



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΑΡΑΜΠΕΛΑΣ

ΣΠΗΛΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΜΑΧΩΝΑ
ΣΕΡΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023





ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΑΡΑΜΠΕΛΑΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5717

**ΣΠΗΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΠΡΟΜΑΧΩΝΑ ΣΕΡΡΩΝ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής
και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας

Επιβλέπων

Λαζαρίδης Γεώργιος, ΕΔΙΠ

.....



© Αλέξανδρος Καράμπελας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΠΗΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΜΑΧΩΝΑ ΣΕΡΡΩΝ – *Διπλωματική Εργασία*

© Alexandros Karampelas, School of Geology AUTH, 2023

All rights reserved.

SPELEOGENESIS IN THE AREA OF PROMACHONAS IN SERRES REGION – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Θόλος (cupola) στο σπήλαιο του Ρούπελ, φωτ. Α. Καράμπελας



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	8
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	11
4. ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΟΥ	14
5. ΣΠΗΛΛΑΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	16
5.1 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΛΥΣΗΣ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΠΗΛΛΑΙΟΥ	18
5.1.1 ΘΟΛΟΙ	25
5.1.2 ΚΤΕΝΟΕΙΔΗ (Scallops)	29
5.2 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΠΗΛΛΑΙΟΥ	31
5.2.1 ΣΠΗΛΛΑΙΟΘΕΜΑΤΑ	31
5. 2. 2 ΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	33
5.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΠΗΛΛΑΙΟΥ ΛΑΚΗΣ	36
7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	38
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	45



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με προτροπή του Γ. Λαζαρίδη, μετά από εύρεση ενός νέου σπηλαίου στον δήμο Σιντικής, ΒΒΑ της περιοχής του Ρούπελ. Ως στόχο της έχει τη χαρτογράφηση του σπηλαίου, την καταγραφή των γεωλογικών του χαρακτηριστικών και εν τέλει την περιγραφή ενός πιθανού μοντέλου ανάπτυξης του σπηλαίου. Για τη χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκαν τόσο παραδοσιακά εργαλεία και συμβατικές μέθοδοι μελέτης σε συνδυασμό με πιο πρόσφατες τεχνολογίες και λογισμικά που μπορούν να βρεθούν σε συσκευές κινητών τηλεφώνων όπως κλισιόμετρο, GPS, γεωλογική πυξίδα ή ο αισθητήρας LiDAR που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου. Για τη μελέτη του σπηλαίου συλλέχθηκαν πληροφορίες για τη γεωμορφολογία, τη λιθολογία και τη τεκτονική της περιοχής, καθώς και στοιχεία που συνδέουν το σπήλαιο με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής. Ακόμα γίνεται αναφορά των βασικών μορφομετρικών στοιχείων του σπηλαίου, καθώς και καταγραφή και κατηγοριοποίηση των ιζηματογενών αποθέσεων και των διαβρωσιγενών μορφολογιών που βρίσκονται στους θαλάμους. Μετέπειτα όλα τα στοιχεία που συλλέχθηκαν, συγκρίθηκαν με παρόμοια ευρήματα, με βάσει έρευνες και άρθρα της επιστημονικής κοινότητας, για τη τελική κατανόηση του τρόπου γένεσης του σπηλαίου και ώστε να δοθεί μια πρώτη περιγραφή των συνθηκών που υπήρχαν κατά την ανάπτυξη του.

Λέξεις Κλειδιά: Χαρτογράφηση σπηλαίου, Θόλοι, Διάλυση από συμπύκνωση υδρατμών, Γεωθερμία, Κτενοειδή



ABSTRACT

This thesis was accomplished with the exhortation of G. Lazaridis, following the discovery of a newly discovered cave in the municipality of Sintiki, NE of the Roupel region. Its aim is the mapping of the cave, record its geological features and finally describe a possible model of development for the cave. Both traditional tools and conventional survey methods were used for the mapping combined with more recent technologies and software applications that can be found in mobile phone devices such as an inclinometer, GPS, geological compass or the LiDAR sensor which was used to create a digital 3D model. For the geological study of the cave, information about the geomorphology, lithology and tectonics of the area was gathered, along with data that connects the cave to the hydrographic network of the area. In this survey, the basic morphometric elements of the cave are also mentioned, along with the recording and classification of the sedimentary deposits and the erosive morphologies found in the chambers. Later on, all the data that were collected, were compared with similar findings, based on research and articles of the scientific community, so as to finally come to a conclusion on how this cavity was formed and to give a first description of the conditions that took place during its development.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

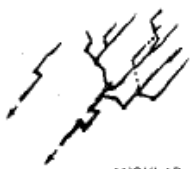
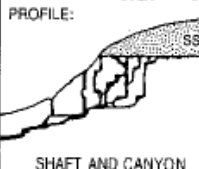
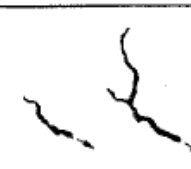
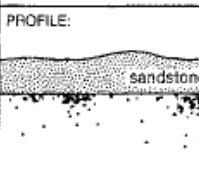
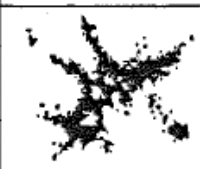
Σε αυτή τη πτυχιακή εργασία θα αναφερθούν τα αποτελέσματα της σπηλαιολογικής έρευνας που έγινε στην περιοχή του Ρούπελ και θα γίνει η ερμηνεία της διαδικασίας δημιουργίας των σπηλαίων. Η τοποθεσία του σημαντικότερου σπηλαίου που βρέθηκε έως τώρα, του Σπηλαίου του Λάκη, ανακαλύφθηκε πρόσφατα από τον εκλιπόντα Κετσετζίδη Βασίλειο, από τον οποίο πήρε και την ονομασία του. Στο σπήλαιο αυτό, πραγματοποιήθηκε υπαίθρια εργασία τον Ιούλιο του 2022, κατόπιν αδείας από την Εφορεία Σπηλαιολογίας και Παλαιοανθρωπολογίας-Τμήμα Βορείου Ελλάδος με το υπ. αριθμ. 319346/13-7-2022 έγγραφό της. Σκοπός της υπαίθριας εργασίας ήταν να χαρτογραφηθεί το σπήλαιο και να γίνουν οι απαραίτητες παρατηρήσεις για την ερμηνεία της σπηλαιογένεσης σε αυτό και την ευρύτερη περιοχή. Σκοπός αυτής της ερευνητικής πτυχιακής εργασίας είναι από εκπαιδευτικής πλευράς, να γίνει εξοικείωση με τους τρόπους που μελετάται για πρώτη φορά ένα σπήλαιο και για το οποίο δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα προηγούμενα στοιχεία και από ερευνητικής πλευράς, να καταγραφούν και να μελετηθούν τα κύρια χαρακτηριστικά του, η τεκμηρίωση και η ερμηνεία των δεδομένων της έρευνας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Δρ. Γεώργιο Λαζαρίδη, επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, ώστε να φέρω εις πέρας τη πρώτη μου ερευνητική εργασία. Ευχαριστώ επίσης τη Δέσποινα Δώρα, υποψήφια διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας, για τη συνεργασία και την παροχή εξοπλισμού LiDAR για τη σάρωση του σπηλαίου. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Πρόδρομο Κουλέλη, μέλος του σπηλαιολογικού συλλόγου «Πρωτέας», για τη βοήθεια και τη καθοδήγηση που μας προσέφερε κατά την εργασία υπαίθρου μας.

Τα σπήλαια συνήθως αναπτύσσονται σε συγκεκριμένα πετρώματα τα οποία είναι πιο επιδεκτικά στη χημική διάλυση και διευκολύνουν τη δημιουργία σπηλαίων. Η διαδικασία αυτή λέγεται καρστική διάλυση. Κατά τον Bögli (1978), τέτοια πετρώματα αποτελούν ανθρακικά πετρώματα όπως οι ασβεστόλιθοι, οι δολομίτες και μάρμαρα, οι εβαπορίτες που περιλαμβάνουν τη γύψο και το ορυκτό αλάτι αλλά και τα πιο δυσδιάλυτα πετρώματα όπως οι χαλαζίτες.

Οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από ένα απογυμνωμένο, βραχώδες ανάγλυφο, όπου προεξέχουν τα ανθρακικά πετρώματα και η απορροή γίνεται κυρίως υπόγεια. Το νερό ρέει εν μέσω των ασυνεχειών, κινείται μέχρι και τα βαθύτερα σημεία του υδροφόρου ορίζοντα και ταυτόχρονα διευρύνει τις ασυνέχειες δημιουργώντας ένα δίκτυο αγωγών και εγκοίλων, τα οποία με την μετέπειτα διεύρυνση τους δημιουργούν τα σπήλαια.

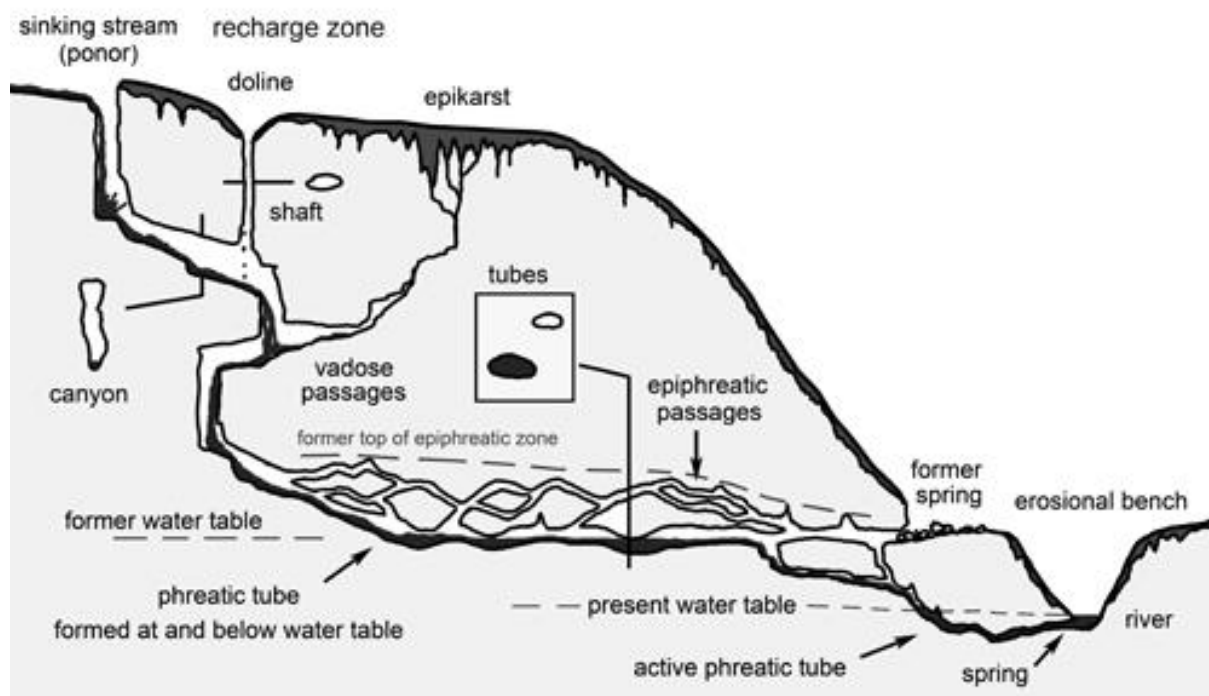
Για τη δημιουργία και ανάπτυξη των σπηλαίων κυρίαρχο ρόλο κατέχει το νερό που αποσθρώνει, διαλύει και μεταφέρει το περιβάλλον πέτρωμα του σπηλαίου. Σύμφωνα με τους Ford & Williams (2007), ως προς την προέλευση του νερού τα σπήλαια μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες ομάδες. Αυτές είναι τα υπεργενή σπήλαια, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από μετεωρικό νερό που κατεισδύει καταλήγοντας στον υδροφόρο ορίζοντα και εκβάλλοντας σε πηγές. Το νερό σε αυτά τα σπήλαια είτε κατεισδύει με ελεύθερη ροή νερού, είτε μέσω υπό πίεση υδροφόρων οριζόντων. Στη δεύτερη ομάδα, ανήκουν τα σπήλαια που έχουν δημιουργηθεί ακόμη και σε σημαντικότερα βάθη, κατώτερα από τους υδροφόρους ορίζοντες, από ρευστά τα οποία ανέρχονται προς τα ανώτερα στρώματα και δεν έχουν άμεση τροφοδοσία από το επιφανειακό σύστημα απορροής. Αυτού του είδους τα σπήλαια ονομάζονται υπογενή και ένας αυστηρός ορισμός τους δίνεται από τον Klimchouk, 2017. Σύμφωνα με τον Palmer (1991), η ανάπτυξη των περασμάτων, κατά το οριζόντιο επίπεδο, μπορεί να ταξινομηθεί, με βάση την προέλευση του νερού και του υδροδυναμικού καθεστώτος, στις εξής κατηγορίες περασμάτων σύμφωνα με τον πίνακα 1. Παρόλα αυτά ο πίνακας αυτός αναφέρεται σε καλά αναπτυγμένα σπήλαια ενώ συχνά παρατηρούνται και σπήλαια πολύ απλούστερης δομής περασμάτων, αποτελούμενα από ένα ή δύο θαλάμους και συχνά έχουν μικρή ανάπτυξη σε μήκος και βάθος.

		TYPE OF RECHARGE				
		VIA KARST DEPRESSIONS		DIFFUSE		HYPOGENIC
		SINKHOLES (LIMITED DISCHARGE FLUCTUATION)	SINKING STREAMS (GREAT DISCHARGE FLUCTUATION)	THROUGH SANDSTONE	INTO POROUS SOLUBLE ROCK	DISSOLUTION BY ACIDS OF DEEP-SEATED SOURCE OR BY COOLING OF THERMAL WATER
		BRANCHWORKS (USUALLY SEVERAL LEVELS) & SINGLE PASSAGES	SINGLE PASSAGES AND CRUDE BRANCHWORKS, USUALLY WITH THE FOLLOWING FEATURES SUPERIMPOSED:	MOST CAVES ENLARGED FURTHER BY RECHARGE FROM OTHER SOURCES	MOST CAVES FORMED BY MIXING AT DEPTH	
DOMINANT TYPE OF POROSITY	FRACTURES	 ANGULAR PASSAGES	 FISSURES, IRREGULAR NETWORKS	 FISSURES, NETWORKS	 ISOLATED FISSURES AND RUDIMENTARY NETWORKS	 NETWORKS, SINGLE PASSAGES, FISSURES
	BEDDING PARTINGS	 CURVILINEAR PASSAGES	 ANASTOMOSES, ANASTOMOTIC MAZES	PROFILE:  SHAFT AND CANYON COMPLEXES, INTERSTRATAL SOLUTION	 SPONGEWORK	 RAMIFORM CAVES, RARE SINGLE-PASSAGE AND ANASTOMOTIC CAVES
	INTERGRANULAR	 RUDIMENTARY BRANCHWORKS	 SPONGEWORK	PROFILE:  RUDIMENTARY SPONGEWORK	 SPONGEWORK	 RAMIFORM & SPONGEWORK CAVES

Πίνακας 1. Μορφολογικά πρότυπα περασμάτων σε κάτοψη κατά Palmer (1991). Ως μερικά από τα πιο κοινά περάσματα ξεχωρίζουν τα δενδριτικά δίκτυα (Branchwork caves), οι αναστομοτικοί λαβύρινθοι (Anastomotic caves), οι σπογγοειδείς λαβύρινθοι (Spongework caves) και τα περάσματα μορφής πλέγματος (Network caves).

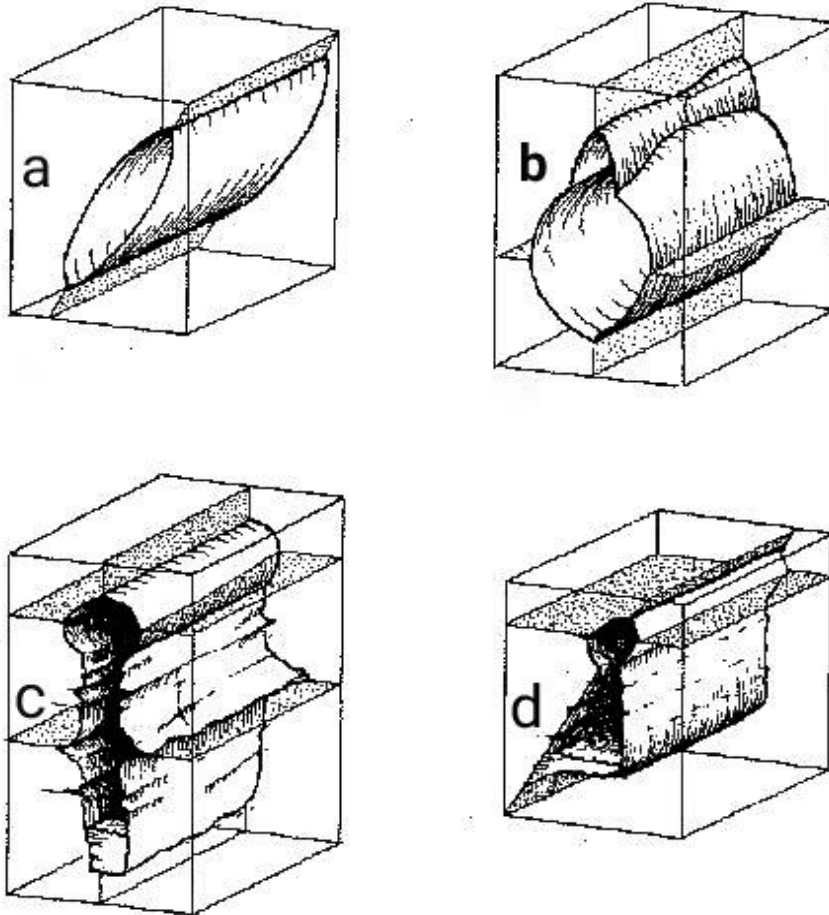
Η απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι άλλος ένας παράγοντας που διαμορφώνει την μορφολογία των περασμάτων. Έτσι σύμφωνα με τους Jennings, (1985), Gillieson (1996) και Palmer (1991, 2011), όπως παρουσιάζεται παρακάτω στην εικόνα 1, τα περάσματα διακρίνονται, με βάση την απόσταση τους από τον υδροφόρο ορίζοντα, σε τρεις ζώνες, τη ζώνη κατείδυσης (vadose zone), την επιφρεατική ζώνη (epiphreatic zone) και την φρεατική ζώνη (phreatic zone). Στη ζώνη κατείδυσης ανήκουν όλα τα υπερκείμενα του υδροφόρου ορίζοντα περάσματα που δημιουργούνται καθώς το νερό ρέει ανεμπόδιστα, μόνο με την επίδραση της βαρύτητας, ακολουθώντας την πιο σύντομη διαδρομή προς τα κατώτερα στρώματα. Τα περάσματα που δημιουργούνται σε αυτή τη ζώνη είναι σχεδόν κατακόρυφα. Σε αυτή τη ζώνη η ταχύτητα του νερού είναι μεγάλη και το νερό συνεχώς ανανεώνεται και έτσι δεν προλαβαίνει να φτάσει σε σημείο κορεσμού. Στα κατώτερα σημεία της ζώνης κατείδυσης και μέχρι το κατώτερο όριο του υδροφόρου ορίζοντα σχηματίζεται η επιφρεατική ζώνη όπου οι αγωγοί που δημιουργούνται παρουσιάζουν μεικτά χαρακτηριστικά της ζώνης κατείδυσης όσο και της φρεατικής ζώνης. Ονομάζεται αλλιώς και πλημμυρική ζώνη (Palmer, 1972) καθώς σε πλημμυρικά φαινόμενα οι αγωγοί πληρώνονται με νερό όπως ακριβώς και στη φρεατική ζώνη, αλλά υπάρχουν και περίοδοι, όπου υπάρχει μειωμένη παροχή νερού και οι αγωγοί είναι μερικώς γεμάτοι. Στη φρεατική ζώνη οι αγωγοί δημιουργούνται σε μεγαλύτερα βάθη από τον

υδροφόρο ορίζοντα και γι' αυτό είναι διαρκώς πληρωμένοι με νερό. Τα παλιά φρεατικά περάσματα αποτελούν δείκτες για το ύψος του βασικού επιπέδου της εκάστοτε περιόδου. Η κίνηση του νερού σε αυτή τη ζώνη είναι σχεδόν πάντα οριζόντια και η ταχύτητα ροής είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις προηγούμενες ζώνες και μειώνεται προς τα βαθύτερα σημεία. Καθώς η ταχύτητα ροής είναι μικρή και το νερό δεν ανανεώνεται επαρκώς, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι πάντα κορεσμένο και η διαδικασία διάλυσης πιο αργή σε σχέση με τη ζώνη κατείσδυσης. Στη φρεατική ζώνη, καθώς το νερό είναι υπό πίεση και οι αγωγοί πληρωμένοι με νερό η διάλυση τους από το νερό είναι παγκρατευθυντική σε αντίθεση με την ζώνη κατείσδυσης όπου, επειδή η ροή ελέγχεται από την βαρύτητα, η διάλυση βασίζεται στον κατακόρυφο άξονα.



Εικόνα 1. (Audra & Palmer, 2011). Η διείσδυση των υδάτων στη ζώνη κατείσδυσης γίνεται μέσω της καρστικοποιημένης επιφάνειας και βαθιών ασυνεχειών ή καρστικών μορφών όπως δολίνες ή καταβόθρες. Κοντά στη επιφάνεια και πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα σχηματίζεται η ζώνη κατείσδυσης. Τα περάσματα είναι αρκετά ανεπτυγμένα προς τον κατακόρυφο άξονα και το νερό πέφτει ελεύθερα προς τα κατώτερα στρώματα. Ανάμεσα στα δύο όρια του υδροφόρου ορίζοντα υπάρχουν επιφρεατικά περάσματα τα οποία είναι άδεια ή μερικώς πληρωμένα με νερό. Στα κατώτερα μέρη, στη φρεατική ζώνη, οι αγωγοί είναι μονίμως γεμάτοι με υπό πίεση νερό.

