορφώνονται κατά τακτά χρονικά διαστήματα.

Στα νερά του τύπου Ca(Mg)-HCO<sub>3</sub>, όσον αφορά το κατιονικό φορτίο κυριαρχούν τα ιόντα Ca<sup>2+</sup> σε ποσοστό 62.2-84.9% (στην περίπτωση μας έχουμε 68 – 70% και ακολουθούν τα ιόντα Mg<sup>+2</sup> σε ποσοστό 22 – 25%), ενώ στο ανιονικό επικρατούν τα

ιόντα  $HCO_3$  <sup>-</sup> σε ποσοστό 64.2-94% (στην περίπτωση μας σε ποσοστό 90 – 92%). Συνήθως αντιπροσωπεύει ψυχρά έως υπόθερμα επιφανειακά νερά πλούσια σε  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$ , καθαρά πρωτογενούς μετεωρικής προέλευσης, δεδομένου ότι τα γεωθερμικά νερά της ευρύτερης περιοχής ανήκουν στα νερά του τύπου Na-HCO<sub>3</sub> (Αρβανίτης κ.α. 1998).

5) Τα τετραγωνικά διαγράμματα Langelier-Ludwig, τα οποία χρησιμοποιούνται σπανιότερα από τα άλλα διαγράμματα για την σύγκριση νερών διαφορετικής προέλευσης. Οι χημικές αναλύσεις εκφράζονται σε % meq/l (βλ. Σχ. 42).



**Σχ. 42.:** Χαρακτηριστικό **τετραγωνικό** διάγραμμα για την απεικόνιση και σύγκριση του χημισμού των νερών από τις τέσσερις θέσεις δειγματοληψίας.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα γίνεται σαφής ο σχεδόν ταυτόσημος χημισμός των τριών θέσεων δειγματοληψίας με τον αντίστοιχο της πηγής και κυρίως η επικράτηση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> στην χημική σύσταση των υπό μελέτη υπόθερμων υδάτων, γεγονός που δηλώνει ξεκάθαρα την πρωτογενή μετεωρική προέλευση των υδάτων αλλά και την σημαντική σε έκταση και βαθμό διάλυση των ασβεστολιθικών σχηματισμών που δεσπόζουν στην περιοχή.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα νερά της υπό μελέτη πηγής είναι πλούσια σε ανθρακικά ιόντα, τα οποία γενικότερα θεωρούνται πλούσια σε CO<sub>2</sub>, και ο σχηματισμός τους είναι συνήθως αποτέλεσμα της αντίδρασης του διαλυμένου στα μετεωρικά νερά CO<sub>2</sub> με τα πετρώματα. Επιπλέον νερά πλούσια σε όξινα ανθρακικά περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις Ca και Mg. Η απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από τα νερά με βρασμό ή με διαχωρισμό των φάσεων οδηγεί σε σημαντική αύξηση του pH του διαλύματος.

Όσον αφορά ειδικότερα την συγκέντρωση του ασβεστίου στα γεωθερμικά νερά, αυτή ελέγχεται κυρίως από τα ορυκτά του τα οποία έχουν ανάδρομη διαλυτότητα (π.χ.CaCO<sub>3</sub>) και σε μικρότερο βαθμό από τα ασβεστούχα αργιλοπυριτικά.

Ο συγκεκριμένος χημισμός των υδάτων λοιπόν που περιγράφεται παραπάνω με ποικίλα διαγράμματα, είναι εκείνος που διαθέτει το κατάλληλο ασβεστιτικό φορτίο το οποίο μάλιστα μπορεί να αποδώσει κιόλας, μόλις ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες (μηχανικές και φυσικές), στις οποίες έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

#### 6.3.5. Γεωχημική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων

6.3.5.1. Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (ή TDS) των νερών της περιοχής έρευνας

Οι φυσικοχημικές παράμετροι που έχουν σημασία για τα θερμομεταλλικά νερά είναι το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία ελέγχεται από τη μεταλλικότητα (**T.D.S ή Σ.Δ.A**).

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από την περιοχή μελέτης, η πλειοψηφία των νερών ανήκει στην κατηγορία των γλυκών (Fresh) νερών τόσο σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Hem (1970), αφού το Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (Σ.Δ.Α ή TDS) γενικά είναι μικρότερο από 1000 mg/I.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 16 του Παραρτήματος Γ, για την περιοχή μελέτης, οι τιμές του TDS κατά μέσο όρο για τις θέσεις 1-4, αντίστοιχα είναι: 1189, 952, 623, 862 mg/l. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η τιμή του TDS κυμαίνεται μεταξύ 300 -1552mg/I. Αφού, λοιπόν, οι τιμές αυτές απέχουν πολύ λίγο από το όριο των 1000mg/I, μπορούν και αυτά τα νερά να θεωρηθούν ως «γλυκά» με μικρή επιβάρυνση σε άλατα.

Η τιμή του TDS των υπό μελέτη υδάτων είναι χαμηλότερη από την τιμή 1g/l και επίσης η συγκέντρωση του Cl<sup>-</sup> είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από την τιμή των 100 mg/l.

Επιπλέον τα φαινόμενα απόθεσης, γίνονται αντιληπτά έμμεσα και από την μεταβολή του TDS, που σημειώνεται ανά θέση δειγματοληψίας. Παρακάτω, παρατίθεται διάγραμμα της παραπάνω μεταβολής στο χρόνο (ετήσια και εποχική), στο οποίο παρατηρείται χαρακτηριστικά η μείωση της τιμής του από το σημείο της εκφόρτισης

έως την δειγματοληψία που λαμβάνει χώρα μετά την πτώση των υδάτων (στην θέση 4 δηλαδή). Το γεγονός αυτό ενισχύει το γεγονός ότι το φαινόμενο της απόθεσης όντως συντελείται κατά μήκος της πορείας των υπό μελέτη υπόθερμων υδάτων και μάλιστα σε όλη την διάρκεια του έτους (βλ. Σχ. 43).

Από το παραπάνω τελευταίο γεγονός, γίνεται κατανοητό ότι ο παράγοντας της θερμοκρασίας δεν είναι ούτε ο ισχυρότερος αλλά ούτε και ο μοναδικός παράγοντας στον οποίο μπορεί να οφείλεται η παρουσία και η εκδήλωση των φαινομένων απόθεσης, κατά μήκος της πορείας των υπό μελέτη υδάτων.

Επιπλέον επειδή η μεγαλύτερη απώλεια παρατηρείται μπροστά από το μέτωπο των καταρρακτών (δηλαδή στην θέση 3), όπως διαπιστώνεται εύκολα στο παρακάτω διάγραμμα, εύλογα θεωρούμε ότι απόθεση λαμβάνει χώρα στην συγκεκριμένη θέση, δεδομένου ότι στο σημείο αυτό συντρέχουν και οι υπόλοιποι παράγοντες που ευνοούν την απόθεση (φυσικοχημικές συνθήκες απόθεσης, συμμετοχή του οργανικού κόσμου).



Σχήμα 43.: Διάγραμμα που απεικονίζει την εποχική και ετήσια μεταβολή του ΣΔΑ, κατά μ.ο. φυσικά, των υπό μελέτη υπόθερμων υδάτων, ανά θέση δειγματοληψίας

Ακόμη στο σημείο, πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι η έκταση της απόθεσης φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου, σε αντίθεση με την αντίστοιχη θερινή, που σαφώς παρουσιάζει λίγο μικρότερες τιμές.

Στο γεγονός αυτό συνηγορεί και το δεδομένο ότι ο Ιανουάριος είναι ο μήνας στον οποίο σημειώνεται η ελάχιστη τιμή του TDS (άρα η μέγιστη τιμή απόθεσης), η οποία μόλις που φθάνει τα 299 mg/l, τόσο για το σύνολο των δειγμάτων μέσα στο χρόνο όσο

και αναφορικά με την θέση δειγματοληψίας, στην οποία παρατηρείται, στην θέση δηλαδή μπροστά από το μέτωπο των καταρρακτών (βλ. Σχ. 44).

Γνωρίζουμε ότι η διαλυτότητα των ανθρακικών ορυκτών μειώνεται με την ελάττωση της μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub>. Την χειμερινή περίοδο, λόγω ακριβώς των ιδιαίτερων χαμηλών θερμοκρασιών τους αέρα από τη μια και την σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία των υπό μελέτη υδάτων από την άλλη, ο ρυθμός έκλυσης του CO<sub>2</sub>, από την υγρή φάση προς την ατμόσφαιρα ενισχύεται σημαντικά. Εξαιτίας λοιπόν των στοιχείων αυτών εξηγείται η ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές απόθεσης την χειμερινή περίοδο, από την στιγμή μάλιστα όπου την δεδομένη χρονική περίοδο, η συμμετοχή του οργανικού κόσμου δεν θεωρείται σημαντική.

Ασφαλώς η έντονη θερμοκρασιακή διαφορά δεν έχει μόνο εποχικό χαρακτήρα αλλά και ημερήσιο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, δεν θα πρέπει να αποκλειστεί το ενδεχόμενο η απόθεση να συντελείται και κατά την διάρκεια της νύχτας, με μεγαλύτερες τιμές μάλιστα, από τις αντίστοιχες ημερήσιες!!!



Σχήμα 44.: Διάγραμμα που απεικονίζει την μηνιαία μεταβολή του ΣΔΑ των υπό μελέτη υπόθερμων υδάτων, ανά θέση δειγματοληψίας

## 6.3.5.2. Το pH των νερών της περιοχής έρευνας

Το pH ενός ρευστού, δηλαδή το μέτρο οξύτητας ή αλκαλικότητάς του, μετριέται επίσης στην ύπαιθρο και η μέτρηση επαναλαμβάνεται στο εργαστήριο. Μας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την αρχική κατάσταση του ρευστού, ενώ επηρεάζει την συμπεριφορά ορισμένων διαλυτών συστατικών, όπως του πυριτίου και του σιδήρου. Το pH καθορίζεται βασικά από την απώλεια CO<sub>2</sub>, αποτέλεσμα του οποίου είναι το

διάλυμα να γίνει περισσότερο αλκαλικό. Το pH επηρεάζεται από την αλατότητα και την θερμοκρασία του νερού, καθώς και από την ρυθμιστική ικανότητα των ορυκτών. Το pH των γεωθερμικών νερών κυμαίνεται συνήθως από 5,5 – 8,5.

Το pH όλων των υπόθερμων νερών της περιοχής μελέτης κυμαίνεται από 6,5 – 7,7 (βλ. Πίνακα 17 του Παραρτήματος Γ). Όταν το pH> 8.3, τότε τα HCO<sub>3</sub> δίνουν ιόντα  $CO_3^{2-}$  ενώ όταν το pH είναι μικρότερο του 8.30 (που είναι και το σύνολο των δειγμάτων μας) κυριαρχούν τα HCO<sub>3</sub> έναντι των ιόντων  $CO_3^{2-}$ , γεγονός που επίσης επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων.

Το νερό όταν βρίσκεται σε ισορροπία με τον ασβεστίτη και το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> πρέπει να περιέχει γύρω στα 60mg/l HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Η τιμή του pH σε συνδυασμό με την υψηλή συγκέντρωση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (βλ. Πίνακα 18 του Παραρτήματος Γ) αποκαλύπτει το γεγονός της παρουσίας επιπλέον διαλυμένου CO<sub>2</sub> μετά και από την επίτευξη ισορροπίας με τα ιόντα Ca<sup>+2</sup> του διαλύματος. Οπότε σε συνθήκες βάθους, τα συγκεκριμένα νερά είναι ακόρεστα σε ασβεστίτη και περιέχουν περίσσεια CO<sub>2</sub>, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα διαβρωτικά. Ειδικότερα οι μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> δηλώνει ότι η χημική σύνθεση των γεωθερμικών ρευστών βασίζεται σχεδόν εξολοκλήρου στην αλληλεπίδραση των ρευστών αυτών με τα ανθρακικά πετρώματα που διασχίζουν κατά την άνοδό τους (Αρβανίτης Α., 2001).

Η πρόσθετη, απαραίτητη για την διάλυση των ανθρακικών ορυκτών, ποσότητα CO<sub>2</sub> είναι βιολογικής ή βιοχημικής προέλευσης. Η για οποιοδήποτε λόγο μείωση της πίεσης του συστήματος, οδηγεί άμεσα στην μείωση του διαλυμένου CO<sub>2</sub>, με αποτέλεσμα το νερό να γίνεται πιο κορεσμένο σε ασβεστίτη, από ότι ήταν αρχικά.

Επιπλέον τα φαινόμενα απόθεσης, γίνονται αντιληπτά έμμεσα και από την μεταβολή του pH, που σημειώνεται ανά θέση δειγματοληψίας. Παρακάτω, παρατίθεται διάγραμμα της παραπάνω μεταβολής, στο οποίο παρατηρείται χαρακτηριστικά η αύξηση της τιμής του pH κατά την πτώση των υδάτων, στο μέτωπο των καταρρακτών. Η τιμή του pH μάλιστα επανέρχεται στην συνέχεια σε εκείνη την τιμή περίπου που είχαν τα νερά στην έξοδό τους από την πηγή (βλ. Σχ. 45).

Όπως θα δούμε και λίγο παρακάτω, η μεταβολή του pH των υπό μελέτη υδάτων συνδέεται άμεσα με την μεταβολή του CO<sub>2</sub> μέσα στο διάλυμα, η έκλυση του οποίου από το διάλυμα συνεπάγεται αύξηση των τιμών του pH του υδατικού διαλύματος.



Σχήμα 45.: Διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή του pH, κατά μ.ο. φυσικά, των υπο μελέτη υπόθερμων υδάτων, ανά θέση δειγματοληψίας

Επομένως και το δεδομένο αυτό συνηγορεί στο γεγονός ότι τα φαινόμενα της απόθεσης των ανθρακικών αλάτων συντελούνται γύρω από το μέτωπο των καταρρακτών και μάλιστα κατά την πτώση των υδάτων από το μέτωπο του καταρράκτη.

## 6.3.5.4. Ιοντικές Συγκεντρώσεις στα νερά της περιοχής μελέτης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα συσχετικά διαγράμματα μεταξύ των κύριων στοιχείων που συμμετέχουν στην απόθεση των ανθρακικών σχηματισμών από τα υδατικά διαλύματα της υπό μελέτης πηγής, στα αντίστοιχα σημεία σειγματοληψίας. Τα διαγράμματα αυτά είναι **Ca** - **Mg**, **Ca** – **HCO**<sub>3</sub>, και **Mg** – **HCO**<sub>3</sub>.

Οι συγκεντρώσεις του Ca<sup>+2</sup> στα γεωθερμικά νερά κυμαίνονται από 129 - 170 mg/l. Στα υπό εξέταση νερά, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις κατά μ.ο. είναι: **188**, **176**, **164** και **156** mg/l για τις θέσεις 1 – 4 της δειγματοληψίας (βλ. Πίνακα 22 του Παραρτήματος Γ). Οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις ιόντων Mg κατά μ.ο. είναι: **41**, **36**, **35** και **31**mg/l (βλ. Πίνακα 23 του Παραρτήματος Γ) . Η σχέση Mg/Ca για τα εξεταζόμενα υπόθερμα νερά δίνει τιμές κατά μ.ο., **0.345**, **0.349**, **0.375** και **0.327** για τις θέσεις 1 – 4 της δειγματοληψίας, αντίστοιχα υποδεικνύοντας την υδροφορία στα ασβεστολιθικά πετρώματα.

Στο Σχήμα 46 απεικονίζεται η σχέση των ιόντων  $Ca^{2+}$  με τα ιόντα  $Mg^{2+}$  στο σύνολο των νερών της περιοχής (οι συγκεντρώσεις εκφρασμένες σε mg/l). Διαπιστώνεται μία τάση αύξησης της συγκέντρωσης του  $Ca^{2+}$  με αύξηση του  $Mg^{2+}$ , ενώ είναι χαρακτηριστική η σημαντική διασπορά των προβαλλόμενων σημείων.



**Σχήμα 46.:** Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση των ιόντων Ca<sup>2+</sup> με τα ιόντα Mg<sup>2+</sup> στο σύνολο των νερών της περιοχής (οι συγκεντρώσεις είναι εκφρασμένες σε mg/l).

Τα ιόντα  $HCO_3^-$  είναι τα κυρίαρχα ανιόντα των νερών της περιοχής. Στα υπό εξέταση νερά, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις κατά μ.ο. είναι: 747, 672, 648 και 597 mg/l για τις θέσεις 1 – 4 της δειγματοληψίας, αντίστοιχα (βλ. Πίνακα 18 του Παραρτήματος Γ).

Στο Σχήμα 47 απεικονίζεται η συσχέτιση του Ca<sup>2+</sup> με τα HCO<sub>3</sub> για το σύνολο των δειγμάτων από την περιοχή έρευνας. Γενικά διαπιστώνεται τάση αύξησης της συγκέντρωσης ιόντων Ca<sup>2+</sup> με τα HCO<sub>3</sub>. Είναι επίσης σαφής η πολύ καλή γραμμική σχέση ανάμεσα τους, ενδεικτικό του γεγονότος ότι και τα δύο ιόντα προκύπτουν κάτω από τις ίδιες διαδικασίες διάλυσης. Τα δείγματα στο σύνολο τους παρουσιάζουν σημαντική τιμή του λόγου Ca/HCO<sub>3</sub>, δηλ. **0.253**, **0.260**, **0.249** και **0.267**, αντίστοιχα για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4.



Σχήμα 47.: Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση των ιόντων Ca<sup>2+</sup> με τα ιόντα HCO<sub>3</sub> στο σύνολο των νερών της περιοχής (οι συγκεντρώσεις είναι εκφρασμένες σε mg/l).

Στο Σχήμα 48 απεικονίζεται η συσχέτιση του  $Mg^{2+}$  με τα  $HCO_3$  για το σύνολο των δειγμάτων από την περιοχή έρευνας. Γενικά διαπιστώνεται τάση αύξησης της συγκέντρωσης ιόντων  $Mg^{2+}$  με τα  $HCO_3$ . Είναι εμφανής η γραμμική σχέση ανάμεσα

τους, δεν είναι όμως τόσο στενή η εξάρτηση μεταξύ τους όσο στο παραπάνω διάγραμμα, ενδεικτικό ότι και τα δύο ιόντα προκύπτουν κάτω από τις ίδιες διαδικασίες διάλυσης.



Σχήμα 48.: Διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση των ιόντων Mg<sup>2+</sup> με τα ιόντα HCO<sub>3</sub> στο σύνολο των νερών της περιοχής (οι συγκεντρώσεις είναι εκφρασμένες σε mg/l).

Τα δείγματα στο σύνολο τους παρουσιάζουν σημαντική τιμή του λόγου Mg/HCO<sub>3</sub>, δηλ. **0.055**, **0.056**, **0.056** και **0.055**, αντίστοιχα για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4.

Από την μελέτη και των τριών διαγραμμάτων παρατηρείται μια ταυτόχρονη τάση μείωσης των ιόντων Ca, Mg και HCO<sub>3</sub>, στα δείγματα που αφορούν κατά κύριο λόγο την θέση μετά την πτώση των υδάτων από τον καταρράκτη της υπό μελέτη θέσης.

Η μείωση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί μόνο εάν δεχτούμε την απώλεια των συγκεκριμένων ιόντων από την υγρή φάση, με την μορφή στερεάς πλέον μορφής (φαινόμενα απόθεσης) κατά την πτώση των υδάτων του καταρράκτη γύρω από το μέτωπο του. Η απώλεια αυτή δηλώνεται με την μικρότερη πλέον συγκέντρωση των παραπάνω ιόντων στην υγρή φάση, μετά την πτώση των υδάτων.

Γίνεται σαφές, λοιπόν, με τον τρόπο αυτό ότι πράγματι λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απόθεσης ανθρακικών αλάτων από τα συγκεκριμένα ύδατα και μάλιστα η απόθεση τοποθετείται σε μια μικρή ακτίνα γύρω από την θέση του μετώπου του καταρράκτη στην υπό μελέτη περιοχή. Η παραπάνω μείωση μάλιστα είναι μεγαλύτερη για τα ιόντα Ca και HCO<sub>3</sub>, επομένως αναμένουμε κατά κύριο λόγο την καταβύθιση ασβεστίτη και αραγωνίτη και όχι μαγνησίτη, από τα υπό μελέτη ύδατα (βλ. Σχ. 49).



**Σχήμα 49.:** Διάγραμμα που απεικονίζει τη μεταβολή των ιόντων Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub> καθώς και του TDS, κατά μ.ο. του συνόλου των νερών της περιοχής (οι συγκεντρώσεις είναι εκφρασμένες σε mg/l)., σε σχέση με την απόσταση από την πηγή (αρχική και τελική δειγματοληψία).

### 6.3.6. Θερμοδυναμικό Μοντέλο

#### 6.3.6.1. Γενικά

Θεωρήθηκε, επίσης, ζωτικής σημασίας να εξεταστεί κατά πόσο είναι θερμοδυναμικά «ώριμα» τα συγκεκριμένα νερά να αποθέσουν το ασβεστιτικό τους φορτίο καθώς και σε ποιες θέσεις, κατά μήκος της πορείας τους, καθίστανται δυνατή η παραπάνω, απαραίτητη για την απόθεση, προϋπόθεση.

Έχοντας, λοιπόν σαν βάση τις φυσικοχημικές παραμέτρους και τις ιοντικές συγκεντρώσεις των νερών της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήθηκε το θερμοδυναμικό μοντέλο EQL/EVP (Risacher & Clement 2001), που διαθέτει το ερευνητικό κέντρο 'Δημόκριτος' και έτσι μεταξύ των άλλων προσδιορίστηκαν οι τιμές της pCO<sub>2</sub> (μερικής πίεσης CO<sub>2</sub>) καθώς και οι δείκτες κορεσμού (Is) ως προς τον ασβεστίτη και τον αραγωνίτη, οι οποίοι συνιστούν τις πιο συνηθισμένες ανθρακικές ορυκτές φάσεις που αποθέτουν τα ψυχρά και υπόθερμα νερά, με την πρώτη φάση να υπερτερεί σημαντικά, μέσα στο διάλυμα, ως περισσότερο σταθερή θερμοδυναμικά φάση.

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πρόγραμμα, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον FORTRAN 90 και συνιστά ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας της εξάτμισης των γεωθερμικών ρευστών, το οποίο όμως δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και για τα υπόθερμα νερά (Risacher & Clement 2001).
Το παραπάνω πρόγραμμα εφαρμόστηκε πάνω στα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που προέκυψαν για τους δυο τελευταίους μήνες δειγματοληψίας (11/2006 και 02/2007), προφανώς για πιο ασφαλή τελικά συμπεράσματα. Επομένως κάνουμε λόγο, συνολικά, για 8 δείγματα, που αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά δύο εποχές του χρόνου (φθινόπωρο και χειμώνα).

Οι αναλυτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων που έδωσε το συγκεκριμένο πρόγραμμα, για τα 8 δείγματα, παρατίθενται στους Πίνακες 24-30 του Παραρτήματος Γ.

Τα κυριότερα στοιχεία που αφορούν το φαινόμενο της απόθεσης ανθρακικών αλάτων και που μας παρέχονται από τους παραπάνω πίνακες είναι οι τιμές του log pCO<sub>2</sub>, οι τιμές του ιοντικού δυναμικού (Ionic Strength) καθώς και οι τιμές του δείκτη κορεσμού (Saturation Index).

### 6.3.6.2. Τιμές pCO<sub>2</sub>

Η συγκέντρωση του  $CO_2$  σε ένα διάλυμα μπορεί πάντοτε να εκφραστεί είτε με τις μονάδες συγκέντρωσης είτε ως μερική πίεση του  $CO_2$  στο διάλυμα (p $CO_2$ ), δηλ. είναι εκείνη η πίεση του  $CO_2$  στην αέρια φάση με την οποία το δείγμα θα ήταν σε ισορροπία. Θεωρείται, λοιπόν, πρακτικό όταν γίνεται αναφορά στο  $CO_2$  να χρησιμοποιείται ο όρος μερική πίεση του  $CO_2$  (Λαμπράκης 1994).

Το CO<sub>2</sub> είναι αέριο άχρωμο, που διαλύεται αρκετά εύκολα στο νερό (0.034 mmol/l στους 20°C σε p=1 atm). Η αντίδραση του CO<sub>2</sub> με το νερό δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$CO_2$$
 (g) + H<sub>2</sub>O = CO<sub>2</sub> (aq) και  
 $CO_2$  (aq)+ H<sub>2</sub>O = H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Κατά τους D' Amore & Panichi (1987) η θερμομεταμόρφωση αποτελεί κύρια διαδικασία, που είναι υπεύθυνη για την παρουσία CO<sub>2</sub> σε γεωθερμικές περιοχές, αν και μαγματικές και οργανικές διαδικασίες μπορεί τοπικά να συμβάλλουν στη συνολική εκροή του CO<sub>2</sub> κατά τους ίδιους ερευνητές, μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> μπορεί να παραχθούν από αντιδράσεις υδρόλυσης ασβεστίτη και δολομίτη. Σύμφωνα με τα παραπάνω η pCO<sub>2</sub> αυξάνει απότομα με τη θερμοκρασία.