Η τεκτονική της περιοχής κατέχει επίσης σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των περασμάτων των σπηλαίων καθώς ρήγματα και διακλάσεις μαζί με τις στρωματογραφικές ασυνέχειες αποτελούν τον ταχύτερο δρόμο και αυτόν με τη μικρότερη απαιτούμενη ενέργεια για την ελεύθερη κίνηση του νερού προς τα βαθύτερα σημεία και έτσι σύντομα διαβρώνονται και διευρύνονται από τη δράση του νερού δημιουργώντας περάσματα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2, κατά τους Lauritzen & Lundberg (2000), ο προσανατολισμός των τεκτονικών δομών επηρεάζει άμεσα το σχήμα της διατομής του περασματος που θα δημιουργηθεί.



Εικόνα 2. Συμβολή τεκτονικών στοιχείων στη μορφολογία περασμάτων κατά Lauritzen & Lundberg (2000). Στο σχέδιο (a) παρατηρείται η επίδραση μιας κεκλιμένης ασυνέχειας στη μορφολογία ενός φρεατικού περάσματος. Στο σχέδιο (b) παρουσιάζονται δομές μορφής «αψίδας». Τα σχέδια (c) και (d) αναπαριστούν τις μορφές «κλειδαρότρυπας» όπου σε αυτή τη περίπτωση η τεκτονική δημιουργεί ένα συνδυασμό φρεατικών και φαραγγειδών μορφών καθώς η πορεία διάλυσης ακολουθεί και επηρεάζεται από τις ασυνέχειες. (Τροποποιημένο από: Lauritzen & Lundberg, 2000)

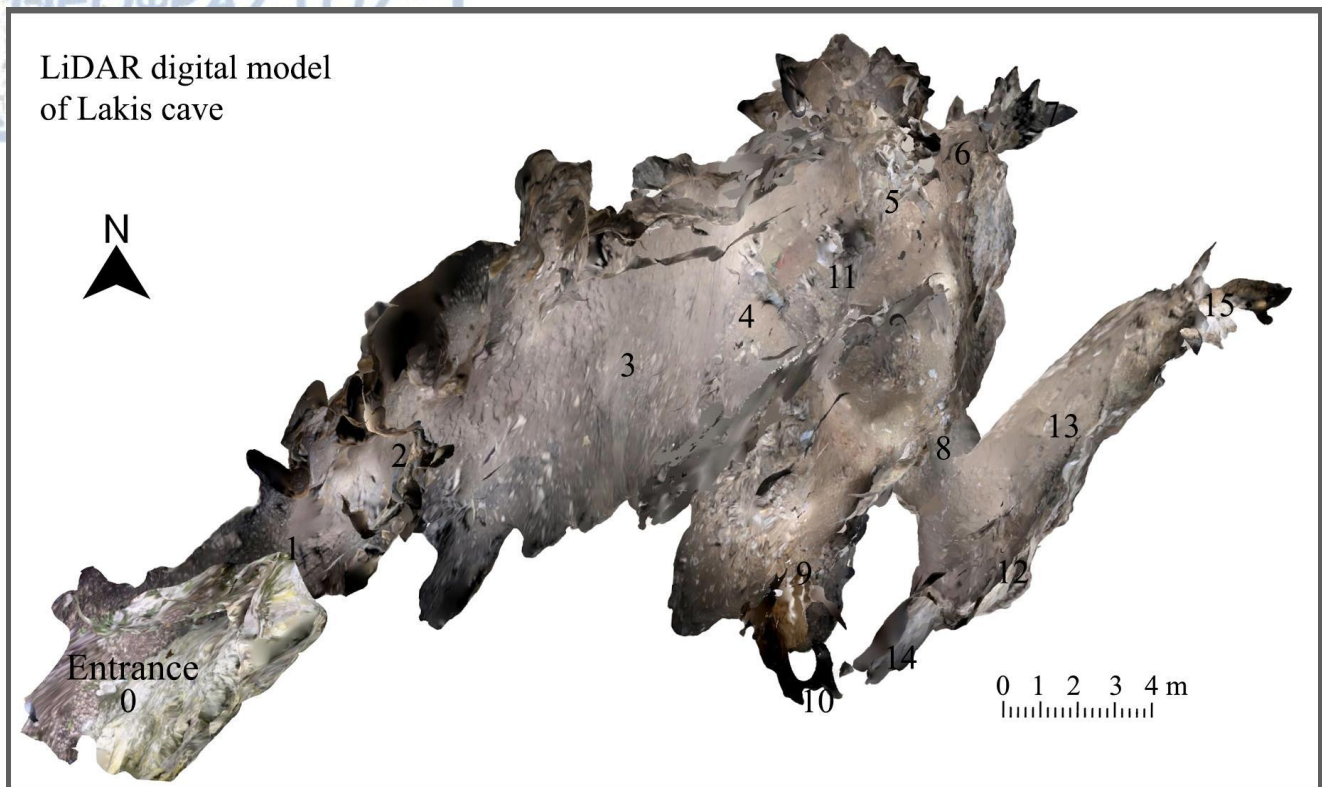
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το σπήλαιο χαρτογραφήθηκε με την κλασική μέθοδο αποτύπωσης σπηλαίων από σπηλαιολόγους (Dasher, 1994). Η μεθοδολογία και ορολογία για τις μορφές διάλυσης είναι σύμφωνη με τους Lauritzen & Lundberg (2000), Gunn (2004), White & Culver (2005), Ford & Williams (2007) και η ορολογία για τη δημιουργία των περασμάτων και του γενικού μορφολογικού πρότυπου του σπηλαίου ακολουθεί τους Frumkin, & Fischhendler (2005). Ο υπολογισμός των βασικών μορφομετρικών παραμέτρων είναι σύμφωνος με τους ορισμούς του Klimchouk (2003). Τα μορφομετρικά στοιχεία είναι παράμετροι των σπηλαίων που συμβάλλουν στη κατηγοριοποίηση τους και στη διεξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο γένεσης τους. Αναλυτικά η παράμετροι που υπολογίστηκαν περιλαμβάνουν το εμβαδόν πολυγώνου που περικλείει το σπήλαιο σε κάτοψη (cave field area) η οποία βρίσκεται σχεδιάζοντας το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με όσο το δυνατόν μικρότερο εμβαδόν, το οποίο να περιλαμβάνει όλη τη έκταση των περασμάτων και των αγωγών του σπηλαίου. Υπολογίστηκε το μήκος του σπηλαίου (Cave length) και η περίμετρος των αγωγών και περασμάτων του (Cave perimeter) καθώς και το κλάσμα του εμβαδού του σπηλαίου προς την περίμετρο του (Area over perimeter). Περαιτέρω εξετάστηκε η ζώνη κάλυψης του σπηλαίου (Areal coverage) που εκφράζεται ως το εκατοστιαίο κλάσμα του εμβαδού των αγωγών και περασμάτων του σπηλαίου σε κάτοψη προς το εμβαδόν του ελάχιστου πολυγώνου που καλύπτει τον συνολικό χώρο του σπηλαίου. Αναφέρεται ακόμα η πυκνότητα του δικτύου αγωγών του σπηλαίου (Passage network density) ως η εκατοστιαία έκφραση του μήκους του σπηλαίου προς το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας του πολυγώνου που περικλείει τον χώρο του σπηλαίου. Η ποιότητα της βραχομάζας των ανθρακικών πετρωμάτων, εξωτερικά του σπηλαίου, κατηγοριοποιήθηκε, με μακροσκοπικό εμπειρικό διαχωρισμό, σύμφωνα με τον δείκτη γεωλογικής αντοχής βραχομάζας (GSI), κατά Hoek & Brown (1997). Αυτός ο δείκτης βασίζεται κυρίως στην ποιότητα της βραχομάζας από άποψη κερματισμού και αποσάθρωσης και στην ποιότητα των ασυνεχειών του βάσει της τραχύτητας τους και της κατάστασης των επιφανειών τους. Για τη μέτρηση των διαστάσεων του το σπήλαιο χωρίστηκε σε τμήματα, όπου κρίνεται πως υπάρχουν αλλαγές στη μορφολογία ή τη γεωμετρία του χώρου και έπειτα με τη χρήση πυξίδας και αποστασιόμετρου μετρήθηκε και σημειώθηκε (πίνακας 2) το αζιμούθιο του σημείου, η κλίση του από το προηγούμενο σημείο, με χρήση κλισιομέτρου και βασικές αποστάσεις (εικόνα 3) όπως η απόσταση του σημείου από την οροφή, το δάπεδο, και δύο αντιδιαμετρικές μετρήσεις στον οριζόντιο άξονα.

Σημεία μετρήσεων	Προσανατολισμός	Κλίση	Πάνω (m)	Κάτω (m)	Αριστερά (m)	Δεξιά (m)
Είσοδος	0°	-	1,54	0	0,61	0,35
0-1	230°	0°	1,75	0	1,57	1,08
1-2	245°	-20°	1,87	0	2,41	2,32
2-3	240°	-23°	3,41	0,25	2,32	4,71
3-4	260°	-10°	3	0,88	3,46	2,47
4-5	240°	0°	1,67	0,54	2,22	4,93
5-6	220°	0°	0,58	0,71	1,34	0,63
6-7	245°	13°	0,51	0,52	0,51	0,51
4-8	290°	0°	0,17	0,64	2,25	1,08
6-9	25°	0°	0,76	0,29	0,94	2,87
9-10	345°	10°	2,41	1,14	0,25	0,37
8-11	140°	8°	1,67	0,78	7,42	5,77
12-8	120°	-15°	1,05	1,35	3,56	3,07
12-13	170°	40°	2,11	0,91	1,63	2,05
13-14	40°	-35°	2,52	1,51	0,52	0,52
15-13	35°	-55°	1,14	0,91	0,52	0,69
15-16	125°	83°	0,51	0,42	3,71	3,52

Πίνακας 2. Δεδομένα τοπογραφικής αποτύπωσης του χώρου του σπηλαίου του Λάκη.

Οι διαστάσεις των θόλων (cupolas) στους δύο θαλάμους πάρθηκαν με χρήση μεζούρας και αποστασιόμετρου, ενώ η θέση τους εντός του σπηλαίου αποτυπώθηκε με τη χρήση αισθητήρα LiDAR. Ειδικότερα, πάρθηκαν μετρήσεις για τη κατά μήκος διάμετρο τους, την κατά πλάτος διάμετρο που μετρήθηκε από τα μέσα της κατά μήκους και βρίσκεται κάθετη σε αυτή, καθώς και μέτρηση του βάθους τους. Για τη μέτρηση των στοιχείων των διακλάσεων και των ρηγμάτων, καθώς και για τη ομαδοποίηση τους, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή FieldMove Clino. Με μετέπειτα επεξεργασία εντός της εφαρμογής αλλά και χρήση του λογισμικού Stereonet 11 (Allmendinger, R.) δημιουργήθηκαν τα δίκτυα Schmidt όπου απεικονίζονται τα επιφανειακά στοιχεία. Επίσης χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας LiDAR που φέρει η κινητή συσκευή iPhone 13 pro για τη ψηφιοποίηση του χώρου και για μέτρηση αποστάσεων. Ο αισθητήρας αποδίδει μια τρισδιάστατη σάρωση χώρου (εικόνα 3) κάνοντας χρήση ακτινοβολίας λέιζερ, βάσει των χρόνων άφιξης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας στο μηχάνημα. Μετά από επεξεργασία του αρχείου στην εφαρμογή Polycam, δημιουργείται το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση της κάτοψης, με τη χρήση λογισμικού γραφιστικής επεξεργασίας.

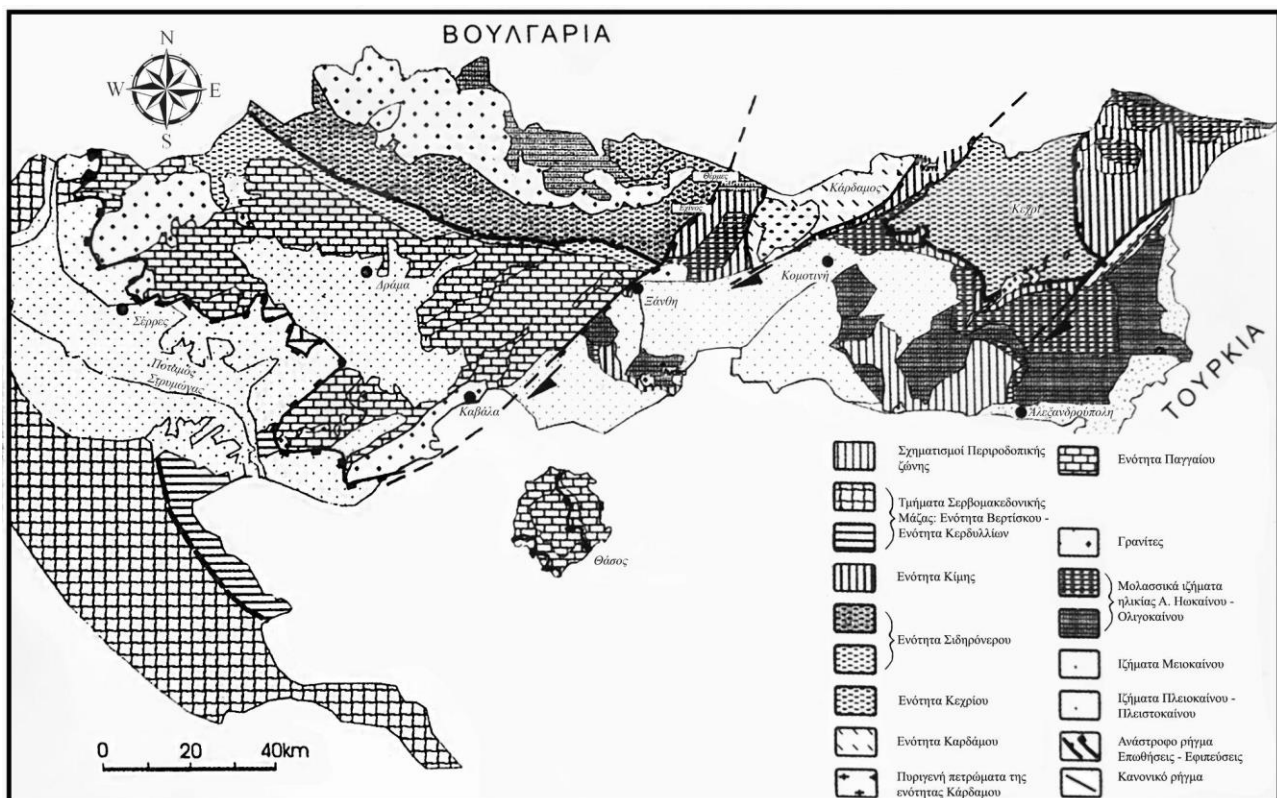


Εικόνα 3. Ψηφιακή χαρτογράφηση του σπηλαίου, όπου έχουν σημειωθεί οι θέσεις που πάρθηκαν οι μετρήσεις των διαστάσεων του χώρου.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

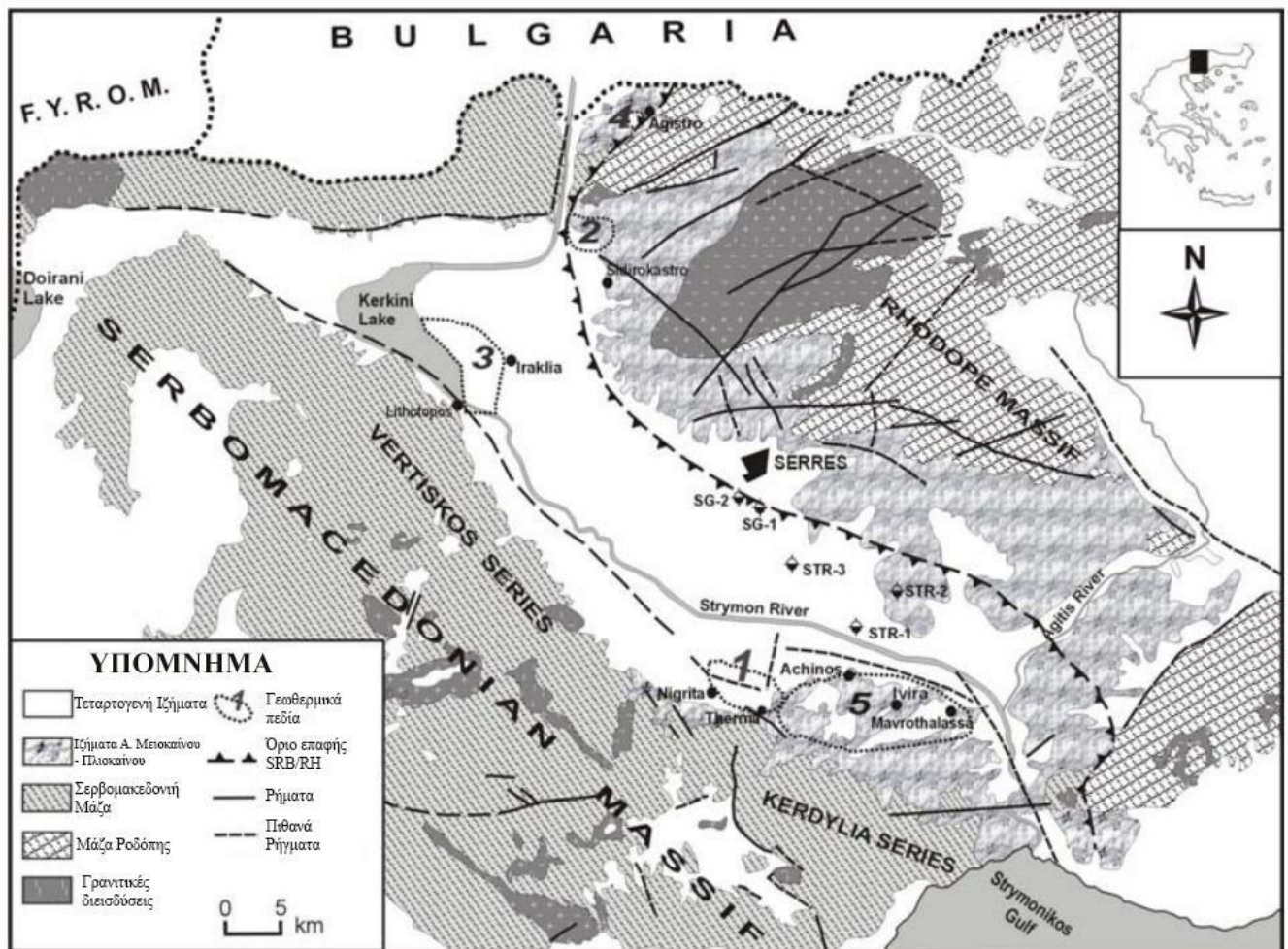
Η περιοχή μελέτης, όπως παρατηρείται στον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (εικόνα 4) κατά Mposkos & Krohe, 2000, βρίσκεται περίπου δύο χιλιόμετρα ΝΝΑ του οχυρού Ρούπελ, κοντά στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα, στα ανατολικά του ποταμού Στρυμόνα. Γεωτεκτονικά ανήκει στην μάζα Ρίλα-Ροδόπης η οποία εκτείνεται στο χώρο της ΒΑ Ελλάδας μέχρι τη νότια Βουλγαρία και έχει ως δυτικό φυσικό όριο, με τη Σερβομακεδονική μάζα, τον ποταμό Στρυμόνα. Η διάκριση της μάζας Ροδόπης με τη Σερβομακεδονική γίνεται κατά μήκος της τεκτονικής γραμμής του Στρυμόνα η οποία ήταν αποτέλεσμα αρχικά εφελκυστικών κινήσεων προς τα ΝΔ κατά το Μειόκαινο - Πλειόκαινο και αργότερα των ρηγμάτων διαφυγής, μικρής γωνίας κλίσης που τελικά σχημάτισαν τη λεκάνη. (Dinter & Royden 1993, Dinter 1998, Kiliyas & Mountrakis 1998, Kiliyas *et al.* 1999).

Σύμφωνα με τους Papanikolaou & Panagopoulos (1981), Kiliyas & Mountrakis (1998), Kiliyas *et al.* (1999) και Brun & Sokoutis (2007), η μάζα της Ροδόπης θεωρείται ως τμήμα της αλπικής ορογεννετικής ζώνης και ειδικότερα το σημείο συρραφής της Ευρασίας με τη Αφρικανική πλάκα. Η μάζα της Ροδόπης αποτελεί ένα ηπειρωτικό τέμαχος και είτε αποτελεί τη πλάκα της Ευρασίας, ή σχηματίστηκε από τη συγκόλληση ηπειρωτικών τεμαχών που αποσπάστηκαν από την Gondwana και καθώς κινήθηκαν Βορειοανατολικά, ενώθηκαν με την Ευρασία. Απαρτίζεται από αλληπάλληλα τεκτονικά λείπια, διαδοχικά επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο με γενική κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά.