Σημαντικές πηγές του CO<sub>2</sub> είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και το έδαφος, με την τελευταία πηγή να υπερτερεί εκείνη της ατμόσφαιρας κατά 10 έως και 100 φορές. Το CO<sub>2</sub> του αέρα στο έδαφος είναι βιογενούς προέλευσης, δηλ. προέρχεται από την

αποσύνθεση οργανικών ουσιών, από οργανισμούς και από τις ρίζες των φυτών (Καλλέργης Γ., 1986).

Τα νερά, τα οποία βρίσκονται σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα έχουν  $pCO_2 = 10^{-3.5}$  atm ή  $pCO_2 = 3*10^{-4}$  atm (Stumm & Morgan 1996, από Βαφειάδη κ.α. 1994). Το έδαφος ή η βιολογική ισορροπία δίνει  $pCO_2$  μεταξύ  $10^{-0.5}$  και  $10^{-3.5}$  (Demolon 1960, Glinka 1963, από Βαφειάδη κ.α. 1994).

Στον Πίνακα 31 του Παραρτήματος Γ παρουσιάζονται οι τιμές της pCO<sub>2</sub>, όπως προσδιορίστηκαν με την εφαρμογή του θερμοδυναμικού μοντέλου EQL/EVP. Τα ψυχρά και υπόθερμα νερά εμφανίζουν χαμηλές τιμές pCO<sub>2</sub> που κυμαίνονται μεταξύ 10<sup>-1.7872460</sup> (=0.16321\*10<sup>-1</sup>) και 10<sup>-0.6529162</sup> (=2.22374\*10<sup>-1</sup>), γεγονός που υποδηλώνει την πιθανή βιογενή προέλευση του CO<sub>2</sub> στα δείγματα αυτά.

Αν αποκλεισθεί το ενδεχόμενο της βιογενούς προέλευσης του CO<sub>2</sub> τότε προβάλλει ως αρκετά πιθανή η προέλευσή του από την υδρόλυση μεταμορφωμένων ανθρακικών σχηματισμών και ειδικότερα αναφερόμαστε στα ολισθοστρώματα και τα μάρμαρα που συναντώνται στην περιοχή μελέτης. Δηλ. είναι δυνατόν το μετεωρικό νερό να έχει κατεισδύσει στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και μέσω των ρηγμάτων που συναντώνται στην περιοχή της λεκάνης του Σιδηροκάστρου να έχει φθάσει σε ορισμένα βάθη (π.χ. 100-200m, κοντά δηλαδή στην οροφή του υποβάθρου, από Savvaidis S.A. et al., 1999) αποκτώντας ορισμένη θερμοκρασία με τη συνδρομή της οποίας ελαττώνεται η διαλυτότητα του  $CO_2$  στο νερό και συνεπώς η σταθερότητα του  $H_2CO_3$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση CO2 από το υδάτινο διάλυμα με παράλληλη απορρόφηση ενέργειας. Στη συνέχεια τα θερμά ρευστά μπορεί να ανέρχονται μέσω των ρηγμάτων του νοτιοδυτικού περιθωρίου της περιοχής μελέτης. Ένα τέτοιο μοντέλο λειτουργίας είναι συνηθισμένο σε γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας που αναπτύσσονται σε ιζηματογενείς λεκάνες. Η έλλειψη όμως ισοτοπικών δεδομένων <sup>12</sup>C και <sup>13</sup>C δεν επιτρέπει στο να αποφανθεί κανείς με βεβαιότητα για την προέλευση του CO<sub>2</sub> και το θέμα χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Ακολουθεί στη συνέχεια το διάγραμμα του Σχήματος 50, στο οποίο παρουσιάζεται η pCO<sub>2</sub> σε σχέση με τη συγκέντρωση των HCO<sub>3</sub> για τις δύο πιο πρόσφατες δειγματοληψίες των νερών της περιοχής έρευνας., προς αποφυγή προφανώς σφαλμάτων και λαθών (βλ. Πίνακα 32 του Παραρτήματος Γ).



Σχήμα 50.: Η περιεκτικότητα των υπό μελέτη νερών σε HCO<sub>3</sub> σε συνάρτηση με την pCO<sub>2</sub>.

Παρατηρείται μία γενική τάση αύξησης της συγκέντρωσης των HCO<sub>3</sub> με την αύξηση της pCO<sub>2</sub>, όμως η σημαντική διασπορά των προβαλλόμενων σημείων δεν επιτρέπει τη διατύπωση κάποιας μεταξύ τους εξίσωσης.

Η τάση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της pCO<sub>2</sub>, γίνεται πιο όξινο το διάλυμα, όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω, το οποίο με την σειρά του ενισχύει την διαλυτική δράση του υδατικού διαλύματος έναντι των ανθρακικών σχηματισμών που συναντούν τα τελευταία στην πορείας τους, με απώτερη συνέπεια να έχουμε σταδιακά ολοένα και μεγαλύτερη εισροή ιόντων HCO<sub>3</sub> στην υγρή φάση.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 51 απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ του pH και της pCO<sub>2</sub> για τις δύο πιο πρόσφατες δειγματοληψίες των νερών της περιοχής έρευνας., προς αποφυγή προφανώς σφαλμάτων και λαθών (βλ. Πίνακα 33 του Παραρτήματος Γ).

Από το διάγραμμα αυτό διαπιστώνεται ότι το pH είναι συνάρτηση της τιμής της pCO<sub>2</sub> και ειδικότερα υψηλές τιμές τη; συνδέονται με χαμηλές τιμές pH. Είναι σαφές ότι τα ψυχρά - υπόθερμα νερά της περιοχής μελέτης διαμορφώνουν μία γραμμή τάσης με εξίσωση y = -1,1683x + 7,0567 και συντελεστή συσχέτισης r = 97,95% για την

δειγματοληψία του 11/2006 και μια γραμμή τάσης με εξίσωση y = -1,364x + 8,6128 και συντελεστή συσχέτισης r = 84,55% για την δειγματοληψία του 02/2007.



Σχήμα 51.: Οι τιμές pH των νερών σε συνάρτηση με την υπολογισθείσα pCO<sub>2</sub>.

Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων εύκολα διαπιστώνουμε ότι οι υψηλότερες τιμές του pH σημειώνεται κατά την πτώση των υδάτων από τα μέτωπα των καταρρακτών. Παράλληλα όμως παρατηρούμε, ότι στην ίδια θέση έχουμε τις μικρότερες τιμές της pCO<sub>2</sub>.

Επομένως λοιπόν στις θέσεις όπου συντελείται η απόθεση έχουμε και σημαντική μεταβολή των τιμών του pH, η οποία συνδέεται στενά, ή αν προτιμάτε προδίδει την αντίστοιχη μεταβολή των τιμών της pCO<sub>2</sub>.

6.3.6.3. Τιμές Δεικτών Κορεσμού ανθρακικών ορυκτών

Η γνώση του βαθμού ή δείκτη κορεσμού (Is) σε διάφορα ορυκτά είναι πολύ χρήσιμη, γιατί εκτός του ότι είναι ένας δείκτης του χρόνου παραμονής του νερού σε διάφορα πετρώματα, έχει επίσης πολύ μεγάλη σημασία για την ποσοτική εκτίμηση της δυνατότητας του νερού να διαλύει ή να αποθέτει διάφορα ορυκτά (κυρίως CaCO<sub>3</sub>). Όταν ο δείκτης κορεσμού Is ως προς ένα ορυκτό είναι ίσος ή περίπου ίσος (με απόκλιση  $\pm$  0.200) με το μηδέν, τότε το νερό είναι σε ισορροπία με το ορυκτό αυτό. Αν όμως ο δείκτης είναι αρνητικός, δηλ. Is<0, τότε το νερό είναι ακόρεστο ως προς το ορυκτό αυτό και συνεπώς έχει την τάση περαιτέρω διάλυσης αυτού του ορυκτού. Αν ο δείκτης κορεσμού είναι θετικός, δηλ. Is>0, τότε το νερό είναι υπέρκορο ως προς το συγκεκριμένο ορυκτό και επομένως έχει την τάση απόθεσης αυτού του ορυκτού.

Με τη βοήθεια του θερμοδυναμικού μοντέλου EQL/EVP (Risacher & Clement 2001) προσδιορίσθηκαν οι δείκτες κορεσμού ορισμένων ορυκτών, όπως του ασβεστίτη, του αραγωνίτη, του βατερίτη, του δολομίτη και του μαγνησίτη, όπως παρουσιάζονται στους Πίνακα 34 και 35 του Παραρτήματος Γ. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 52 και 53 απεικονίζονται οι δείκτες κορεσμού (Is) ως προς τα ορυκτά ασβεστίτη και αραγωνίτη, για τις δειγματοληψίες του 11/2006 και του 02/2007.

Η αντιστοίχιση, στα παραπάνω διαγράμματα, περιλαμβάνει πάντα τον log Is (άξονας x) με τον log Ion Strength (άξονας y). Σύμφωνα με τον Πίνακα 34 του Παραρτήματος Γ, διαπιστώνουμε ότι για την δειγματοληψία του 11/2006 και ως προς την φάση του ασβεστίτη (calcite), ο log Is παίρνει τις τιμές 0.32, 0.40, 1,07 και 0.61, για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4, αντίστοιχα. Επιπλέον ο log Is παίρνει τις τιμές -1.59, -1.62, -1.69 και -1.80, για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4, αντίστοιχα.

Ακόμη για την δειγματοληψία του 02/2007 (βλ. Πίνακα 35 του Παραρτήματος) και ως προς την φάση του ασβεστίτη (calcite), ο log Is παίρνει τις τιμές 0.93, 1.25, 1,09 και 0.98, για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4, αντίστοιχα. Επιπλέον ο log Is παίρνει τις τιμές -1.60, -1.57, -1.68 και -1.72, για τις θέσεις δειγματοληψίας 1-4, αντίστοιχα.

Στο σύνολό τους τα υπό μελέτη δείγματα είναι κορεσμένα ως προς τον ασβεστίτη ( $I_S>0$ ). Γενικότερα τα ψυχρά - υπόθερμα υπό μελέτη νερά παρουσιάζουν υψηλούς δείκτες κορεσμού, ιδιαίτερα ως προς τον ασβεστίτη ( $I_S > 0,5$ ), γεγονός που σημαίνει ότι τα νερά αυτά είναι υπέρκορα στην συγκεκριμένη φάση και επομένως έχουν ισχυρή τάση απόθεσης του ορυκτού αυτού.

Ειδικότερα, στην πρώτη περίπτωση παρατηρούμε ότι ο log Is υπερβαίνει την τιμή 0.5 μόνο στην θέση που αντιστοιχεί στην πτώση των υδάτων, μπροστά από το μέτωπο των καταρρακτών. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, στο σύνολο των δειγμάτων ο log

Is υπερβαίνει την τιμή 0.5, χωρίς αυτό βέβαια να συνεπάγεται ότι πραγματοποιείται η απόθεση των ανθρακικών ορυκτών φάσεων και στις τέσσερις θέσεις δειγματοληψίας, δεδομένου ότι πρέπει να ικανοποιούνται παράλληλα και άλλες συνθήκες (κυρίως φυσικές).

Κατά τον ίδιο τρόπο, η πλειοψηφία των νερών είναι επίσης κορεσμένα, στην λιγότερο σταθερή θερμοδυναμικά ορυκτή φάση του αραγωνίτη καθώς επίσης και σε άλλα ορυκτά (βλ. Πίνακα 34 και 35 του Παραρτήματος Γ)



Σχήμα 52.: Διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή του δείκτη κορεσμού (Is) του ορυκτού ασβεστίτη, ανά θέση δειγματοληψίας τις περιόδους 11/2006 και 02/2007



Σχήμα 53.: Διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή του δείκτη κορεσμού (Is) του ορυκτού αραγωνίτη, ανά θέση δειγματοληψίας τις περιόδους 11/2006 και 02/2007

Από την μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων εύκολα διαπιστώνουμε ότι σε όλα, οι μεγαλύτερες τιμές του δείκτη κορεσμού (Is > 0,5) σημειώνονται κατά την διάρκεια της πτώσης των υδάτων, μπροστά από τα μέτωπα των καταρρακτών.

Επομένως λοιπόν και μέσα από την μελέτη των δεικτών κορεσμού επιβεβαιώνεται το γεγονός της απόθεσης ανθρακικών αλάτων στις παραπάνω θέσεις.

Τέλος, στο σημείο αυτό επίσης πρέπει να επισημάνουμε, την κατάσταση υπερκορεσμού των υπό μελέτη υδάτων, ως προς την ορυκτή φάση του **αραγωνίτη**, η παρουσία του οποίου είναι δηλωτική του πρόσφατου χαρακτήρα της απόθεσης, άρα και της σύγχρονης προέλευσης καθώς και της μικρής παραμονής των υπό μελέτη νερών στο υπέδαφος (από Dotsika E. 1991).

### 6.3.7. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι τα φαινόμενα απόθεσης, από υδροχημική άποψη, γίνονται έμμεσα αντιληπτά, μπροστά από τα μέτωπα των καταρρακτών, από τα εξής γεγονότα:

➤ Από την μεταβολή του TDS και των ιόντων Ca, Mg και HCO<sub>3</sub>, που σημειώνεται ανά θέση δειγματοληψίας. Σύμφωνα με τα διάγραμμα των Σχημάτων 44, 46, 47 και 48, παρατηρείται χαρακτηριστικά η μείωση των τιμών τους από το σημείο της εκφόρτισης έως την δειγματοληψία που λαμβάνει χώρα μετά την πτώση των υδάτων (στην θέση 4 δηλαδή) για το σύνολο των δειγμάτων. Η μείωση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί μόνο εάν δεχτούμε την απώλεια των συγκεκριμένων ιόντων από την υγρή φάση, με την μορφή στερεάς πλέον μορφής (φαινόμενα απόθεσης) κατά την πτώση των υδάτων του καταρράκτη γύρω από το μέτωπο του. Η απώλεια αυτή δηλώνεται με την μικρότερη πλέον συγκέντρωση των παραπάνω ιόντων στην υγρή φάση μετά την πτώση των υδάτων, σε σύγκριση με τις τιμές τους κατά την διάρκεια της εκφόρτισης (βλ. Σχ. 49). Επειδή μάλιστα η μεγαλύτερη απώλεια, ιδιαίτερα στις τιμές του ΣΔΑ, παρατηρείται μπροστά από το μέτωπο των καταρρακτών (βλ. Σχ. 54), εύλογα θεωρούμε ότι η απόθεση λαμβάνει χώρα στην συγκεκριμένη θέση, δεδομένου ότι στο σημείο αυτό συντρέχουν και οι υπόλοιποι παράγοντες που ευνοούν την απόθεση (φυσικοχημικές συνθήκες απόθεσης, πιο έντονη συμμετοχή του οργανικού κόσμου).



Σχήμα 54.: Ενδεικτικό διάγραμμα που απεικονίζει την ταυτόχρονη μεταβολή του ΣΔΑ (TDS) και του pH, κατά μέσο όρο και ανά θέση δειγματοληψίας

Επιπλέον τα φαινόμενα απόθεσης, γίνονται αντιληπτά έμμεσα και από την μεταβολή του pH, που σημειώνεται ανά θέση δειγματοληψίας. Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 54, παρατηρείται χαρακτηριστικά η αύξηση της τιμής του pH κατά την πτώση των υδάτων, στο μέτωπο των καταρρακτών. Η τιμή του pH μάλιστα επανέρχεται στην συνέχεια σε εκείνη την τιμή περίπου που είχαν τα νερά στην έξοδό τους από την πηγή. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε την ταυτόχρονη μεταβολή των τιμών του pH με τις αντίστοιχες του ΣΔΑ, δεδομένου ότι στις μέγιστες τιμές της πρώτης παραμέτρου σημειώνονται οι ελάχιστες τιμές της δεύτερης. Ασφαλώς και οι δυο μεταβολές υποδηλώνουν σαφέστατα την απόθεση ανθρακικών αλάτων.

- Η ταυτόχρονη και αντίρροπη μεταβολή της pCO<sub>2</sub> με τις τιμές του pH (βλ. Σχ. 55)
- Η ταυτόχρονη και ομόρροπη μεταβολή της pCO<sub>2</sub> με την συγκέντρωση των HCO<sub>3</sub> ιόντων στο διάλυμα. Οι ελάχιστες τιμές της pCO<sub>2</sub>, της συγκέντρωσης των HCO<sub>3</sub> ιόντων στο διάλυμα καθώς και οι μέγιστες τιμές του pH και των δεικτών κορεσμού, σημειώνονται λίγο πριν ή κατά την πτώση των υδάτων μπροστά από τα μέτωπα των καταρρακτών (βλ. Σχ. 55 & 56). Στην συγκεκριμένη θέση, σημειώνεται και η ελάχιστη θερμοκρασία των υπόθερμων υδάτων κατά μ.ο., κατά μήκος της πορείας τους, επιβεβαιώνοντας το χαρακτηριστικό της αντίστροφης διαλυτότητας των ανθρακικών ορυκτών φάσεων.



Σχήμα 55.: Ενδεικτικό διάγραμμα που απεικονίζει την ταυτόχρονη μεταβολή του pH, της pCO<sub>2</sub> και της συγκέντρωσης των ιόντων HCO<sub>3</sub>, ανά θέση δειγματοληψίας και μόνο για την περίοδο του 11/2006.

Η υπέρκορη κατάσταση των υπό μελέτη υδάτων, ως προς τα ανθρακικά ορυκτά και ιδιαίτερα ως προς την φάση του ασβεστίτη, σύμφωνα με τις τιμές των δεικτών κορεσμού. Στην μεταβολή των τιμών των δεικτών κορεσμού των ανθρακικών ορυκτών, ανά θέση δειγματοληψίας, με την μέγιστη τιμή να παρατηρείται, ως επί το πλείστον, λίγο πριν ή κατά την πτώση των υδάτων μπροστά από τα μέτωπα των καταρρακτών, προσδιορίζοντας έτσι την θέση στην οποία αποτίθεται η ορυκτή φάση του ασβεστίτη (βλ. Σχ. 56).



Σχήμα 56.: Ενδεικτικό διάγραμμα που απεικονίζει την ταυτόχρονη μεταβολή του δείκτη κορεσμού (Is) του ορυκτού ασβεστίτη, της pCO<sub>2</sub> και της θερμοκρασίας των υπόθερμων υδάτων, ανά θέση δειγματοληψίας και μόνο για την περίοδο του 11/2006.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται η απόθεση των ανθρακικων αλάτων αποκλειστικά στην συγκεκριμένη θέση με βάση την μελέτη καλά καθορισμένων υδροχημικών κριτηρίων και παραγόντων που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της υδροχημικής μελέτης και ανάλυσης των υπό εξέταση υπόθερμων υδατικών διαλυμάτων.

# 7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία της τραβερτινικής γέφυρας στην θέση «Ζεστά Νερά» Σιδηροκάστρου απαιτεί την παρουσία κατάλληλου περιβάλλοντος, η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση των παρακάτω παραγόντων – ειδικών συνθήκων:

1. Στην τεκτονική και μορφολογική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής μελέτης:

- Μια φάση από τεκτονικά γεγονότα στο χώρο της περιοχής Σιδηροκάστρου Αχλαδοχωρίου άρχισε από το τέλος του Πλειοκαίνου και συνεχίστηκε σε όλη την διάρκεια του Τεταρτογενούς. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις τεμαχών στο χώρο των ρηγμάτων κατέληξαν στην αποκοπή της από την λεκάνη του Στρυμόνα και στη μετέπειτα μορφολογική διαφοροποίηση της αρχικής λεκάνης του Σιδηροκάστρου κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς, με συνέπεια την δημιουργία της κοιλάδας του Αχλαδίτη καθώς και του βυθίσματος του Αχλαδοχωρίου. Την συγκεκριμένη χρονική περίοδο λοιπόν, τα παραπάνω τμήματα της λεκάνης δεν αποστραγγίζονται από το ίδιο υδρογραφικό δίκτυο (Ψιλοβίκος κ.α. 1981).
- Κατά την διάρκεια του Ανώτερου Τεταρτογενούς παρατηρείται μια εκ νέου ανύψωση στην περιοχή Σιδηροκάστρου – Αχλαδοχωρίου που είχε σαν συνέπεια τον εγκιβωτισμό των ρεμάτων μέσα στις τεταρτογενείς αποθέσεις και την ανανέωση της διαβρωτικής δράσης (Vavliakis et al. 1983). Μετά την συγκεκριμένη ρηξιγενή δράση, τα παραπάνω τμήματα της λεκάνης του Σιδηροκάστρου αποστραγγίζονται από το ίδιο υδρογραφικό δίκτυο (Ψιλοβίκος κ.α. 1981, Vavliakis et al. 1983).
- Ακόμη τα αποτελέσματα από την μελέτη της κλίσης του αναγλύφου στην περιοχή έρευνας αλλά και ορισμένων ποσοτικών παραμέτρων της λεκάνης, υποδεικνύουν την γενικότερη ανύψωση της περιοχής από την δράση συγκεκριμένων τεκτονικών γεγονότων, όπως αυτά επισημαίνονται άλλωστε και από την εργασία υπαίθρου.

Είναι γεγονός λοιπόν ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται κάτω από ένα καθεστώς ανύψωσης που συνοδεύεται από την ισχυρή παρουσία φαινομένων ανανέωσης του αναγλύφου της και είχε ως κύριο αποτέλεσμα τον εγκιβωτισμό της κοίτης του Αχλαδίτη στην θέση 'Ζεστά Νερά'.

2. Ο εγκιβωτισμός της κοίτης του Αχλαδίτη ποταμού στην συγκεκριμένη θέση εξασφάλισε τις δύο απαραίτητες γεωμετρικές συνθήκες που ευνοούν την απόθεση και οι οποίες είναι οι εξής:

- Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της υπόθερμης καρστικής πηγής και της κοίτης, η οποία οφείλεται στην συνδυασμένη δράση της ρηξιγενούς τεκτονικής που αρχικά διαφοροποιεί τα επιμέρους τεμάχη καθώς και την μετέπειτα γεωμορφολογική δράση είτε με την μορφή παγετώνων είτε με την μορφή ρεμάτων. Όσον αφορά μάλιστα καρστικές περιοχές η παραπάνω δράση ενισχύεται σημαντικά κατά την διάρκεια κυρίως πλειστοκαινικών παγετωδών περιόδων, δεδομένου ότι η καρστική ταπείνωση είτε μειώνεται πολύ είτε σταματά εντελώς σε αντιδιαστολή με την ποτάμια διάβρωση η οποία συνεχίστηκε κανονικά (Bayari et al. 2002, Baker et al. 1993). Κάτω από αυτές τις συνθήκες λοιπόν προκαλείται η εκδήλωση υδατοπτώσεων και η εμφάνιση μετώπων καταρρακτών.
- ➤ Το μικρό πλάτος της κοίτης (L ≤ H) δεδομένου ότι η πλευρική ανάπτυξη των αποθέσεων εξαρτάται από την διατμητική αντοχή και την πυκνότητα των αποθέσεων. Εγκλείσματα άλγης και ξύλων ενισχύουν την παραπάνω αντοχή. Η ανάπτυξη αυτή είναι δυνατόν να ενισχυθεί από τεμάχη τραβερτινικών αποθέσεων όταν αυτά μπορούν να έχουν ρόλο μηχανικής υποστήριξης, λόγω θέσης. Ο εγκιβωτισμός της κοίτης στην συγκεκριμένη θέση εξασφάλισε το μικρό πλάτος της κοίτης, διότι έγινε μέσα σε συνεκτικά πετρώματα (κροκαλολατυποπαγή αδροκρυσταλλικών μαρμάρων, από Λαζαρίδης Γ. 2004), γεγονός που ευνοεί την κατά βάθος διάβρωση.

 Όσον αφορά τον σχηματισμό και γενικότερα την δημιουργία της υπόθερμης καρστικής πηγής, μπορούμε να πούμε ότι συνιστά συνέπεια της παραπάνω πλειο – πλειστοκαινικής εφελκυστικής τεκτονικής. Ειδικότερα:

- Η δημιουργία ρηγμάτων επέτρεψε αρχικά την δημιουργία κλειστών λεκανών και τον σχηματισμό λιμναίων κυρίως ιζημάτων. Συγχρόνως δημιούργησε και προϋποθέσεις σχηματισμού γεωθερμικών ρευστών, που με την συνεχιζόμενη ενεργό τεκτονική έφτασαν μέχρι την επιφάνεια και δημιούργησαν θερμές πηγές.
- Από την μελέτη του γεωλογικού χάρτη που παραθέτουμε προκύπτει ότι η πηγή εκδηλώνεται σε διασταύρωση πρόσφατων ρηγμάτων με ΑΝΑ –ΔΒΔ διεύθυνση με άλλα παλαιότερα ρήγματα διεύθυνσης BBΔ NNA και BA NΔ. Πιστεύουμε πως το παραπάνω γεγονός δεν είναι τυχαίο, αφού οι εκδηλώσεις των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια σε θέσεις διασταυρωμένων ρηγμάτων, λαμβάνουν χώρα σε περιοχές, όπου έχουμε χαλαρά ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς. Τα γεωθερμικά ρευστά σε αυτές τις θέσεις διασταυρώσεων, απεγκλωβίζονται και

φτάνουν στην επιφάνεια. Η δράση τέτοιων θερμών εκδηλώσεων τόσο κατά το παρελθόν όσο και σήμερα συχνά υποδηλώνεται και από την παρουσία χημικών ιζημάτων γύρω ή κοντά στις θέσεις εκφόρτισής τους, ενώ μπορούν να επαληθευτούν οριστικά με την εκτέλεση γεωτρήσεων ως επί το πλείστον μέσα σε χαλαρά πλειο – πλειστοκαινικά, όπως και συνέβη άλλωστε με την περιοχή μελέτης (Κνιθάκης 1985, Δημόπουλος Γ. 1990).

- Τα συγκεκριμένα νερά ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των υπόθερμων πηγών με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 20 - 35°C. Πρόκειται για πηγές που οφείλουν την δημιουργία τους στην άνοδο του γεωθερμικού ρευστού διαμέσου ρηγμάτων μέχρι την επιφάνεια. Η χαμηλή τους θερμοκρασία, οφείλεται στον καθαρά υποεπιφανειακό τους χαρακτήρα και στη μικρή θετική απόκλιση της γεωθερμική βαθμίδας από την μέση τιμή της στην εκάστοτε περιοχή. Τα συγκεκριμένα υδροφόρα στρώματα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διαπερατότητα και υδατοκινητικότητα καθώς και από το σχετικά μικρό πιεζομετρικό φορτίο του γεωθερμικού ρευστού (Καλλέργης Γ., 1986).
- Η ισχυρή παρουσία CO<sub>2</sub> στην σύσταση των γεωθερμικών ρευστών σε συνδυασμό με την θερμοκρασία που κατέχουν προκαλούν αδιαβατική εκτόνωση των τελευταίων δίνοντας, με τον τρόπο αυτό, γένεση σε φαινόμενα θερμοανύψωσης (thermolifting). Επίσης η υδροστατική πίεση που χαρακτηρίζει τα συγκεκριμένα ρευστά (μετεωρικής προέλευσης) συντελούν στην δημιουργία μιας συνεχούς αρτεσιανής ροής των γεωθερμικών ρευστών (Αρβανίτης Α. 2001).

4. Στην συνέχεια ακολουθεί η ικανοποίηση συγκεκριμένων φυσικών συνθηκών που απαιτούνται για την εκδήλωση των φαινομένων της απόθεσης των ανθρακικών αλάτων. Ειδικότερα στις θέσεις των καταρρακτών συντελούνται:

- Καλύτερες συνθήκες αερισμού των υδάτων
- Απαντώνται χαμηλότερες πιέσεις των διαλυμάτων και
- Σημειώνονται μεγαλύτερες ταχύτητες ροής των υδάτων.

Τα στοιχεία αυτά οδηγούν σε αύξηση της μετωπικής επιφάνειας νερού – αέρα και σε συνθήκες στροβιλισμού, όπου σε συνδυασμό και με τις φωτοσυνθετικές διεργασίες των φυτικών ειδών προκαλούν την έντονη έκλυση σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub>, γεγονός που ενισχύει την απόθεση τραβερτινικού υλικού. 5. Το κλίμα αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για τον σχηματισμό αλλά και την διάβρωση του εδάφους (Τσιραμπίδης Α., 1999). Το κλίμα στην υπό μελέτη λεκάνη για ένα μεγάλο διάστημα χαρακτηρίζεται υγρό, επομένως η διάβρωση (μηχανική και χημική) από το νερό στα πετρώματα αλλά και στους ιζηματογενείς σχηματισμούς αναμένεται να είναι έντονη. Η παραπάνω διαπίστωση είναι ιδιαίτερης σημασίας διότι υποδηλώνει:

- Την έντονη παρουσία της καρστικής διάλυσης που λαμβάνει χώρα μέσα στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης. Εξάλλου τα προϊόντα της τελευταίας είναι που θα εμπλουτίσουν κατάλληλα τα υπόθερμα ύδατα της περιοχής, έτσι ώστε αργότερα με την έξοδο τους από την πηγή θα είναι χημικά «ώριμα» να δώσουν τις τραβερτινικές αποθέσεις που βαθμιαία θα προκαλέσουν την δημιουργία της υπό εξέταση τραβερτινικής γέφυρας.
- Την συνεχή ανανέωση τόσο των υποεπιφανειακών όσο και των βαθύτερων υπόγειων υδάτων, ένας ακόμη παράγοντας δηλαδή που βοηθά στην διατήρηση των ιδιοτήτων των υπόθερμων υδάτων και εξασφαλίζει την συνεχή παροχή «κατάλληλων», χημικά, υδατικών διαλυμάτων που αποθέτουν συνεχώς το ασβεστιτικό τους φορτίο!

Η διαφορά θερμοκρασίας που υφίσταται μεταξύ των υπόθερμων νερών (25<sup>0</sup>C) και της ατμόσφαιρας (μεγάλο μηνιαίο και ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος), ελέγχει ουσιαστικά την ποσότητα που απαιτείται να έχει το διάλυμα σε ιόντα ώστε να βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας (αντίστροφη διαλυτότητα ανθρακικών ορυκτών). Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία υπερκορεσμένων διαλυμάτων που με την σειρά τους αποθέτουν την ουσία εκείνη που δεν αντέχουν να διαλύσουν πλέον. Αλλαγές στην θερμοκρασία λοιπόν μπορούν επίσης να διαταράξουν την ισορροπία του υδατικού διαλύματος, γεγονός που καθιστά σαφή δύο γεγονότα:

- Ότι η θερμοκρασία των υδάτων είναι αυτή που καθιστά τα συγκεκριμένα διαλύματα να είναι υπερκορεσμένα ως προς την φάση του ασβεστίτη καθώς και
- Ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας των υδάτων που συντελείται στο μέτωπο του καταρράκτη (αλληλεπίδραση με την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας) ευνοεί με την σειρά της και αυτή την απόθεση του ασβεστιτικού φορτίου, τόσο με άμεσο τρόπο (εξάτμιση) όσο και με έμμεσο (έκλυση CO<sub>2</sub>).

6. Τελευταία αλλά όχι λιγότερο σημαντική αφήνουμε την ικανοποίηση εκείνων των υδροχημικών συνθηκών που απαιτούνται να υπάρχουν στα συγκεκριμένα διαλύματα ώστε και να διαθέτουν το κατάλληλο φορτίο αλλά ταυτόχρονα να είναι και σε θέση να το αποθέσούν όταν ικανοποιηθούν τόσο οι μηχανικοί όσο και οι φυσικοί παράγοντες απόθεσης.

- Η ταξινόμηση και ο υδροχημικός προσδιορισμός έδειξε ότι στα νερά, της περιοχής μελέτης, όσον αφορά το κατιονικό φορτίο κυριαρχούν τα ιόντα Ca<sup>2+</sup> σε ποσοστό 68 70% και ακολουθούν τα ιόντα Mg<sup>+2</sup> σε ποσοστό 22 25%, ενώ στο ανιονικό επικρατούν τα ιόντα HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> σε ποσοστό 90 92%. Τα νερά λοιπόν της περιοχής μελέτης ανήκουν στην κατηγορία των ανθρακικών (Ca, Mg HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup>) υδάτων, που είναι πλούσια σε CO<sub>2</sub> και θεωρούνται πρωτογενούς μετεωρικής προέλευσης (κατά Alekin 1962, από Καλλέργη Γ. 1986), δεδομένου ότι τα γεωθερμικά νερά της ευρύτερης περιοχής ανήκουν στα νερά του τύπου Na-HCO<sub>3</sub> (Αρβανίτης Α. & Ε. Ντότσικα 1998).
- Ειδικότερα οι μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> δηλώνουν ότι η χημική σύνθεση των γεωθερμικών ρευστών βασίζεται σχεδόν εξολοκλήρου στην αλληλεπίδραση των ρευστών αυτών με τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστολιθικά κροκαλολατυποπαγή) της λεκάνης του Σιδηροκάστρου που διασχίζουν κατά την άνοδό τους (Αρβανίτης Α. & Ε. Ντότσικα 1998).
- Επιπλέον ο υδροχημικός προσδιορισμός απέκλεισε την οποιαδήποτε συμμετοχή θαλάσσιας φάσης στην σύσταση των υδάτων της περιοχής μελέτης, προσδίδοντας σε αυτά προέλευση καθαρά μετεωρική, γεγονός το οποίο επιτρέπει τις πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης ιόντων HCO<sub>3</sub> στα συγκεκριμένα νερά. Ειδικότερα, η τιμή του TDS των υπό μελέτη υδάτων είναι περίπου 1g/l και επίσης η συγκέντρωση του Cl<sup>-</sup> είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από την τιμή των 100 mg/l.
- Το νερό όταν βρίσκεται σε ισορροπία με τον ασβεστίτη και το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> πρέπει να περιέχει γύρω στα 60mg/l HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Η τιμή του pH σε συνδυασμό με την υψηλή συγκέντρωση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, αποκαλύπτει το γεγονός της παρουσίας επιπλέον διαλυμένου CO<sub>2</sub> μετά και από την επίτευξη ισορροπίας με τα ιόντα Ca<sup>+2</sup> του διαλύματος. Οπότε σε συνθήκες βάθους, τα συγκεκριμένα νερά είναι ακόρεστα σε ασβεστίτη και περιέχουν περίσσεια CO<sub>2</sub>, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα διαβρωτικά. Η για οποιοδήποτε λόγο μείωση της πίεσης του συστήματος, οδηγεί άμεσα στην μείωση του διαλυμένου CO<sub>2</sub>, με αποτέλεσμα το νερό να γίνεται πιο κορεσμένο σε ασβεστίτη, από ότι ήταν αρχικά. Ειδικότερα:

7. Τα ανθρακικά άλατα αποτίθενται μέσω αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην διεπιφάνεια υγρού/στερεού μέσου και αφορούν το σύστημα MeCO<sub>3</sub> - CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O όπου Me = Ca, Mg. Η ισορροπία του συστήματος αυτού περιγράφεται από πλήθος χημικών εξισώσεων και επιμέρους ισορροπιών που βοηθούν στην περαιτέρω φυσική του λειτουργία. Κάθε αλλαγή που σημειώνεται στην θερμοκρασία ή την συγκέντρωση οποιουδήποτε ιόντος του συστήματος (ή συνιστώσας αυτού) προκαλεί μεταβολή στην συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην διεπιφάνεια υγρού/στερεού με άμεση συνέπεια την αυτορύθμιση όλου του συστήματος. Ειδικότερα, σε ένα τέτοιο σύστημα που βρίσκεται αρχικά σε ισορροπία, εάν σημειωθεί απώλεια CO<sub>2</sub> επέρχεται κορεσμός του διαλύματος σε Ca<sup>+2</sup> και τελικά έχουμε απόθεση CaCO<sub>3</sub>, ώστε το σύστημα να επέλθει σε νέα ισορροπία. Πρακτικά, όταν και η θερμοκρασία του συστήματος είναι σταθερή, μόνο η οποιαδήποτε μεταβολή στην pCO<sub>2</sub> είναι ο κυριότερος παράγοντας που μπορεί να ανατρέψει την επιθυμητή ισορροπία με άμεση συνέπεια την καταβύθιση ιζήματος ή την περαιτέρω διάβρωση υλικού. Η γενική αντίδραση είναι η εξής:

# $Ca^{+2} + 2HCO_3 \Rightarrow CO_2 + H_2O + CaCO_3 \downarrow$

Το σύστημα MeCO<sub>3</sub> - CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O κάτω από συνθήκες αερισμού είναι ανοιχτό στην ατμόσφαιρα και προσπαθεί να εξισορροπηθεί με την pCO<sub>2</sub> αυτής το οποίο στην περίπτωση της ανοικτής κατάστασης ουσιαστικά ρυθμίζει την ποσότητα CaCO<sub>3</sub> στο διάλυμα. Όταν η ποσότητα αυτή είναι χαμηλή, το CO<sub>2</sub> εισάγεται στο διάλυμα και το κάνει πιο δραστικό, άρα έχουμε περαιτέρω διάλυση ασβεστόλιθου. Αντίθετα όταν έχουμε κορεσμένο διάλυμα σε ιόντα Ca τότε σημειώνεται έκλυση CO<sub>2</sub> άρα και απόθεση CaCO<sub>3</sub> με την μορφή ασβεστολιθικού τόφφου.

- Οι απώλειες CO<sub>2</sub> είναι δυνατόν να γίνουν μόνο σε συνθήκες αερισμού (ανοιχτά φυσικά συστήματα) και ιδιαίτερα μόνο όταν η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στο νερό είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση που υπαγορεύεται από την pCO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Εάν οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται τότε σημειώνεται κορεσμός του διαλύματος σε Ca<sup>+2</sup> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> και μετά το πέρας της μετασταθούς κατάστασης πραγματοποιείται η απόθεση CaCO<sub>3</sub>.
- Εκτός από τα παραπάνω, οι φυτικοί οργανισμοί που φωτοσυνθέτουν απορροφούν σημαντικές ποσότητες CO<sub>2</sub> από τα νερά και μάλιστα σε μεγαλύτερη αναλογία από το αντίστοιχο της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό οδηγεί άμεσα στην καταβύθιση ασβεστίτη. Η τελευταία γίνεται πολύ γρήγορα και για αυτό άλλωστε εμφανίζει πορώδη χαρακτήρα, σχηματίζοντας εύθρυπτα ιζήματα τα οποία μάλιστα περιέχουν

πολυάριθμα φυτικά τεμάχη (Bayari 2002). Με τους τρόπους αυτούς λοιπόν καταλήγουμε στην δημιουργία των ασβεστολιθικών τόφφων.

8. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων, την εφαρμογή του θερμοδυναμικού μοντέλου και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα ανθρακικά άλατα αποτίθενται όταν η περιεκτικότητα του νερού σε <u>CaCO<sub>3</sub> ελαττώνεται,</u> καταλήγουμε στα εξής τελικά συμπεράσματα όσον αφορά τις συνθήκες απόθεσής τους:

- Η μείωση δηλαδή της περιεκτικότητας σε CaCO<sub>3</sub> συμβαίνει στις εξής περιπτώσεις:
  - (1) Με την αύξηση της απόστασης από την πηγή (αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα).
  - (2) Με την αύξηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ατμόσφαιρας και υπόθερμων υδάτων (βαθμός κορεσμού διαλύματος).
  - (3) Με την αύξησης της επιφάνειας αντίδρασης της υδάτινης μάζας με την ατμόσφαιρα, μπροστά στα μέτωπα των καταρρακτών (έντονη έκλυση CO<sub>2</sub>, φαινόμενα εξάτμισης).

Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι:

- Ο παράγοντας της θερμοκρασίας δεν είναι ούτε ο ισχυρότερος αλλά ούτε και ο μοναδικός φυσικοχημικός παράγοντας στον οποίο μπορεί να οφείλεται η παρουσία και η εκδήλωση των φαινομένων απόθεσης.
- Η έντονη θερμοκρασιακή διαφορά δεν έχει μόνο εποχικό αλλά και ημερήσιο χαρακτήρα. Επομένως δεν θα πρέπει να αποκλειστεί το ενδεχόμενο η απόθεση να συντελείται σε χρονικά διαστήματα μέσα στο 24ωρο στα οποία συντελούνται οι απαραίτητες θερμοκρασιακές διαφορές.
- Το κυρίαρχο φυσικοχημικό αίτιο για την έναρξη των διαδικασιών απόθεσης των ανθρακικών αλάτων είναι η απώλεια CO<sub>2</sub> από την υγρή φάση προς την ατμόσφαιρα με ή χωρίς την συμμετοχή των μεταβολών της θερμοκρασίας. <u>Η</u> διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αέρα και υπόθερμων υδάτων συμβάλλει στην έκταση της απώλειας CO<sub>2</sub> επομένως και της απόθεσης.
- Τόσο οι φυσικές όσο και οι χημικές συνθήκες απόθεσης ικανοποιούνται μόνο στα εκάστοτε μέτωπα των καταρρακτών όπου και τελικά γίνεται η απόθεσή τους και η βαθμιαία προώθησή τους (θετική μετατόπιση μετώπου καταρρακτών, δημιουργία πρωτογενών σπηλαίων).

# 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### 8.1. Ξενόγλωσσες

- Armour- Brown A., De Bruin H., Maniati C., Siatos G., Niesen P., (1977): 'The geology of the Neogene Sediments North of Serres and the use of Rodent fauna for Biostratigrarhic control'. [VII Colloquia on the Geology of Aegean Region, 2, Athens, p. 615-622].
- Baker A, Smart P.L., Ford D.C., (1993): 'Northwest European paleoclimate as indicated by growth frequency variations of secondary calcite deposits'. [Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 100: 291–301].
- 3. **Bayari S.C.** (2002): 'A rare landform: Yerkopru travertine bridges in the Taurids karst range, Turkey'. [Earth Surf. Processes & Landforms No. 27, pp. 577 590].
- 4. **Bogli A.** (1980): 'Karst Hydrology & Physical Speleology'. [Publ. Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, New York, pp. 12 49, 180 199].
- D' Amore F. & Panichi C., (1987): 'Geochemistry in geothermal exploration'. [Applied Geothermics (M. Economides & P. Ungemach, eds). John Wiley & Sons], New York.
- 6. Davis S.N. & De Wiest R.J.M., (1966): 'Hydrogeology', New York, 392 pp.
- 7. **Demek, J.,** (1972): 'Manual of detailed geomorphological mapping', International Geographical Union.
- Dikau, R., (1989): The application of a digital relief model to landform analysis. In :Raper, J.F. (Ed.) 1989 : Three dimensional applications in Geographical Information Systems. [Taylor and Francis, London, pp. 51 – 77].
- 9. Dilsiz C., Marques J.M. & Carreira P.M. (2004): 'The impact of hydrological changes on travertine deposits related to thermal springs in the Pamukkale area (SW Turkey)'. [Journal of Environmental Geology, No. 45, pp. 808–817].
- Dinter D. & Royden L., (1993): 'Late Cenozoic extension in North Eastern Greece : Strymon Valley detachment system and Rodope metamorphic core complex'. [Geology, 21:45-48].
- 11. **Dotsika E.,** (1991): 'Utilization du geothermometre isotopique sulfate-eau en milieux de haute temperature sous influence marine potentielle: Les systemes geothermaux de Grece'. [These en Sciences, University de Paris-Sud, 184pp].
- Domingo E. & Papastamataki P., (1975): 'Characteristics of Greek geothermal Waters'. [Proceedings 2<sup>nd</sup> U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Fransisco, pp. 109-121].
- 13. Dramis F., Materazzi M, Cilla G. (1999): 'Influence of climatic changes on freshwater travertine deposition: A new hypothesis'. [Physics and Chemistry of the Earth (A) 10: 893–897].
- 14. Freyberg B., (1951): 'Geologie und Lagerstattenkunde des Braunkohlenreviers von Serrae'. [Ann. Geol. Despays hell. 3].
- 15. Guo L. & Riding R. (1992): 'Aragonite laminae in hot water travertine crusts, Rapolano Terme, Italy'. [Sedimentology Vol. 39, pp 1067-1079].
- 16. **Hem J.D.**, (1962): 'Study and Interpretation of the Chemical Characteristics on Natural Water'. [U.S.G.S., Water Supply, 2<sup>nd</sup> Edition, paper No 1459, 268p].
- 17. Henley R.W. & Ellis A.J., (1983): 'Geothermal Systems ancient and modern, a geochemical review'. [Earth Science Reviews, Vol. 19, pp. 1-50].
- 18. Herman J.S. & Lorah M.M. (1988): 'Calcite precipitation rates in the field: measurement and prediction for a travertine-depositing stream'. [Geochimica Cosmochimica Acta, Vol. 52, pp 2347-2355].

- 19. International Atomic Energy Agency (I.A.E.A.), (1987): 'Statistical treatment of environmental isotope data in precipatation'. [Techn. Rep. Ser., No 206, IAEA], Vienna.
- 20. Karydakis G., Arvanitis A., Andritsos N. & Fytikas M., (2005): 'Low Enthalpy Geothermal Fields in the Strymon Basin (Northern Greece)'. [Proceedings World Geothermal Congress, pp 1-12], Antalya, Turkey.
- 21. Keller E.A. & Pinter N., (2002): 'Active Tectonics: Earthquakes, uplift and landscape'. [1st Ed. Prentice Hall Inc.], New Jersey
- 22. Kilias A. & Mountrakis D., (1990): 'Kinematic of the crystalline sequences in the Western Rhodope Massif'. [Geologica Rhodopica, Vol. 2, pp. 100-116].
- Kockel F.& Walther H., (1965): 'Die Strimonlinie als Grenze zwischen Serbo-Makedonischen und Rila- Rhodope Massiv in Ost-Mazedonien'. [Geol. JB, 83:575-602]
- 24. Kondopoulou P.D. & Pavlides B.S. (1990): 'Tertiary Geodynamic Pattern of Rhodope and Surrounding area on paleomagnetic and neotectonic data'. [Geologica Rhodopica, Vol. 2, pp. 36-49].
- 25. **Kronberg P.**, (1969): 'Gliederung, Petrographie und Tektogenese des Rhodopes Kristallins im Tsal – Dag, Simvolon und Ost-Pangaon (Greichisch-Makedonien)'. [Geotekt. Forsch. 31, I-III, Stuttgart].
- 26. Liu Z.H., Svensson U., Dreybrodt W., Yuan D. & Buhmann D. (1995): 'Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: field measurements and theoretical prediction of deposition rates'. [Geochim. Cosmochim. Acta, No. 59(15), pp 3087-3097].
- 27. Loyd R.M., (1968): 'Oxygen isotope behavior in the sulphate-water system'. [Journal Geophys. Res., Vol. 73, pp. 6099-6110].
- Lu G., Zheng C., Donahoe R.J. & Lyons W.B. (2000): 'Controlling processes in a CaCO3 precipitating stream in Hunaglong Natural Scenic District, Sichuan, China'. [Journ. Hydrol., Vol. 230(1/2), pp 34-54].
- 29. Lykoudi, E., Angelaki, M., (2004): 'The contribution of the morphometric parameters of an hydrographic network to the investigation of the neotectonic activity: an application to the upper Acheloos river'. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress*, Thessaloniki, April, [Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XXXVI].
- 30. Michelot J.L., Dotsika E. & Fytikas M., (1993): 'A hydrochemical and isotopic study of thermal waters on Lesbos Island (Greece)'. [Geothermics, Vol. 22, No 2, pp. 91-99].
- Nicholson K., (1993): 'Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques'. Springer Verlag, Heidelberg.
- 32. Osswald K., (1938): 'Geologische Geschiechte von Griechisch-Nord-Makedonien'. [Nationale Druckerei Athen].
- 33. **Owen L.B. & Michels D.E.**, (1984): ' Geochemical Engineering Reference Manual'. DOE/SF/11520-T1, Salt Lake City.
- 34. **Pavlides S., Mountrakis D., Kilias A., Tranos M.,** (1990): 'The role of strike-slip monements in the extentional area of Northern Aegean (Greece). A case of transtensional tectonics'. [Annales Tectonicae, Spec. Issue, Vol. IV, No. 2, pp. 196-211].
- 35. **Pedley H.M.**, (1990): 'Classification and environmental models of cool freshwater tufas'. [Sedimentary Geology, Vol. 28, pp 143-154].
- 36. Pentecost A. & Viles H. (1994): 'A review and reassessment of travertine classification'. [Geographie Physique et Quaternarie 48(3): 305–314].
- 37. **Piper A.M.**, (1994): 'A graphic procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis'. [Trans Amer. Geophysical Union, Vol. 25, pp 914-928], New York.