Εικόνα 4. Διαχωρισμός ενοτήτων της μάζας Ροδόπης. (Τροποποιημένο από Mposkos & Krohe, 2000)

Η Μάζα της Ροδόπης συνίσταται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και από όγκους πυριγενών πετρωμάτων. Από ραδιοχρονολογήσεις που έγιναν σε ζirkόνια, βρέθηκε ότι η ηλικία των πρωτολίθων που στη συνέχεια μεταμορφώθηκαν στα κρυσταλλοσχιστώδη είναι Παλαιοζωική (Mroskos 1989, 2002, Liati & Seidel 1996). Ειδικότερα, οι πρωτόλιθοι είτε αποτέλεσαν γρανίτες που στη συνέχεια δημιούργησαν γνευσίους, είτε από ιζηματογενή προήλθαν τα μάρμαρα και οι σχιστόλιθοι. Με τεκτονικά κριτήρια διαχωρισμού, η μάζα της Ροδόπης έχει χωριστεί σε δύο ενότητες (Papanikolaou & Panagopoulos, 1981), την «τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου » και την «τεκτονική ενότητα του Παγγαίου». Η πρώτη καλύπτει το Βόρειο τμήμα της μάζας της Ροδόπης και εκτείνεται παράλληλα με το όριο των ελληνοβουλγαρικών συνόρων ενώ η δεύτερη συναντάται στο δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα της μάζας. Συνεπώς η περιοχή μελέτης ανήκει στην «τεκτονική ενότητα Παγγαίου», η οποία αποτελείται από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα, από (1) μια ακολουθία ορθογνευσίων, αμφιβολιτών και σχιστολίθων, από (2) έναν ορίζοντα μεγάλου πάχους, αποτελούμενο από μάρμαρα και (3) έναν τρίτο ορίζοντα με εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων. Η ενότητα του Παγγαίου σήμερα εμφανίζεται ως τεκτονικό παράθυρο (Kilias & Mountrakis, 1998) το οποίο ξεκινάει κάτω από τη ενότητα Σιδηρόνερου στο ΒΑ κομμάτι και τη Σερβομακεδονική μάζα στα Δυτικά και εμφανίστηκε στη επιφάνεια κατά τη δημιουργία, κατά το Ηώκαινο με Ολιγόκαινο, της τεκτονικής λεκάνης του Στρυμόνα, από τη υποβύθιση της Σερβομακεδονικής μάζας. Γενικά, η ευρύτερη περιοχή, σύμφωνα με τους Kilias & Mountrakis (1998) και Κίλιας *et al.* (1999), χαρακτηρίζεται αρχικά από μία συμπιεστική τεκτονική κατά το Ιουρασικό-Κρητιδικό, η οποία προκάλεσε την τοποθέτηση των αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων, τις συνθήκες έντονης μεταμόρφωσης υψηλής πίεσης και πάχυνση του φλοιού. Στη συνέχεια ακολούθησε μεταμόρφωση υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής πίεσης και μια εκτατική τεκτονική κατά το Τριτογενές της μάζας της Ροδόπης, κατά την οποία συνέβησαν η ανάδυση και η αποκάλυψη των τριών ενοτήτων. Πρώτα από όλες τις ενότητες εμφανίζεται στην επιφάνεια αυτή της Κύμης κατά το Παλαιόκαινο- Ηώκαινο. Στη συνέχεια αναδύεται και η ενδιάμεση ενότητα Ηωκαινικής- Ολιγοκαινικής ηλικίας με τη μορφή τεκτονικών παραθύρων, λόγω της ύπαρξης ενός κανονικού ρήγματος μικρής γωνίας κλίσης. Τέλος, η ενότητα Παγγαίου, Ολιγοκαινικής- Μειοκαινικής ηλικίας, εμφανίζεται επίσης με τη μορφή ενός μεγάλου τεκτονικού παραθύρου εξαιτίας της δράσης ενός κανονικού ρήγματος μικρής γωνίας κλίσης. Η εκτατική τεκτονική συνεχίστηκε έως το Τεταρτογενές, όπου και αναπτύχθηκαν κανονικά ρήγματα μεγάλης γωνίας κλίσης. Σύμφωνα με τους Dinter & Royden (1993), Dinter (1998), Kilias & Mountrakis (1998) και Kilias *et al.* (1999) στην περιοχή εμφανίζονται αρκετά εφελκυστικά ρήγματα, μικρής και μεγάλης γωνίας κλίσης, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά το Τριτογενές. Παράδειγμα αυτής της εφελκυστικής τεκτονικής θεωρείται η δημιουργία της λεκάνης του ποταμού Στρυμόνα αφού μετά την εφίπνευση της Σερβομακεδονικής στην μάζα Ροδόπης ακολούθησε η αποσυμπίεση του χώρου μέσω αυτών των ρηγμάτων. Όπως φαίνεται στον χάρτη της εικόνας 5, ολόκληρη η περιοχή ανατολικά του Στρυμόνα βρίσκεται τεμαχισμένη από τη δράση κανονικών ρηγμάτων. Τα ρήγματα της περιοχής κατέχουν διπλό ρόλο στη ύπαρξη γεωθερμίας καθώς αρχικά τα κρύα μετεωρικά νερά κατεβαίνουν σε μεγάλα βάθη μέσα από τα εφελκυστικά ρήγματα, θερμαίνονται και πάλι διαμέσου των ρηγμάτων ανέρχονται στην επιφάνεια δημιουργώντας υδροθερμικά πεδία στη περιοχή (Καρυδάκης *κ.α.* 2005) όπως φαίνεται και στον χάρτη της εικόνας 5.

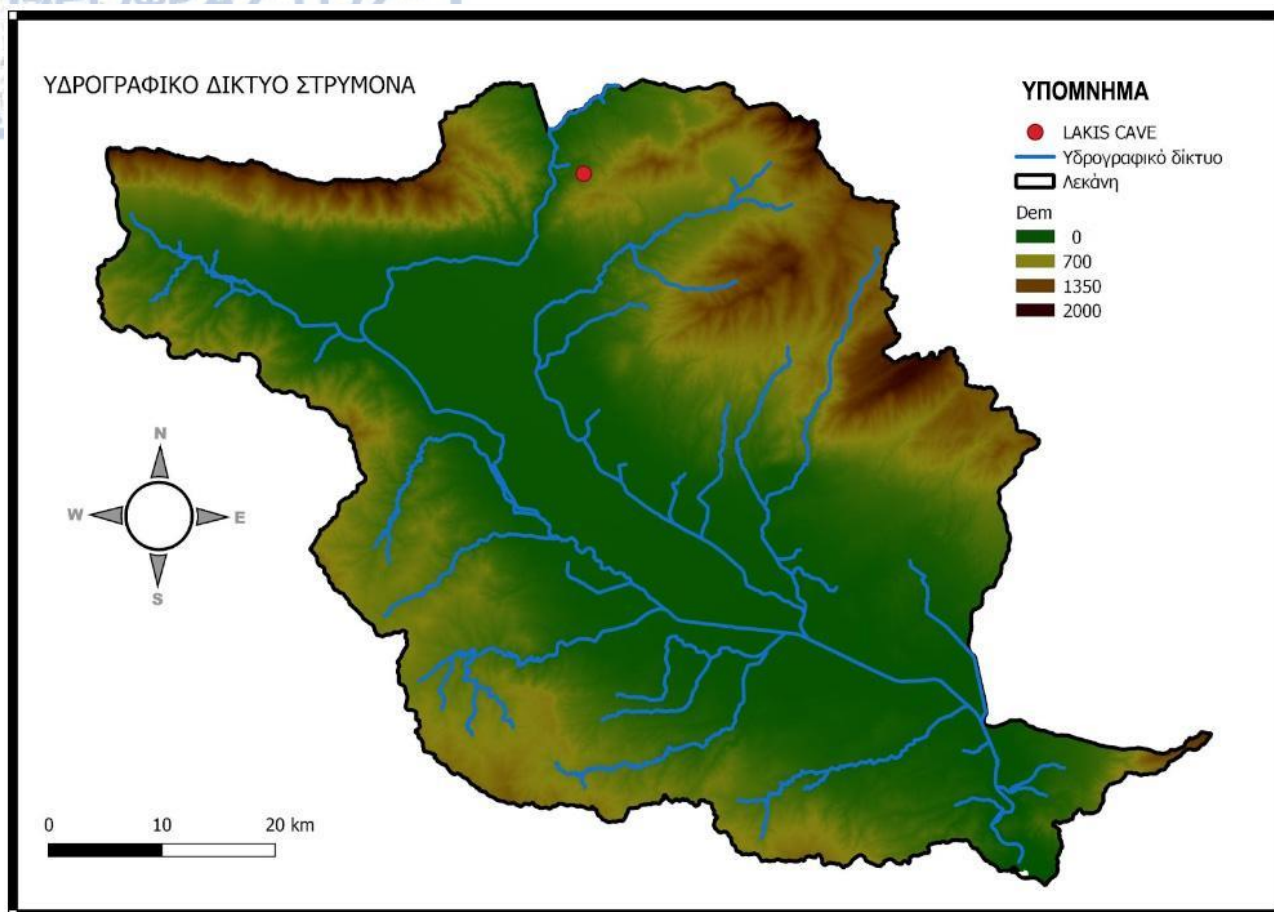


Εικόνα 5. Τεκτονικός χάρτης όπου απεικονίζεται η επαφή του Βορειοδυτικού ορίου της Μάζας της Ροδόπης με την Σερβομακεδονική, τα κανονικά ρήγματα εφελκυσμού και τα κυριότερα και μελετημένα γεωθερμικά πεδία της περιοχής (1:Θερμά- Νιγρίτα, 2:Σιδηρόκαστρο, 3:Λιθότοπος, 4:Άγκιστρο, 5:Αχινός- Ίβηρα- Μαυροθάλασσα (Τροποποιημένο από Καρυδάκης κ.α., 2005).

4. ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

Η δημιουργία και η ανάπτυξη του σπηλαίου, το υδροδυναμικό καθεστώς και το μικροκλίμα του, καθώς και τα ιζήματα που αποτίθενται σε αυτό είναι αλληλένδετα με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής γύρω από το σπήλαιο και για αυτό η μελέτη των εκάστοτε συνθηκών αποτελούν σημαντικό τμήμα της μελέτης του σπηλαίου.

Το σπήλαιο μελέτης ανήκει στη ταφρολεκάνη Σερρών, η οποία ταυτίζεται με την υδρολογική και στην οποία εντάσσεται και το ελληνικό τμήμα του ποταμού Στρυμόνα. Η λεκάνη απορροής του δικτύου οριοθετείται μεταξύ των ορεινών όγκων της Σερβομακεδονικής στα δυτικά, με τη μάζα της Ροδόπης προς τα ανατολικά. Το δίκτυο (εικόνα 6) που αρχίζει από τους ορεινούς όγκους έχει ως κύριο κλάδο τον ποταμό Στρυμόνα, στον οποίο στραγγίζεται το μεγαλύτερο ποσοστό των υδάτων του δικτύου. Ο ποταμός Στρυμόνας εάν και έχει διεθνή χαρακτήρα, καθώς διέρχεται από την Βουλγαρία και την Π.Γ.Δ.Μ., καταλήγει στην Ελλάδα και εκβάλλει τα νερά του στο κόλπο του Ορφανού. Σύμφωνα με τους Αλτήγος (1962), Δαούλας (1989) και Ψιλοβίκος κ.α. (1992), η έκταση της λεκάνης στον ελληνικό χώρο ανέρχεται στα 3714,8 km², αποτελεί το 21,68 % της συνολικής έκτασής της και η έκταση του δικτύου μπορεί να παρομοιαστεί ως σχήμα με πλάγιο παραλληλόγραμμο με κύριο άξονα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Από την είσοδο του στον ελληνικό χώρο μέχρι και το σημείο εκβολής του καλύπτει απόσταση 118 km. Η κοίτη του έχει πλάτος 100-220 m και εμφανίζει μαιανδρικό ή και αναστομωτικό πρότυπο ποταμού χάρη στη μικρή συνολική κλίση του ποταμού (0,9-1,1 ‰). Κατά τους Ψιλοβίκος, Αλμπανάκης, Παπαφιλίππου (1992) η ροή του Στρυμόνα χαρακτηρίζεται ως χειμαρρώδης με αυτή να κυμαίνεται από 0,4-0,7 m/s για παροχές 20-50 m³/s έως 0,8-1,2 m/s για παροχές 100-200 m³/s ενώ σε πλημμυρικά φαινόμενα φτάνει τα 1,5 m/s. Η συνολική παροχή του ποταμού ανά έτος υπολογίζεται στα 1,5-2,6*10⁹ m³. Ο σημαντικότερος παραπόταμος του ποταμού είναι ο Αγγίτης στον οποίο αποστραγγίζεται η λεκάνη της Δράμας. Το σύνολο των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανέρχεται περίπου στους 68. Από έρευνες του ΥΠΕΚΑ μελετήθηκε το υπόγειο υδρολογικό σύστημα της περιοχής ενδιαφέροντος που περιλαμβάνει τις ημιορεινές περιοχές της Λιβαδίτσας και του άγκιστρου όπου βρίσκονται τα σπήλαια ενδιαφέροντος. Ειδικότερα αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν ανεπτυγμένο καρστικό υδρολογικό σύστημα όπως αναμένεται καθώς τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι που αποτελούν κατά το πλείστον την λιθολογία της περιοχής ευνοούν τη καρστικοποίηση του υπεδάφους. Το καρστικό υπόγειο σύστημα απορροής καλύπτει 153,43 km³, παρουσιάζει συνολικό μήκος 9 km και πλάτος 25 km. Το πάχος του υπόγειου συστήματος υπολογίστηκε σε 1500 m. Επιπλέον έχει βρεθεί (Καρυδάκης κ.α., 2005) ότι στην περιοχή του Αγκίστρου υπάρχουν δύο υδροφόροι ορίζοντες, ο πρώτος στα 50 μέτρα και ο δεύτερος στα 70-130 μέτρα. Οι δύο υδροφόροι ορίζοντες επικοινωνούν μέσω διακλάσεων και ρηγμάτων και έτσι υπάρχει ανταλλαγή των μετεωρικών, ψυχρών νερών του επιφανειακού με τα πιο θερμά νερά του δεύτερου υδροφόρου. Τα θερμά νερά του βαθύτερου υδροφόρου ορίζοντα φτάνουν τους 40° C.

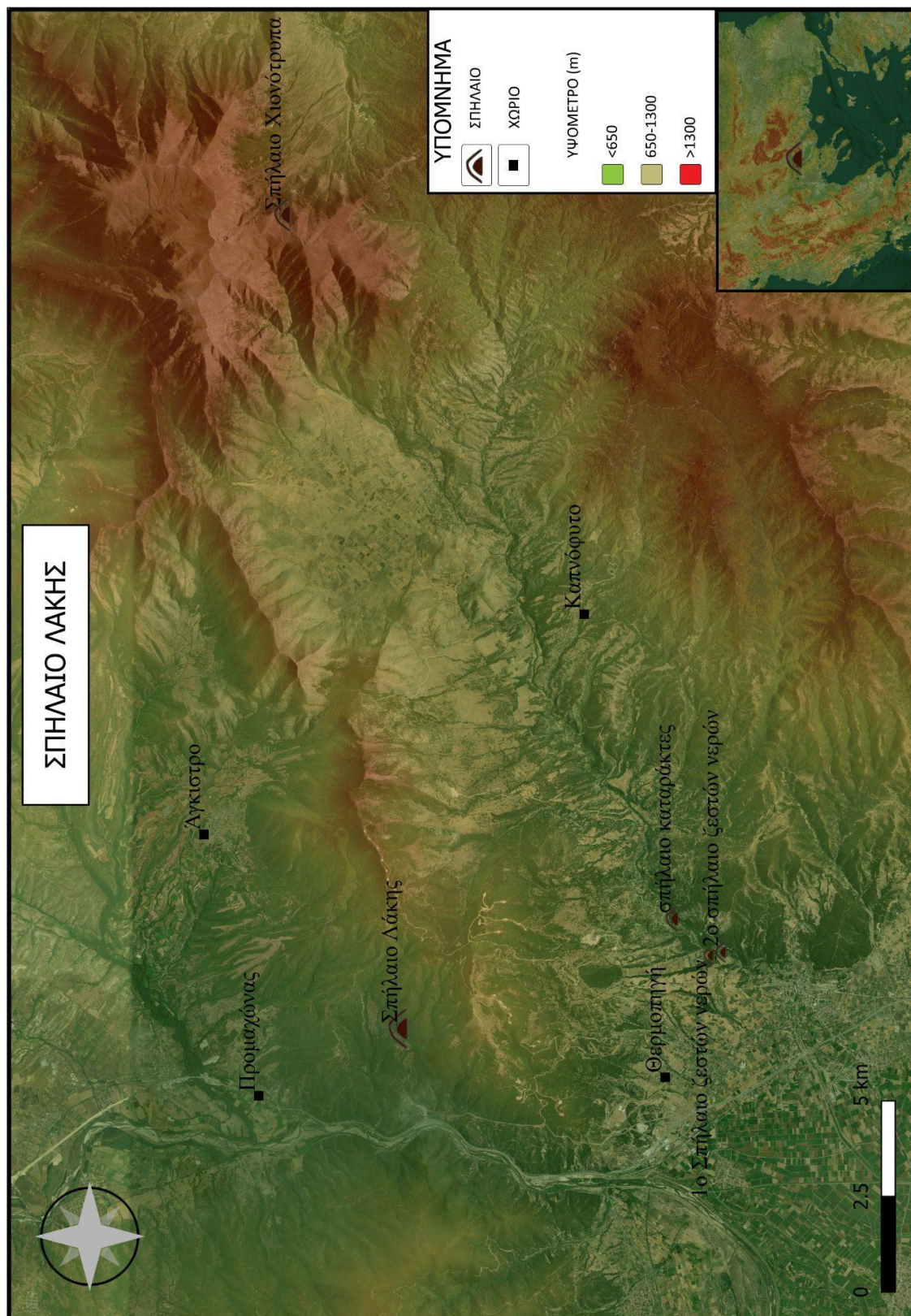


Εικόνα 6. Υδρογραφικός χάρτης της λεκάνης αποστράγγισης του ποταμού Στρυμόνα στον ελληνικό χώρο.

5. ΣΠΗΛΑΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στη περιοχή του δήμου Σιντικής έχει ερευνηθεί μεγάλος αριθμός σπηλαίων, με πληθώρα τρόπων ανάπτυξής τους. Τα σπήλαια που καταγράφηκαν περιλαμβάνονται στο ανατολικό τμήμα του δήμου Σιντικής και εκτείνονται από τα ανατολικά του Στρυμόνα, στη Θερμοπηγή, μέχρι το Καπνόφυτο και στα Βόρεια από τις ορεινές περιοχές του Άγκιστρου και της περιοχής του Ρούπελ (εικόνα 7). Το υπό μελέτη σπήλαιο, το οποίο βρίσκεται 2 χιλιόμετρα ΝΝΑ του Ρούπελ, είναι ένα σχετικά μεγάλο σπήλαιο, που θα αναφέρεται στη συνέχεια ως σπήλαιο του Λάκη. Στην περιοχή επίσης έχουν παρατηρηθεί και μικρότερες σπηλαιομορφές, σχηματισμένες με παρόμοιο τρόπο.

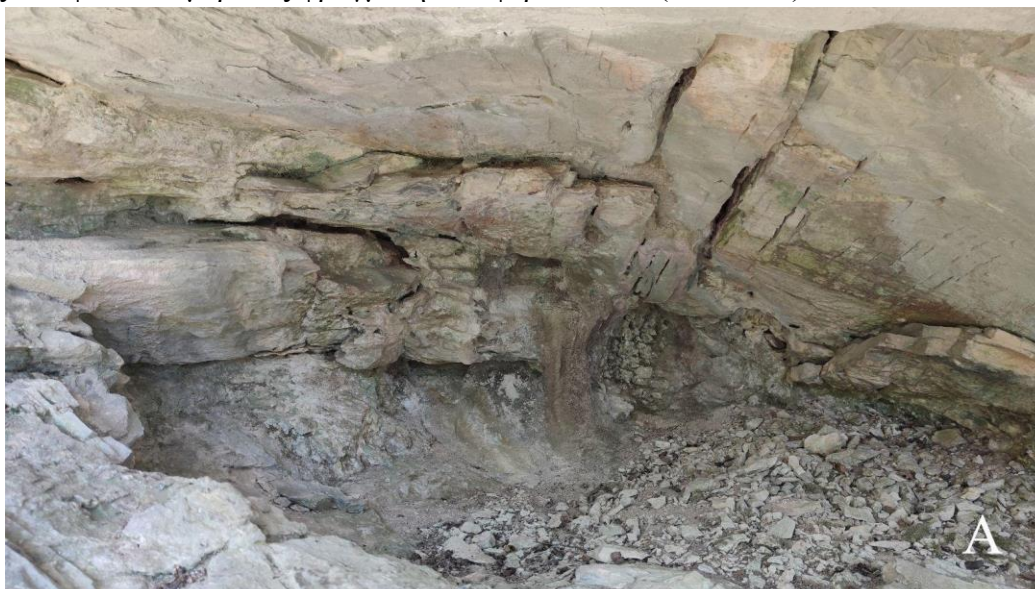
Σύμφωνα με τους Βλασταρίδης και Λαζαρίδης (2013), τα περισσότερα από αυτά φαίνεται ότι συνδέονται με τη λεκάνη του Στρυμόνα εφόσον βρίσκονται στη λεκάνη του Κρουσοβίτη, του δεύτερου μεγαλύτερου παραπόταμου του Στρυμόνα. Μεγάλος αριθμός σπηλαίων έχει αναπτυχθεί κατά μήκος του ποταμού, σε μεγαλύτερο ύψος από την τωρινή στάθμη ροής του ποταμού, γεγονός που προδίδει τα παλαιότερα επίπεδα στάθμης του ποταμού. Μερικά από τα σημαντικότερα σπήλαια που έχουν εξερευνηθεί στη περιοχή αποτελούν οι «Καταρράκτες», το σπήλαιο των «Νυχτερίδων», το «φιλί λιονταριών», «Καλόγερου Μαύρου Βράχου», «Καπνόφυτου» και το «Πνιγμένο» σπήλαιο. Στην περιοχή τα σπήλαια μπορεί να εμφανίζονται σε ομάδες και με παρόμοιους τρόπους ανάπτυξης όπως στη περίπτωση των σπηλαίων «Καταρράκτες» με το «Πνιγμένο» ή απομονωμένα εγκόιλα όπως το σπήλαιο «Λάκης». Στα σπήλαια της περιοχής ξεχωρίζει ο μεγάλος αριθμός φερτών υλικών και ιζηματογενών αποθέσεων, λόγω του καλά ανεπτυγμένου υδρολογικού δικτύου της περιοχής και των συχνών πλημμυρικών φαινομένων σε συνδυασμό με το αναστοματικό και μαιανδρικό πρότυπο του ποταμού. Το έντονο ανάγλυφο στη περιοχή του Ρούπελ επιτρέπει τη δημιουργία τόσο εγκοίλων στη ζώνη κατείσδυσης, όπου η αποσάθρωση συμβαίνει λόγω της κίνησης του νερού της βροχής προς τα κατώτερα στρώματα, όσο και σπήλαια κάτω από το βασικό επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, μονίμως πληρωμένα με νερό. Η πρώτη κατηγορία συναντάται, κατά τους Βλασταρίδης και Λαζαρίδης (2013), στα πιο ορεινά τμήματα, όπως στο Άγκιστρο και τον Όρβηλο. Το βάραθρο «λατομείου Μαύρου Βράχου» αποτελεί παράδειγμα υπογενούς σπηλαίου που δημιουργήθηκε από ανερχόμενα θερμά νερά. Στη περιοχή από το Άγκιστρο μέχρι τη Θερμοπηγή, επικρατούν γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, με θερμοκρασίες 40° C και 33-55° C αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Καρυδάκης κ.α. (2013).



Εικόνα 7. Τοπογραφικός χάρτης περιοχής σπηλαίου μελέτης και γειτονικών σπηλαιομορφών.

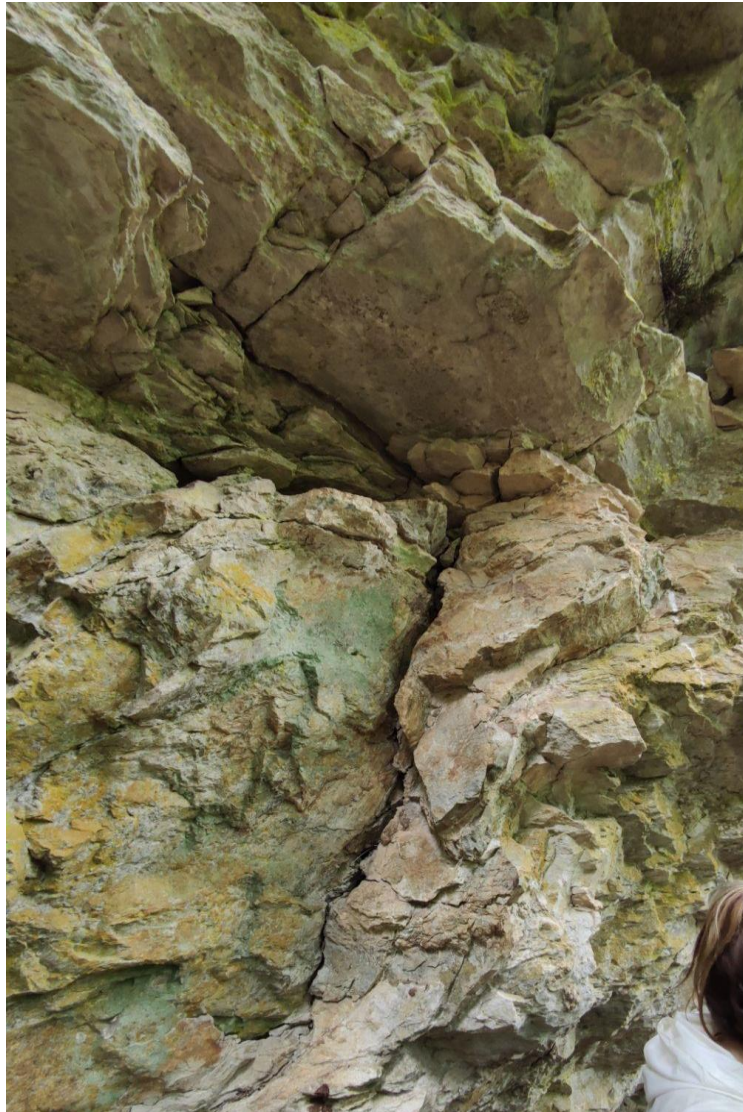
5.1 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΛΥΣΗΣ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

Στη περιοχή του σπηλαίου υπάρχουν επιφανειακές εμφανίσεις μαρμάρων, όπου παρατηρούνται καρστικά φαινόμενα διάβρωσης, με την δημιουργία σπηλαίων. Κάποια από αυτά τα σπήλαια έχουν μορφή βραχοκαταφυγίου (εικόνα 8a) και άλλα αγωγού φραγμένου μερικώς με ιζήματα και οργανικά υλικά (εικόνα 8b & 8c). Στην τελευταία ανήκει και το σπήλαιο «Λάκης», όπου η είσοδος του φαίνεται μερικώς φραγμένη από φερτά υλικά (εικόνα 8c).



Εικόνα 8. A: Έγκοιλο σε επιφανειακές εμφανίσεις ασβεστολίθων. B: Φρεατικοί αγωγοί, σωληνοειδούς μορφής στα μάρμαρα της περιοχής του σπηλαίου του Λάκη. C: Πρόσωση της εισόδου του σπηλαίου του Λάκη, όπου διακρίνονται το μικρό της μέγεθος, το τριγωνικό της σχήμα και η μερική πλήρωση της από κλαστικές αποθέσεις. (Φωτ. Καράμπελας Α.)

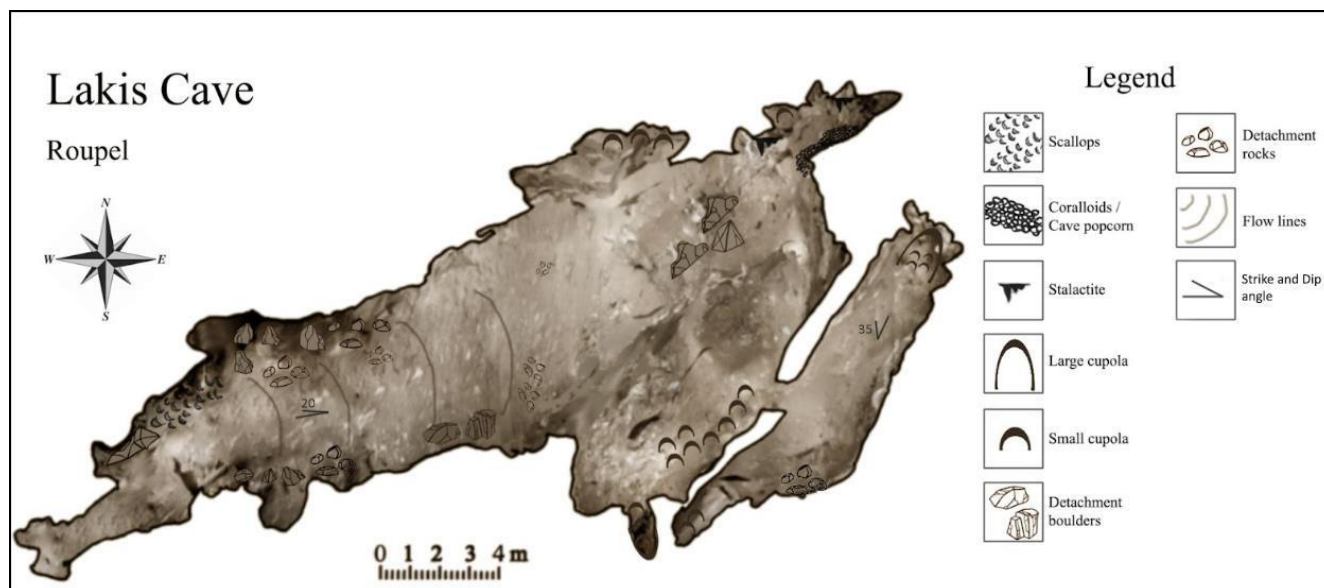
Από τις σπηλαιομορφές που παρατηρήθηκαν στη περιοχή το μεγαλύτερο αποτελεί το σπήλαιο «Λάκης» με είσοδο που βρίσκεται σε υψόμετρο 310 μέτρων σε πρανές με απότομη κλίση περίπου $30^\circ - 40^\circ$. Σε πολλά σημεία δεν υπάρχει έδαφος λόγω του απότομου αναγλύφου και προεξέχουν τα μάρμαρα. Τα μάρμαρα, όπως μπορούν να παρατηρηθούν στην εικόνα 9, χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τον δείκτη γεωλογικής αντοχής βραχομάζας (GSI), κατά Hoek & Brown (1997) ως γενικά καλής δομής με $GSI \approx 60-70$. Αυτό προκύπτει καθώς το πέτρωμα είναι μερικώς διαταραγμένο με κυβικά τεμάχια σχηματισμένα από τη δράση τριών συστημάτων ασυνεχειών, με τις επιφάνειες που δημιουργούν τα επίπεδα ασυνεχειών να είναι τραχειές και ελαφρά αποσαθρωμένες.



Εικόνα 9. Ασβεστολιθικά πετρώματα εξωτερικά του σπηλαίου με γενικά καλή ποιότητα βραχομάζας και με τρεις οικογένειες ασυνεχειών. (Φωτ. Καράμπελας Α.)

Η είσοδος του σπηλαίου βρίσκεται κοντά σε χείμαρρο που δεν φέρει νερό και πιθανόν πλέον να λειτουργεί κατά διαστήματα, σε πλημμυρικά φαινόμενα. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, στο μορφολογικό πρότυπο σε κάτοψη του σπηλαίου (εικόνα 10), η είσοδος του είναι μικρών διαστάσεων (1,5m ύψος, 0,95m διάμετρος) σε σχήμα τριγώνου. Η επιφάνεια που δημιουργείται μπροστά σε αυτή χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ρήγματος με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Το δάπεδο της εισόδου είναι

καλυμμένο από ιζηματογενείς αποθέσεις και δεν είναι διακριτό το πέτρωμα στο κατώτερο τμήμα της. Οι αποθέσεις αυτές συνεχίζουν και εντός του σπηλαίου, καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος του κύριου θαλάμου σχηματίζοντας μορφή αλλουβιακού ριπιδίου.



Εικόνα 10. Κάτοψη σπηλαίου με σκιαγραφημένα τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Το σπήλαιο είναι επίμηκες με ολικό εμβαδόν των θαλάμων του τα 235.15 m², συνολικό μήκος 60 m και μέγιστο ύψος οροφής 7 m. Σύμφωνα με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά (πίνακας 3) κατά Klimchouk (2003) υπολογίστηκε η περίμετρος του σπηλαίου στα 134.678 m και η έκταση του περιλαμβάνεται σε ορθογώνιο παραλληλόγραμμο μεγέθους 33.5 m² μήκος και 14 m πλάτος. Η μέση πυκνότητα του δικτύου διαδρόμων υπολογίστηκε 9.88 %. Παρουσιάζει αρκετά απλή ανάπτυξη περασμάτων, αποτελούμενο από δύο κύριους θαλάμους και τρεις μικρότερους.

Cave Area (m ²)	Cave Length (m)	Cave Perimeter (m)	Area over Perimeter (m)	Areal Coverage (%)	Passage Network Density (%)
235.150	60	134.678	1.746	38.743	9.88

Πίνακας 3. Βασικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά του σπηλαίου, υπολογισμένα σύμφωνα με Klimchouk (2003).

Τόσο στον κεντρικό θάλαμο όσο και στα υπόλοιπα περάσματα παρατηρείται ελλειπτική διατομή, μικρή ανάπτυξη των περασμάτων στον κατακόρυφο άξονα και έλλειψη σπηλαιοθεμάτων. Για τα πρώτα τρία μέτρα, η είσοδος συνεχίζει να έχει τις ίδιες περίπου διαστάσεις με το εξωτερικό της, με μικρή κατηφορική κλίση και έπειτα διευρύνεται για να ακολουθήσει ο πρώτος και μεγαλύτερος θάλαμος του σπηλαίου, με γενική κατεύθυνση ανάπτυξης ΒΑ-ΝΔ. Ο θάλαμος έχει μέγιστο ύψος 7 μέτρα, μήκος σε ευθεία 30 μέτρα και μέση κλίση δαπέδου 15°. Στην εικόνα 11 παρατηρείται πως η κλίση της οροφής έχει ακολουθήσει την βύθιση της σχιστότητας των ανθρακικών πετρωμάτων του σπηλαίου που κλίνουν προς τα ΝΝΑ. Στη οροφή επίσης παρατηρούνται οπές από τις αποκολλήσεις τεμαχών.



Εικόνα 11. Το κύριο πέρασμα μετά την είσοδο του σπηλαίου του Λάκη, που οδηγεί με κλίση προς τα κάτω στον πρώτο μεγάλο θάλαμο. Η διατομή του είναι τριγωνική και στην οροφή παρατηρούνται λιθολογικές αλλαγές. Κάτω δεξιά η προβολή σε δίκτυο Schmidt των ασυνεχειών ως επιφανειακά στοιχεία (Φωτ. Καράμπελας Α.).

Στο βόρειο τμήμα του διαδρόμου της εισόδου προς τον πρώτο θάλαμο, παρατηρήθηκαν ελάχιστα κτενοειδή, μικρού μεγέθους, τα οποία παρουσιάζουν μέγιστη κύρτωση προς τον δυτικό άξονα. Οι επιφάνειες σχιστότητας μετρήθηκαν στο διάδρομο αυτό με μέση διεύθυνση κλίσης και κλίση $S175^{\circ}/55^{\circ}$ (εικόνα 11). Το δάπεδο του θαλάμου είναι καλυμμένο από ιζήματα. Πάνω και πιθανώς μέσα σε αυτά έχουν αποτεθεί μεγάλα τεμάχια κατάρρευσης από την οροφή του σπηλαίου. Σημαντικότερο από αυτά αποτελεί ένας επιμήκης όγκων μαρμάρων, στη ΝΑ πλευρά του θαλάμου, η οποία αποκολλήθηκε από την οροφή (εικόνα 12).



Εικόνα 12. Υπόλειμμα όγκου πετρώματος μετά από κατάρρευση τμήματος του στο κέντρο του κύριου θαλάμου. Η διάλυση ανάμεσα σε αυτόν τον όγκο που παρέμεινε στη θέση του και στην οροφή, προηγείται της κατάρρευσης (Φωτ. Καράμπελας Α.).

Τα περάσματα του σπηλαίου έχουν ημικυκλικές ή ελλειπτικές διατομές και οι ελάχιστοι πιθανοί “αγωγοί τροφοδοσίας” που παρατηρήθηκαν είναι ημικυκλικής διατομής (εικόνα 13). Η γενική ανάπτυξη του σπηλαίου ως προς το βάθος είναι σχετικά μικρή και περιορίζεται περίπου στα 10-20 μέτρα από το τμήμα της εισόδου.



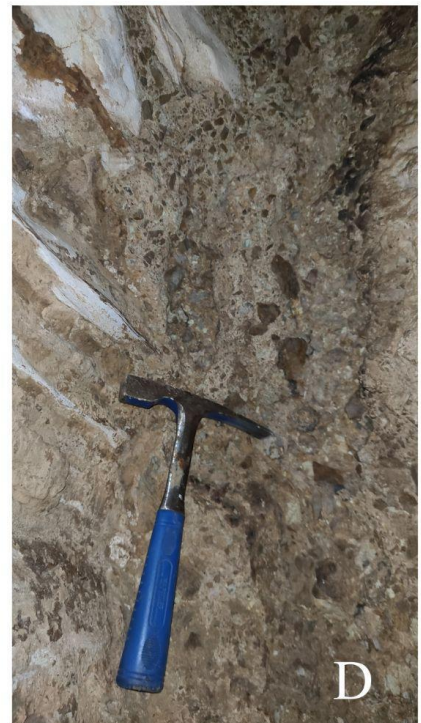
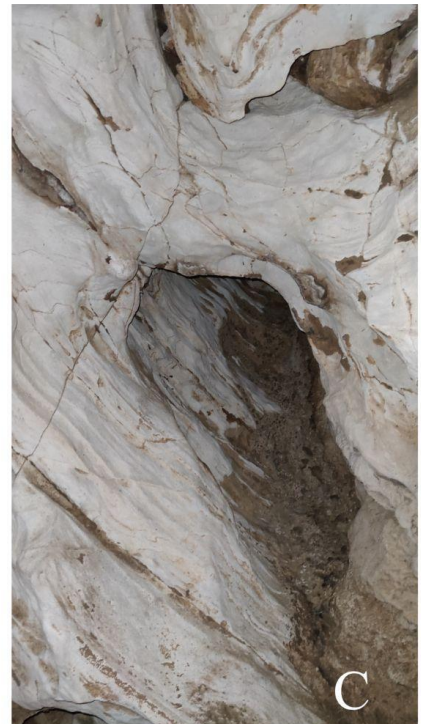
Εικόνα 13. Αγωγός μικρού μεγέθους και ημικυκλικής διατομής στο τοίχωμα του σπηλαίου (Φωτ. Καράμπελας Α.).

Στο ΒΑ τμήμα του πρώτου θαλάμου παρατηρούνται δύο κοιλότητες. Σε αυτή που είναι προσανατολισμένη περισσότερο προς τα ανατολικά εμφανίζεται στήλη που αποτελεί εναπομείναν μητρικό πέτρωμα, από τις διαδικασίες διάβρωσης στο σπήλαιο. Κατά μήκος αυτής, παρατηρήθηκε αποκόλληση (εικόνα 14) του άνω με το κάτω μέλος της.



Εικόνα 14. Στήλη, σε ΒΒΑ κοιλότητα του πρώτου θαλάμου, που φέρει διάτμηση (φωτ. Δώρα Δ.).

Τα cupolas είναι οι μορφές διάλυσης που κυριαρχούν στον χώρο του σπηλαίου με αυτά να βρίσκονται κυρίως στα δυτικά - νοτιοδυτικά του πρώτου θαλάμου αλλά και στις κοιλότητες στα ΒΑ και ΝΑ καθώς και στον δεύτερο θάλαμο, στα νοτιοδυτικά και βορειοανατολικά του άκρα (εικόνα 15e). Η είσοδος στο δεύτερο θάλαμο βρίσκεται στο δυτικό τμήμα του πρώτου και έχει καλυφθεί κατά ένα βαθμό από ιζήματα. Οι δύο χώροι ενώνονται μόνο σε αυτό το σημείο και φαίνεται να διαχωρίζονται από τοίχωμα σχετικά μικρού πάχους, καθώς η ανάπτυξη του δεύτερου θαλάμου έχει γίνει με διεύθυνση ΒΒΑ - ΝΝΔ και υποπαράλληλα σε αυτήν του πρώτου και κύριου θαλάμου (εικόνα 15b). Αυτός ο δεύτερος θάλαμος αποτελεί ένα ανηφορικό πέρασμα προς το βορειότερο του άκρο, όπου καταλήγει σε σχεδόν κατακόρυφο αγωγό. Η κλίση του έχει μέση τιμή 30°. Η διατομή αυτού του περάσματος είναι ελλειπτική και παρουσιάζει ιδιαίτερες μορφές αποθέσεων και αποσάθρωσης τους. Ειδικότερα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 15, το δάπεδο είναι καλυμμένο με μη συμπαγοποιημένες αργίλους και άμμους. Στο βορειοδυτικό τοίχωμα παρατηρείται, σε μεγαλύτερο ύψος από το σημερινό επίπεδο ιζημάτων, μια σκουρόχρωμη γραμμή (εικόνα 15a) παράλληλη με την κλίση του περάσματος, μήκους τριών μέτρων. Στον αγωγό, στο βορειότερο τμήμα του θαλάμου υπάρχουν συμπαγοποιημένες αποθέσεις άμμου με χάλικες και κροκάλες, πάνω στο μητρικό πέτρωμα (εικόνα 15c & 15d), οι οποίες αποτελούν υπολείμματα μιας απόθεσης που έχει διαβρωθεί.



Εικόνα 15. Α: Ίχνος σε τοίχωμα που υποδηλώνει παλαιότερο επίπεδο ιζημάτων τα οποία διαβρώθηκαν στη συνέχεια. Β: Παρατήρηση της φρεατικής δομής του του δεύτερου θαλάμου από το βόρειο τμήμα του, στη θέση του κατακόρυφου αγωγού. C & D: Συμπαγή ιζήματα σε κατακόρυφο αγωγό που έχουν υποστεί διάβρωση. Ε: Κάτοψη σχεδόν κατακόρυφου, ελλειπτικού σε διατομή, θόλου με μεγάλη ανάπτυξη του στον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με τον οριζόντιο, στον δεύτερο θάλαμο (Φωτ. Καράμπελας Α.).

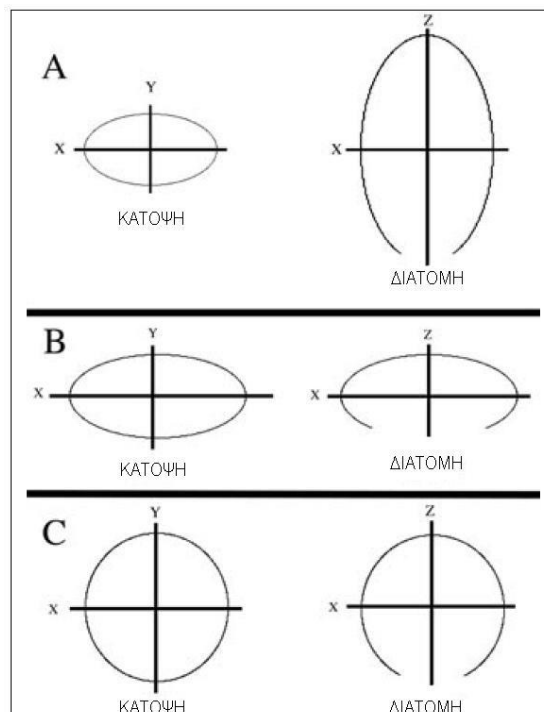
5.1.1 ΘΟΛΟΙ

Στην οροφή του ΝΑ τμήματος του πρώτου θαλάμου, καθώς και του ΒΑ και ΝΑ τμήματος του δεύτερου θαλάμου, παρατηρούνται ιδιαίτερες μορφές διάλυσης σε μορφή θόλων, γνωστές με τον διεθνή όρο "cupolas". Ο Osborne (2004) συνδέει αυτές τις μορφές διάλυσης με διάφορους τρόπους δημιουργίας και σύμφωνα με τη μορφή τους διακρίνονται σε ελλειπτικούς, σε ημισφαιρικούς και κωνικούς θόλους, σε σφαιρικές κόγχες και μορφές που προσομοιάζουν οροφές καθεδρικού ναού. Οι θόλοι, ανάλογα με την σχέση πλάτους και μήκους τους, χωρίζονται σε τρεις κύριες ομάδες. Αυτές είναι οι ελλειπτικοί θόλοι, οι θόλοι τύπου καθεδρικού ναού και οι σφαιρικοί θόλοι. Οι σφαιρικοί θόλοι έχουν διάμετρο που δεν ξεπερνά τα 1,5 m ενώ οι καθεδρικού τύπου ξεχωρίζουν καθώς είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους ελλειπτικούς ή ημισφαιρικούς, με μεγέθη που μπορεί να καλύπτουν και ολόκληρη την οροφή του σπηλαίου.