- Psilovikos A., Sotiriadis L., Vavliakis E., (1980): 'Quaternary tectonics and morphological differentiation of Sidirokastro basin'. [Ann. Geol. de Pays Hell, 30, (2), pp. 588 - 601].
- 39. **Psilovikos A., Vavliakis E., Sotiriadis L., (1981)**: Granite core stones and tors in the Vrontou mountains. [Arbeit Inst. Geog., 8, 63-78, Salzbourg].
- 40. **Risacher F. & Clement A.**, (2001): 'A computer programme for the simulation of evaporation of natural waters to high concentrations'. [Pergamon Public., in Computers Geosciences Vol. 27, pp. 191-201].
- 41. **Riding R.** (2000): 'Microbial carbonates: the geologic record of calcified bacterialalgal mats and biofilms'. [Sedimentology Vol. 47, pp 179-214].
- 42. Sotiriadis L., (1973): 'Uber festlandische Olisthostrome in N-Makedonien/Griechenland'. [N. Jb. Geol. Palaont. Mh., 1, 55-60, Stuttgart].
- 43. Sotiriadis L., (1974): 'Die Geomorphologie des Tales von Anthemous (Griechish Makedonien)'. [Ann. Musei Gulandris, 2, 141 163, Athen].
- 44. **Strahler, A.N.,** (1952): 'Hypsometric (are altitude) analysis of erosional topography'.[Bulletin Geolog. Societ. Americ., 63: 1117-1142].
- 45. **Strahler A.N.,** (1957): 'Quantitative analysis of watershed geomorphology'. [Transactions, American Geophysical Union, 38 (6), pp. 913-920].
- 46. **Strahler, A.N.,** (1964): 'Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and channel Networks'. [In CHOW, V. T., (Ed.) Handbook of Applied Hydrology, Section 14 : 54, New York].
- 47. Stumm W. & Morgan J.J. (1996): 'Aquatic Chemistry'. Published by Wiley, New York.
- Savvaidis S.A., Tsokas N.G., Soupios P., Vargemezis G., Manakou M., Tsourlos P. & Fikos I., (1999): 'Geophysical prospecting in the Krousovitis dam (N. Greece) by seismic and resistivity methods'. [Journ. of the Balkan Geophys. Soc., Vol. 2, No 4, pp. 128-138]. Geophys. Laboratory of A.U.Th., Thessaloniki.
- 49. **Theodorikas S.**, (1982): 'The mineralogy, petrology and geochemistry of the Serres-Drama granitic complex, northern Greece'. [PhD Thesis, Scien. Annales of the Faculty of Physics & Mathematics, Univ. of Thessaloniki, Vol. 22, No 28, pp. 415], Thessaloniki.
- 50. Yoshimura K., Liu Z., Cao J., Yuan D., Inokura Y. & M. Noto (2004): 'Deep source CO2 in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sihuan, China'. [Published by Elsevier, in Chemical Geology, No 205, pp 141-153].
- Vavliakis E, Sotiriadis L., Psilovikos A., (1983): 'The marginal Sidirokastro Basin of the Rhodope Massif, during the Neogene and the Quaternary'. [Sonderdruck, Glausthaler Geol. Abh., Vol 44, pp 3-19].
- 52. Vertical Mapper Spatial Analysis and Display Software, (2001): 'Tutorial'.[Northwood Technologies Inc. and Marconi Mobile Limited Canada].
- 53. Zhang D.D., Peart M., Zhang Y., Zhu A. & Cheng X. (2000): "Natural water softening processes by waterfall effects in karst areas". [Desalination, Elsevier, pp. 247 - 259].

## 8.2. Ελληνικές

1. Αρβανίτης Α., Φυτίκας Μ., Καβουρίδης Θ. & Καρυδάκης Γ., (2001): 'Γεωχημικά χαρακτηριστικά των γεωθερμικών ρευστών της περιοχής Θερμοπηγής – Σιδηροκάστρου (Λεκάνη Στρυμόνα, Μακεδονία – Β. Ελλάδα)'. [Δελτίο Ε.Γ.Ε. τόμ. XXXIV/3, σελ. 1083 – 1092].

- 2. Αρβανίτης Α., Φυτίκας Μ. & Ντότσικα Ε. (1998): 'Γεωθερμικές συνθήκες της περιοχής θερμών-Νιγρίτας (Λεκάνη Στρυμόνα, Βόρεια Ελλάδα)'. [Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Ετ., XXXII, 4, pp. 229-242].
- 3. **Αστάρας Θ.,** (1980): 'Ποσοτική Γεωμορφολογική Μελέτη τμήματος των Δ. πλευρών του όρους Βερτίσκου (Κ. Μακεδονία)'. [Διδακτορική.Διατριβή, σ.1-214] Α.Π.Θ.
- 4. **Βαβλιάκης Ε.,** (1981): 'Μελέτη των επιφανειών διάβρωσης, καρστικών, παγετωδών μορφών του όρους Μενοικίου (στην Α.Μακεδονία) από γεωμορφολογικής και μορφογενετικής πλευράς'. [Διδακτορική Διατριβή, σ.1-192]
- 5. Βαβλιάκης Ε., Μουντράκης Δ., Σωτηριάδης Λ., (1989) : 'Μορφοτεκτονικές παρατηρήσεις και σχετική χρονολόγηση των Νεοτεκτονικών παραμορφώσεων στο όρος Μενοίκιο (Αν. Μακεδονία)'. [Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Συνεδρίου Ε.Γ.Ε / 1988. Δελτ. Ελ.. Γεωλ. Εταιρ. Τόμος XXIII/1, 1989, σ. 289-302].
- Βαβλιάκης Ε., (1998): 'Σχηματισμός εξέλιξη του σπηλαίου της Έδεσσας και η θετική μετατόπιση του μετώπου των καταρρακτών'. [Α.Π.Θ., Τμήμα Γεωλογίας], Θεσσαλονίκη.
- Βαβλιάκης Ε. & Αρβανίτης Α. (1994): 'Το προβλημα της απόθεσης ανθρακικών αλάτων κατά μήκος του ρέματος Αραπίτσας Νάουσας (Κ. Μακεδονία – Β. Ελλάδα)'. [Δελτίο Ε.Γ.Ε. τόμ. XXX/4, σελ. 137 –147].
- 8. Βαβλιάκης Ε., Αλμπανάκης Κ. Ψιλοβίκος Α., Παπαφιλίππου-Πέννου Ε., (1999): 'Η αξιοποίηση του νερού της βροχής από το ασφαλτοστρωμένο οδικό δίκτυο για την επίλυση προβλημάτων πυρόσβεσης, ύδρευσης και άρδευσης προβληματικών περιοχών της Ελλάδας'. [50 Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, σ.497- 507].
- 9. Βαφειάδης Π., Πουτούκης Δ., Ντότσικα Ε., Κουκουλάκης Π., (1994): 'Επίδραση των γεωθερμικών νερών της λεκάνης Λαγκαδά (Ν. Θεσ/νίκης) πάνω στην ποιότητα των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής'. [Δελτίο Ελλ. Εδαφολ. Ετ. ΧΙ, 1, σελ. 92-103].
- 10. **Βουβαλίδης Κ.** (2006): 'Μαθήματα Φυσικής Γεωγραφίας'. [Α.Π.Θ., Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, σ.1-147].
- 11. **Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού Γ.Υ.Σ.** (1970): Τοπογραφικοί χάρτες, κλίμακας 1:50.000 φύλλα: Ν. Πετριτσίου, Αχλαδοχωρίου, Σερρών, Σιδηροκάστρου
- 12. Γ.Υ.Σ. (1971): Τοπογραφικοί χάρτες, κλίμακας 1:100.000 φύλλο: Σιδηροκάστρου
- 13. Δημόπουλος Γ., (1990): 'Υδρογεωλογικά και Υδροχημικά χαρακτηριστικά θερμομεταλλικών νερών Ελλάδας'. [Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Συνεδρίου για τα Θερμομεταλλικά Νερά, σελ. 41-57], Θεσσαλονίκη.
- 14. Δομακίνης Χ., (2004): 'Η χρήση της τηλεπισκόπησης και των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στη χαρτογράφηση κατολισθήσεων, στην παράκτια περιοχή Στρυμονικού κόλπου – Καβάλας'. [Διατριβή Ειδίκευσης, σελ. 133, Α.Π.Θ.], Θεσ/νίκη.
- 15. Εθνική Μεταωρολογική Υπηρεσία ΕΜΥ Μ.Σ. Σερρών : Μηνιαία στατιστικά των ετών 1971 –2000.
- Ι.Γ.Μ.Ε: Γεωλογικοί χάρτες, κλίμακας 1:50.000 φύλλα: Σιδηρόκαστρο (υπό έκδοση), Αχλαδοχώρι (1982).
- 17. **Ι.Γ.Μ.Ε.**, (1983): 'Υδρολογικές και υδρογεωλογικές έρευνες. Απογραφή Θερμομεταλλικών πηγών Ελλάδας'. [Αρ. Νο 39, τ.1, σ.52].
- 18. Καλλέργης Γ., (1986): 'Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία'. Έκδοση Τ.Ε.Ε., [Τόμος Α & B], Αθήνα
- 19. Καρυδάκης Γρ., Καβουρίδης Θ., (1984): 'Η γεωθερμική Έρευνα στην περιοχή Λιθοτόπου – Ηράκλειας του Ν. Σερρών κατά το 1983'. [Εκθεση ΙΓΜΕ-δ/νση Ενεργειακών Πρώτων Υλών-Τμήμα Γεωθερμίας, σ 1-53]
- 20. Καρυστιναίος Ν., (1984): 'Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης των Σερρών, λιθοστρωματογραφία βιοστρωματογραφία και τεκτονική'. [Διδακτορική Διατριβή, σ.1-230].

- 21. **Καφταντζής Γ.,** (1972): 'Ιστορία της πόλης των Σερρών και της περιφερείας της'. Τόμος Β.
- 22. Κνιθάκης Μ., (1985): 'Απογραφή καρστικών πηγών Ελλάδος υδρολογική λεκάνη Στρυμόνα'. [Υδρολογικές και υδρογεωλογικές έρευνες Ι.Γ.Μ.Ε.], Αθήνα.
- 23. Κούλας, Ν., (2004): 'Φυσικό περιβάλλον και στοιχεία διαχείρισης του χειμάρρου Ολυνθίου της Χαλκιδικής'. [Διατριβή ειδίκευσης], Θεσσαλονίκη.
- 24. Λαζαρίδης Γ., (2004): 'Μελέτη των σπηλαιομορφών της λεκάνης του Κρουσοβίτη ποταμού (Κ. Μακεδονία, Β. Ελλάδα)'. [Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ., σ. 1-59]
- 25. **Λαζαρίδου Μ.,** (1993): ' Έκθεση- Υ/Γ Έρευνα Λεκάνης Στρυμώνα'. [Ι.Γ.Μ.Ε., Παράρτημα Θεσ/νίκης, σελ. 1-30].
- 26. Λαμπράκης Ν., (1994): Έισαγωγή στην Υδροχημεία'. [Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, σελ. 158], Πάτρα
- 27. Λαμπρινός Ν., (1989): 'Συμβολή της ποσοτικής μελέτης των υδρογραφικών συστημάτων στην παλαιογεωγραφική εξέλιξη των ορέων της Βόλβης' [Διδακτορική Διατριβή, σ.1-168]
- 28. **Μουντράκης** Δ., (1985): 'Γεωλογία της Ελλάδας'. [Univ.Studio Press Α.Π.Θ., σ.1-207].
- 29. **Μουντράκης** Δ., (2002): 'Τεκτονική Εξέλιξη του Ελληνικού Ορογενούς. Γεωμετρία και Κινηματική της Παραμόρφωσης'. [Δελτίο Ε.Γ.Ε, XXXIV, σελ. 2113-2126, Αθήνα].
- 30. **Μπαλαφούτης Χ.,** (1977): 'Συμβολή εις την μελέτην του κλίματος της Μακεδονίας και Δυτικής Θράκης'. [Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ, σ.1-110]
- Παπαδάκης Α., (1965): 'Ο πλουτωνίτης της περιοχής Σερρών-Δράμας'. [Διατριβή επί Διδακτ. Θεσσαλονίκη]
- 32. Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη Κ., (1993): Έλληνικό καρστ και περιβάλλον', [Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Γεωγραφικού Συνεδρίου], Αθήνα, 1-3 Απριλίου
- 33. Παπαπέτρου-Ζαμάνη Α., (1993): 'Γεωμορφολογία'. [Αθήνα, σ. 1-176]
- 34. Παπαφιλίππου Πέννου Ε., (2004): 'Δυναμική εξέλιξη και σύγχρονες εξωγενείς διεργασίες του υδρογραφικού συστήματος της ταφρολεκάνης των Σερρών'. [Διδακτορική Διαττριβή, Α.Π.Θ., σ. 1- 243].
- 35. Παρασκευαϊδης Η., (1952): 'Σέρραι Παγγαίον, το Νεογενές και η γεωλογία του λιγνίτου'. [Γεωλογικαί και Γεωφυσικαί μελέται – Ινστιτούτο Γεωλογίας και ερευνών υπεδάφους, σελ.1-248].
- 36. Παυλίδης Σ., (2003): 'Γεωλογία των σεισμών Εισαγωγή στην Νεοτεκτονική, Μορφοτεκτονική και Παλαιοσεισμολογία'. [Univ.Studio Press, σελ. 1-338].
- 37. Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ., Διαμαντής Ι. & Καλλιώρας Α. (2004): ' Μελέτη της κατανομής των βροχοπτώσεων και της επιφανειακής απορροής στην περιφέρεια της Α. Μακεδονίας και Θράκης για την περίοδο 1964 1998'. [Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, σελ. 1054 1063], Θεσ/νίκη.
- 38. Πολύζου O., Κουμαντάκης I. & Σταματάκη Σ. (2002): 'Εφαρμογή των G.I.S. στην ταξινόμηση και αξιολόγηση των θερμομεταλλικών πηγών της Ελλάδας'. [Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, σελ. 325 336, Ξάνθη].
- 39. Σαμσάρης Δ.: 'Ιστορική Γεωγραφία της Ανατολικής Μακεδονίας κατά την Αρχαιότητα'. [Δημοσ. Εταιρείας Μακεδονικών Σπουδών].
- 40. Σούλιος Γ., (2006): 'Γενική Υδρογεωλογία'. [Univ.Studio Press, Τόμ. Β, σελ. 1-238].
- 41. Σωτηριάδης Λ., (1966): 'Μορφολογικαί και Μορφογενετικαί έρευναι εις την κοιλάδα του Κρουσοβίτου παρά το Σιδηρόκαστρον Ανατολικής Μακεδονίας'. [Επιστ.Επετ.Φ.Μ.Σ Α.Π.Θ, παρτ.αρ.1 του 10ου τόμου, σ.1-62]
- 42. Τσιραμπίδης Α., (1999): 'Γεωλογία'. [Εκδόσεις Γιαχούδη, σελ. 301], Θεσ/νίκη
- 43. ΥΒΕΤ (1987): Δ/νση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών πόρων
- 44. Φλόκας Α., (1986): 'Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας', [Α.Π.Θ., σελ. 363], Θεσσαλονίκη

- 45. Φυτίκας, Μ., (1993): 'Ειδικές δημοσιεύσεις της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας', τόμος 2ος.
- 46. Φυτίκας Μ. & Ανδρίτσος Ν. (2004): 'Γεωθερμία'. [Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ 92 –109, 274 –293].
- 47. Χατζηαγοράκης Δ. & Ταουσιάνης Α., (1989) : Ύδρογεωλογική μελέτη πεδιάδας Σερρών'. [Υπουργείο Γεωργίας - Ι΄ ΠΔΕΒ – Τμήμα Γεωλογικό, Καβάλα, σ.1-30].
- 48. Ψιλοβίκος Α., (1977): 'Παλαιογεωγραφική εξέλιξις της λεκάνης και της λίμνης Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης)'. [Διδακτορική. Διατριβή Α.Π.Θ., σ.1-156]
- 49. Ψιλοβίκος Α., Σωτηριάδης Λ. & Βαβλιάκης Ε., (1981): 'Τεταρτογενής τεκτονική και μορφολογκική διαφοροποίηση της λεκάνης του Σιδηροκάστρου'. [Annales Geol. Des Pays Hellen., Vol. 30/2, pp. 588-601], Αθήνα.
- 50. Ψιλοβίκος Α. & Βαβλιάκης Ε., (1983): 'Το πρόβλημα των επιφανειών επιπέδωσης στο χώρο της Σερβομακεδονικής μάζας και της μάζας της Ρίλα-Ροδόπης'. [Δελτίο Ε.Γ.Ε, XVI, σελ. 3-16]
- 51. Ψιλοβίκος Α., Βαβλιάκης Ε., Βουβαλίδης Κ., Παπαφιλίππου-Πέννου Ε., (2001): Γεωμορφολογικές, υδρογραφικές και ιζηματολογικές διεργασίες στη λεκάνη των Σερρών, που οφείλονται στη δράση της ρηξιγενούς τεκτονικής του Τεταρτογενούς [90 Διεθνές Συνέδριο - Ε.Γ.Ε (με έμφαση στη συμβολή των Γεωεπιστημών στην ανάπτυξη), σελ.451-457]

8.3. Πηγές από το διαδίκτυο: url 1: http://www.terra.gr http://zulu.nasa.gov/mrsid http://www.earthsat.com http://www.elsevier.com http://www.mom.gr.

### 9. ПАРАРТНМАТА

#### 9.1. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΑΝΘΡΑΚΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

### 9.1.1. Ασβεστολιθικός τόφφος (calcareous tuff)

Σύμφωνα με τον Pia (1953) ο τόφος που περιέχει ασβέστιο είναι ένας μαλακός, πορώδης βράχος στην δημιουργία του οποίου συμβάλλουν τα φυτά ως επί το πλείστον. Η ασβεστώδης συμπυκνωμένη μάζα (κατακάθι) που προέρχεται από την εξάτμιση υδάτων που προέρχονται συνήθως από κάποια πηγή είναι αντίθετα μη-πορώδης, κρυσταλλική και σκληρή και βρίσκεται μονάχα σε μέρη όπου δεν υπάρχουν φυτά. Ο τόφφος παράγεται από την λατινική λέξη tofus η οποία αναφέρεται στον πορώδη, θρυμματισμένο ασβεστόλιθο του γλυκού νερού καθώς και στον ηφαιστειακό πορώδη βράχο (τόφφο). Και τα δύο είναι εύθραυστα, το οποίο εξηγεί πως δύο τόσο γενετικά ανόμοια βράχια μπορούν να έχουν το ίδιο όνομα. Ο διαχωρισμός που γίνεται συνήθως ανάμεσα στον ασβεστολιθικό τόφο και την ασβεστώδη συμπυκνωμένη μάζα συναντάται στους μελετητές μορφολογίας που ασχολούνται με τα ασβεστολιθικά πετρώματα και τους σπηλαιολόγους της Γαλλικής και Γερμανικής σχολής, ενώ οι Άγγλοι και Αμερικανοί γεωλόγοι συχνά χρησιμοποιούν την γενική ονομασία της ασβεστώδους συμπυκνωμένης μάζας και για τις δυο περιπτώσεις (από Bogli 1980).

Στα Γερμανικά η λέξη 'calc-tufa' ορίζεται σαν ένας εύθραυστος, πορώδες ασβεστόλιθος που βρίσκεται στα γλυκά νερά και ο οποίος κατά κανόνα δημιουργείται από την συμβολή των φυτών που υπάρχουν τριγύρω, κυρίως από τα βρύα και τα φύκια.

Ο πορώδης αυτός βράχος που περιέχει ασβέστιο αποτελείται κατά κύριο λόγο, εκτός από ακαθαρσίες, από CaCO<sub>3</sub>, ακόμη και σε περιοχές δολομιτικές. Ο Stirn (1964) δημοσίευσε μια αναλογία λιγότερο από 0.7% σε MgCO<sub>3</sub> σε πέντε αναλύσεις, ένα ποσοστό της τάξης πάνω του 1% (μέχρι και 1.8%) σε άλλες τρεις. Οι ακαθαρσίες και οι οργανικές ουσίες βρίσκονται σε διάφορες αναλογίες (από Bogli 1980).

Στην κεντρική Ευρώπη υπάρχουν σημαντικά αποθέματα από πορώδεις βράχους που περιέχουν ασβέστιο τα οποία εντοπίζονται σε συγκεκριμένα σημεία σαν γεμίσματα κοιλάδας, τα οποία συνεχίζουν να σχηματίζονται ακόμη και σήμερα, όμως με πολύ πιο αργούς ρυθμούς από ότι στο παρελθόν λόγω κυρίως της αλλαγής των ιδιαίτερων κλιματικών συνθηκών σε τοπική κλίμακα ασφαλώς αλλά και λόγω της δράσης του ανθρώπινου παράγοντα. <u>Με την βοήθεια των μεθόδων χρονολόγησης C και της</u> ανάλυσης της γύρης λουλουδιών, στην κεντρική Ευρώπη έχουν τοποθετηθεί (χρονολογικά) στην θερμή Ατλαντική Περίοδο (5000-2500 π.Χ) και μερικώς στην προγενέστερη Υποατλαντική Περίοδο (Groschopf 1952, 1961, από Bogli 1980). Μια τόσο έντονη εναπόθεση είναι μονάχα δυνατή κατά την διάρκεια θερμών, υγρών περιόδων, όταν η μεγάλη βιολογική δραστηριότητα συμπίπτει με τον αυξημένο ρυθμό αντίδρασης στο σύστημα CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>, το οποίο εξετάζεται και αναλύεται εκτενώς σε άλλο σημείο της συγκεκριμένης εργασίας.

Οι πιο δημοφιλείς σχηματισμοί τόφου στην Ευρώπη είναι οι κοραλλιογενείς τόφοι στην Γιουγκοσλαβία στη περιοχή Krka (καταρράκτες Krka) και στην περιοχή Korana (Λίμνες του Plitwitz).

### 9.1.2. Πρωτογενή σπήλαια σε τραβερτίνες

Τα σπήλαια ανάλογα με τον τρόπο γένεσής τους και κατ' επέκταση του πετρώματος στο οποίο βρίσκονται ομαδοποιούνται σε δύο κατηγόριες: τα πρωτογενή και τα δευτερογενή.

Ο όρος «πρωτογενές σπήλαιο» αναφέρεται σε σπήλαια που έχουν ηλικία όμοια με αυτήν των πετρωμάτων μέσα στα οποία δημιουργούνται και σχηματίζονται κυρίως σε τραβερτινικές αποθέσεις με τη λεγόμενη ανάπτυξη κατά θετικό τρόπο, δηλαδή όταν ένας καταρράκτης εναποθέτει τραβερτινικό υλικό σχηματίζει έγκοιλα που απομονώνονται όταν τα γένια του καταρράκτη ενωθούν με το μαξιλάρι, καθώς το μέτωπό του προχωρά προς τα εμπρός (Βαβλιάκης Ε., 1998). Επίσης δημιουργούνται σε λάβες, δηλαδή καθώς ρέει η λάβα το εξωτερικό της τμήμα ψύχεται ταχύτερα και όταν μεταβληθεί η θέση του εσωτερικού μέρους της έχουμε σχηματισμό εγκοίλων. Τέλος δημιουργούνται σε κοραλλιογενείς υφάλους παράλληλα με την ανάπτυξη των κοραλλιών.

Ο όρος «δευτερογενές σπήλαιο» αφορά τα σπήλαια που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα διαβρωτικών διαδικασιών σε μάρμαρα, ασβεστόλιθους, δολομίτες, γύψους, ψαμμίτες, ορυκτό άλας και πυριγενή πλουτωνικά πετρώματα, όπως οι γρανίτες. Στην περίπτωση αυτή το περιβάλλον πέτρωμα προϋπήρχε του εγκοίλου. Υπάρχουν τα καρστικά σπήλαια υπό το γεωμορφολογικό όρο «καρστ», ο οποίος χαρακτηρίζει τα εσωτερικά μορφολογικά στοιχεία, τα οποία δημιουργούνται στα ασβεστολιθικά πετρώματα εξαιτίας της διαλυτικής δράσεως του νερού. Έτσι καρστικοποίηση είναι η διαδικασία δημιουργίας σπηλαίων, δολινών, πολγών κ.α. Τέλος για τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται μορφές όμοιες με αυτές του καρστ σε μη ανθρακικά πετρώματα όπως σε μάργες και ψαμμίτες με διαφορετικά από τα συνήθη σχήματα και μικρό μέγεθος έχουν δοθεί οι ταυτόσημοι όροι «ψευδοκάρστ» και «κρυπτοκάρστ». Υπάρχουν επίσης τα «υπογενή σπήλαια» (υδροθερμικά) που δημιουργούνται σε ανθρακικά πετρώματα από ανερχόμενα θερμά διαλύματα που τα διαβρώνουν και είναι πλούσια συνήθως σε θειικά οξέα και διοξείδιο του άνθρακα.

Τα πρωτογενή σπήλαια σε τραβερτινικές αποθέσεις δημιουργούνται ταυτόχρονα με την απόθεση του τραβερτίνη. Η απόθεση είναι συνδεδεμένη με αλλαγή των φυσικοχημικών συνθηκών που προκαλεί την διαφυγή του CO<sub>2</sub> και την καθίζηση του CaCO3 και των άλλων αλάτων σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Η αλλαγή των φυσικοχημικών συνθηκών μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια (αλλαγή θερμοκρασίας, πίεσης κ.α.).

Οι αιτίες στις οποίες αποδίδεται η αλλαγή των απαραίτητων φυσικοχημικών συνθηκών, εκτός από τις αναφερόμεμες παραπάνω, για την έναρξη των διαδικασιών απόθεσης τραβερτινικών σχηματισμών στις συγκεκριμένες θέσεις της κοίτης με απώτερη συνέπεια την δημιουργία πρωτογενών σπηλαίων αφορούν την ανατάραξη των υδάτων, τον αερισμό αυτών και κάποιες φορές κυρίως ο στροβιλισμός του νερού σε θέσεις καταρρακτών (Zhang et al., 2000).

Η θέση των συγκεκριμένων σπηλαίων εστιάζεται κυρίως κάτω από τα κατά τόπους σημεία εκδήλωσης καταρρακτών. Τα πρωτογενή σπήλαια σε τραβερτίνες δημιουργούνται σε καταρράκτες. Σε αυτούς αναπτύσσονται βρυόφυτα και άλλοι φυτικοί οργανισμοί, είτε στο χώρο κάτω από τους καταρράκτες από όπου πέφτουν τα νερά, είτε στη βάση του χώρου αυτού, οι οποίοι σταδιακά περιλιθώνονται με συνέπεια να προκύπτουν ορισμένοι χαρακτηριστικοί σχηματισμοί που ονομάζονται 'γένεια' και 'μαζιλάρια' των καταρρακτών αντίστοιχα (Bogli 1980). Οι σχηματισμοί αυτοί ουσιαστικά συνιστούν και το «υπόβαθρο» για την απόθεση των τραβερτινών και την προχώρηση του μετώπου των καταρρακτών (βλ. Εικ. 18). Η απόθεση CaCO<sub>3</sub> κατά λεπτά στρώματα πάνω στα φυτά λέγεται περιλίθωση και τα αίτια της αναφέρονται παραπάνω ενώ το αποτέλεσμα της είναι η δημιουργία τραβερτινών στις θέσεις των γενιών, των μαζιλαριών και του μετώπου του καταρράκτη. Η ένωση αυτή έχει να κάνει με το ότι η πρόοδος της απόθεσης σε αυτές τις θέσεις προκαλεί την ανάπτυξη των αποθέσεων κατά ανταγωνιστικό τρόπο με αποτέλεσμα να συναντώνται (Βαβλιάκης 1998).

Με την πάροδο του χρόνου τα γένεια και τα μαξιλάρια των καταρρακτών αυξάνουν τις διαστάσεις τους, συμπαγοποιούνται εξαιτίας της απόθεσης αλάτων Ca και Mg (ασβεστολιθικού τόφφου) και τελικά ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας στύλους και σπήλαια κάτω από το μέτωπο των καταρρακτών. Με την διαδικασία αυτή προκαλείται ταυτόχρονα και θετική μετατόπιση των καταρρακτών (δηλ. επεκτείνονται προς τα εμπρός). Οι αποκλεισμένοι χώροι που δημιουργούνται αποτελούν τα πρωτογενή σπήλαια.

Τα σπήλαια αυτά χαρακτηρίζονται από τη μικρή τους έκταση και το ότι η διεύθυνση ανάπτυξης τους είναι εγκάρσια στη διεύθυνση ροής του ποταμού που τα δημιούργησε. Το μήκος τους αντιστοιχεί περίπου στο πλάτος του καταρράκτη (βλ. Εικ. 18). Τυπικό σπήλαιο αυτής της κατηγορίας στην Ελλάδα υπάρχει στους καταρράκτες της Έδεσσας (Βαβλιάκης Ε., 1998).



Εικόνα 18.: Γένια και μαξιλάρια κάτω από το σημερινό μέτωπο των καταρρακτών του πρωτογενούς σπηλαίου Εδέσσης, με την θέση του σπηλαίου να προσδιορίζει την παλαιότερη θέση των καταρρακτών (Βαβλιάκης 1998).

# 9.2. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ

### 9.2.1. Σύσταση της αέριας φάσης

Όλα τα γεωθερμικά ρευστά περιέχουν πάντοτε σημαντικές ποσότητες διαλυμένων αερίων, τα οποία απελευθερώνονται κυρίως κατά την διάρκεια της εκτόνωσης των ρευστών. Η ισορροπία μεταξύ αέριας και υγρής φάσης καθορίζει την κατανομή των αερίων στις δύο φάσεις, τα οποία κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους μεταφέρονται στην αέρια φάση. Τα αέρια από μια γεωθερμική γεώτρηση ή από μια φυσική εκδήλωση αναφέρονται ως μη συμπυκνώσιμα αέρια (noncondensable gases), επειδή δεν συμπυκνώνονται στις συνθήκες που εκπέμπονται ή στις συνθήκες λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας. Τα μη συμπυκνώσιμα αέρια αποτελούνται συνήθως κατά 60 – 100% από δύο αέρια, τα οποία απορροφούνται από διάλυμα NaOH: το CO<sub>2</sub> και το H<sub>2</sub>S. Αν και η σύσταση των μη συμπυκνώσιμων αερίων από γεωθερμικές γεωτρήσεις, από θερμές πηγές και ατμίδες ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, το κυρίαρχο αέριο που συνδέεται με την γεωθερμική δραστηριότητα είναι το CO<sub>2</sub>. Το δελυτερο σε αφθονία είναι το υδρλοθειο, ιδιαίτερα σε ηφαιστειακές περιοχές. Η συμμετοχή των μη συμπυκνώσιμων αερίων στην αέρια φάση στα κυριότερα πεδία υψηλής ενθαλπίας κυμαίνεται από 2,5 – 50g/Kg ατμού.

Ειδικότερα για τα παραπάνω πεδία χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα, με αξιοσημείωτες ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, οι αναλύσεις έχουν δείξει ότι το μη συμπυκνώσιμο τμήμα της αέριας φάσης αποτελείται κατά 90 – 99% από CO<sub>2</sub>, με μικρές ποσότητες H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub> (π.χ. Νιγρίτα). Εάν οι ποσότητες που εκλύονται είναι πολύ μικρές, τότε είναι δυνατόν το κυρίαρχο αέριο να είναι το μεθάνιο ή το άζωτο. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το κυριότερο συστατικό της αέριας φάσης που ανιχνεύεται σε θερμές πηγές και ατμίδες στην Ελλάδα είναι το CO<sub>2</sub> (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004).

Το πρόβλημα της προέλευσης των διαλυμένων αερίων και γενικότερα των διαλυμένων συστατικών στα γεωθερμικά ρευστά έχει προκαλέσει αρκετές συζητήσεις τα τελευταία χρόνια, χωρίς να έχει δοθεί μέχρι τώρα ικανοποιητική και ολοκληρωμένη απάντηση. Αρχικά θεωρούνταν ότι η παρουσία CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S (όπως και άλλων συστατικών) στα γεωθερμικά ρευστά ήταν αποτέλεσμα της μαγματικής προέλευσης των νερών. Πάντως πειραματικά δεδομένα από αντιδράσεις θερμού νεού – πετρωμάτων και από ισοτοπικές αναλύσεις οδήγησαν στη ριζική επανεξέταση της παραπάνω θεώρησης.

Το CO<sub>2</sub> θεωρείται ότι παράγεται σε ορισμένες περιπτώσεις από διεργασίες θερμομεταμόρφωσης. Σε αρκετές άλλες περιπτώσεις όμως μπορεί να προέρχεται από βιολογικές αντιδράσεις (αποσύνθεση οργανικής ύλης σε ιζηματογενή πετρώματα), ενώ μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> μπορούν να παραχθούν μέσω αντιδράσεων υδρόλυσης ασβεστίτη και δολομίτη σε ιζηματογενείς περιοχές. Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις, μέρος του CO<sub>2</sub> μπορεί να προέρχεται από την αντίδραση σύνθεσης μεταξύ ανθρακούχων πετρωμάτων και ιόντων υδρογόνου.

Οι ποσότητες και το είδος των διαφόρων αερίων που βρίσκονται διαλυμένα στα γεωθερμικά ρευστά εξαρτώνται βασικά από το περιβάλλον των πετρωμάτων με τα οποία αυτά βρίσκονται σε επαφή, ενώ οι συγκεντρώσεις τους συνδέονται με την σταθερότητα και τη διαλυτότητα των συγκεκριμένων ορυκτών.

Ειδικότερα, στο διάλυμα οι ποσότητες των CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> ελέχγονται από την pCO<sub>2</sub> του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Μέσα από διεργασίες διαχωρισμού που λαμβάνουν

χώρα στο διάλυμα οι παραπάνω ποσότητες προκαλούν μεταβολές στην συγκέντρωση ιόντων H<sup>+</sup> άρα αντίστοιχα και του pH. Ανάμεσα στις τιμές του τελευταίου και τις τιμές της pCO<sub>2</sub> υπάρχει μια πολύ στενή σχέση κατά την διάρκεια επαναφοράς του διαλύματος σε ισορροπία (βλ. Εικ 19). Ειδικότερα κατά την διάρκεια αυτή, η αναλογία των ποσοτήτων των CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> μεταξύ τους είναι σταθερή για οποιαδήποτε τιμή pH, παρόλα αυτά όμως αλλάζουν όταν μεταβάλλεται το pH.



**Εικόνα 19.:** Μεταβολή του pH σε συνάρτηση με την μερική πίεση του CO<sub>2</sub> (Roques 1964, από Bogli 1980).

Από την μελέτη των γραφημάτων φαίνεται ξεκάθαρα ότι για τιμή pH < 8.7 οι ποσότητες των CO<sub>2</sub> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> φτάνουν σε ποσοστό 1,2% του διαλύματος, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση των ιόντων HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> φτάνει σε ένα μέγιστο ποσοστό 97,6%. Για τιμή pH πάνω από 8.7 η ποσότητα CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> είναι ακόμα πιο μικρή και θεωρείται αμελητέα. Το ίδιο ισχύει επίσης για το CO<sub>2</sub> για τιμές pH μεγαλύτερες από 8.7. αντίθετα για τιμές pH μικρότερες από 6.6 η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> ξεπερνά ακόμα και αυτή του HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Στην φύση όπου οι τιμές pH συνήθως κυμαίνονται από 6.25 – 8.75, η συγκέντρωση των ιόντων CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> δεν είναι σημαντική. Σε κατάσταση ισορροπίας διαλυμάτων καρστικής προελεύσεως παρατηρούνται τιμές pH από 7 – 8.5. Όσον αφορά την συγκέντρωση HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> στο συγκεκριμένο διάστημα pH είναι κυρίαρχη (βλ. Eικ. 20).



**Εικόνα 20.:** Μεταβολή των ιόντων  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{-2}$  καθώς και του  $CO_2$  σε συνάρτηση με τις μεταβολές του pH (Roques 1954, από Bogli 1980).

#### 9.2.1.1. Διαλυτότητα γεωθερμικών αερίων

Οι ποσότητες και το είδος των διαφόρων αερίων που βρίσκονται διαλυμένα στα γεωθερμικά ρευστά εξαρτώνται βασικά από το περιβάλλον των πετρωμάτων με τα οποία αυτά βρίσκονται σε επαφή, ενώ οι συγκεντρώσεις τους συνδέονται με την σταθερότητα και τη διαλυτότητα των συγκεκριμένων ορυκτών.

Η διαλυτότητα ενός αερίου σε δεδομένο όγκο υγρού και σε συνθήκες ισορροπίας ανάμεσα στα δύο μέσα καθώς και σταθερών θερμοκρασιών, εκφράζεται μέσω του **νόμου του Henry**, σύμφωνα με τον οποίο η ποσότητα του διαλυμένου αερίου μέσα στην υγρή φάση είναι ανάλογη με την πίεση (μερική) του ίδιου αερίου επίσης στο διάλυμα (Φυτίκας & Ανδρίτσος, 2004):

$$K_{\rm H} = p_i / \varphi_i$$

όπου  $K_{\rm H} =$ σταθερά του Henry

 $p_i = η$  μερική πίεση του i - αερίου στην αέρια φάση και  $\varphi_i = το$  μοριακό κλάσμα του i - αερίου στην υγρή φάση

Η σταθερά του Henry ουσιαστικά εξαρτάται από την θερμοκρασία και την αλατότητα του συστήματος, όπως έχει ειπωθεί από τους Capasso & Inguaggiato (1998). Ειδικότερα οι Dramis et al. (1999) έχουν παρουσιάσει εκτενή εργασία στην οποία διαπιστώνεται ότι νερό με θερμοκρασία 0°C διαλύει τρεις φορές περισσότερο CO<sub>2</sub> από ότι σε 30°C, εξηγώντας πολύ καλά γιατί η διαλυτότητα του CaCO<sub>3</sub> είναι αντίστροφα σχετιζόμενη με την θερμοκρασία

Επίσης η διαλυτότητα του CO<sub>2</sub> μειώνεται με την αλατότητα του ρευστού, ενώ η μείωση αυτή γίνεται περισσότερο έντονη σε μεγάλες θερμοκρασίες.

Το περισσότερο διαλυτό αέριο στο νερό είναι η αμμωνία ακολουθούμενη από το υδρόθειο και το CO<sub>2</sub>. πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η σειρά διαλυτότητας των αερίων δεν αλλάζει με την θερμοκρασία, ενώ σημαντικές διαφορές της διαλυτότητας μεταξύ των αερίων παρατηρούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η σειρά διαλυτότητας των γεωθερμικών αερίων έχει ως εξής:

 $N_2 < O_2 < CH_4 < CO_2 < H_2S < NH_3$  (περισσότερο διαλυτό)

9.2.1.2. Η κινηματική του CO<sub>2</sub>

Η μεταφορά μάζας από το ένα μέσο στο άλλο πάντα λαμβάνει χώρα πολύ αργά και για το λόγο αυτό άλλωστε έχουμε σταδιακή, βαθμιαία μετάβαση από την παλιά κατάσταση ισορροπίας στην νέα. Αντίθετα οι μεταβολές στην pCO<sub>2</sub> είναι πολύ απότομες όπως για παράδειγμα όταν το νερό κινείται μέσα σε ένα σωληνοειδή θάλαμο στον οποίο δεν υπάρχει επαφή με ατμοσφαιρικό αέρα και μεταβαίνει απότομα σε ένα χώρο που διατηρεί μια κάποια ατμόσφαιρα ( $p_1 < p_2$ ). Στην θέση του σωληνοειδούς θαλάμου το νερό ουσιαστικά συνιστά ένα κλειστό σύστημα αφού δεν υπάρχει επικοινωνία με την ατμόσφαιρα, άρα δεν συμβαίνει καμιά αλλαγή στο σύστημα από την στιγμή που αυτό θα φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Επικρατεί λοιπόν στην περίπτωση αυτή μια θεωρητική pCO<sub>2</sub> η οποία βρίσκεται σε ισορροπία με την διαλυμένη στο νερό ποσότητα CO<sub>2</sub>. Μόλις λοιπόν το νερό φτάσει στον ανοιχτό χώρο που διαθέτει κάποια ατμόσφαιρα με μερική πίεση CO<sub>2</sub> διαφορετική από την αντίστοιχη του διαλύματος, ανατρέπεται η ισορροπία του τελευταίου στην προσπάθεια του να προσαρμοστεί στο νέο καθεστώς συνθηκών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε απορρόφηση CO<sub>2</sub> από το διάλυμα.

Στην περίπτωση όμως των βωκλυζιανών πηγών όπου ισχύει  $(p_1 > p_2)$  έχουμε έκλυση CO<sub>2</sub> προς το περιβάλλον.

Προφανώς και στις δύο περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων ιόντων του διαλύματος είναι αναγκασμένες να μεταβληθούν και αυτές στην προσπάθεια του διαλύματος να ανταποκριθεί στις καινούργιες κάθε φορά συνθήκες.

Σύμφωνα με τον νόμο του Henry η pCO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας και η διαλυμένη ποσότητα CO<sub>2</sub> στο διάλυμα συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με την σχέση:

$$pCO_2 = D * [CO_2]$$

όπου D : Συντελεστής Διάχυσης (εξαρτάται ισχυρά από την θερμοκρασία)

Από την παραπάνω σχέση πηγάζει μια πιο κατάλληλη σχέση (Trombe 1952, από Bogli 1980):

CO<sub>2</sub> g/l = M \* pCO<sub>2</sub> όπου M = (1/D) \* (1964/44) 1,964= Το βάρος 1 lit CO<sub>2</sub> σε gr. και 44 = το M.B. του CO<sub>2</sub>

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στο διάλυμα καθορίζεται αφού επιτευχθεί ισορροπία με την pCO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας. Γενικά το CO<sub>2</sub> διαλύεται φυσικώς σε ποσοστό 99,3% ενώ το υπόλοιπο 0,7% στους 4°C υδρολύεται (Trombe 1952). Συγκεκριμένα όταν η pCO<sub>2</sub> είναι σταθερή, η περιεχόμενη ποσότητα CO<sub>2</sub> του διαλύματος μειώνεται στο ποσοστό 37,3% στους 30°C. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι να μειωθεί και η διαλυτότητα του ασβεστόλιθου σημαντικά.

Η μετάβαση από το ένα μέσο στο άλλο κάτω από συνθήκες ήρεμης ροής καθορίζεται από τον συντελεστή διάχυσης D του CO<sub>2</sub> τόσο στο υγρό μέσο όσο και στο αέριο. Ειδικότερα (από Stumm & Morgan 1996):

$$D_{air} = 0,138 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} (0^{\circ}\text{C}, 1 \text{ atm}) \text{ } \text{ } 1 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} (25^{\circ}\text{C})$$
$$D_{water} = 0,95^* 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} (0^{\circ}\text{C})$$

Επειδή  $D_{water}$  είναι μικρότερος από τον  $D_{air}$  κατά 4 τάξεις μεγέθους, ο ρυθμός διάχυσης στο νερό θα είναι και αυτός κατά 10000 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο στον αέρα. Αυτό το τελευταίο γεγονός προφανώς παίζει και τον ρυθμιστικό ρόλο στο ποσό και τον όγκο μάζας που μεταφέρεται στην διεπιφάνεια υγρού – στερεού. Στην περίπτωση όπου τα δύο μέσα ουσιαστικά δεν μετακινούνται η μεταφορά μάζας από το ένα στο άλλο λαμβάνει χώρα μόνο μέσω της διάχυσης.

Όταν όμως παρατηρείται στο νερό στροβιλώδη ροή, οι συνθήκες που περιγράφουν το σύστημα αλλάζουν απότομα και δραστικά. Στην περίπτωση αυτή το CO<sub>2</sub> που βρίσκεται γύρω από την διεπιφάνεια απομακρύνεται ισχυρά από το διάλυμα επειδή η κίνηση του νερού με τον τρόπο αυτό είναι πολύ πιο ισχυρή από τον αντίστοιχο ρυθμό διάχυσης στο διάλυμα. Στην περίπτωση αυτή στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας συμμετέχει όλος ο όγκος του νερού και με τη συγκέντρωση των ιόντων να φτάνει τις μέγιστες τιμές της στην περιοχή της διεπιφάνειας υγρού – στερεού. Το γεγονός αυτό πραγματικά επιταχύνει σημαντικά τις διαδικασίες μεταφοράς της μάζας. Επίσης στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια του υγρού μέσου είναι τραχιά, γεγονός που αυζάνει κατά πολύ τον λόγο A/V.

Υπάρχουν δύο πιθανές αιτίες για την μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου CO<sub>2</sub>: είτε οφείλεται στην δράση φωτοσυνθετικών διεργασιών από υδρόβιους οργανισμούς είτε στην έκλυση CO<sub>2</sub> λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Υποθέτωντας σταθερές συνθήκες ο ρυθμός μεταφοράς του CO<sub>2</sub> (F σε mol/cm<sup>2</sup>\*s) από την διεπιφάνεια υγρής και αέριας φάσης προς την ατμόσφαιρα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

## $F = D_{CO_2} * ([CO_2(aq)] - [CO_2]_{w/a})/z_w$

Όπου D<sub>CO2</sub> είναι ο συντελεστής διάχυσης του CO<sub>2</sub> στο νερό (σε cm<sup>2</sup>/s), z<sub>w</sub> το πάχος της διεπιφάνειας (σε cm), και [CO<sub>2</sub>]<sub>w/a</sub> η συγκέντρωση του διαλυμένου CO<sub>2</sub> στην διεπιφάνεια (σε mol/cm<sup>3</sup>). Η σχέση αυτή έχει προσδιοριστεί πειραματικά φυσικά από τους Stumm & Morgan (1996). Επίσης η μεταβολή του D<sub>CO2</sub> από την θερμοκρασία θεωρείται αμελητέα. <u>Τέλος, ενδεικτικά μόνο αναφέρουμε ότι εάν η θερμοκρασία αυξηθεί από τους 5°C στους 15°C και διατηρήσουμε τις υπόλοιπες συνθήκες σταθερές, ο ρυθμός F θα αυξηθεί κατά 5%.</u>

### 9.2.2. Θεωρία της διάλυσης ανθρακικών ορυκτών φάσεων

Τόσο οι τραβερτινικές αποθέσεις όσο και αυτά τα ίδια τα πρωτογενή σπήλαια που φιλοξενούν αποτελούν φυσικά φαινόμενα των οποίων η δημιουργία, η ανάπτυξη και η διατήρησή τους συνδέεται πολύ στενά με τις διεργασίες της καρστικής διάβρωσης. επομένως η σωστή μελέτη των φαινομένων αυτών επιβάλλεται να γίνει μέσω των κανόνων και διεργασιών που περιγράφουν τις συνθήκες διάλυσης και απόθεσης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων συνέπεια των οποίων άλλωστε είναι και η δημιουργία των μελετούμενων αποθέσεων. Για το λόγο αυτό άλλωστε αναφερόμαστε παρακάτω στον ιδιαίτερο μηχανισμό διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων αρχικά έτσι ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα και την αντίστροφη διαδικασία που δεν είναι άλλη από αυτή της απόθεσης, το γενικότερο πρόβλημα της οποίας προσπαθεί να αντιμετωπίσει η εν λόγω εργασία.

Ο μηχανισμός της διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων, αναφέρεται σε ένα σύστημα ουσιών (Bogli 1980) του τύπου CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O – Me (όπου Me = Ca ή Mg) και περιλαμβάνει πολυάριθμες φυσικές και χημικές διεργασίες στις οποίες συμμετέχουν και οι τρεις φάσεις, αέρια, υγρή και στερεή. Αυτό προκαλεί μια ανταλλαγή μάζας μέσα από τις διεπιφάνειες **αέρας/νερό** και **νερό/πέτρωμα**. Οι διαδικασίες στις διεπιφάνειες είναι φυσικές (ανταλλαγή μαζας, διάχυση) ενώ στο υδατικό διάλυμα είναι χημικές ασφαλώς (βλ. Εικ. 21).

Τα καρστικά φαινόμενα είναι αποτέλεσμα της διάβρωσης που προκαλεί το νερό της βροχής στα πετρώματα αφού εμπλουτισθεί σε CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα και το έδαφος. Οι πιο σημαντικές πηγές CO<sub>2</sub> είναι ο αέρας και το έδαφος. Πρέπει να σημειωθεί μάλιστα, ότι η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> του αέρα στο έδαφος ξεπερνά εκείνη της ατμόσφαιρας κατά 10 – 100 φορές. Το CO<sub>2</sub> του αέρα στο έδαφος είναι βιογενούς προέλευσης, δηλαδή προέρχεται από την αποσύνθεση οργανικών ουσιών, από οργανισμούς και το ριζικό σύστημα των φυκών.\_Προσβάλλει κυρίως ανθρακικά άλατα του Ca<sup>++</sup> και Mg<sup>++</sup>.