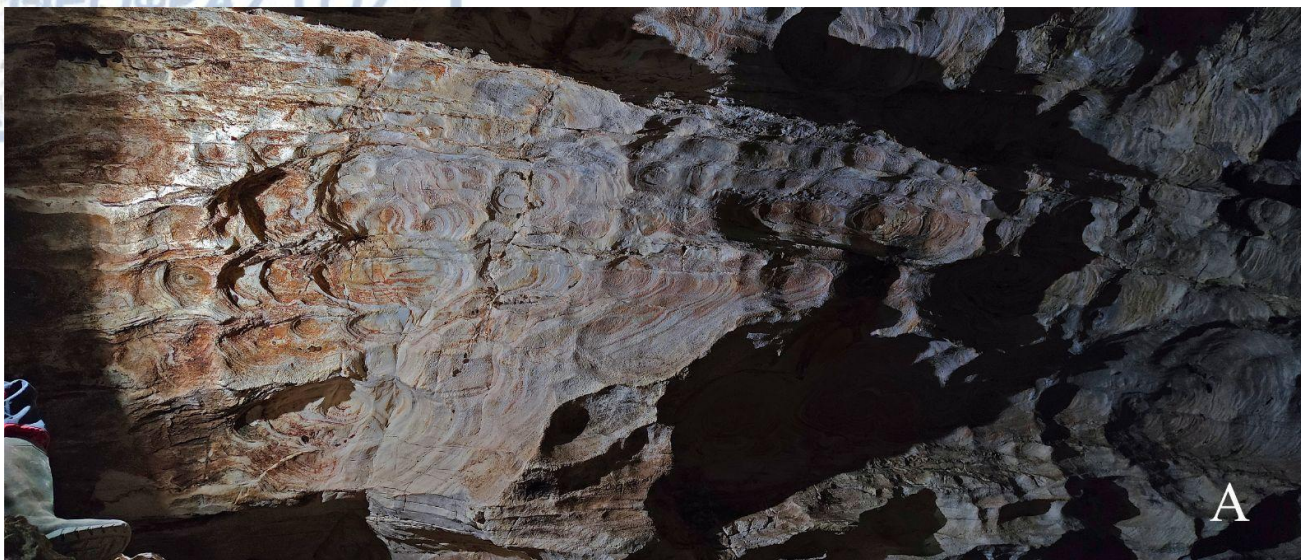
Για την ομαδοποίηση και καταγραφή των θόλων πάρθηκαν μετρήσεις μήκους (άξονας x), πλάτους (άξονας y) καθώς και του βάθους τους (άξονας z) όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Οι άξονες μήκους και πλάτους μετρήθηκαν με τοποθέτηση του x άξονα παράλληλα με τον μεγαλύτερο άξονα ανάπτυξης αυτών των μορφών και ο y άξονας κάθετα σε αυτόν. Παρακάτω (εικόνα 17) παρουσιάζονται οι διαφορές στο σχήμα των διαφόρων μορφών θόλων με τις ονομασίες κάθε τύπου όπως καθορίστηκαν από τον Osborne (2004). Οι θόλοι που μελετήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες βάσει των διαστάσεων και άλλων τους χαρακτηριστικών. Τη πρώτη ομάδα αποτελούν οι θόλοι του πρώτου θαλάμου οι οποίοι εμφανίζονται πολυάριθμοι, με μικρότερο μέγεθος, λιγότερο κοίλοι και με σχετικά επίπεδο το ανώτερο τους τμήμα, όπως παρατηρείται στην εικόνα 18 A&B, από αυτά του δεύτερου θαλάμου. Τα τοιχώματα των θόλων της πρώτης ομάδας είναι πιο τραχιά (εικόνα 18C). Οι θόλοι στα ΝΑ του πρώτου θαλάμου (εικόνες 19 A&B) και αυτοί που βρίσκονται στο δεύτερο θάλαμο (εικόνα 19C) αποτελούν μια άλλη ομάδα αφού είναι πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων, λιγότεροι σε αριθμό και διαφορετικής δομής αφού προσομοιάζουν σε σχήμα ποτηριού σαμπάνιας με πιο επιμήκη τον κατακόρυφο άξονα. Με βάση τις αναλογίες των διαστάσεων τους οι θόλοι παρουσιάζονται στο διάγραμμα διασποράς της εικόνας 20.



Εικόνα 16. Προβολή αξόνων μέτρησης των θόλων. Χρήση ψηφιακού πλέγματος για προσεγγιστική απόδοση βάθους κοιλότητας. Θόλοι από την οροφή του πρώτου θαλάμου (τροποποιημένο από Δώρα. Δ.).



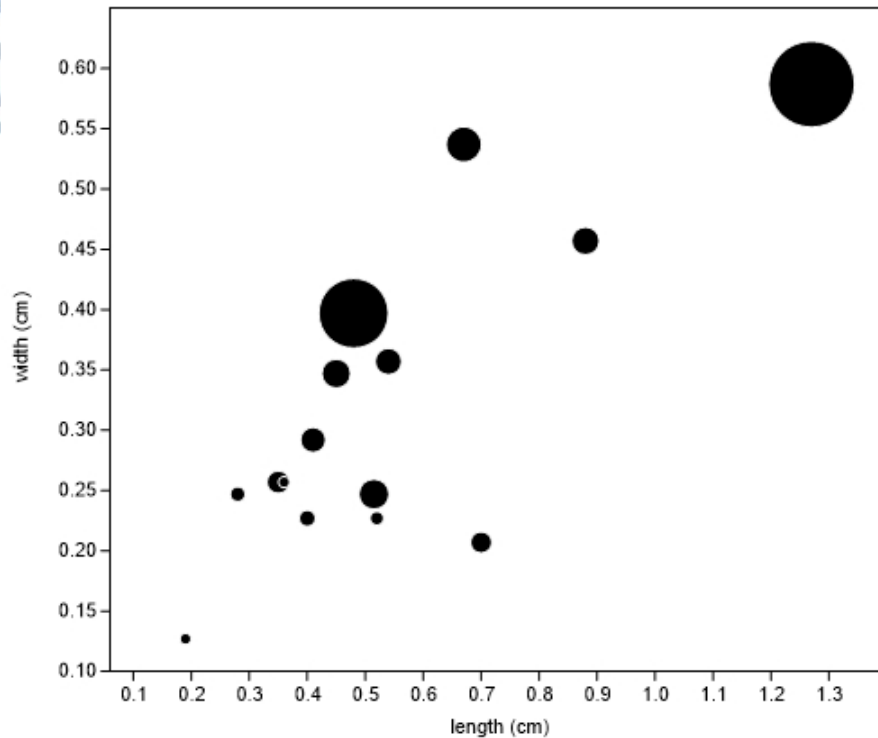
Εικόνα 17. Σχηματική σύγκριση των ελλειψοειδών θόλων με τους τύπου καθεδρικού ναού και τους σφαιρικούς θόλους (τροποποιημένο από Osborne, 2004). A: Ελλειπτικός θόλος με $X > Y$, $Z \geq X$. Αυτού του τύπου οι θόλοι με μεγάλη ανάπτυξη ως προς τον κατακόρυφο άξονα παρομοιάζονται από τον Osborne (2004) με τη μορφή ποτηριού σαμπάνιας. B: θόλος τύπου καθεδρικού ναού με $X > Y$, $Z \geq Y$. C: Ημισφαιρικός θόλος με $X = Y = Z$.



Εικόνα 18. Ελλειπτικές μορφές θόλων του σπηλαιίου «Λάκης» στα ΝΑ του πρώτου θαλάμου. Χαρακτηριστικό των κοιλοτήτων του πρώτου θαλάμου είναι η μικρή ανάπτυξη ως προς το κατακόρυφο άξονα και η παρουσία αναβαθμίδων, αντί για λείες κοιλότητες (Φωτ. Καράμπελας Α.).



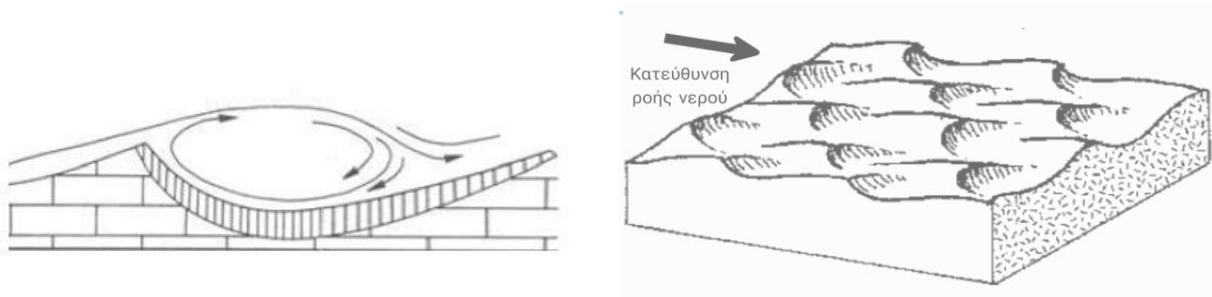
Εικόνα 19. Επιμήκεις ελλειπτικές μορφές θόλων με μεγάλη ανάπτυξη του κατακόρυφου άξονα σε σχέση με τον οριζόντιο, σε σχήμα ποτηριού σαμπάνιας (Φωτ. Καράμπελας Α.).



Εικόνα 20. Διάγραμμα διασποράς των θόλων του σπηλαίου του Λάκη με βάση τις διαστάσεις του (Lazaridis *et al.*, 2022). Η τρίτη διάσταση, του βάθους είναι ανάλογη της διαμέτρου των συμβόλων. Οι κλίμακες είναι σε μέτρα.

5.1.2 ΚΤΕΝΟΕΙΔΗ (Scallops)

Σύμφωνα με τον Bögli (1978) τα "scallops" αποτελούν μορφές διάλυσης του πετρώματος του σπηλαίου από τη δράση του νερού, το οποίο κινείται με στροβιλώδη ροή. Τα εξωτερικά τοιχώματα έχουν ήδη μειωμένη συνοχή σε σύγκριση με τα πιο εσωτερικά μέρη του πετρώματος λόγω της επαφής τους με το υδάτινο στοιχείο και τη διάλυση τους από αυτό. Έτσι με την τυρβώδη ροή του νερού και τη διάλυση, δημιουργούνται ασύμμετρες μορφές σε σχήμα κουταλιού (εικόνα 21), με τη καμπύλη να είναι απότομη στη αρχή και να γίνεται πιο ήπια προς τη κατεύθυνση ροής του νερού.



Εικόνα 21. Απεικόνιση ροής νερού στο εσωτερικό των ασύμμετρων κτενοειδών με την πιο απότομη πλευρά προς την κατεύθυνση ροής του νερού (τροποποιημένο από Blumberg (1970), τροποποιημένο από Bögli (1978)).

Κατά τον Bögli (1978), το σχήμα και το μέγεθος των κτενοειδών μορφών (scallops) των τοιχωμάτων ποικίλει από 5-25cm και εξαρτάται από παράγοντες όπως η λιθολογική σύσταση του πετρώματος, η διαλυτική ικανότητα του νερού, ο βαθμός κορεσμού του σε διαλυμένα συστατικά, που αυξάνει το ιξώδες του και η ταχύτητα ροής του. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του νερού, τόσο πιο ταχεία η διάλυση και πιο τυρβώδης η ροή του νερού με αποτέλεσμα τα κτενοειδή που δημιουργούνται να έχουν μικρότερο μήκος και μεγαλύτερο βάθος από αυτά που δημιουργούνται σε πιο ήσυχες συνθήκες ροής νερού. Άρα η παρουσία αυτών των μορφών διάλυσης είναι δείκτης για το υδρολογικό δυναμικό στα σπήλαια και τα περάσματα τους. Γενικώς η ύπαρξη τους σχετίζεται περισσότερο με συνθήκες ζώνης κατείσδυσης ή επιφρεατικής ζώνης ή ρηχής φρεατικής ζώνης.



Εικόνα 22. Παρατήρηση των ελάχιστων κτενοειδών που βρέθηκαν κοντά στην είσοδο, στο ΒΔ τοίχωμα του πρώτου θαλάμου με προσανατολισμό των λιγότερο κυρτών τους τμημάτων προς τα ανατολικά. (Φωτ. Καραμπελας Α.)

Στον πρώτο θάλαμο του σπηλαίου, με κατεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ, κατά μήκος του ΒΔ ανθρακικού τοιχώματος, παρατηρούνται κτενοειδή με μέγεθος 6-7cm (εικόνα 22). Τα κτενοειδή παρατηρούνται σε πολύ μικρό αριθμό και μόνο στο βόρειο τοίχωμα με την απουσία τους στα νότια τοιχώματα του σπηλαίου. Τα κτενοειδή μετρήθηκαν από το πιο κυρτό τους τμήμα μέχρι την αρχή του επόμενου με χρήση μεζούρας ενώ η θέση εμφάνισής τους φωτογραφήθηκε.

5.2 ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΠΗΛΑΙΟΥ

5.2.1 ΣΠΗΛΑΙΟΘΕΜΑΤΑ

Το σπήλαιο χαρακτηρίζεται, ως επί το πλείστον, από την απουσία σπηλαιοθεμάτων. Εξαίρεση αποτελεί η ΒΑ πλευρά του κυρίου θαλάμου, όπου παρατηρούνται ελάχιστοι σταλακτίτες μικρού μεγέθους και σπηλαιοθέματα κοραλλοειδούς μορφής στα τοιχώματα και στο πάτωμα της ΝΑ πλευράς της εσοχής, στο ΒΑ τμήμα του πρώτου θαλάμου.

ΚΟΡΑΛΛΟΕΙΔΗ

Τα κοραλλοειδή είναι μικρού μεγέθους σπηλαιοθέματα, συνήθως στα τοιχώματα των θαλάμων με μέγεθος μερικών χιλιοστών που δεν ξεπερνά τα δύο εκατοστά. Σύμφωνα με τους Hill & Forti (1997) εμφανίζονται σε μεγάλους αριθμούς, με μορφή βοτρυοειδών συσσωμάτων ή με ακανόνιστο σχήμα σφαιρών. Επίσης, παρουσιάζουν συγκεντρικές επιφλοιώσεις. Η εμφάνιση τους συνδέεται με τη δράση τρεχούμενου νερού ή την υποβύθιση τους σε νερό με μικρή ταχύτητα ροής. Η ανάπτυξη των κοραλλοειδών μπορεί να επηρεάζεται από την τριχοειδή ροή. Ο τρόπος σχηματισμού αυτών των σπηλαιοθεμάτων, σύμφωνα με τους Hill & Forti (1997), δεν έχει εξακριβωθεί ακόμα πλήρως και υπάρχουν τρεις θεωρίες για τον τρόπο σχηματισμού τους. Μπορούν να σχηματιστούν είτε με εξάτμιση, είτε από νερό που στάζει πάνω στην επιφάνεια, είτε υποβρυχίως με απόθεση ασβεστίτη. Καθώς τα τοιχώματα του σπηλαίου είναι πιο υγρά και κρύα σε σχέση με τον αέρα, εξατμίζεται το κορεσμένο νερό, πλούσιο σε ασβεστίτικά συστατικά, αφήνοντας πίσω κρυστάλλους καθαρού ασβεστίτη. Η διαδικασία εντείνεται εάν υπάρχει κάποιο ρεύμα αέρα που να τον ανακυκλώνει από άνοιγμα του σπηλαίου. Τότε τα κοραλλοειδή αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση των ρευμάτων αέρα που εισέρχονται στη σπηλιά. Ένας άλλος τρόπος σχετίζεται με τη δράση του νερού, καθώς αυτό στάζει από την οροφή ή ανώτερα σημεία των τοιχωμάτων που προεξέχουν, το πιτσίλισμα οδηγεί στην απόθεση ασβεστίτη. Τέλος, ο τρόπος δημιουργίας τους μπορεί να περιλαμβάνει σχηματισμό κάτω από την επιφάνεια του νερού σε θέσεις που αυτό κατακλύζει τους θαλάμους. Εκεί διαδοχικές επιφλοιώσεις αυξάνουν τον όγκο των κοραλλοειδών.

Τα κοραλλοειδή παρατηρούνται σε κοιλότητα στα ΒΑ του πρώτου θαλάμου και καλύπτουν μέρος της βάσης του ανατολικού τοιχώματος. Η ανάπτυξη τους περιορίζεται στην βάση του τοιχώματος και μειώνεται με το ύψος. Παρουσιάζονται πολυάριθμα, με μορφή βοτρυοειδών και συσσωματωμάτων σε μεγέθη μερικών χιλιοστών όπως φαίνεται στην εικόνα 23. Για τη μελέτη τους φωτογραφήθηκαν οι θέσεις που βρίσκονται.



Εικόνα 23. Κοραλλοειδή σε συσσωματώματα, στο κάτω μέρος τοιχώματος του δυτικού θαλάμου (Φωτ. Καράμπελας Α.).

ΣΤΑΛΑΚΤΙΤΕΣ

Σταλακτίτες μικρού μεγέθους παρατηρούνται στο ΒΑ κοίλωμα του πρώτου θαλάμου. Ο αριθμός των σταλακτιτών είναι πολύ μικρός σε αυτή τη θέση και γενικώς απουσιάζουν ως σπηλαιοθέματα σε αυτό το σπήλαιο. Οι σταλακτίτες σχηματίζονται μέσα από μία διαδικασία χημικής καθίζησης και αναπτύσσονται από την οροφή του σπηλαίου προς το δάπεδο. Ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι εξαιρετικά αργός και μπορεί να διαρκέσει εκατοντάδες χρόνια. Όλοι οι σταλακτίτες ξεκινούν τη δημιουργία τους ως κυλινδρικά σχήματα με κοίλο εσωτερικό, σε σχήμα που παρομοιάζεται από την Hill (1987) ως «καλαμάκι» (Soda straw). Κατά την Hill (1987) η ανάπτυξή τους αρχίζει καθώς το νερό της βροχής που εισέρχεται μέσω των ρωγμών, μέσα στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που αποτελούν το σπήλαιο, διαλύει το περιβάλλον πέτρωμα και έτσι εμπλουτίζεται με ανθρακικό ασβέστιο και διοξείδιο του άνθρακα. Οι σταγόνες νερού, οι οποίες είναι κορεσμένες σε ανθρακικό ασβέστιο και διοξείδιο του άνθρακα, συλλέγονται σε τμήματα της οροφής. Καθώς οι σταγόνες συγκεντρώνονται σε ακμές ή μέρη συνένωσης θαλάμων και το διοξείδιο του άνθρακα χάνεται, παραμένει ένα λεπτό στρώμα ανθρακικού υλικού πάνω στις σταγόνες. Στη συνέχεια όσο αυξάνεται ο ρυθμός συγκέντρωσης των σταγόνων, αυξάνεται και το βάρος τους με συνέπεια να αρχίσουν να ταλαντεύονται λίγο πριν χαθούν οι δυνάμεις συνοχής τους και υπάρξει η ελεύθερη πτώση τους. Αυτή η ταλάντευση περιστρέφει τις στρώσεις του ασβεστιτικού υλικού στις σταγόνες προς την οροφή και το ασβεστιτικό υλικό προσκολλάται σε αυτήν λόγω επιφανειακής τάσης ως μια μάζα κυκλικής διατομής. Αυτός είναι ο πυρήνας του σταλακτίτη. Με τη συνεχόμενη επανάληψη αυτής της διαδικασίας αυξάνεται μόνο το μήκος του σταλακτίτη και δημιουργείται ο σταλακτίτης σε σχήμα «καλαμάκι». Εάν το κοίλο εσωτερικό μέρος φραχθεί από υλικά το νερό ρέει

εξωτερικά του σταλακτίτη αυξάνοντας το πλάτος του και δίνοντας του το γνωστό σχήμα σταλακτίτη που από την Hill (1987) παρομοιάζεται με «καρότο». Οι επιστήμονες απέδειξαν ότι το σχήμα των σταλακτιτών είναι μαθηματικά προβλέψιμο και ότι στη πραγματικότητα όλοι έχουν το ίδιο σχήμα αλλά ποικίλει το μέγεθός τους.

5. 2. 2 ΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ

Οι ιζηματογενείς αποθέσεις εντός των σπηλαίων αποτελούν από τους σημαντικότερους δείκτες για μελέτη των συνθηκών γένεσης του σπηλαίου, ανάπτυξής του και το υδροδυναμικό καθεστώς που επικράτησε. Αυτό συμβαίνει καθώς οποιεσδήποτε διαφορές στις περιβαλλοντικές συνθήκες, στο κλίμα, στην κλίση και διάμετρο των περασμάτων, στη λιθολογία των πετρωμάτων του σπηλαίου και στη ροή του νερού επηρεάζουν την μεταφορική ικανότητα κόκκων του νερού, την ένταση και τον τρόπο με τον οποίο το νερό διαβρώνει τα περάσματα και εναποθέτει νέα ιζήματα, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα υδρολογικά συστήματα στην επιφάνεια της γης. Τα ιζήματα που παρατηρούνται χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τη προέλευση και τον τρόπο απόθεσης τους οι οποίες παρατηρούνται στους διαδρόμους αυτού του σπηλαίου.