Παράγοντες που επιδρούν στη καρστική διάβρωση είναι η κατάλληλη τεκτονική κατασκευή της περιοχής, κλίση της επιφάνειας του εδάφους, οι κλιματολογικές συνθήκες (T, P) και η χημική σύσταση των ασβεστολίθων. Το αποσταγμένο νερό σε συνήθη θερμοκρασία διαλύει 16mg/l CaCO<sub>3</sub>, ενώ όταν είναι εμπλουτισμένο σε CO<sub>2</sub> δρα κατά την αντίδραση:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

και αυξάνει την διαλυτική του ικανότητα. Η ποσότητα του CaCO<sub>3</sub> που θα διαλυθεί αρχικά στο διάλυμα, καθορίζεται από την αρχική περιεκτικότητα του H<sub>2</sub>O σε CO<sub>2</sub>. Με συνηθισμένη περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> και σε 0<sup>°</sup> C η διαλυτική ικανότητα του νερού είναι 70 mg/l, ενώ στη φύση η τιμή αυτή κυμαίνεται από 100 - 200 mg/l και φτάνει συχνά τα 400 mg/l. Η αρχική ποσότητα CO<sub>2</sub> που μπορεί να διαλυθεί στο H<sub>2</sub>O, μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί με την βοήθεια της εξίσωσης που ακολουθεί αμέσως παρακάτω: CO<sub>2</sub> διαλ. σε gr (Βαβλιάκης 1981):

$$gr = A.*P*1,964$$
 (1)

Α= Συντελεστής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία

P= Μερική πίεση του CO<sub>2</sub> σε At.

1,964= Το βάρος 1 lit CO<sub>2</sub> σε gr.

Έτσι με την παρουσία του ανθρακικού οξέος στο νερό ο ασβεστόλιθος (CaCO<sub>3</sub>) μετατρέπεται σε όξινο δισανθρακικό ασβέστιο κατά την αντίδραση:

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

Η αντίδραση μετατοπίζεται προς τα προϊόντα σε περίπτωση περίσσειας CO<sub>2</sub> ή προς τα αντιδρώντα όταν υπάρχει έλλειψη, οπότε έχουμε διάλυση ή καθίζηση CaCO<sub>3</sub> ανάλογα με την περίπτωση.

Καθώς τα νερά κατεισδύουν στον ασβεστόλιθο από τις κατακλάσεις διαλύουν το CaCO<sub>3</sub>. σύντομα επέρχεται κορεσμός τους με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συνεχίσουν τη διάβρωση. Για να ξεκινήσει ξανά πρέπει να έχουμε ανάμειξη δύο ή

περισσοτέρων διαλυμάτων διαφορετικής περιεκτικότητας σε H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ή απλώς διαφορετικής θερμοκρασίας.

Η διάλυση των μορίων CO<sub>2</sub> (γενικά **αργή** αντίδραση) οδηγεί σε πρώτη φάση στην απελευθέρωση ιόντων από την κρυσταλλική δομή των ιόντων, με άλλα λόγια από το πέρασμα των ιόντων μέσα από την αλληλεπίδραση **στερεών/υγρών** ουσιών. Αυτό δεν συμβαίνει με κάποιο τυχαίο ρυθμό καθώς τα ιόντα περιβάλλονται από μόρια νερού (ενυδάτωση). Η διαδικασία αυτή συνδέεται με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Στο σύστημα CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O - CaCO<sub>3</sub>, η διάλυση του CaCO<sub>3</sub> γενικά ανήκει στις αργές αντιδράσεις.

Στην επιφάνεια της στερεής ουσίας σχηματίζεται μια οριακή στοιβάδα κατά την διάρκεια της διάλυσης η οποία παραμένει ανέπαφη ακόμη και όταν οι αναταράξεις είναι έντονες. Είναι αρκετά εκατομμυριοστά του μέτρου σε πάχος. Μέσα σ' αυτήν, η κίνηση των ιόντων γίνεται μόνο με την διάλυση, η οποία καθορίζει τον ρυθμό της διάλυσης σύμφωνα με το πόσο αργή είναι αυτή.

Ανάλογα με την ταχύτητα και την ποσότητα του διαλυμένου CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται, νέα ποσότητα CO<sub>2</sub> από τον αέρα διαλύεται στο H<sub>2</sub>O και διατηρεί τη συνέχεια των αντιδράσεων.

Όταν τα ιόντα του διαλύματος φεύγουν από την ιοντική κρυσταλλική δομή το  $CO_3^{-2}$ μετασχηματίζεται από το H<sup>+</sup> σε HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Στην οριακή στοιβάδα υπάρχουν δύο κατευθύνσεις κίνησης (των ιόντων). Τα ιόντα  $Ca^{2+}, CO_3^{-2}$  και HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> κινούνται προς την ζώνη αναταράξεων, ενώ τα H<sup>+</sup> και CO<sub>2</sub> προς τον βράχο (βλ. Εικ. 21).



Εικόνα 21.: Σχηματική παράσταση των αντιδράσεων διάλυσης ανθρακικών πετρωμάτων (Bogli 1980).

Ειδικότερα όταν το νερό βρίσκεται σε ισορροπία με τον ασβεστίτη και το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> πρέπει να περιέχει γύρω στα 60mg/l HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Οι συνηθισμένες όμως συγκεντρώσεις του στο καρστικό νερό συνήθως είναι της τάξης των 300-450mg/l, γεγονός που υποδηλώνει αναμφισβήτητα ότι τα νερά των συγκεκριμένων φυσικών συστημάτων δεν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας όσον αφορά την φάση του ασβεστίτη το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> και συνεπώς το διαλυμένο CO<sub>2</sub>.

Τα γεωθερμικά νερά συνήθως παρουσιάζουν τιμές pCO<sub>2</sub> μεταξύ  $10^{-0.384}$  και  $10^{-1.053}$ , τιμές ελαφρώς υψηλότερες αυτών που προέρχονται από το έδαφος ή τη βιολογική δραστηριότητα ( $10^{-0.5} - 10^{-3.5}$ ). Το γεγονός αυτό επίσης συνομολογεί με την σειρά του για την παρουσία επιπλέον διαλυμένου CO<sub>2</sub>. Γενική είναι επίσης η διαπίστωση ότι τα ψυχρότερα νερά έχουν μικρότερες τιμές pCO<sub>2</sub> από αυτές των θερμότερων. Η υδρόλυση CaCO<sub>3</sub> ασβεστολιθικών μαζών καθώς και μαρμάρων φαίνεται να αποτελεί την πιθανότερη αιτία της δημιουργία του CO<sub>2</sub> των γεωθερμικών νερών.

Παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την διαλυτική ικανότητα του νερού αποτελούν η θερμοκρασία και η πίεση. Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται ελάττωση της διαλυτικής ικανότητας, ενώ αύξηση της πίεσης έχει ως συνέπεια την αύξηση της διαλυτότητας λόγω του ότι υπάρχει περισσότερο CO<sub>2</sub> σε διάλυση.

Γενικότερα μπορεί να τονιστεί ότι τόσο ο ασβεστίτης όσο και ο δολομίτης ελάχιστα διαλύονται στο καθαρό νερό. Όμως η παρουσία του  $CO_2$  στο νερό τα μετατρέπει σε οξυανθρακικές ενώσεις οι οποίες είναι ευδιάλυτες. Οι συγκεντρώσεις  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$  και  $CO_3^{-2}$  εκφράζουν την ιοντική ισορροπία των αλάτων στο νερό, αλλά στις χημικές αναλύσεις συνήθως αυτά τα ανθρακικά είδη εκφράζονται σαν  $HCO_3^-$ .

Η διαλυτική ικανότητα του φυσικού νερού σε CaCO<sub>3</sub> αυξάνει, εφόσον περιέχει ορισμένα ιόντα, όπως  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$  και άλλα, σε ορισμένες αναλογίες. Αντίθετα η παρουσία ιόντων  $SO_4^{-2}$  μειώνει την διαλυτική ικανότητα του φυσικού νερού (Μονόπωλης 1971), με την απαραίτητη προϋπόθεση όμως τα ιόντα να μην υπάρχουν στο αρχικό διάλυμα. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση που τα ιόντα που προστίθενται στο διάλυμα υπάρχουν στο αρχικό. Έτσι οι καθαροί ασβεστόλιθοι είναι οι πιο ευδιάλυτοι από όλες τις μορφές των ανθρακικών πετρωμάτων.

## 9.2.3. Είδη ορυκτών φάσεων

Στη φύση βρίσκονται περίπου 60 ορυκτά που περιέχουν την ρίζα CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> στον τύπο τους. <u>Το CaCO<sub>3</sub> κρυσταλλώνεται συνήθως σε τρεις πολυμορφικές φάσεις: ασβεστίτης,</u> <u>αραγωνίτης και βατερίτης.</u> Από αυτά ο ασβεστίτης και ο πολύμορφός του αραγωνίτης είναι τα πιο κοινά στα ιζήματα νεώτερης ηλικίας. Ο Mg-ούχος ασβεστίτης δημιουργείται από τυχαία υποκατάσταση ορισμένων ιόντων Ca από ιόντα Mg στη δομή του ασβεστίτη. **Ο φτωχός Mg-ούχος ασβεστίτης περιέχει < 4% MgCO<sub>3</sub> σε**
**ισόμορφη παράμειξη με CaCO<sub>3</sub>.** Ο πλούσιος Mg-ούχος ασβεστίτης περιέχει 4 – 19% MgCO<sub>3</sub> σε ισόμορφη παράμειξη με CaCO<sub>3</sub>. Είναι γενικά ασταθής και κατά την διάρκεια σχηματισμού του ασβεστολίθου μετατρέπεται σε φτωχό Mg-ούχο ασβεστίτη ή σε δολομίτη.

Στα παλαιότερα ανθρακικά πετρώματα τα κοινότερα ορυκτά είναι ο CaCO<sub>3</sub> και ο δολομίτης CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> στον οποίο η αναλογία Mg /Fe είναι > από 4:1. Στα πετρώματα αυτά επίσης είναι χαρακτηριστική η απουσία αραγωνίτη η οποία οφείλεται στη διάλυση και αντικατάστασή του από άλλα ορυκτά.

Η διαλυτότητα του CaCO<sub>3</sub> είναι συνάρτηση του ιοντικού πλέγματος που δημιουργείται από τα ιόντα Ca<sup>+2</sup> και CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>. Κάτω από φυσικές συνθήκες ο κοινός ασβεστίτης (τριγωνικό σύστημα) είναι ο πιο αδιάλυτος. Ο αραγωνίτης (ρομβικό σύστημα) είναι κάπως πιο διαλυτός (σε ποσοστό 16%). Οι άλλες δύο μορφές, ο βατερίτης (εξαγωνικό σύστημα) και το άμορφο CaCO<sub>3</sub> είναι ιδιαίτερα ασταθείς όταν έρχονται σε επαφή με το νερό και μεταπίπτουν σχεδόν ακαριαία σε ασβεστίτη και όταν η συγκέντρωση επαρκεί σε αραγωνίτη (Bogli 1980). Υπάρχει λοιπόν η εξής σειρά:

## CaCO<sub>3</sub> (gel) $\rightarrow$ Βατερίτης $\rightarrow$ Δευτερογενής αραγωνίτης

<u>Για τον σχηματισμό πρωτογενή αραγωνίτη από ένα διάλυμα απαιτείται ασφαλώς</u> κορεσμός τόσο σε κλασσικό ασβεστίτη όσο και σε αραγωνίτη. Η συνθήκη αυτή είναι δυνατόν να ικανοποιηθεί είτε από απώλειες CO<sub>2</sub> είτε από φαινόμενα εξάτμισης είτε ακόμα από αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα η τελευταία δεν προκαλεί αλλαγές μόνο στην αναλογία CO<sub>2</sub> /CaCO<sub>3</sub> αλλά επίσης επηρεάζει τον σχηματισμό αραγωνίτη άμεσα (Curl, 1962, από Bogli 1980). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται η τάση για τον σχηματισμό πρωτογενή αραγωνίτη ενισχύεται σημαντικά. Σύμφωνα με τον Moore (1956) ο σχηματισμός του αραγωνίτη προϋποθέτει θερμοκρασίες υψηλότερες των 16°C, τιμή που φτάνει τους 24°C εάν μιλάμε για περίοδο 6000 ετών από σήμερα καθώς επίσης και χαμηλές σχετικά τιμές υγρασίας (έχει να κάνει με την pCO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και τη μείωση των εκλυόμενων ποσοτήτων). <u>Κυρίως</u> απαιτείται μεγάλη περίσσεια CO<sub>3</sub><sup>-</sup> στο διάλυμα με ταυτόχρονη παρουσία Mg<sup>+2</sup> και Sr<sup>+2</sup> και γενικότερα «ξένων» ως προς το μελετούμενο σύστημα ιόντων έτσι ώστε να σχηματίστεί αραγωνίτης (Murray 1954, Κουτσούκος 1989, από Φυτίκα & Ανδρίτσο 2004).

## 9.3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

## 9.3.1. Πίνακες αποτελεσμάτων χημικών αναλύσεων

ΧΡΟΝΟΣ Δ	ΕΙΓΜΑΤΟΛΗ	ΙΨΙΑΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2005				
ΣΗΜΕΙΟ ΔΕ	ΕΙΓΜΑΤΟΛΗ	ΙΨΙΑΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙ	ΚΕΣ ΠΑΡΑ	METPOI					
Т	AEPA		_	_	_	_	
Т	NEPOY		_	_		_	
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	(R) (μS/cm	) (εργασ.)	394	448	403	377	
рН	(εργασ.)		6,65	6,5	6,79	6,69	
ΣΔA ŕ	j TDS (mg/l)		1257,14	968,57	853,27	950,68	
ΑΛΚΑΛ	IKOTHTA (F	<b>&gt;</b> )	0	0	0	0	
ΟΛΙΚΗ ΣΙ	КЛНРОТНТ.	A (f)	75,14	56,89	49,03	55,39	
ANOPAKIKH	Ι ΣΚΛΗΡΟΤ	HTA (f)	75,14	53,35	49,03	55,25	
MH ANOPAKI	ΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	OTHTA (f)	0,00	3,54	0,00	0,14	
ΑΛΚΑΛ	IKOTHTA (N	A)	15,41	10,67	10,27	11,05	
ΧΗΜΙΚΕΣ	ПАРАМЕТ	POI					
KATIONTA							
		mg/l	20,9	20,9	21,9	21,7	
Na		meq/l	0,91	0,91	0,95	0,94	
		%meq/l	5,67	7,34	8,76	7,78	
		mg/l	4	3,5	4,2	4	
K		meq/l	0,10	0,09	0,11	0,10	
		%meq/l	0,64	0,73	0,99	0,85	
		mg/l	202	160	138	165	
Са		meq/l	10,1	8	6,9	8,25	
		%meq/l	62,97	64,64	63,50	68,04	
		mg/l	59,14	40,53	34,87	33,94	
Mg		meq/l	4,93	3,38	2,91	2,83	
		%meq/l	30,73	27,29	26,74	23,33	
		meq/l	16,04	12,38	10,87	12,12	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤ	ΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	5,1	7	7,3	5,6	
CI		meq/l	0,14	0,20	0,21	0,16	
		%meq/l	0,90	1,59	1,89	1,30	
		mg/l	940	651	626	674	
HCO3		meq/l	15,41	10,67	10,26	11,05	
		%meq/l	96	86	95	91	
		mg/l	15	28	10	35	
SO4		meq/l	0,31	0,58	0,21	0,73	
		%meq/l	1,95	4,71	1,92	6,02	
		mg/l	11	57,64	11	11,44	
NO3		meq/l	0,18	0,93	0,18	0,18	
		%meq/l	1,11	7,51	1,63	1,52	
		meq/l	16,04	12,38	10,85	12,12	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤ	ΊΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ Σ	ΣΦΑΛΜΑ	%	-0,01	-0,02	0,05	0,02	

Πίνακας Γ.1.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 08/2005

XPONO	Σ ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\ΗΨΙΑΣ		ΣΕΠΤΕΜ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2005		
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟΧΙ	ΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI					
	T AEPA		16,5	20	15	15	
	T NEPOY		23	23,5	18	21,5	
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	HTA (R) (μS/c	m) (εργασ.)	424	419	258	410	
	ρΗ (εργασ.)		6,62	6,57	6,65	6,5	
ΣΔ	ΔA ή TDS (mg	/I)	430,09	616,62	632,71	1064,49	
AVk	<u>ΑΛΙΚΟΤΗΤΑ</u>	(P)	0	0	0	0	
ΟΛΙΚΗ	Ι ΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	22,42	34,30	35,87	62,40	
ANOPAK	ΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	22,42	32,79	35,87	62,40	
ΜΗ ΑΝΘΡΑ	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	0,00	1,52	0,00	0,00	
ΑΛΚ	ΆΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	4,88	6,56	7,49	12,51	
XHMI	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	TPOI					
KATIONTA							
		mg/l	20,9	20,7	21,1	21,0	
Na		meq/l	0,91	0,90	0,92	0,91	
		%meq/l	16,57	11,45	11,22	6,77	
		mg/l	3,5	4	3,4	4	
K		meq/l	0,09	0,10	0,09	0,10	
		%meq/l	1,64	1,30	1,07	0,76	
		mg/l	59	90	80	197	
Са		meq/l	2,95	4,5	4	9,85	
		%meq/l	53,81	57,23	48,91	72,99	
		mg/l	18,41	28,32	38,09	31,55	
Mg		meq/l	1,53	2,36	3,17	2,63	
		%meq/l	27,98	30,02	38,81	19,48	
		meq/l	5,48	7,86	8,18	13,49	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	5,2	5,4	6	5,5	
CI		meq/l	0,15	0,15	0,17	0,15	
		%meq/l	2,67	1,93	2,07	1,15	
		mg/l	298	400	457	763	
HCO3		meq/l	4,89	6,56	7,49	12,51	
		%meq/l	89	83	92	93	
		mg/l	11	11	17	31	
SO4		meq/l	0,23	0,23	0,35	0,65	
		%meq/l	4,18	2,92	4,33	4,79	
		mg/l	14,08	57,20	10,12	11,44	
NO3		meq/l	0,23	0,92	0,16	0,18	
		%meq/l	4,14	11,74	2,00	1,37	
		meq/l	5,49	7,86	8,18	13,49	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	-0,05	0,01	0,00	0,00	

Πίνακας Γ.2.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 09/2005

ΧΡΟΝΟΣ	ΔΕΙΓΜΑ	ΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005			
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑ	ΤΟΛΗΨΙΑΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧΗ	ΙΜΙΚΕΣ Γ	ΙΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				
	T AEPA	Ą	17	17-18	17	17
	T NEPO	Ϋ́	23,5	23,5	19-20	20
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	TA (R) (µ	ιS/cm) (εργασ.)	334	409	368	404
	ρΗ (εργα	σ.)	6,95	6,71	6,61	6,48
ΣΔ	Α ή TDS	(mg/l)	768,55	767,50	706,02	884,45
ΑΛΚ	ΑΛΙΚΟΤΗ	ITA (P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚΗ	ΣΚΛΗΡΟ	OTHTA (f)	43,98	44,42	40,16	51,27
ANOPAKI	κη Σκυι	IPOTHTA (f)	43,98	43,36	40,16	50,49
MH ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚ	∧HPOTHTA (f)	0,00	1,06	0,00	0,78
ΑΛΚΑ	ΑΛΙΚΟΤΗ	ITA (M)	8,95	8,67	8,39	10,10
ХНМІК	ΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI				
KATIONTA						
		mg/l	21,0	21,2	21,4	21,1
Na		meq/l	0,91	0,92	0,93	0,92
		%meq/l	9,33	9,31	10,27	8,14
		mg/l	3,2	3,5	3,7	3,9
К		meq/l	0,08	0,09	0,09	0,10
		%meq/l	0,84	0,91	1,05	0,89
		mg/l	127	116	100	156
Са		meq/l	6,35	5,8	5	7,8
		%meq/l	64,86	58,61	55,20	69,20
		mg/l	29,35	37,02	36,38	29,45
Mg		meq/l	2,45	3,08	3,03	2,45
		%meq/l	24,98	31,17	33,48	21,77
		meq/l	9,79	9,90	9,06	11,27
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤΙΟΝΤΩ	) DN	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	4,6	5,5	6,9	4,6
CI		meq/l	0,13	0,15	0,19	0,13
		%meq/l	1,32	1,56	2,15	1,15
		mg/l	546	529	512	616
HCO3		meq/l	8,95	8,67	8,39	10,10
		%meq/l	91,46	87,58	92,67	89,62
		mg/l	22	39	12	38
SO4		meq/l	0,46	0,81	0,25	0,79
ļ		%meq/l	4,68	8,21	2,76	7,03
		mg/l	15,4	16,28	13,64	15,4
NO3		meq/l	0,25	0,26	0,22	0,25
ļ		%meq/l	2,54	2,65	2,43	2,20
		meq/l	9,79	9,90	9,06	11,27
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤΙΟΝΤΩ	) 2N	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚ ΣΦΑΛΜΑ	κυ 4	%	0,02	-0,03	0,00	0,02

Πίνακας Γ.3.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 10/2005

XPONO	Ε ΔΕΙΓΜΑΤΟ	ΟΛΗΨΙΑΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2005			
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ	ΛΗΨΙΑΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧΗ	ΙΜΙΚΕΣ ΠΑ	PAMETPOI				
	T AEPA		6	8έως9	10	10
	T NEPOY		23	22	17-18	20
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	ITA (R) (μS/	′cm) (εργασ.)	531	408	452	421
	ρΗ (εργασ.)		6,51	6,72	6,68	6,8
ΣΔ	Α ή TDS (m	g/l)	1238,68	1109,35	615,37	836,60
ΑΛΚ	ΆΛΙΚΟΤΗΤ	A (P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚΗ	Ι ΣΚΛΗΡΟΤ	HTA (f)	73,75	65,01	34,46	48,46
ANOPAK	ΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	73,44	64,59	31,89	48,03
MH ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗ	POTHTA (f)	0,31	0,42	2,58	0,43
ΑΛΚ	ΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	А (M)	14,69	12,92	6,37	9,61
ХНМІК	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜ	IETPOI				
KATIONTA						
		mg/l	20,9	22,3	21,1	20,9
Na		meq/l	0,91	0,97	0,92	0,91
		%meq/l	5,77	6,90	11,62	8,51
		mg/l	3,2	3,4	3,2	3,2
K		meq/l	0,08	0,09	0,08	0,08
		%meq/l	0,52	0,62	1,04	0,77
		mg/l	225	210	100	145
Са		meq/l	11,25	10,5	5	7,25
		%meq/l	71,47	74,68	63,36	67,87
		mg/l	42,00	30,03	22,71	29,30
Mg		meq/l	3,50	2,50	1,89	2,44
		%meq/l	22,23	17,80	23,98	22,86
		meq/l	15,74	14,06	7,89	10,68
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	τιοντων	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	5,5	6,1	6,4	5,2
CI		meq/l	0,15	0,17	0,18	0,15
		%meq/l	0,98	1,22	2,28	1,37
		mg/l	896	788	389	586
HCO3		meq/l	14,69	12,92	6,38	9,61
		%meq/l	93,34	91,92	80,69	89,95
		mg/l	32	35	36	36
SO4		meq/l	0,67	0,73	0,75	0,75
		%meq/l	4,24	5,19	9,49	7,02
		mg/l	14,08	14,52	36,96	11
NO3		meq/l	0,23	0,23	0,60	0,18
		%meq/l	1,44	1,67	7,54	1,66
		meq/l	15,74	14,05	7,90	10,68
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	τιοντων	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	0,01	0,02	-0,07	0,01

Πίνακας Γ.4.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 11/2005

XPONC	Σ ΔΕΙΓΜΑΤΟ	λημίας	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2005			
ΣΗΜΕΙ	Ο ΔΕΙΓΜΑΤΟ	ΛΗΨΙΑΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧ	(ΗΜΙΚΕΣ ΠΑΙ	PAMETPOI				
	T AEPA		5	7	11	9έως10
	T NEPOY		22,5-23	22,5	18-19	20
ΑΓΩΓΙΜΟΤ	'HTA (R) (µS/	cm) (εργασ.)	457	486	388	418
	ρΗ (εργασ.)		7,04	6,81	7,07	6,75
Σ	ΔΑ ή TDS (m	g/l)	1009,14	1119,24	566,88	991,83
ΑΛ	ΚΑΛΙΚΟΤΗΤ/	A (P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚ	Η ΣΚΛΗΡΟΤ	HTA (f)	60,34	68,55	32,88	59,78
ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	60,34	68,55	32,88	59,78
MH ANOP	ΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗ	POTHTA (f)	0,00	0,00	0,00	0,00
ΑΛ	ΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	A (M)	12,26	13,93	6,62	11,97
ХНМІ	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜ	ETPOI				
KATIONTA						
		mg/l	21,0	20,9	21,0	21,2
Na		meq/l	0,91	0,91	0,91	0,92
		%meq/l	6,99	6,18	12,06	7,11
		mg/l	3,4	3,2	3,2	3,2
K		meq/l	0,09	0,08	0,08	0,08
		%meq/l	0,67	0,56	1,08	0,63
		mg/l	193	205	90	185
Са		meq/l	9,65	10,25	4,5	9,25
		%meq/l	73,85	69,73	59,44	71,37
		mg/l	29,01	41,51	24,91	32,48
Mg		meq/l	2,42	3,46	2,08	2,71
		%meq/l	18,50	23,53	27,42	20,88
		meq/l	13,07	14,70	7,57	12,96
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	5,4	7,8	6,2	3,4
CI		meq/l	0,15	0,22	0,17	0,10
		%meq/l	1,16	1,49	2,31	0,74
		mg/l	748	850	404	730
HCO3		meq/l	12,26	13,93	6,62	11,97
		%meq/l	93,79	94,79	87,53	92,27
		mg/l	17	17	25	34
SO4		meq/l	0,35	0,35	0,52	0,71
		%meq/l	2,71	2,41	6,88	5,46
		mg/l	18,92	11,88	15,4	12,32
NO3		meq/l	0,31	0,19	0,25	0,20
		%meq/l	2,33	1,30	3,28	1,53
		meq/l	13,07	14,70	7,57	12,97
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	-0,02	0,00	0,03	-0,04