Το δάπεδο του σπηλαίου και στους δύο διαδρόμους, είναι καλυμμένο με ιζηματογενείς αποθέσεις που προέρχονται είτε από απόθεση υλικών αποσάθρωσης του σπηλαίου, είτε αλλόχθονων υλικών που εισήλθαν στα σπήλαιο μέσω της κύριας εισόδου, είτε αποτελούν προϊόντα κατάρρευσης των τοιχωμάτων και της οροφής του. Τα υλικά τα οποία αποτέθηκαν πριν το στάδιο της κατάρρευσης ογκόλιθων της οροφής αποτελούν παράλληλες εναλλαγές αργιλικών και ψαμμιτικών στρωμάτων με διακριτά, μεταξύ τους, όρια (εικόνα 24). Κάθε στρώμα υλικών χαρακτηρίζει μια περίοδο με συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτά τα υλικά είναι συνδυασμός αυτόχθονων ασβεστιτικών υλικών, από τις διαδικασίες διάβρωσης των τοιχωμάτων ή και της οροφής των περασμάτων κατά τη διεύρυνση του σπηλαίου, μαζί με μη ασβεστιτικά υλικά που προϋπήρχαν στα τοιχώματα ή που συμπαρασύρθηκαν από τα ανώτερα στρώματα. Τα λεπτόκοκκα αυτά υλικά βρίσκονται σε αιώρηση μέσα στο κορεσμένο νερό και κατακάθονται σε στρώματα παράλληλα με το υλικό της βάσης του σπηλαίου όταν το δυναμικό καθεστώς του νερού μειωθεί σε βαθμό ώστε να σταματήσουν οι μεγαλύτερης διαμέτρου κόκκοι την αναπήδηση και τα πιο λεπτόκοκκα υλικά την αιώρηση. Τα αυτόχθονα αυτά ιζήματα αναμειγνύονται πολλές φορές με αλλόχθονα υλικά που συμπαρασύρονται από το νερό και καταλήγουν εντός του σπηλαίου. Βάσει της σύστασης των ιζημάτων μπορούν εύκολα να διακριθούν σε αυτά που προέρχονται από το εσωτερικό του σπηλαίου και σε αυτά που ανήκουν στο γειτονικό περιβάλλον καθώς τα δεύτερα αποτελούν τις περισσότερες φορές δυσδιάλυτα πυριτικά ορυκτά όπως χαλαζίας, άστριοι ή μαρμαρυγίες που διαφέρουν πολύ από τα ευδιάλυτα ασβεστιτικά ιζήματα του καρστικού περιβάλλοντος. Τα ιζήματα αυτά είναι εξαιρετικοί δείκτες για μεγάλες αλλαγές στις συνθήκες ανάπτυξης των σπηλαίων και γενικότερα για κλιματικές και γεωμορφολογικές αλλαγές της περιοχής. Για παράδειγμα, μια περίοδος αυξημένων βροχοπτώσεων πιθανόν να οδηγήσει σε πλημμυρικά φαινόμενα μέσα στο σπήλαιο, πράγμα το οποίο θα φανερωθεί με την ύπαρξη αυξημένων αποθέσεων από αλλόχθονα υλικά.



Εικόνα 24. Απεικόνιση των ιζηματογενών στρωμάτων από τη διάβρωση υλικών του σπηλαίου. Βρίσκονται σε παράλληλες εναλλαγές λεπτόκοκκων με τα πιο αδρόκοκκα υλικά και υπερκείμενα έχουν καλυφθεί από υλικά κατάπτωσης από την οροφή. Η παρατήρηση γίνεται σε κοιλότητα στο ανατολικό κομμάτι του πρώτου θαλάμου (Φωτ. Καράμπελας Α.).

Πάνω από αυτά τα υλικά του πρώτου θαλάμου έχουν αποτεθεί αλλούβια υλικά (εικόνα 25) τα οποία πιθανόν εισήλθαν με τη δράση του νερού από τη κύρια είσοδο του σπηλαίου και αποτέθηκαν πάνω στα αρχικά στρώματα της διάβρωσης και πλάτυνσης του σπηλαίου. Καθώς η είσοδος του σπηλαίου συνδεόταν με κάποιο ρέμα ή χείμαρρο που συμπαρέσυρε υλικά από την πλαγιά, με αναπήδηση ή αιώρηση τους μέσα σε αυτό, γέμιζε το εσωτερικό του σπηλαίου με υλικά από γειτονικές περιοχές.

Σε μεταγενέστερο χρόνο υπήρξε αποκόλληση μεγάλων τεμαχών από την οροφή τα οποία αποτέθηκαν υπερκείμενα των υπολοίπων ιζημάτων (εικόνα 26), είτε κατακόρυφα του σημείου αποκόλλησης τους λόγω ελεύθερης πτώσης και *in situ* απόθεσης λόγω του μεγάλου βάρους τους, είτε ελαφρώς μετατοπισμένα λόγω ολίσθησης ή κύλισης τους. Οι όγκοι ασβεστιτικής κυρίως σύστασης ήταν προφανώς εξασθενημένοι από τη διάβρωση του νερού το οποίο διεύρυνε τις ασυνέχειες μείωσε τη γενική συνοχή του πετρώματος. Οι δυνάμεις της βαρύτητας και τεκτονικές δράσεις μαζί με ρήγματα συντέλεσαν στη τελική αποκόλληση τους.



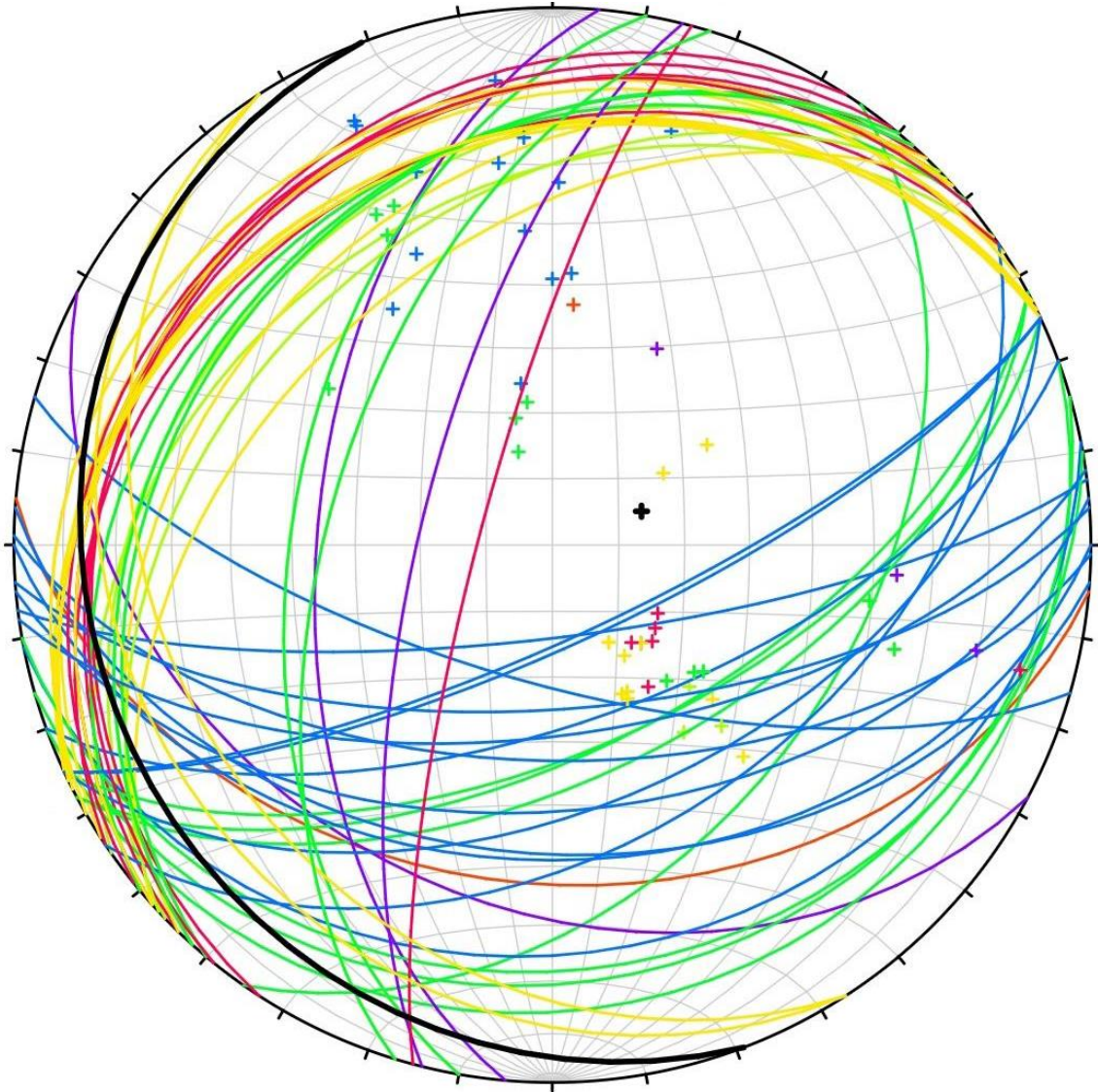
Εικόνα 25. Παρουσίαση της εισχώρησης των αλλουβιακών αποθέσεων (σκιαγραφημένη περιοχή) που εισήλθαν από την κύρια είσοδο προς το εσωτερικό του σπηλαίου. Η θέση παρατήρησης βρίσκεται στα πρώτα 15 μέτρα από την είσοδο (Φωτ. Δώρα Δ.).



Εικόνα 26. Παρατήρηση των ογκολίθων από κατάπτωση τεμάχων της οροφής οι οποίοι παρουσιάζονται σκιαγραφημένοι με μπλε χρώμα. Εμφανείς είναι οι αρχικές θέσεις των επικολληθέντων τεμαχών από κοιλότητες στην οροφή (Φωτ. Καράμπελας Α.).

5.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ ΛΑΚΗΣ

Από μετρήσεις που έγιναν στα μάρμαρα, στο εξωτερικό τμήμα του σπηλαίου, στην επιφάνεια που συμπίπτει με την είσοδο του σπηλαίου, παρατηρούνται δύο κύρια συστήματα διακλάσεων και το επίπεδο φολίδωσης των μαρμάρων. Από μετρήσεις εντός του σπηλαίου παρατηρούνται διακλάσεις με παρόμοια στοιχεία που συμπίπτουν στις δύο ομάδες, όπως το ρήγμα της στήλης στον πρώτο θάλαμο.



Εικόνα 27. Στερεοδιάγραμμα Schmidt με προβολή μετρήσεων των βασικών επιφανειακών στοιχείων εξωτερικά και εσωτερικά του σπηλαίου. Με μπλε χρώμα ορίζονται οι διακλάσεις με μεγάλες κλίσεις, με κόκκινο οι διακλάσεις με μικρές κλίσεις, με κίτρινο σημειώθηκαν οι μετρήσεις των επιπέδων φολίδωσης και με σκούρο και ανοιχτό πράσινο οι διακλάσεις από μετρήσεις εντός του σπηλαίου. Με μαύρο απεικονίζεται το μέσο επιφανειακό στοιχείο που προκύπτει από όλες τις παραπάνω ομάδες.

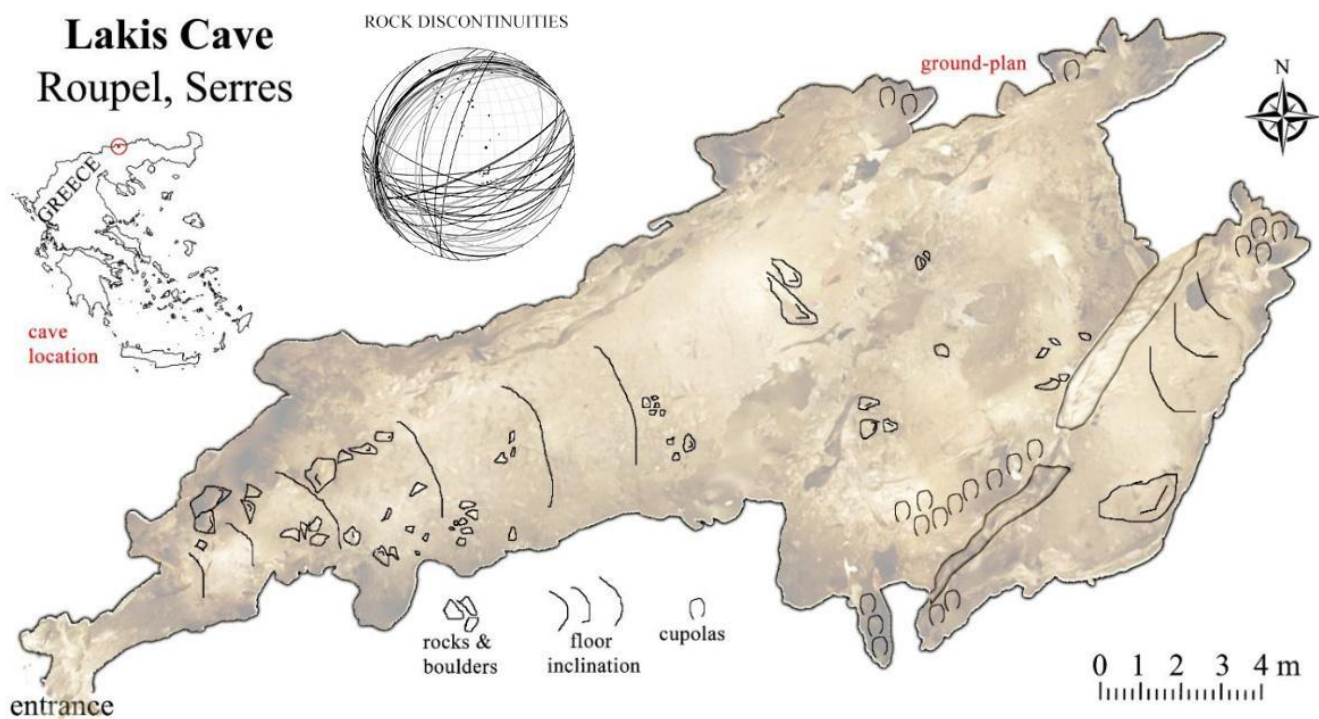
Μετρήσεις εξωτερικά του σπηλαίου		Μετρήσεις εντός και εκτός σπηλαίου	Μετρήσεις εσωτερικά του σπηλαίου	
A ομάδα ασυνεχειών	B ομάδα ασυνεχειών	Φολίδωση Μαρμάρων	Γ ομάδα ασυνεχειών	Δ ομάδα ασυνεχειών
J 285/79	J 155/76	S 318/20	J 312/29	J 152/59
J 314/21	J 146/44	S 330/17	J 310/30	J 125/42
J 318/20	J 175/49	S 335/25	J 320/27	J 170/22
J 326/26	J 196/69	S 334/26	J 280/50	J 160/15
J 309/20	J 155/75	S 333/25	J 287/56	J 164/20
J 303/19	J 155/50	S 237/20	J 316/30	J 155/59
J 321/19	J 181/57	S 318/44	J 325/35	J 152/55
	J 176/65	S 314/34	J 317/38	
	J 184/42	S 327/20		
	J 169/25			
	J 172/61			
	J 160/63			
	J 180/41			
	J 173/76			

Πίνακας 4. Ομαδοποιημένες μετρήσεις των βασικών τεκτονικών στοιχείων από τον εξωτερικό και εσωτερικό χώρο του σπηλαίου. (Σχιστότητα-S, Διάκλαση-J)

Οι δύο ομάδες απεικονίζονται με μπλε και κόκκινο χρώμα όπως φαίνεται στο στερεοδιάγραμμα Schmidt, με μέση τιμή των ασυνεχειών μεγάλης γωνίας J-173°/56° με βύθιση προς τα ΒΒΔ και των ασυνεχειών μικρής γωνίας με J-315°/21° με βύθιση προς τα ΝΑ. Αυτές οι δύο ομάδες συναντώνται κατά μήκους όλου του μπροστινού τμήματος της εισόδου και συνεχίζονται στο βορειοανατολικό κομμάτι του σπηλαίου. Η φολίδωση των μαρμάρων μετρήθηκε ως S-316°/26° και βυθίζεται προς τα ΝΝΑ.

7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αυτή η εργασία είχε ως στόχους της την υπαίθρια εργασία στην ημιορεινή περιοχή στα νοτιοανατολικά του Ρούπελ, μια πρώτη χαρτογράφηση του σπηλαίου του Λάκη και αποτύπωση των μορφολογικών χαρακτηριστικών που συναντήθηκαν σε αυτό καθώς και τη μετέπειτα μελέτη των παρατηρήσεων και πορισμάτων που αναφέρθηκαν πρώτα από τους Lazaridis *et al.* (2022). Η χαρτογράφηση του σπηλαίου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις πρότυπες διαδικασίες χαρτογράφησης ως προς τη δημιουργία του τελικού πρότυπου κάτοψης που παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 31. Κάτοψη μορφολογικού προτύπου του σπηλαίου με σχετική θέση του στον ελληνικό χώρο και στερεοδιάγραμμα Schmidt με καταγεγραμμένες όλες τις μετρήσεις ασυνεχειών (Lazaridis *et al.*, 2022).

Το σπήλαιο όπως φαίνεται στη μορφολογική του κάτοψη είναι αρκετά απλό στη δομή των θαλάμων με αυτούς να είναι δύο επιμήκη περάσματα που ενώνονται μέσω ενός στενού περάσματος. Οι αγωγοί που παρατηρήθηκαν είναι ελάχιστοι και φαίνεται πως αποτελείται από μια κύρια είσοδο στη αρχή του πρώτου θαλάμου. Στο σπήλαιο συνυπάρχουν τόσο χαρακτηριστικά φρεατικών συνθηκών και υπογενούς σπηλαιογένεσης όσο και χαρακτηριστικά ενός υπεργενούς σπηλαίου που έχει άμεση σχέση με το υδρολογικό σύστημα της επιφάνειας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των μορφομετρικών δεικτών του σπηλαίου. Σύμφωνα με τον Klimchouk (2003) τα σπήλαια μπορούν να διαχωριστούν σε αυτά τα οποία έχουν δημιουργηθεί σε ελεύθερες και ανεμπόδιστες συνθήκες υδροφορίας και σε αυτά που έχουν δημιουργηθεί σε συνθήκες εγκλωβισμένων υδροφορέων. Αυτό καθώς τα πρώτα εμφανίζουν συνήθως δένδριτικό πρότυπο ανάπτυξης περασμάτων με τους αγωγούς και τα περάσματα αυτών να είναι πολύ μικρότερα σε αριθμό από αυτά που έχουν δημιουργηθεί υπό πίεση. Από τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά αυτό αντικατοπτρίζεται στη πυκνότητα των δικτύων των περασμάτων που στην περίπτωση αυτού του σπηλαίου είναι 9,88% που τείνει περισσότερο σε μορφές σπηλαίων υπό ελεύθερες συνθήκες οι οποίες έχουν μέσο όρο πυκνότητας 10-15% ενώ οι