Πίνακας Γ.5.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 12/2005

XPON	ΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\ΗΨΙΑΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2006			
ΣΗΜΕ		.HΨIAΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟ	ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI				
	T AEPA		5	5	11	10
	T NEPOY		22,5	21	18-19	20
ΑΓΩΓΙΜΟ	THTA (R) (µS/c	m) (εργασ.)	457	477	430	395
	ρΗ (εργασ.)		6,67	6,59	6,55	6,62
	ΣΔΑ ή TDS (mg	/I)	1078,13	1049,38	957,40	299,68
A	ΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(P)	0	0	0	0
ΟΛΙ	ΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	69,07	67,36	61,17	20,17
ANOPA	ΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	63,36	59,84	57,38	13,11
MH ANO	ΡΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	5,71	7,52	3,79	7,05
A/	ΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	12,67	11,96	11,47	2,62
XHN	ΙΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	ΤΡΟΙ				
KATIONTA						
		mg/l				
Na		meq/l				
		%meq/l				
		mg/l				
К		meq/l				
		%meq/l				
		mg/l	208	211	178	56
Са		Meq/I	10,4	10,55	8,9	2,8
		%meq/l	75,28	78,31	72,75	69,43
		mg/l	40,97	35,06	40,00	14,80
Mg		Meq/I	3,41	2,92	3,33	1,23
		%meq/l	24,72	21,69	27,25	30,57
		Meq/I	13,81	13,47	12,23	4,03
ΣΥΝΟΛΟ	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	4,4	6	6,2	5
CI		Meq/I	0,12	0,17	0,17	0,14
		%meq/l	0,90	1,25	1,42	3,49
		mg/l	773	730	700	160
HCO3		Meq/I	12,67	11,97	11,48	2,62
		%meq/l	91,73	88,77	93,52	64,94
		mg/l	39	55	18	52
SO4		Meq/I	0,81	1,15	0,38	1,08
		%meq/l	5,88	8,50	3,06	26,82
		mg/l	12,76	12,32	15,2	11,88
NO3		Meq/I	0,21	0,20	0,25	0,19
		%meq/l	1,49	1,47	2,00	4,74
		Meq/I	13,81	13,48	12,27	4,04
ΣΥΝΟΛΟ	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙ	κο ΣφαλΜα	%	0,00	-0,03	-0,15	-0,07

Πίνακας Γ.6.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 01/2006

ΧΡΟΝΟΣ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\HΨIAΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2006			
ΣΗΜΕΙΟ Δ	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛ	ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧΗΙ	ΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI				
	T AEPA		9	10	10,5	10
	T NEPOY		23	21,5	10,5	10
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (R) (μS/cm) (εργασ.)			466	509	418
p	Η (εργασ.)		7,02	6,85	7,7	6,8
ΣΔΑ	、ή TDS (mg/	(1)	408,12	799,09	1552,12	709,81
ΑΛΚΑ	<b>NIKOTHTA</b>	(P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚΗ	ΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	26,62	51,44	98,54	46,19
ANOPAKIK	(Η ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	21,07	46,31	94,75	39,84
MH ANOPAK	(ΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	5,56	5,13	3,79	6,36
ΑΛΚΑ	ΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	4,21	9,27	18,95	7,97
ХНМІКЕ	ΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	TPOI				
KATIONTA						
		mg/l	_		_	_
Na		meq/l				
		%meq/l				_
		mg/l				
K		meq/l			_	
		%meq/l				
		mg/l	82	151	307	123
Са		meq/l	4,1	7,55	15,35	6,15
		%meq/l	77,00	73,38	77,88	66,57
		mg/l	14,70	32,87	52,30	37,07
Mg		meq/l	1,22	2,74	4,36	3,09
		%meq/l	23,00	26,62	22,12	33,43
		meq/l	5,32	10,29	19,71	9,24
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤ	ΓΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	5,1	7,5	6,5	5,5
CI		meq/l	0,14	0,21	0,18	0,15
		%meq/l	2,70	2,05	0,93	1,68
		mg/l	257	565	1156	486
HCO3		meq/l	4,21	9,26	18,95	7,97
		%meq/l	79,10	90,06	96,16	86,22
		mg/l	37	26	18	38
SO4		meq/l	0,77	0,54	0,38	0,79
		%meq/l	14,47	5,27	1,90	8,57
		mg/l	12,32	16,72	12,32	20,24
NO3		meq/l	0,20	0,27	0,20	0,33
		%meq/l	3,73	2,62	1,01	3,53
		meq/l	5,33	10,28	19,71	9,24
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΤ	ΓΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	-0,01	0,02	0,00	-0,01

Πίνακας Γ.7.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 02/2006

XPONO	Σ ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\ΗΨΙΑΣ		MAPTIO	Σ 2006	
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\HΨIAΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧΙ	ΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI				
	T AEPA		18	18	15	15
	T NEPOY		23,5	22,5	19	21
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	HTA (R) (µS/c	m) (εργασ.)	522	465	503	427
	ρΗ (εργασ.)		7,03	6,75	6,9	6,99
ΣΔ	ΔA ή TDS (mg	/I)	1208,47	930,18	829,96	869,32
ΑΛκ	<u>ΑΛΙΚΟΤΗΤΑ</u>	(P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚΗ	ΙΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	77,80	59,48	53,35	55,35
ANOPAK	ΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	71,72	54,18	47,54	51,97
MH ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΓ	POTHTA (f)	6,07	5,30	5,81	3,38
ΑΛΚ	ΆΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	14,34	10,84	9,51	10,39
ХНМІР	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	ΤΡΟΙ				
KATIONTA						
		mg/l		_		
Na		meq/l		_	_	_
		%meq/l	_	_	_	
		mg/l		_	_	_
K		meq/l	_	_	_	
		%meq/l		_		
		mg/l	221	185	164	175
Са		meq/l	11,05	9,25	8,20	8,75
		%meq/l	71,02	77,76	76,85	79,04
		mg/l	54,11	31,74	29,64	27,84
Mg		meq/l	4,51	2,65	2,47	2,32
		%meq/l	28,98	22,24	23,15	20,96
		meq/l	15,56	11,90	10,67	11,07
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	7,6	4	6	4,8
CI		meq/l	0,21	0,11	0,17	0,14
		%meq/l	1,38	0,95	1,58	1,22
		mg/l	875	661	580	634
HCO3		meq/l	14,34	10,84	9,51	10,39
		%meq/l	92,21	91,03	89,13	93,98
		mg/l	38	37	38	18
SO4		meq/l	0,79	0,77	0,79	0,38
		%meq/l	5,09	6,48	7,42	3,39
		mg/l	12,76	11,44	12,32	9,68
NO3		meq/l	0,21	0,18	0,20	0,16
		%meq/l	1,32	1,55	1,86	1,41
		meq/l	15,56	11,90	10,67	11,06
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	) ΣΦΑΛΜΑ	%	0,01	-0,04	0,01	0,04

Πίνακας Γ.8.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 03/2006

ΧΡΟΝΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ		ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2006				
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟΧΗ	ΙΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI					
	T AEPA		20,5	20	20	17,5	
	T NEPOY		24	24	18-19	21	
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	ITA (R) (µS/c	m) (εργασ.)	521	325	460	420	
	ρΗ (εργασ.)		6,7	6,85	6,78	6,81	
ΣΔ	Α ή TDS (mg	/l)	1271,71	582,85	988,21	872,18	
ΑΛΚ	ΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(P)	0	0	0	0	
ΟΛΙΚΗ	ΣΚΛΗΡΟΤΗ	ITA (f)	81,01	37,77	63,20	55,43	
ANOPAKI	ΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	76,56	31,97	57,38	52,87	
MH ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	POTHTA (f)	4,45	5,80	5,83	2,56	
ΑΛΚ	ΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	15,31	6,39	11,48	10,57	
ХНМІК	ΈΣ ΠΑΡΑΜΕ	TPOI					
KATIONTA							
		mg/l					
Na		meq/l	_	_	_	_	
		%meq/l	_	_			
		mg/l	_	_	_	_	
К		meq/l	_	_	_	_	
		%meq/l	_	_	_	_	
		mg/l	249	109	196	172	
Са		meq/l	12,45	5,45	9,8	8,6	
		%meq/l	76,84	72,15	77,53	77,57	
		mg/l	45,03	25,25	34,09	29,84	
Mg		meq/l	3,75	2,10	2,84	2,49	
		%meq/l	23,16	27,85	22,47	22,43	
		meq/l	16,20	7,55	12,64	11,09	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	τιοντων	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	4,8	5,4	6,2	4,9	
CI		meq/l	0,14	0,15	0,17	0,14	
		%meq/l	0,83	2,01	1,38	1,25	
		mg/l	934	390	700	645	
HCO3		meq/l	15,31	6,39	11,48	10,57	
		%meq/l	94,51	84,32	90,77	95,40	
		mg/l	27	38	33	9	
SO4		meq/l	0,56	0,79	0,69	0,19	
		%meq/l	3,47	10,44	5,44	1,69	
		mg/l	11,88	15,2	18,92	11,44	
NO3		meq/l	0,19	0,25	0,31	0,18	
		%meq/l	1,18	3,23	2,41	1,66	
		meq/l	16,20	7,58	12,64	11,08	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	τιοντων	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	0,00	-0,19	-0,01	0,01	

Πίνακας Γ.9.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 04/2006

XPON	ΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	\HΨIAΣ	ΜΑΙΟΣ 2006				
ΣΗΜΕ	ΙΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛ	ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟ	ΚΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI					
	T AEPA		21,5	21	17,5	17	
	T NEPOY		23	23	20	21	
ΑΓΩΓΙΜΟ	ΓΗΤΑ (R) (μS/ci	m) (εργασ.)	516	485	447	426	
	ρΗ (εργασ.)		6,89	6,8	6,9	6,7	
Σ	ΔΑ ή TDS (mg/	1)	948,94	1115,25	875,09	816,19	
A/	KANIKOTHTA	(P)	0	0	0	0	
OVIN	ΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	60,71	71,45	55,63	52,08	
ANOPA	<u>ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ</u>	THTA (f)	54,92	65,57	52,79	48,28	
MH ANØF	ΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	5,80	5,88	2,84	3,80	
A۸	ΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	10,98	13,11	10,56	9,66	
XHM	ΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	TPOI					
KATIONTA							
		mg/l	_				
Na		meq/l	_		_		
		%meq/l	_		_		
		mg/l	_		_		
К		meq/l	_		_	_	
		%meq/l	_		_	_	
		mg/l	188	215	171	155	
Са		meq/l	9,4	10,75	8,55	7,75	
		%meq/l	77,41	75,22	76,85	74,41	
		mg/l	32,92	42,49	30,91	31,99	
Mg		meq/l	2,74	3,54	2,58	2,67	
		%meq/l	22,59	24,78	23,15	25,59	
		meq/l	12,14	14,29	11,13	10,42	
ΣΥΝΟΛΟ Η	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	4,1	6,8	4,1	3	
CI		meq/l	0,12	0,19	0,12	0,08	
		%meq/l	0,95	1,34	1,04	0,81	
		mg/l	670	800	644	589	
HCO3		meq/l	10,98	13,11	10,56	9,66	
		%meq/l	90,52	91,73	94,86	92,45	
		mg/l	35	36	11	22	
SO4		meq/l	0,73	0,75	0,23	0,46	
		%meq/l	6,01	5,25	2,06	4,39	
		mg/l	18,92	14,96	14,08	15,2	
NO3		meq/l	0,31	0,24	0,23	0,25	
		%meq/l	2,52	1,69	2,04	2,35	
		meq/l	12,13	14,30	11,13	10,44	
ΣΥΝΟΛΟ Η	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚ	Ο ΣΦΑΛΜΑ	%	0,04	-0,02	-0,01	-0,13	

Πίνακας Γ.10.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 05/2006

XPON	ΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	ΗΨΙΑΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ 2006				
ΣΗΜΕ	ΙΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛ	ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟ	ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI					
	T AEPA		31	32,5	24	24	
	T NEPOY		25	24	18-18,5	23	
ΑΓΩΓΙΜΟ	THTA (R) (µS/cı	m) (εργασ.)	524	452	453	418	
	ρΗ (εργασ.)		7,05	6,95	6,9	6,85	
	ΣΔΑ ή TDS (mg/	1)	1156,47	572,69	980,84	848,91	
A/	\KA/IKOTHTA	(P)	0	0	0	0	
ΟΛΙΙ	<u>ΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗ</u>	TA (f)	74,32	37,20	62,49	54,58	
ANOPA	ΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	70,57	32,70	58,28	48,77	
MH ANOF	ΡΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	3,75	4,50	4,21	5,81	
A/	\KAΛΙΚΟΤΗΤΑ	(M)	14,11	6,54	11,66	9,75	
XHN	ΙΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	TPOI					
KATIONTA							
		mg/l				_	
Na		meq/l				_	
		%meq/l				_	
		mg/l				_	
K		meq/l					
		%meq/l					
		mg/l	201	99	195	165	
Са		meq/l	10,05	4,95	9,75	8,25	
		%meq/l	67,61	66,53	78,02	75,58	
		mg/l	57,77	29,89	32,96	31,99	
Mg		meq/l	4,81	2,49	2,75	2,67	
		%meq/l	32,39	33,47	21,98	24,42	
		meq/l	14,86	7,44	12,50	10,92	
ΣΥΝΟΛΟ κ	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	5,7	2,8	3,8	5,6	
CI		meq/l	0,16	0,08	0,11	0,16	
		%meq/l	1,08	1,06	0,86	1,44	
		mg/l	861	399	711	595	
HCO3		meq/l	14,11	6,54	11,66	9,75	
		%meq/l	94,92	87,88	93,32	89,30	
		mg/l	20	31	24	39	
SO4		meq/l	0,42	0,65	0,50	0,81	
		%meq/l	2,80	8,68	4,00	7,44	
		mg/l	11	11	14,08	12,32	
NO3		meq/l	0,18	0,18	0,23	0,20	
		%meq/l	1,19	2,38	1,82	1,82	
		meq/l	14,87	7,44	12,49	10,92	
ΣΥΝΟΛΟ Μ	ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚ	Ο ΣΦΑΛΜΑ	%	-0,02	-0,02	0,03	-0,03	

Πίνακας Γ.11.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 06/2006

XPONO	Σ ΔΕΙΓΜΑΤΟ	ΛΗΨΙΑΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006				
ΣΗΜΕΙΟ	Ο ΔΕΙΓΜΑΤΟ	\HΨIAΣ	1	2	3	4	
ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙ	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜ	ETPOI					
	T AEPA		7	8	7 έως 8	7 έως 8	
	T NEPOY		23-24	22	17-18	20	
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗ	-TA (R) (μS/α	cm) (εργασ.)	504	500	496	483	
	ρΗ (εργας.)		6,61	6,73	7,62	7,36	
ΣΔ	ΔA ή TDS (mg	µ/I)	1324,38	1236,01	1049,93	800,36	
AVk	ΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	. (P)	0	0	0	0	
ΟΛΙΚΗ	Ι ΣΚΛΗΡΟΤΗ	ITA (f)	85,03	78,55	67,00	51,42	
ANOPAK	ΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	OTHTA (f)	79,59	74,59	63,28	47,79	
ΜΗ ΑΝΘΡΑ	ΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΙ	POTHTA (f)	5,44	3,96	3,72	3,63	
ΑΛΚ	αλικοτητα	(M)	15,92	14,92	12,66	9,56	
ХНМІ	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜΙ	ΕΤΡΟΙ					
KATIONTA							
		mg/l	_				
Na		meq/l					
		%meq/l	_				
		mg/l	_				
K		meq/l	_				
		%meq/l	_				
		mg/l	241	245	201	146	
Са		meq/l	12,05	12,25	10,05	7,3	
		%meq/l	70,85	77,98	75,00	70,99	
		mg/l	59,48	41,51	40,19	35,80	
Mg		meq/l	4,96	3,46	3,35	2,98	
		%meq/l	29,15	22,02	25,00	29,01	
		meq/l	17,01	15,71	13,40	10,28	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ANIONTA							
		mg/l	7,5	4,5	4,3	5,8	
CI		meq/l	0,21	0,13	0,12	0,16	
		%meq/l	1,24	0,81	0,90	1,59	
		mg/l	971	910	772	583	
HCO3		meq/l	15,92	14,92	12,66	9,56	
		%meq/l	93,62	94,89	94,45	92,96	
-		mg/l	30	24	21	17	
SO4		meq/l	0,63	0,50	0,44	0,35	
		%meq/l	3,68	3,18	3,27	3,44	
		mg/l	15,4	11	11,44	12,76	
NO3		meq/l	0,25	0,18	0,18	0,21	
		%meq/l	1,46	1,13	1,38	2,00	
		meq/l	17,00	15,72	13,40	10,28	
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100	
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	0,01	-0,04	0,00	0,01	

Πίνακας Γ.12.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 11/2006

ΧΡΟΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ		ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007				
ΣΗΜΕΙΟ	ΔΕΙΓΜΑΤΟ/	ΗΨΙΑΣ	1	2	3	4
ΦΥΣΙΚΟΧΙ	ΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡ	AMETPOI				
	T AEPA		10	13	13,5	11,5
	T NEPOY		23,5	22,5	19	20,5
ΑΓΩΓΙΜΟΤΙ	HTA (R) (μS/c	m) (εργασ.)	_	_	_	_
	ρΗ (εργασ.)		7,23	7,45	7,59	7,55
ΣΔ	ΔA ή TDS (mg	/I)	1291,26	1473,78	1077,79	975,05
AVR	ΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑ	(P)	0	0	0	0
ΟΛΙΚΗ	Ι ΣΚΛΗΡΟΤΗ	TA (f)	82,53	93,71	68,71	62,35
ANOPAK	ΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟ	THTA (f)	76,97	87,54	63,28	57,13
ΜΗ ΑΝΘΡΑ	ΑΚΙΚΗ ΣΚΛΗΡ	OTHTA (f)	5,56	6,17	5,43	5,22
ΑΛκ	αλικοτητα	(M)	15,39	17,51	12,66	11,43
ХНМІ	ΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕ	ΤΡΟΙ				
KATIONTA						
		mg/l	_			_
Na		meq/l	_			_
		%meq/l	_			_
		mg/l	_			_
K		meq/l	_	_		_
		%meq/l	_			_
		mg/l	247	298	216	190
Са		meq/l	12,35	14,9	10,8	9,5
		%meq/l	74,83	79,50	78,59	76,18
		mg/l	49,86	46,10	35,31	35,65
Mg		meq/l	4,16	3,84	2,94	2,97
		%meq/l	25,17	20,50	21,41	23,82
		meq/l	16,51	18,74	13,74	12,47
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ		%meq/l	100	100	100	100
ANIONTA						
		mg/l	4	7	5	4
CI		meq/l	0,11	0,20	0,14	0,11
		%meq/l	0,68	1,05	1,03	0,90
		mg/l	939	1068	772	697
HCO3		meq/l	15,39	17,51	12,66	11,43
		%meq/l	93,27	93,39	92,11	91,59
		mg/l	36	34	31	33
SO4		meq/l	0,75	0,71	0,65	0,69
		%meq/l	4,54	3,78	4,70	5,51
		mg/l	15,4	20,68	18,48	15,4
NO3		meq/l	0,25	0,33	0,30	0,25
		%meq/l	1,50	1,78	2,17	1,99
		meq/l	16,50	18,75	13,74	12,47
ΣΥΝΟΛΟ ΚΑ	ΑΤΙΟΝΤΩΝ	%meq/l	100	100	100	100
ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ	ΣΦΑΛΜΑ	%	0,00	-0,01	0,01	-0,02

Πίνακας Γ.13.: Αναλυτικά αποτελέσματα χημικής ανάλυσης από την δειγματοληψία 02/2007

9.3.2. Αναλυτικοί πίνακες φυσικοχημικών χαρακτηριστικών ψυχρών – υπόθερμων νερών περιοχής μελέτης

	1	2	3	4
TH (σε mg/l)	187,92	176,46	164,31	156,15
fH	46,98	44,12	41,08	39,04

**Πίνακας Γ.14.:** Πίνακας τιμών της σκληρότητας κατά μ.ο. ανά θέση δειγματοληψίας, εκφρασμένη σε γαλλικούς βαθμούς

	1	2	3	4
Cl mg/l	5,46	5,52	5,35	4,84

Πίνακας Γ.15.: Πίνακας τιμών της συγκέντρωσης των ιόντων Cl κατά μ.ο. ανά θέση δειγματοληψίας, από την περιοχή μελέτης

ΣΔA (mg/l)				
ΜΗΝΕΣ	1	2	3	4
А	884,45	767,5	706,02	768,55
Σ	1064,49	632,71	430,09	616,62
0	1257,14	968,57	853,27	950,68
N	1238,68	1109,35	615,37	836,6
Δ	1119,24	1009,14	566,88	991,83
I	1078,13	1049,38	299,68	957,4
Φ	1552,12	799,09	408,12	709,81
М	1208,47	930,18	829,96	869,32
А	1271,71	988,21	582,85	872,18
М	1115,25	948,94	816,19	875,09
I	1156,47	980,84	572,69	848,91
N-06	1324,38	1236,01	800,36	1049,93
Φ-07	1473,78	1291,26	975,05	1077,79
SUM	15744	12711	8457	11425
AVERAGE	1189	952	623	862
MAX	1552	1291	975	1078
MIN	884	633	300	617

**Πίνακας Γ.16.:** Πίνακας μηνιαίων τιμών ΣΔΑ, ανά θέση δειγματοληψίας, όπου διαπιστώνεται ότι η τιμή του μέσου όρου του ΣΔΑ των υπό μελέτη υδάτων, είναι περίπου 1g/l

Ph				
ΜΗΝΕΣ	1	2	3	4
Α	6,65	6,5	6,79	6,69
Σ	6,62	6,57	6,65	6,5
0	6,95	6,71	6,61	6,48
N	6,51	6,72	6,68	6,8
Δ	7,04	6,81	7,07	6,75
I	6,67	6,59	6,55	6,62
Φ	7,02	6,85	7,7	6,8
М	7,03	6,75	6,9	6,99
A	6,7	6,85	6,78	6,81
М	6,89	6,8	6,9	6,7
I	7,05	6,95	6,9	6,85
N-06	6,61	6,73	7,62	7,36
Φ-07	7,23	7,45	7,59	7,55
SUM	88,97	88,28	90,74	88,90
AVERAGE	6,84	6,79	6,98	6,84
MAX	7,23	7,45	7,70	7,55
MIN	6,51	6,5	6,55	6,48

**Πίνακας Γ.17.:** Πίνακας μηνιαίων τιμών του pH, ανά θέση δειγματοληψίας, από την περιοχή μελέτης

HCO3				
(IIIg/I)	4	2	2	4
WIFINES	1	2	3	4
A	940	651	627	674
Σ	298	400	457	763
0	546	529	512	616
N	896	788	388	586
Δ	748	850	404	729
I	773	730	700	160
Φ	257	565	1156	486
М	875	661	580	634
А	934	390	700	645
М	670	800	644	589
I	861	399	711	595
N-06	971	910	772	583
Φ-07	939	1068	772	697
SUM	9708	8739	8423	7759
AVERAGE	747	672	648	597
MAX	971	1068	1156	763
MIN	257	390	388	160

**Πίνακας Γ.18.:** Πίνακας μηνιαίων τιμών της συγκέντρωσης ιόντων HCO3, ανά θέση δειγματοληψίας, από την περιοχή μελέτης

	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ ΣΕ meq/l				ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΝΙΟΝΤΩΝ ΣΕ meq/l			<u>E</u> q/l
ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	Ca+2	Mg+2	Na+1	K+1	CI	HCO3	SO4	NO3
1	9,4	3,42	0,91	0,09	0,15	12,24	0,58	0,23
2	8,82	2,96	0,92	0,09	0,16	11,02	0,66	0,33
3	8,94	2,9	0,93	0,09	0,16	10,62	0,47	0,25
4	7,81	2,57	0,92	0,09	0,14	9,78	0,64	0,21

Πίνακας Γ.19.: Πίνακας τιμών συγκεντρώσεων ιόντων κατά μ.ο., ανά θέση δειγματοληψίας, όπου διαπιστώνεται η υπεροχή του ασβεστιτικού ιόντος έναντι των υπολοίπων κατιόντων, καθώς και του όξινου ανθρακικού ιόντος έναντι των υπολοίπων ανιόντων, όσον αφορά το τύπο των υπό μελέτη υδάτων

	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΤΙΟΝΤΩΝ ΣΕ meg/l %				ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ	
ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	Ca Mg Na K				Ca + Mg (A)	Na + K (B)
1	68,02	24,75	6,58	0,65	92,76	7,24
2	68,96	23,14	7,19	0,70	92,10	7,90
3	69,52	22,55	7,23	0,70	92,07	7,93
4	68,56	22,57	8,08	0,79	91,13	8,87
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ					92,02	7,98

Πίνακας Γ.20.: Πίνακας τιμών συγκεντρώσεων ιόντων σε meq/l % κατά μ.ο., ανά θέση δειγματοληψίας, όπου διαπιστώνεται η ποσοτική υπεροχή του αθροίσματος Α έναντι του αθροίσματος Β, όσον αφορά το τύπο των υπό μελέτη υδάτων

	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΝΙΟΝΤΩΝ ΣΕ meq/l %			۱%	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΘΡΟΙΣΜΑΤΩΝ		
ΘΕΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	HCO3	СІ	SO4-2	NO3-1	НСО3 + СО3 (Г)	CI + SO4-2 + NO3-1 (Δ)	
1	92,73	1,14	4,39	1,74	92,73	7,28	
2	90,55	1,31	5,42	2,71	90,55	9,44	
3	92,35	1,39	4,09	2,17	92,35	7,65	
4	90,81	1,30	5,94	1,95	90,81	9,19	
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ					91,61	8,39	

Πίνακας Γ.21.: Πίνακας τιμών συγκεντρώσεων ιόντων κατά μ.ο., ανά θέση δειγματοληψίας, όπου διαπιστώνεται η ποσοτική υπεροχή του αθροίσματος Γ έναντι του αθροίσματος Δ, όσον αφορά το τύπο των υπό μελέτη υδάτων.

Ca (mg/l)				
ΜΗΝΕΣ	1	2	3	4
А	202	160	138	165
Σ	59	90	80	197
0	127	116	100	156
N	225	210	100	145
Δ	193	205	90	185
I	208	211	178	56
Φ	82	151	307	123
М	221	185	164	175
А	249	109	196	172
М	188	215	171	155
I	201	99	195	165
N-06	241	245	201	146
Φ-07	247	298	216	190
AVERAGE	188	176	164	156
MAX	249	298	307	197
MIN	59	90	80	56

**Πίνακας Γ.22.:** Πίνακας μηνιαίων τιμών της συγκέντρωσης ιόντων Ca<sup>+2</sup> ανά θέση δειγματοληψίας, από την περιοχή μελέτης

Mg (mg/l)				
ΜΗΝΕΣ	1	2	3	4
А	59,14	40,53	34,87	33,94
Σ	18,41	28,32	38,09	31,55
0	29,35	37,02	36,38	29,45
Ν	42,00	30,03	22,71	29,30
Δ	29,01	41,51	24,91	32,48
Ι	40,97	35,06	40,00	14,80
Φ	14,70	32,87	52,30	37,07
М	54,11	31,74	29,64	27,84
А	45,03	25,25	34,09	29,84
М	32,92	42,49	30,91	31,99
Ι	57,77	29,89	32,96	31,99
N-06	59,48	41,51	40,19	35,80
Φ-07	49,86	46,10	35,31	35,65
AVERAGE	41	36	35	31
MAX	59	46	52	37
MIN	15	25	23	15

**Πίνακας Γ.23.:** Πίνακας μηνιαίων τιμών της συγκέντρωσης ιόντων Mg<sup>+2</sup> ανά θέση δειγματοληψίας, από την περιοχή μελέτης 9.3.3.: Αναλυτικοί πίνακες αποτελεσμάτων εφαρμογής του μοντέλου EQL/EVP για τα ψυχρά-υπόθερμα νερά της υπό μελέτη περιοχής

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ- 1			
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY
Na	9,00E-05	0,839742	7,56E-05
K	8,20E-05	0,837111	6,86E-05
Са	5,98E-03	0,556804	3,33E-03
Mg	2,48E-03	0,524377	1,30E-03
CI	2,20E-04	0,869937	1,91E-04
SO4	3,20E-04	0,407571	1,30E-04
NO3	2,40E-04	0,865959	2,08E-04
Н	2,93E-07	0,836913	2,45E-07
HCO3	1,60E-02	0,877726	1,40E-02
OH	4,41E-08	0,824134	3,63E-08
CO3	5,06E-06	0,498865	2,53E-06
CO2	7,64E-03	1,00319	7,67E-03
CaCO3	1,15E-05	1	1,15E-05
MgCO3	2,79E-06	1	2,79E-06
Mg(OH)2	8,70E-09	0,835712	7,27E-09
H2SO4	3,33E-09	0,876596	2,92E-09
ELECTRICAL	BALANCE	=	1,01%
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	1,67058 g/kg(H2O)
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9983941
DENSITY		=	1,000062
IONIC	STRENGTH	=	2,59E-02
WATER	ACTIVITY	=	0,9995819
рН		=	6,61
LOG	PCO2	=	-0,6529162
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,60E-02
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
OH	ALKALINITY	=	5,28E-08
Н	ALKALINITY	=	-2,97E-07
TOTAL	ALKALINITY	=	1,60E-02
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX
ARAGONITE	6,17E-09	8,40E-09	1,36135
CALCITE	3,98E-09	8,40E-09	2,10938
DOLOMITE	8,49E-18	2,76E-17	3,24452
MAGNESITE	1,58E-08	3,28E-09	0,207671
VATERITE	1,27E-08	8,40E-09	0,662987

Πίνακας Γ.24.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 11/2006-1

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ- 2				
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY	
Na	9,70E-04	0,844594	8,19E-04	
K	8,70E-05	0,842295	7,33E-05	
Са	5,86E-03 0,567312 3,		3,32E-03	
Mg	1,73E-03 0,534891		9,24E-04	
CI	1,30E-04	0,87278	1,13E-04	
SO4	2,60E-04	0,421481	1,10E-04	
NO3	1,80E-04	0,868659	1,56E-04	
Н	2,21E-07	0,842259	1,86E-07	
HCO3	1,54E-02	0,881328	1,36E-02	
ОН	5,15E-08	0,829024	4,27E-08	
CO3	6,09E-06	0,511504	3,11E-06	
CO2	5,72E-03	1,00303	5,74E-03	
CaCO3	1,38E-05	1	1,38E-05	
MgCO3	2,45E-06	1	2,45E-06	
Mg(OH)2	7,18E-09	0,841058	6,04E-09	
H2SO4	2,02E-09	0,879411	1,78E-09	
ELECTRICAL	BALANCE	=	6,26%	
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	1,535406 g/kg(H2O)	
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9985613	
DENSITY		=		
IONIC	STRENGTH	=	2,41E-02	
WATER	ACTIVITY	=	0,999592	
рН		=	6,73	
LOG	PCO2	=	-0,7970567	
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,54E-02	
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
OH	ALKALINITY	=	5,87E-08	
Н	ALKALINITY	=	-2,23E-07	
TOTAL	ALKALINITY	=	1,54E-02	
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX	
ARAGONITE	6,31E-09	1,03E-08	1,63909	
CALCITE	4,07E-09	1,03E-08	2,54066	
DOLOMITE	9,07E-18	2,98E-17	3,28452	
MAGNESITE	1,69E-08	2,88E-09	0,170728	
VATERITE	1,30E-08	1,03E-08	0,79332	

Πίνακας Γ.24.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 11/2006-2

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ- 3			
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY
Na	9,20E-04	0,855214	7,87E-04
К	8,20E-05	0,853622 7,00E-05	
Са	4,72E-03	4,72E-03 0,589062 2	
Mg	1,66E-03	0,560066	9,27E-04
CI	1,20E-04	0,880446	1,06E-04
SO4	2,20E-04	0,454571	1,00E-04
NO3	1,80E-04	0,876881	1,58E-04
Н	2,81E-08	0,854091	2,40E-08
HCO3	1,29E-02	0,887266	1,15E-02
OH	2,75E-07	0,842706	2,32E-07
CO3	3,40E-05	0,540033	1,84E-05
CO2	6,68E-04	1,00257	6,70E-04
CaCO3	6,35E-05	1	6,35E-05
MgCO3	1,45E-05	1	1,45E-05
Mg(OH)2	3,81E-08	0,853057	3,25E-08
H2SO4	2,06E-10	0,886317	1,83E-10
ELECTRICAL	BALANCE	=	7,21%
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	1,118402 g/kg(H2O)
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9989694
DENSITY		=	1,000087
IONIC	STRENGTH	= 2,04E-02	
WATER	ACTIVITY	=	0,9996527
pН		=	7,62
LOG	PCO2	=	-1,787246
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,32E-02
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
OH	ALKALINITY	=	3,13E-07
Н	ALKALINITY	=	-2,83E-08
TOTAL	ALKALINITY	=	1,32E-02
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX
ARAGONITE	6,71E-09	5,10E-08	7,60656
CALCITE	4,32E-09	5,10E-08	11,8033
DOLOMITE	1,09E-17	8,70E-16	79,6121
MAGNESITE	2,04E-08	1,70E-08	0,834431
VATERITE	1,42E-08	5,10E-08	3,60253

Πίνακας Γ.25.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 11/2006-3

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ- 4				
	MOLALITY ACT. COEFF.		ACTIVITY	
Na	9,10E-04	0,870005	7,92E-04	
К	8,20E-05	0,868624	7,12E-05	
Са	3,38E-03	0,618284	0,618284 2,09E-03	
Mg	1,48E-03	0,594553 8.82E-04		
CI	1,60E-04	0,890525	1,42E-04	
SO4	1,80E-04	0,496563	8,94E-05	
NO3	2,10E-04	0,887813	1,86E-04	
Н	5,02E-08	0,869015	4,37E-08	
HCO3	9,95E-03	0,894837	8,91E-03	
OH	1,81E-07	0,860284	1,56E-07	
CO3	1,44E-05	0,577481	8,33E-06	
CO2	9,07E-04	1,002	9,10E-04	
CaCO3	2,25E-05	1	2,25E-05	
MgCO3	6,25E-06	1	6,25E-06	
Mg(OH)2	2,41E-08	0,868254	2,09E-08	
H2SO4	3,58E-10	0,89488	3,20E-10	
ELECTRICAL	BALANCE	=	8,93%	
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	0,88239 g/kg(H2O)	
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9992017	
DENSITY	=		1,000083	
IONIC	STRENGTH	=	1,58E-02	
WATER	ACTIVITY	=	0,9997257	
рН		=	7,36	
LOG	PCO2	=	-1,622119	
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,00E-02	
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
OH	ALKALINITY	=	2,05E-07	
Н	ALKALINITY	=	-5,06E-08	
TOTAL	ALKALINITY	=	1,00E-02	
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX	
ARAGONITE	6,50E-09	1,74E-08	2,67746	
CALCITE	4,19E-09	1,74E-08	4,15224	
DOLOMITE	9,87E-18	1,28E-16	12,9522	
MAGNESITE	1,84E-08	7,35E-09	0,400068	
VATERITE	1,35E-08	1,74E-08	1,28419	

Πίνακας Γ.26.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 11/2006-4

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ-1				
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY	
Na	9,10E-04	0,840994	7,65E-04	
K	8,00E-05	0,83888	6,71E-05	
Са	5,88E-03	0,557724	3,28E-03	
Mg	2,07E-03	0,526013	1,09E-03	
CI	1,10E-04	0,870611	9,58E-05	
SO4	3,80E-04	0,414041	1,57E-04	
NO3	2,50E-04	0,866488	2,17E-04	
Н	7,02E-08	0,839046	5,89E-08	
HCO3	1,57E-02	0,878509	1,38E-02	
ОН	1,83E-07	0,82623	1,51E-07	
CO3	2,06E-05	0,504058	1,04E-05	
CO2	1,81E-03	1,00318	1,81E-03	
CaCO3	4,67E-05	1	4,67E-05	
MgCO3	9,61E-06	1	9,61E-06	
Mg(OH)2	3,03E-08	0,837714	2,54E-08	
H2SO4	9,64E-10	0,877177	8,46E-10	
ELECTRICAL	BALANCE	=	5,79%	
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	1,411785 g/kg(H2O)	
MOLAL/MOLAR	FACTOR	Η	0,9986955	
DENSITY		= 1.0		
IONIC	STRENGTH	H	2,52E-02	
WATER	ACTIVITY	Η	0,9995803	
pН		=	7,23	
LOG	PCO2	H	-1,27908	
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,59E-02	
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
OH	ALKALINITY	=	2,14E-07	
Н	ALKALINITY	=	-7,11E-08	
TOTAL	ALKALINITY	Η	1,59E-02	
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX	
ARAGONITE	6,17E-09	3,40E-08	5,51686	
CALCITE	3,98E-09	3,40E-08	8,54822	
DOLOMITE	8,49E-18	3,84E-16	45,2533	
MAGNESITE	1,58E-08	1,13E-08	0,714752	
VATERITE	1,27E-08	3,40E-08	2,68674	

Πίνακας Γ.27.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 02/2007-1

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ-2			
	MOLALITY ACT. COE		ACTIVITY
Na	9,20E-04	0,832854	7,66E-04
К	9,00E-05	-05 0,830628 7,48E	
Са	7,10E-03 0,544234		3,87E-03
Mg	1,91E-03	0,50945	9,71E-04
CI	2,00E-04	0,865519	1,73E-04
SO4	3,60E-04	0,393634	1,42E-04
NO3	3,30E-04	0,860733	2,84E-04
Н	4,27E-08	0,830991	3,55E-08
HCO3	1,77E-02	0,876006	1,55E-02
OH	2,85E-07	0,815842	2,33E-07
CO3	3,90E-05	0,485171	1,89E-05
CO2	1,24E-03	1,00356	1,24E-03
CaCO3	9,85E-05	1	9,85E-05
MgCO3	1,56E-05	1	1,56E-05
Mg(OH)2	4,18E-08	0,829585	3,47E-08
H2SO4	5,10E-10	0,873228	4,45E-10
ELECTRICAL	BALANCE	=	5,15%
TOTAL	DISSOLVED SOLIDS	=	1,565604g/kg(H2O)
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9985469
DENSITY		=	1,00011
IONIC	STRENGTH	=	2,84E-02
WATER	ACTIVITY	=	0,999528
рН		=	7,45
LOG	PCO2	=	-1,455528
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,80E-02
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
OH	ALKALINITY	=	3,27E-07
Н	ALKALINITY	=	-4,32E-08
TOTAL	ALKALINITY	=	1,80E-02
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX
ARAGONITE	6,27E-09	7,31E-08	11,6618
CALCITE	4,04E-09	7,31E-08	18,074
DOLOMITE	8,87E-18	1,34E-15	151,106
MAGNESITE	1,65E-08	1,83E-08	1,11225
VATERITE	1,29E-08	7,31E-08	5,65627

Πίνακας Γ.28.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 02/2007-2

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ-3			
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY
Na	9,30E-04	0,853492	7,94E-04
K	9,00E-05 0,851806 7		7,67E-05
Са	5,08E-03 0,582188		2,96E-03
Mg	1,46E-03	0,554334	8,09E-04
CI	1,40E-04	0,878927	1,23E-04
SO4	3,30E-04	0,447978	1,48E-04
NO3	3,00E-04	0,875194	2,63E-04
Н	3,02E-08	0,852197	2,57E-08
HCO3	1,29E-02	0,886694	1,15E-02
OH	2,91E-07	0,839536	2,44E-07
CO3	3,32E-05	0,535346	1,78E-05
CO2	6,98E-04	1,00266	7,00E-04
CaCO3	6,69E-05	1	6,69E-05
MgCO3	1,22E-05	1	1,22E-05
Mg(OH)2	3,52E-08	0,851087	3,00E-08
H2SO4	3,42E-10	0,885012	3,03E-10
ELECTRICAL	BALANCE	=	7,03%
	DISSOLVED		
TOTAL	SOLIDS	=	1,148976 g/kg(H2O)
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9989557
DENSITY		=	1,000103
	STRENGTH	=	2,10E-02
WATER	ACTIVITY	=	0,9996462
pH		=	7,59
LOG	PCO2	=	-1,748428
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,32E-02
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00
OH	ALKALINITY	=	3,26E-07
Н	ALKALINITY	=	-3,05E-08
TOTAL	ALKALINITY	=	1,32E-02
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX
ARAGONITE	6,58E-09	5,26E-08	7,9919
	4,24E-09	5,26E-08	12,3969
DOLOMITE	1,03E-17	7,57E-16	73,5878
MAGNESITE	1,92E-08	1,44E-08	0,750353
VATERITE	1,38E-08	5,26E-08	3,8145

Πίνακας Γ.29.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 02/2007-3

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ-4				
	MOLALITY	ACT. COEFF.	ACTIVITY	
Na	9,20E-04	0,859033	7,90E-04	
K	1,00E-04	0,85744	8,57E-05	
Са	4,45E-03 0,591626		2,63E-03	
Mg	1,47E-03	0,566131	8,35E-04	
CI	1,10E-04	1,10E-04 0.882525		
SO4	3,50E-04	0,463185	1,62E-04	
NO3	2,50E-04	0,87919	2,20E-04	
Н	3,29E-08	0,857686	2,82E-08	
HCO3	1,17E-02	0,888943	1,04E-02	
ОН	2,96E-07	0,846364	2,51E-07	
CO3	2,79E-05	0,549072	1,53E-05	
CO2	6,82E-04	1,00243	6,84E-04	
CaCO3	5,24E-05	1	5,24E-05	
MgCO3	1,09E-05	1	1,09E-05	
Mg(OH)2	3,73E-08	0,856656	3,19E-08	
H2SO4	4,29E-10	0,887904	3,81E-10	
ELECTRICAL	BALANCE	=	7,70%	
	DISSOLVED			
TOTAL	SOLIDS	=	1,046695 g/kg(H2O)	
MOLAL/MOLAR	FACTOR	=	0,9990572	
DENSITY		=	1,000103	
IONIC	STRENGTH	=	1,92E-02	
WATER	ACTIVITY	=	0,9996769	
рН		=	7,55	
LOG	PCO2	=	-1,739871	
CARBONATE	ALKALINITY	=	1,19E-02	
BORATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
SILICATE	ALKALINITY	=	0,00E+00	
OH	ALKALINITY	=	3,34E-07	
Н	ALKALINITY	=	-3,33E-08	
TOTAL	ALKALINITY	=	1,19E-02	
	SOLUB. PROD.	ION. ACT. PROD.	SATUR. INDEX	
ARAGONITE	6,45E-09	4,03E-08	6,24182	
CALCITE	4,16E-09	4,03E-08	9,67869	
DOLOMITE	9,66E-18	5,14E-16	53,2315	
MAGNESITE	1,80E-08	1,28E-08	0,710541	
VATERITE	1,34E-08	4,03E-08	3,00082	

Πίνακας Γ.30.: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου EQL/EVP για την δειγματοληψία του 02/2007-4

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006	log PCO2	10
ПНГН	-0,6529162	0,2223739
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-0,7970567	0,1595671
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,787246	0,0163213
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,622119	0,0238716
	МАХ	0,2223739
	MIN	0,0163213

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007	log PCO2	10
ПНГН	-1,27908	0,052592
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,455528	0,0350326
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,748428	0,0178473
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,739871	0,0182024
	MAX	0,052592
	MIN	0,0178473

Πίνακας Γ.31.: Αποτελέσματα pCO<sub>2</sub> σύμφωνα με το μοντέλο EQL/EVP, ανά θέση δειγματοληψίας, για τις περιόδους 11/2006 και 03/2007.

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006	Y	Х
	log PCO2	HCO3
ПНГН	-0,6529162	15,92
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-0,7970567	14,91
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,787246	12,66
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,622119	9,56
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007	log PCO2	HCO3
ПНГН	-1,27908	15,39
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,455528	17,50
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,748428	12,66
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,739871	11,42

**Πίνακας Γ.32.:** Συσχέτιση τιμών pCO<sub>2</sub> και συγκέντρωσης ιόντων HCO<sub>3</sub>, ανά θέση δειγματοληψίας, για τις περιόδους 11/2006 και 02/2007

	Y	x
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006	log PCO2	рН
ПНГН	-0,6529162	6,61
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-0,7970567	6,73
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,787246	7,62
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	-1,622119	7,36
	Y	х
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007	Y log PCO2	X pH
<b>ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007</b> ΠΗΓΗ	Y log PCO2 -1,27908	Х рН 7,23
<b>ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007</b> ΠΗΓΗ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	Y log PCO2 -1,27908 -1,455528	Х рН 7,23 7,45
<b>ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007</b> ΠΗΓΗ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ	Y log PCO2 -1,27908 -1,455528 -1,748428	<b>X</b> <b>pH</b> 7,23 7,45 7,59

Πίνακας Γ.33.: Αναλυτικά αποτελέσματα μερικής πίεσης CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) και pH, ανά θέση δειγματοληψίας για την περίοδο 11/2006 και 02/2007

<b>ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006</b>			Y	X
ПНГН	SATUR. INDEX	IONSTRENGTH	LOG SATUR. INDEX	LOG ION STRENGTH
ARAGONITE	1,36	0,0259	0,133969796	-1,586700236
CALCITE	2,11	0,0259	0,324154824	-1,586700236
DOLOMITE	3,24	0,0259	0,511150456	-1,586700236
VATERITE	0,66	0,0259	-0,178494987	-1,586700236
MAGNESITE	0,21	0,0259	-0,682624146	-1,586700236
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	1,64	0,0241	0,214602801	-1,617982957
CALCITE	2,54	0,0241	0,40494655	-1,617982957
DOLOMITE	3,28	0,0241	0,516471911	-1,617982957
VATERITE	0,79	0,0241	-0,100551597	-1,617982957
MAGNESITE	0,17	0,0241	-0,767695247	-1,617982957

ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	7,61	0,0204	0,881188295	-1,690369833
CALCITE	11,80	0,0204	1,072003446	-1,690369833
DOLOMITE	79,61	0,0204	1,90097908	-1,690369833
VATERITE	3,60	0,0204	0,556607606	-1,690369833
MAGNESITE	0,83	0,0204	-0,07860957	-1,690369833
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	2,68	0,0158	0,427722991	-1,801342913
CALCITE	4,15	0,0158	0,618282448	-1,801342913
DOLOMITE	12,95	0,0158	1,112343542	-1,801342913
VATERITE	1,28	0,0158	0,108629284	-1,801342913
MAGNESITE	0,40	0,0158	-0,397866185	-1,801342913

Πίνακας Γ.34.: Αποτελέσματα Δεικτών κορεσμού (Is) κυριότερων ανθρακικών ορυκτών, σύμφωνα με το μοντέλο EQL/EVP, ανά θέση δειγματοληψίας, για την περίοδο 11/2006.

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2007			Y	X
ПНГН	SATUR. INDEX	ION STRENGTH	LOG SATUR. INDEX	LOG ION STRENGTH
ARAGONITE	5,52	0,02524049	0,741691963	-1,597902218
CALCITE	8,55	0,02524049	0,931875691	-1,597902218
DOLOMITE	45,25	0,02524049	1,655650255	-1,597902218
VATERITE	2,69	0,02524049	0,429225641	-1,597902218
MAGNESITE	0,71	0,02524049	-0,145844621	-1,597902218
ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	11,66	0,0284	1,066765589	-1,54668166
CALCITE	18,07	0,0284	1,257054278	-1,54668166
DOLOMITE	151,11	0,0284	2,179281709	-1,54668166
VATERITE	1,11	0,0284	0,046202414	-1,54668166
MAGNESITE	1,11	0,0284	0,046202414	-1,54668166
ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	7,99	0,021	0,902650041	-1,677780705
CALCITE	12,40	0,021	1,093313098	-1,677780705
DOLOMITE	73,59	0,021	1,866805819	-1,677780705
VATERITE	0,75	0,021	-0,124734377	-1,677780705
MAGNESITE	0,75	0,021	-0,124734377	-1,677780705
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ				
ARAGONITE	6,24	0,0192	0,79531124	-1,716698771
CALCITE	9,68	0,0192	0,98581658	-1,716698771
DOLOMITE	53,23	0,0192	1,726168704	-1,716698771
VATERITE	3,00	0,0192	0,477239946	-1,716698771
MAGNESITE	0,71	0,0192	-0,148410857	-1,716698771

**Πίνακας Γ.35.:** Αποτελέσματα Δεικτών κορεσμού (Is) κυριότερων ανθρακικών ορυκτών, σύμφωνα με το μοντέλο EQL/EVP, ανά θέση δειγματοληψίας, για την περίοδο 02/2007.