δομές λαβυρίνθων σε σπήλαια τα οποία σχετίζονται με καθεστώτα πίεσεως έχουν μέση πυκνότητα δικτύου αγωγών 150-200% σύμφωνα με τις μελέτες του Klimchouk (2003). Πράγματι στο σπήλαιο βρέθηκαν πολύ λίγοι αγωγοί κυκλικής διατομής και γενικά υπάρχει μικρός αριθμός περασμάτων και θαλάμων. Σύμφωνα με τα κριτήρια του Klimchouk (2003), μπορεί η πυκνότητα των περασμάτων (passage network density) να είναι 9,9% όμως η επιφάνεια κάλυψης του σπηλαίου (areal coverage) υπολογίστηκε σε 68%. Έτσι δεν μπορεί να γίνει με βεβαιότητα η ταξινόμηση του σε κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο καθώς μορφολογικά διαφέρει από το πρότυπο λαβυρίνθων και από το δενδριτικό. Βάσει των μορφομετρικών κριτηρίων των Frumkin, & Fischhendler (2005) το σπήλαιο Λάκης κατατάσσεται στην κατηγορία των μεμονωμένων θαλάμων σύμφωνα με την αναλογία μήκους και πλάτους (L/W). Έτσι η κατηγοριοποίηση του τρόπου γένεσης του σπηλαίου είναι πολυσύνθετη και δεν μπορεί να απομονωθεί σε μία μόνο ομάδα. Αυτό παρουσιάζεται και μέσω των μορφών διάλυσης και των σπηλαιοθεμάτων που βρίσκονται στο σπήλαιο όπως η δομή των περασμάτων, οι θόλοι, τα κτενοειδή, τα κοραλλοειδή και τα ιζήματα που αποτέθηκαν. Οι θάλαμοι κατά Ford & Williams (2007) φέρουν κυρίως χαρακτηριστικά φρεατικής σπηλαιογένεσης καθώς είναι λίγοι σε αριθμό, απλοί στη δομή τους, με σχετικά μικρή κατακόρυφη ανάπτυξη, κυρίως λείες επιφάνειες τοιχωμάτων και ελλειψοειδείς διατομές περασμάτων που παραπέμπουν ότι ήταν πληρωμένοι με νερό και η διάλυση ήταν παγκατευθυντική. Ιδιαίτερα ο ανατολικός θάλαμος του σπηλαίου φέρει μορφολογικά χαρακτηριστικά που προσδίδουν φρεατικό χαρακτήρα όπως η γενική ελλειψοειδής διατομή του, η κλίση του θαλάμου που καταλήγει σε σχεδόν κατακόρυφο θόλο και αγωγό και οι θόλοι που παρατηρούνται στα βόρεια και νότια άκρα του. Οι θόλοι (Cupolas) που βρέθηκαν στους δύο διαδρόμους αποτελούν μια ακόμα ένδειξη που παραπέμπει κυρίως σε υπογενείς συνθήκες σπηλαιογένεσης αν και πρέπει να τονιστεί ότι οι μορφές αυτές είναι πολυγενετικές και επομένως δεν προσφέρονται για την εξαγωγή συμπερασμάτων χωρίς την ύπαρξη επιπλέον στοιχείων. Οι θόλοι σε αυτό το σπήλαιο αποτελούν το πιο χαρακτηριστικό του γνώρισμα καθώς βρίσκονται σε πληθώρα και στους δύο διαδρόμους και σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα. Οι θόλοι υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να δημιουργηθούν από διάλυση του πετρώματος από υδροθερμικά ρευστά, από ρεύματα μικρής ταχύτητας με αργή μεταφορά των ιζημάτων, από διάβρωση λόγω ύπαρξης πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο ή από διάλυση στη ζώνη ανάμιξης μετεωρικών υδάτων με θαλασσινό νερό (Osborne, 2004). Οι θόλοι που παρατηρήθηκαν στο σπήλαιο χωρίζονται σε 2 κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος τον αριθμό και την τραχύτητα των επιφανειών τους. Οι θόλοι που βρίσκονται στην οροφή του νοτιοανατολικού τμήματος του πρώτου θαλάμου εμφανίζονται πολυάριθμοι, λιγότερο κοίλοι, με μικρότερο μέγεθος και με τραχύτερες επιφάνειες σε σχέση με τους θόλους του δεύτερου θαλάμου και αυτούς που συναντώνται στο βορειοανατολικό και νότιο τμήμα του πρώτου θαλάμου. Ο τρόπος δημιουργίας των θόλων και στις δύο κατηγορίες που παρατηρήθηκαν πιθανό να μπορεί να αποδοθεί και σε διάλυση από συμπίκνωση υδρατμών που έλαβε χώρα στο εσωτερικό του σπηλαίου. Για τη διάλυση υπό αυτές τις συνθήκες πρέπει η στάθμη του νερού να έχει υποχωρήσει και οι διάδρομοι να μη είναι πληρωμένοι με νερό. Σύμφωνα με τους Dublyansky & Dublyansky (2000), Klimchouk (2013), Dublyansky (2013), Dublyansky & Spötl (2014) και Dreybrodt et al. (2016), θολοειδείς μορφές διάλυσης είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από διάλυση από συμπίκνωση υδρατμών, όταν θερμός υγρός αέρας σε μορφή υδρατμών, έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του σπηλαίου και υπάρχει αρκετή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των υδρατμών του αέρα και των κρύων τοιχωμάτων του σπηλαίου, τότε οι υδρατμοί συμπυκνώνονται πάνω στα τοιχώματα διαλύοντας τις ανθρακικές επιφάνειες και δημιουργώντας θόλους. Αυτό το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί είτε σε κλειστό σύστημα με εμφάνιση γεωθερμίας μέσα στον χώρο του σπηλαίου με μορφή κάποιας λεκάνης, ή μερικής πλήρωσης των θαλάμων του σπηλαίου με θερμό νερό, είτε με ανταλλαγή αερίων μαζών από το εξωτερικό του σπηλαίου προς το εσωτερικό σε ένα ανοιχτό σύστημα. Σύμφωνα επίσης με τους Klimchouk (2013) και Dublyansky & Spötl (2014), σε περίπτωση συνθηκών γεωθερμίας στο εσωτερικό του σπηλαίου, η δράση από συμπίκνωση υδρατμών προς δημιουργία θόλων είναι μέτρια κοντά στη συγκέντρωση των θερμών νερών και αυξάνει με την απόσταση προς τους γειτονικούς θαλάμους περιμετρικά. Αυτό συμβαίνει γιατί η διάλυση είναι μεγαλύτερη όταν υπάρχει διαφορά

θερμοκρασίας ανάμεσα στον αέρα και τα τοιχώματα και συνεπώς κοντά στο επίπεδο των νερών τα τοιχώματα είναι θερμά οπότε η δράση είναι μειωμένη. Εφελκυστικές ρωγματώσεις και ρήγματα μπορεί να λειτουργήσουν θετικά για τη διεύθυνση των θόλων στον κατακόρυφο άξονα καθώς ο αέρας εισέρχεται εντός αυτών. Αυτή η θεωρία μπορεί να εξηγήσει την ύπαρξη των μεγάλων, επιμήκων θόλων σε κοιλότητες περιμετρικά του κυρίου-πρώτου διαδρόμου και αυτών του δεύτερου θαλάμου καθώς και τους συσσωρευμένους, πολυάριθμους, μικρούς θόλους στα νοτιοανατολικά του πρώτου θαλάμου βάσει της υπόθεσης ότι υπήρχε λεκάνη θερμών νερών σε εκείνο το σημείο. Σε αυτό το σημείο οι επιφάνειες των θόλων εμφανίζονται πολύ πιο τραχιές, δημιουργώντας βαθμιδωτή εξέλιξη της κύρτωσης στο εσωτερικό τους, το οποίο αποδίδεται στις πιο έντονες συνθήκες διάλυσης από αέρια σε εκείνο το τμήμα και συνεπώς την πιο ταχεία διάλυση των πετρωμάτων της οροφής. Εάν υπήρχε γεωθερμία στο χώρο του σπηλαιίου αυτή μπορεί να προκλήθηκε από είσοδο του νερού εν μέσω των εφελκυστικών ρηγμάτων. Πράγματι σύμφωνα με τους Dinter & Royden (1993), Dinter (1998), Kiliyas & Mountrakis (1998) και Kiliyas et al. (1999) αυτή η περιοχή εμφανίζει αρκετά εφελκυστικά ρήγματα, μικρής και μεγάλης γωνίας κλίσης, τα οποία δημιουργήθηκαν κατά το Τριτογενές με γενική διεύθυνση προς τα ΝΔ. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τη θέση της περιοχής που γεωλογικά βρίσκεται πολύ κοντά στη ζώνη υποβύθισης της μάζας της Ροδόπης κάτω από τη Σερβομακεδονική που κατά το Τριτογενές δημιούργησε φαινόμενα εφελκυσμού. Φαινόμενα γεωθερμίας έχουν ήδη μελετηθεί στην ευρύτερη περιοχή όπως στην περίπτωση του Άγκιστρου, όπου τα θερμά νερά εξέρχονται στη επιφάνεια μέσω ενός μεγάλου ρήγματος γενικής διεύθυνσης Α-Δ, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα σε μάρμαρα και ασβεστολίθους (Παναγιώτη και Χρήστου, 1990). Άλλωστε η υπόλοιπη περιοχή περιμετρικά του Ρούπελ εμφανίζει φαινόμενα γεωθερμίας με διάφορες μορφές όπως το πρώτο σπήλαιο ζεστών νερών που εμφανίζει τραβερτινική γέφυρα (Λαζαρίδης, 2004, Ελευθεριάδης et al. 2007) ή το βάραθρο «λατομείου Μαύρου Βράχου» που δημιουργήθηκε από ανοδική πορεία θερμών υδάτων (Λαζαρίδης και Βλασταρίδης, 2013). Από την άλλη πλευρά η Hill (1987) μελέτησε το φαινόμενο διάλυσης από συμπίκνωση υδρατμών σε ανοιχτό σύστημα και κατέληξε πως τρεις είναι οι κύριοι παράγοντες που ευνοούν την διάλυση αυτού του είδους σε ένα ανοιχτό σύστημα. Αυτοί είναι 1) να είναι υπερκορεσμένος ο αέρας μέσα στο σπήλαιο σε διοξειδίο του άνθρακα, 2) ο αέρας να έχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας και 3) να υπάρχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο αέρα και τα τοιχώματα του σπηλαιίου. Αντίστοιχα ο Dublyansky (2013) μέσα από μελέτες σπηλαίων στα Καυκάσια όρη, παρουσιάζει ένα άλλο μοντέλο διάλυσης από συμπίκνωση υδρατμών. Σε αυτές τις περιοχές η ετήσια διακύμανση χαρακτηρίζεται από ψυχρούς χειμώνες με υγρασία και ξηρά θερμά καλοκαίρια όπου εάν το σύστημα του σπηλαιίου είναι ανοιχτό, υπάρχουν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας στο εσωτερικό με το εξωτερικό. Τότε από τη ανταλλαγή αερίων μαζών μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού, τα τοιχώματα του σπηλαιίου ψύχονται από τον εισερχόμενο αέρα. Καθώς το σπήλαιο διατηρεί μεγαλύτερη θερμότητα στο εσωτερικό του, ο θερμός υγρός αέρας του σπηλαιίου συσσωρεύεται και συμπυκνώνεται στα τοιχώματα του σπηλαιίου ευνοώντας τη διάλυσή τους. Αυτό το μοντέλο είναι απίθανο να λειτουργήσει σε αυτό το σπήλαιο καθώς η είσοδος του σπηλαιίου άνοιξε σε μεταγενέστερο χρόνο, όπως συμπεραίνεται από τις αποθέσεις του δαπέδου και θα έπρεπε η ανάπτυξη των θόλων να μη διακοπτόταν και να συνέχιζε μέχρι σήμερα. Σε βοριοανατολικό κοίλωμα του πρώτου θαλάμου παρατηρούνται κοραλλοειδή σπηλαιοθέματα στο κατώτερο τμήμα του τοιχώματος. Αυτά κατά την Hill (1987) αποτελούν δείκτες συμπίκνωσης υδρατμών στο σπήλαιο. Η Hill (1987) απέδωσε τη δημιουργία κοραλλοειδών που βρέθηκαν στα τοιχώματα του σπηλαιίου Carlsbad στις συνθήκες συμπίκνωσης υδρατμών που κυριαρχούσαν στο σπήλαιο, το οποίο επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα στα σπηλαιοθέματα. Τα κοραλλοειδή σπηλαιοθέματα, τόσο στο σπήλαιο Carlsbad, όσο και στο σπήλαιο Λάκης, βρίσκονται κοντά στη βάση των τοιχωμάτων το οποίο αποδίδεται στο γεγονός ότι ο ψυχρός, ξηρός αέρας ο οποίος εισχωρεί από την είσοδο καταλαμβάνει τις κατώτερες θέσεις στο χώρο ενώ ο θερμός υγρός αέρας του σπηλαιίου τείνει να ανεβαίνει προς τα ανώτερα σημεία των θαλάμων. Έτσι, καθώς ο ψυχρός αέρας έρχεται σε επαφή με τα πιο ζεστά, υγρά τοιχώματα της βάσης, συμπυκνώνεται δημιουργώντας τις μορφές των κοραλλοειδών σπηλαιοθεμάτων. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία

των λιγοστών κτενοειδών (scallops) στο βόρειο τοίχωμα του πρώτου θαλάμου και η απόθεση φερτών ιζημάτων στο δάπεδο του θαλάμου δείχνουν ένα μετέπειτα υπεργενετικό χαρακτήρα ενός ανοικτού συστήματος σε σύνδεση με τα επιφανειακά νερά απορροής και κατείδυσης. Τα κτενοειδή, σύμφωνα με Blumberg (1970) και Bögli (1978), συνδέονται με ελεύθερη ροή του νερού και είναι δείκτες της κατεύθυνσης κίνησης του νερού προς τα βαθύτερα σημεία. Αυτό συμπεραίνεται από τη διάταξη των κτενοειδών στον χώρο καθώς παρατηρούνται σε ομάδες και σε ασύμμετρες κοίλες μορφές με τη κυρτότητα να είναι απότομη στη αρχή και να γίνεται πιο ήπια προς τη κατεύθυνση ροής του νερού. Στη περίπτωση του σπηλαίου τα κτενοειδή έχουν κατεύθυνση προς τα ανατολικά του σπηλαίου το οποίο συνεπάγεται τη ροή του νερού προς εκείνη τη κατεύθυνση. Αυτό είναι λογικό καθώς στα δυτικά υπάρχει η κύρια είσοδος του σπηλαίου. Μάλιστα κατά τον Bögli (1978) τα κτενοειδή είναι δείκτες έντονης, τυρβώδους ροής του νερού οπότε συμπεραίνεται ότι το νερό εισχωρούσε ορμητικά και με σημαντικές παροχές στον χώρο του σπηλαίου. Η είσοδος του σπηλαίου βρίσκεται πολύ κοντά σε έναν παλαιοχείμαρρο. Αυτή φαίνεται πως ήταν και η κύρια παροχή νερού στο σπήλαιο κατά τη διάνοιξη της εισόδου. Έτσι σε μια πρώτη σύνοψη των συνθηκών σπηλαιογένεσης μπορεί τα αρχικά στάδια διεύρυνσης των περασμάτων να δημιουργήθηκαν σε ένα κλειστό, φρεατικό σύστημα υπό πίεση το οποίο μετέπειτα άλλαξε σε ανοιχτό με άμεση τροφοδοσία από το υδρολογικό σύστημα της περιοχής και είσοδο αλλόχθονων υλικών. Εκτός από τα σπηλαιοθέματα και τις μορφές διάλυσης, οι ιζηματογενείς αποθέσεις στο εσωτερικό του σπηλαίου επίσης δηλώνουν αλλαγές σε συνθήκες. Τα ιζήματα που αποτέθηκαν στο σπήλαιο μπορούν να διακριθούν στα αυτόχθονα, τα οποία προήλθαν από το εσωτερικό του σπηλαίου και στα αλλόχθονα, τα οποία προέκυψαν από μεταφορά από το εξωτερικό σύστημα προς το εσωτερικό. Τα αυτόχθονα υλικά αποτελούν μια σειρά στρωμάτων, υποκειμένων των αλλόχθονων και των τεμαχών κατάρρευσης, με εναλλαγές αμμωδών και αργιλικών υλικών. Αυτά τα στρώματα διαφορετικού μεγέθους δηλώνουν διαφορές στο υδροδυναμικό καθεστώς του σπηλαίου με τα πιο χονδρόκοκκα ιζήματα να αποτίθενται σε περιβάλλον με έντονη κίνηση νερού ενώ τα αργιλικά υλικά αποτέθηκαν σε πιο ήπιες συνθήκες ροής νερού (Hjulström, 1955). Αυτά τα υλικά αποτέθηκαν στο κλειστό περιβάλλον του σπηλαίου, πριν τη διάνοιξη της εισόδου και δείχνουν ήπιες έως πολύ ήπιες συνθήκες ροής του νερού ενώ οι εναλλαγές στο μέγεθος τους χαρακτηρίζουν περιόδους μειωμένου και αυξημένου υδροδυναμικού καθεστώτος στο εσωτερικό. Τα αλλόχθονα ιζήματα αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία αποθέσεων που παρατηρούνται στο σπήλαιο. Βρίσκονται υπερκείμενα των αλλόχθονων και συνδέονται με τη αλλαγή του συστήματος από κλειστό σε ανοιχτό και είσοδο νερού που παρέσυρε τα φερτά υλικά. Πιθανόν εισήλθαν με τη δράση του νερού από τη κύρια είσοδο του σπηλαίου και αποτέθηκαν πάνω στα αυτόχθονα. Καθώς η είσοδος του σπηλαίου είχε άμεση τροφοδοσία με κάποιο ρέμα ή χείμαρρο που συμπαρέσυρε υλικά από την πλαγιά, με αναπήδηση ή αιώρηση τους μέσα σε αυτό, γέμιζε το εσωτερικό του σπηλαίου με υλικά. Σε μεταγενέστερο χρόνο, πιθανόν με την μείωση του επιπέδου νερού υπήρξε χαλάρωση των δυνάμεων συγκράτησης στα πετρώματα της οροφής με αποτέλεσμα την αποκόλληση μεγάλων τεμαχών από την οροφή τα οποία αποτέθηκαν υπερκείμενα των υπολοίπων ιζημάτων. Οι όγκοι ασβεστιτικής κυρίως σύστασης ήταν προφανώς εξασθενημένοι από τη διάβρωση του νερού το οποίο διεύρυνε τις ασυνέχειες μείωσε τη γενική συνοχή του πετρώματος. Οι δυνάμεις της βαρύτητας και πιθανόν τεκτονικές δράσεις συντέλεσαν στη τελική αποκόλληση τους. Κυριότερο από αυτά τα τεμάχια αποτελεί αυτό στο νοτιοανατολικό άκρο του πρώτου θαλάμου. Η σκουρόχρωμη γραμμή που παρατηρείται παράλληλα με την κλίση του περάσματος, στο βορειοδυτικό τοίχωμα του δεύτερου θαλάμου και σε μεγαλύτερο ύψος από το σημερινό επίπεδο ιζημάτων αποτελεί το σημάδι ενός παλαιότερου επιπέδου των ιζημάτων του θαλάμου τα οποία έπειτα διαβρώθηκαν, αφήνοντας πίσω μόνο τη γραμμή. Ακόμη, πιο βέβαια αυτό διαπιστώνεται στον αγωγό, στο βόρειο τμήμα του ίδιου περάσματος, όπου παρατηρείται ένα λεπτό στρώμα συμπαγοποιημένων αποθέσεων άμμου και κροκάλων, πάνω στο ανθρακικό πέτρωμα. Η απόθεση παρατηρείται σε όλο το ύψος του αγωγού και φαίνεται διαβρωμένη και λεία, πιθανώς από τη ροή του νερού δια μέσω του αγωγού. Ο αγωγός όπως και το υπόλοιπο πέρασμα πρέπει να είχε πληρωθεί σε μεγάλο βαθμό από υλικά και μετά με είσοδο νερού στον θάλαμο να διαβρώθηκαν και να απομακρύνθηκαν. Αυτά τα στοιχεία μαρτυρούν πως το

σπήλαιο έχει υποστεί πολλαπλούς κύκλους απόθεσης και διάλυσης και πολλές αλλαγές στο υδροδυναμικό του χαρακτήρα. Συμπερασματικά η διαδοχή των γεγονότων στη σπηλαιογένεση του σπηλαίου Λάκης, με γνώμονα τα χαρακτηριστικά που έχουν ερευνηθεί και αναλυθεί έως τώρα, θεωρείται η εξής. 1) Φρεατικές συνθήκες σπηλαιογένεσης, 2) απόθεση των αυτόχthonων ιζημάτων, 3) πτώση στάθμης νερού, 4) διάλυση από συμπίκνωση υδρατμών, 5) διάνοιξη εισόδου και εισχώρηση αλλόχthonων ιζημάτων και 6) κατάπτωση τεμαχών οροφής. Πολλοί ερευνητές μεταξύ άλλων οι Bögli (1978), Palmer (1991), Lauritzen & Lundberg (2000) και Ford & Williams (2007) θεωρούν ότι τεκτονικά στοιχεία όπως ρήγματα, διακλάσεις, εφελκυστικές ρωγμές σε συνδυασμό με φυσικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων όπως η στρώση και η σχιστότητα τους κατέχουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των χώρων του σπηλαίου και τον άξονα γενικής του ανάπτυξης. Έτσι με καταγραφή και κατηγοριοποίηση των διακλάσεων, με μετρήσεις σε επιφάνειες εξωτερικά και εσωτερικά του σπηλαίου και μελέτη τους σε σχέση με τη φωλίδωση των μαρμάρων βρέθηκε η σχέση τους στην ανάπτυξη του σπηλαίου Λάκης. Παρατηρήθηκε ότι από τα δύο συστήματα ασυνεχειών, αυτό με στοιχεία J-315°/21° και βύθιση προς τα ΝΑ (κόκκινη ομάδα διακλάσεων) έδρασε παράλληλα με την φωλίδωση των μαρμάρων, η οποία παρουσιάζει επίπεδα με στοιχεία S-316°/26° και βύθιση προς τα ΝΝΑ, προς τον κύριο άξονα ανάπτυξης του σπηλαίου (ΒΔ-ΝΑ). Το δεύτερο σύστημα διακλάσεων, με στοιχεία J-173°/56° θεωρείται ότι επηρέασε την διεύρυνση του χώρου ως προς το πλάτος και βάσει αυτού δημιουργήθηκαν οι μικρότεροι αγωγοί, καθώς και ο δεύτερος θάλαμος ο οποίος έχει διεύθυνση ΒΒΑ- ΝΝΔ. Βέβαια απαιτείται περισσότερη μελέτη για να διεξαχθούν ολοκληρωμένα συμπεράσματα για τη δράση των ασυνεχειών στον χώρο του σπηλαίου.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο υπολογισμός των βασικών μορφομετρικών παραμέτρων, η μελέτη της διατομής των περασμάτων και των μορφολογικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται σε αυτούς και η τελική χαρτογράφηση του σπηλαίου συνέβαλε στη καλύτερη κατανόηση του τρόπου δημιουργίας και ανάπτυξης του σπηλαίου «Λάκης» καθώς και των διάφορων υδρολογικών συνθηκών στο εσωτερικό του. Το σπήλαιο αυτό παρουσιάζει πολύ απλή δομή περασμάτων βάσει της αναλογίας μήκους - πλάτους του μπορεί να ταξινομηθεί ως ένα απομονωμένο σπήλαιο μονού θαλάμου (Frumkin, & Fischhendler, 2005). Ακόμα θεωρείται δευτερογενές σπήλαιο καθώς οι διαδικασίες διάλυσης και αποσάθρωσης που συνέβαλαν για τη ανάπτυξη του είναι μεταγενέστερες από τα περιβάλλοντα πετρώματα. Αποτελείται από δύο κύριους θαλάμους με συνένωση τους σε ένα σημείο. Η ανάπτυξη του σπηλαίου έχει προσανατολισμό ΒΔ-ΝΑ. Τόσο εντός του σπηλαίου όσο και στη γύρω περιοχή παρατηρούνται ημικυκλικοί αγωγοί, μικρής διατομής και καρστικό περιβάλλον κυρίως από μάρμαρα που αποτελούν τη λιθολογία της περιοχής. Οι θάλαμοι παρουσιάζουν χαρακτηριστικά φρεατικών συνθηκών δημιουργίας με ημικυκλική διατομή, απουσία πολλών σπηλαιοθεμάτων και ύπαρξη πολυάριθμων θόλων (Cupolas) και στους δύο θαλάμους. Οι θόλοι του σπηλαίου συνδέονται με συνθήκες γεωθερμίας και δημιουργήθηκαν από διάλυση από συμπύκνωση υδρατμών. Παρουσιάζονται με εύρος μεγεθών και σχημάτων. Στα ανατολικά του πρώτου θαλάμου έχουν σχεδόν ημικυκλικό σχήμα, πολύ μικρή κύρτωση και τραχιές επιφάνειες ενώ στον δεύτερο θάλαμο και βορειοανατολικά και νότια του πρώτου παρουσιάζονται με μεγαλύτερο μέγεθος, με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη και επίμηκες σχήμα. Οι τραχιές επιφάνειες, με μορφή αναβαθμιδών, που σχηματίστηκαν στο εσωτερικό των θόλων του πρώτου θαλάμου αποδόθηκαν στη ένταση της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών. Το σπήλαιο φέρει μια κύρια είσοδο, η οποία άνοιξε σε μεταγενέστερο χρόνο, από όπου γινόταν τροφοδοσία του σπηλαίου με φερτά υλικά, μέσω ενός γειτονικού χειμάρρου και αποτέθηκαν αλλούβια ιζημάτα στο δάπεδο των θαλάμων. Στο αρχικό τμήμα του πρώτου θαλάμου μάλιστα, παρατηρούνται στο βόρειο τοίχωμα κτενοειδή, που υποδηλώνουν την έντονη, τυρβώδη ροή του νερού προς το εσωτερικό του σπηλαίου, από τη πλευρά της εισόδου και προς τα ανατολικά. Κατακείμενα των αλλούβιων ιζημάτων παρατηρούνται λεπτές ενστρώσεις από εναλλαγές αργιλόδων και αμμώδων ιζημάτων από αποθέσεις λιγότερο διαλυτών μελών από πετρώματα του σπηλαίου. Αυτά τα αυτόχθονα ιζημάτα αποτέθηκαν σε ένα σαφώς πιο ήπιο υδροδυναμικό καθεστώς, για να μπορέσει να γίνει η απόθεση αυτών των λεπτόκοκκων ιζημάτων, όταν το σπήλαιο αποτελούσε ακόμα κλειστό σύστημα. Οι ογκόλιθοι από κατάπτωση που αποτέθηκαν υπερκείμενα των υπολοίπων ιζημάτων αποκολλήθηκαν καθώς το νερό υποχώρησε από τους θαλάμους και εξασθένησε η συνοχή των πετρωμάτων της οροφής και ακολούθησε η αποκόλληση και ελεύθερη πτώση τους. Στο δεύτερο θάλαμο παρατηρήθηκαν σημάδια από παλιότερα επίπεδα των ιζημάτων, σε ύψος μεγαλύτερο των σημερινών, που δηλώνει πως υπήρχαν πολλές φάσεις απόθεσης και διάλυσης στο εσωτερικό των περασμάτων. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει και η ύπαρξη μιας σχεδόν κατακόρυφης επιφάνειας, από αμμώδη και κροκαλοπαγή υλικά, στο βόρειο τμήμα του ανατολικού θαλάμου, που εμφανίζεται διαβρωμένη και λεία. Στον χώρο του σπηλαίου κυριαρχούν δύο συστήματα διακλάσεων και η φολίδωση των μαρμάρων. Η ανάπτυξη των δύο επιμήκων θαλάμων του σπηλαίου έχει επηρεαστεί από τα συστήματα ασυνεχειών σε συνδυασμό με το επίπεδο που δημιουργεί η φολίδωση. Έτσι, συμπεραίνοντας όλα τα στοιχεία που ερευνήθηκαν στο σπήλαιο του Λάκη και αναλύθηκαν παραπάνω, η εξέλιξη των γεγονότων σπηλαιογένεσης χωρίζεται σε έξι, διαδοχικές, κύριες φάσεις

γεγονότων. Στην πρώτη φάση επικράτησαν φρεατικές συνθήκες σπηλαιογένεσης. Ακολούθησε η απόθεση των αυτόχθονων ιζημάτων και στη συνέχεια πτώση της στάθμης του νερού. Μετέπειτα έλαβε χώρα η διάλυση από συμπύκνωση υδρατμών. Σε μεταγενέστερο χρόνο υπήρξε η διάνοιξη της εισόδου και εισχώρηση αλλόχθονων ιζημάτων και τέλος ακολούθησε η κατάπτωση τεμαχών της οροφής. Όπως συμπεραίνεται, μέσω της γεωλογικής παρατήρησης του σπηλαίου με καταγραφή των σπηλαιοθεμάτων, των μορφών διάλυσης, της μορφολογίας των περασμάτων και των ιζημάτων που αποτέθηκαν, σε συνδυασμό με γνώση του υδρολογικού δικτύου, της γεωμορφολογίας και της τεκτονικής της περιοχής, είναι ικανά στοιχεία για τη κατανόηση και ανάπτυξη ενός μοντέλου για τον τρόπο ανάπτυξης του σπηλαίου «Λάκης». Παρόλα αυτά χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για τη ασφαλή διατύπωση συμπερασμάτων καθώς η κατανόηση των διαδικασιών και των διαφορετικών κύκλων ανάπτυξης ενός σπηλαίου είναι κάτι το πολυδιάστατο και περισσότεροι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη αποτύπωση του τελικού μοντέλου σπηλαιογένεσης. Παρόλα αυτά, η έρευνα αυτή συνέβαλε στη αποτύπωση των βασικών μορφομετρικών, τεκτονικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών που παρατηρούνται στο σπήλαιο «Λάκης», καθώς και στη δημιουργία ενός χάρτη σε μορφή κάτοψης του σπηλαίου.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγγελίδης, Ζ., Βγενόπουλος, Α., Χατζηγιάννης, Γ. και Χατζηδάκης, Κ. (2007). Έκθεση που αφορά την προστασία της ιαματικής πηγής Αγκίστρου Σερρών και τη διαμορφωθείσα κατάσταση στο περιβάλλον της. Επιτροπή Προστασίας Ιαματικών Φυσικών Πόρων Ν.3498/06.

Αλτήγος, Ν. (1962). Προμελέτη πεδιάδας Σερρών. Υδρολογία. Υπηρ. Υδρ. Έργων, Υπουργ. Δημ. Έργων. Αθήνα, τ.Α', p108.

Βλασταρίδης, Ι., Λαζαρίδης, Γ., κ.ά. (2013). ΔΗΜΟΣ ΣΙΝΤΙΚΗΣ: Ο Χώρος και η Ιστορία του, Μέρος Ι. Φυσικό Περιβάλλον, 1.2. Τα Σπήλαια του Δήμου Σιντικής.

Γιαννακοπούλου, Ε. Σ. (2005). Υδατικό ισοζύγιο υδρολογικής λεκάνης Στρυμόνα (εντός Ελληνικού Εδάφους). Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΑΠΘ

Δαούλας, Ε. κ.ά. (1989). Μελέτη αναθεωρήσεων υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Κερκίνης. Διεύθυνση υδρ. Έργων τεως 14ης ΠΥΔΕ, Αθήνα p57

Διαμαντής, Ι., Καρυδάκης, Γ. και Σαραντέας, Α. (1999). Υδροδυναμική Συμπεριφορά Διαρρέοντος Θερμού Υδροφόρου υπό Καθεστώς Άντλησης στο Γεωθερμικό Πεδίο Αγκίστρου, Νομού Σερρών. Πρακτικά 6ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΗΤ, Βόλος 3-5 Νοεμβρίου 1999, Τόμος Α', Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, σελ. 487-494.

Ελευθεριάδης, Ε. (2007). Τα σπήλαια Σιδηρόκαστρου Σιντικής και το Θαυμάσιο φυσικό περιβάλλον τους, απόσπασμα από «Φως στα μυστικά του Μαύρου Βράχου». Σύλλογος Σπηλαιολογίας και Περιβάλλοντος Σιντικής, Αθήνα.

Ηλιόπουλος, Γ. (2015). Στρωματογραφία-Ιστορική γεωλογία. Έκδοση: 1.0. Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πάτρα.

ΙΓΜΕ (2010). Καταγραφή & αποτίμηση των Υδρογεωλογικών Χαρακτήρων των Υπόγειων Νερών & των Υδροφόρων Συστημάτων της Χώρας- Αποτίμηση Υδατικού Δυναμικού Θράκης.

Καβουρίδης, Θ. και Καρυδάκης, Γ. (1998). Γεωθερμική έρευνα στην περιοχή Αγκίστρου Νομού Σερρών, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) - Διεύθυνση Ενεργειακών Πρώτων Υλών / Τμήμα Γεωθερμίας, 12 σελ.

Καρυδάκης, Γ., Αρβανίτης, Α., Ανδρίτσος, Ν., Φύτικας, Μ., (2005). Low enthalpy geothermal fields in the Strymon basin (Northern Greece). Conference: World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey

Καρυδάκης, Γ. (1999). Χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα γεωθερμικού πεδίου Αγκίστρου Ν. Σερρών – Κατά τη δοκιμαστική άντληση στη γεώτρηση ΑΓ-4Π, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) - Διεύθυνση Ενεργειακών Πρώτων Υλών / Τμήμα Γεωθερμίας, 21 σελ., Αθήνα.

Καρυδάκης, Γ. (2003). Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας Β. Ελλάδας. Τεχνική γεωτρήσεων, Μηχανική ταμιευτήρων και διφασική ροή γεωθερμικών ρευστών. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 346 σελ., Ξάνθη.

Καρυδάκης, Γ. και Καβουρίδης, Θ. (1988). Έκθεση - Μελέτη της γεωθερμικής περιοχής χαμηλής ενθαλπίας στη θέση «Αγ. Βαρβάρα» της Θερμοπηγής - Σιδ/στρου ν. Σερρών, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) - Διεύθυνση Ενεργειακών Πρώτων Υλών / Τμήμα Γεωθερμίας, 55 σελ. + χάρτες, σχήματα, διαγράμματα, Αθήνα.

Καρυδάκης, Γ., Καβουρίδης, Θ., Αρβανίτης, Α., και Φυτίκας, Μ., (2013). ΔΗΜΟΣ ΣΙΝΤΙΚΗΣ: Ο Χώρος και η Ιστορία του, Μέρος Ι. Φυσικό Περιβάλλον, Ι-1.3α. Τα γεωθερμικά πεδία Θερμοπηγής Σιδηροκάστρου και Αγκίστρου του Δήμου Σιντικής - Χαρακτηριστικά και προοπτικές.

Καρυστιναίος, Ν. (1984): Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης των Σερρών, λιθοστρωματογραφία, βιοστρωματογραφία & τεκτονική, Διδακτορική Διατριβή, σελ. 1-230.

Κίλιας, Α. (2013). ΔΗΜΟΣ ΣΙΝΤΙΚΗΣ: Ο Χώρος και η Ιστορία του, Μέρος Ι. Φυσικό Περιβάλλον, 1.1. Γεωλογία της Ευρύτερης Περιοχής του Δήμου Σιντικής.

Κουλίδου, Σ., Μυτελέτσης, Μ., Σύρος, Α. και Τσαγκούλη, Χ. (2008). Καταρράκτες (Φράγμα) Σιδηροκάστρου Ν. Σερρών 2006, ΑΔ.

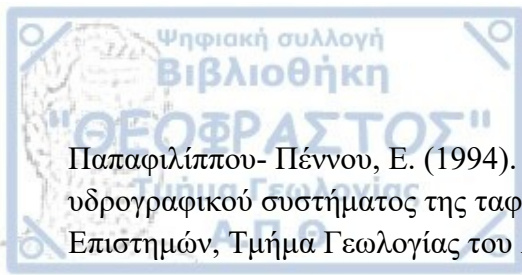
Κωνσταντινίδου, Μ., Κίλιας, Α., Βουδούρης, Κ. και Αγγελίδης, Ζ. (2013). ΔΗΜΟΣ ΣΙΝΤΙΚΗΣ: Ο Χώρος και η Ιστορία του, Μέρος Ι. Φυσικό Περιβάλλον, Ι-1.3β. Οι θερμές πηγές Αγκίστρου του Δήμου Σιντικής και η σχέση τους με τη γεωλογία και την τεκτονική της ευρύτερης περιοχής.

Λαζαρίδου, Μ., Παπαδόπουλος, Κ. (2001): Υδρογεωλογική έρευνα ανθρακικών σχηματισμών Μενοίκιο – Αγκιστρο. Έκθεση ΙΓΜΕ

Λαζαρίδης, Γ. (2004). Μελέτη των σπηλαιομορφών της λεκάνης του Κρουσοβίτη Ποταμού (Νομός Σερρών). Διπλωματική εργασία. ΑΠΘ, Τμ. Γεωλογίας.

Νουσινάνος, Θ., Καραθανασόπουλος, Σ., Λιβαδάς, Α., (1977): Γεωλογική μελέτη της λεκάνης του Στρυμόνα. Δ.Ε.Π., Αθήνα, σελ. 1-31.

Παναγιώτη, Ε., & Χρήστου, Ο. (1990). Γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία από τη μελέτη των ιαματικών πηγών του Δήμου Σιδηροκάστρου και της Κοινότητας Αγκίστρου Σερρών. Πρακτικά 2ου Συνεδρίου για τα θερμομεταλλικά νερά (Θεσ/νίκη 7-9 Οκτ. 1988), σελ. 216-227.



Παπαφιλίππου- Πέννου, Ε. (1994). Δυναμική εξέλιξη και σύγχρονες εξωγενείς διεργασίες του υδρογραφικού συστήματος της ταφρολεκάνης Σερρών. Διδακτορική Διατριβή της Σχολής Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας του ΑΠΘ. Θεσ/νικη.

Παπαφιλίππου- Πέννου, Ε., (1994). Επιφανειακά ύδατα, Αναπτυξιακό Συνέδριο Νομού Σερρών – ενότητα Ι. Ορυκτά – Ενέργεια – Γεωθερμία σ. 307-309. Σέρρες

Παπαφιλίππου-Πέννου, Ε., (2004). Δυναμική εξέλιξη και σύγχρονες εξωγενείς διεργασίες του υδρογραφικού συστήματος της ταφρολεκάνης των Σερρών. Διδακτ. Διατριβή.

Σύρος, Α., Τσαγκούλη, Χ., Μυτελέτσης, Μ. και Βλασταρίδης, Ι. (2010). Σπήλαιο στη θέση «Καταρράκτες-Φράγμα» Σιδηροκάστρου 2007. Αρχαιολογικό Έργο στη Μακεδονία και τη Θράκη, 21(2007), Θεσσαλονίκη.

Σωτηριάδης, Λ., (1966). Μορφογενετικά έρευναι εις την κοιλάδα του Κρουσοβίτου παρά το Σιδηρόκαστρον Α. Μακεδονίας.- Διδακτ. Διατριβή, Επιστ. Επετ. Σχολ. Φυσ/Μαθ., Α.Π.Θ.

Ψιλοβίκος, Α., Αλμπανάκης, Κ., Παπαφιλίππου- Πέννου, Ε. (1992). Έρευνα του προβλήματος της πρόσχωσης της λίμνης Κερκίνης και της κοίτης του ποταμού Στρυμόνα και προτάσεις αντιμετώπισης αυτού. Ερευνητικό πρόγραμμα επιτροπής ερευνών ΑΠΘ. Νο 2343, Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Audra, P., & Palmer, A. N. (2011). The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 17(4), 359-378.

Blumberg, P. N. (1970). Flutes: a study of stable, periodic dissolution profiles resulting from the interaction of a soluble surface and an adjacent turbulent flow. University of Michigan.

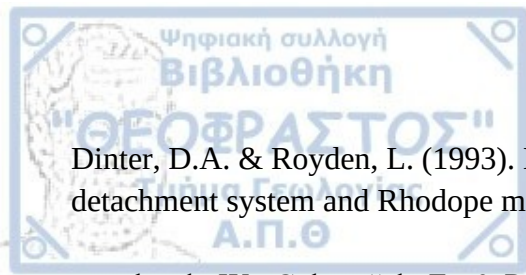
Bögli, A. (1978). *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Springer-Verlag.(1980). Berlin Heidelberg New York.

Brinkmann, R., & Correns, C. W. (1964). *Lehrbuch der allgemeinen Geologie* (Vol. 1). F. Enke.

Brun J. P., & Sokoutis, D. (2007). Kinematics of the Southern Rhodope Core Complex (North Greece). *International Journal of Earth Sciences*, 99(1):09-138.

Dasher, G. (1994). *On Station: a complete handbook for surveying and mapping caves*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, 242pp. (esp. pp.53-54)

Dinter, D.A. (1998). Late Cenozoic extension of the Alpine collisional orogen, northeastern Greece: Origin of the north Aegean basin. *GSA Bulletin* (1998). 1208–1230.



Dinter, D.A. & Royden, L. (1993). Late Cenozoic extension in northeastern Greece: Strymon Valley detachment system and Rhodope metamorphic core complex. *Geology* (1993). p.45–48.

Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., & Perne, M. (2016). Condensation corrosion: a theoretical approach. *Acta carsologica*, 34(2). 317–348.

Dublyansky, V.N., & Dublyansky, Y.V. (2000). 3.6. Role of condensation in Karst hydrogeology and speleogenesis. *Speleogenesis: Evolution of Karst aquifers*. Eds. AB Klimchouk, DC Ford, AN Palmer, W. Dreybrodt. Huntsville, Alabama, USA. National Speleological Society, 100-112.

Dublyansky, Y. V. (2013). 6.6 Karstification by Geothermal Waters. In J. Schroder & A. Frumkin (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA. (6): 57–71.

Dublyansky, Y. V., & Spötl, C. (2014). Morphological effects of condensation-corrosion speleogenesis at Devils hole ridge, Nevada. *Hypogene cave morphologies*. Karst waters institute, 36-43.

Ford, D. C. (1999). Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis. In Palmer A., Palmer M., Sasowsky I. (Eds.): *Karst Modeling*. Karst Waters Institute, Special Publication 5, 17-29.

Ford D. C. & Williams P.W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester, 562 p.

Frumkin, A., & Fischhendler, I. (2005). Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology*, 67(3-4), 457-471.

Gillieson, D. (1996). *Caves: Processes, Development and Management*. Blackwell Publishers Inc. 350 Main Street Malden, Massachusetts 02148 USA

Gunn, J. (2004n). *Encyclopedia of caves and karst science*. Taylor & Francis. New York

Hill, C. A. (1987). *Geology of Carlsbad cavern and other caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico and Texas*. Bull. 117, New Mexico Bureau of Mines and Minerals Resources.

Hill, C.A. & Forti, P. (1997). *Cave Minerals of the World Second Edition*. National Speleological Society. Huntsville 463 p.

Hjulström, F. (1955). *Transportation of Detritus by Moving Water*. Recent Marine Sediments, Parker D. Trask

Jennings, J. N. (1985). *Karst Geomorphology*. KIP Articles. (1985). 2939.
https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/2939

Jenkins, M. (2011). "Vietnam Cave". *National Geographic*. p. 7.

Kilias, A. & Mountrakis, D. M. (1998). Tertiary extension of the Rhodope massif associated with granite emplacement (Northern Greece). *Acta Vulcanologia* - Vol.10 (2) p.331-337 (1998). Department of Geology & Paleontology, Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Kilias, A., Falalakis, G. & Mountrakis, D. (1999). Cretaceous–Tertiary structures and kinematics of the Serbomacedonian metamorphic rocks and their relation to the exhumation of the Hellenic hinterland (Macedonia, Greece). *Int Journ Earth Sciences* 88, 513–531 (1999).

Klimchouk, A. (2003). Unconfined versus confined speleogenetic settings: variations of solution porosity. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1-7.

Klimchouk, A. (2003). Cave morphometry.- In: Gunn, J. (ed.) *Encyclopedia of cave and karst science*, Fitzroy Dearborn, pp. 1120-1125, New York.

Krohe, A. & Mposkos, E. (2002). Multiple generations of extensional detachments in the Rhodope Mountains (northern Greece): evidence of episodic exhumation of high-pressure rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, Volume 204, Pages 151 - 178

Lazaridis, G., Karamelas, A., Dora, D., Koulelis, P. (2022). Cave evolution in Strymonas Valley, Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 16th International Congress of the Geological Society of Greece. Patras, Greece.

Lauritzen, S. E. & Lundberg, J. (2000). Solutional and erosional morphology. Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (eds.) *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, 408-426.

Liati, A. & Seidel, E. (1996). Metamorphic evolution and geochemistry of kyanite eclogites in central Rhodope, northern Greece. *Contrib Mineral Petrol* 123, 293–307 (1996).

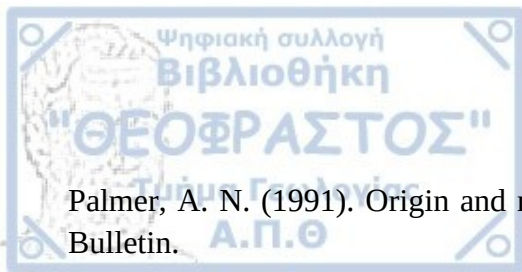
Mattauer, M. (1973). *Les deformations des matériaux de l' écorce terrestre-Hermann*. 493 S.. Paris.

Mposkos, E. (1989). High-pressure metamorphism in gneisses and pelitic schists in the East Rhodope zone (N. Greece). *Mineralogy and Petrology* 41, 25–39 .

Mposkos, E. (2002). Petrology of the ultra-high pressure metamorphic Kimi complex in Rhodope (NE Greece). A new insight into the Alpine geodynamic evolution of Rhodope. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 34(6), 2169-2188.

Mposkos, E., & Krohe, A. (2000). Petrological and structural evolution of continental high pressure (HP) metamorphic rocks in the Alpine Rhodope Domain (N. Greece). In *Proceedings of the 3rd International Conference on the Geology of the Eastern Mediterranean* (Vol. 221232).

Osborne, R. A. L. (2004). The troubles with cupolas. *Acta carsologica*, 33(2).



Palmer, A. N. (1991). Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin.

Palmer, A. N. (1972). Dynamics of a sinking stream system: Onesquethaw Cave, New York. National Speleological Society Bulletin 34, 89-110.

Palmer, A. N. (1975). The origin of maze caves. Natl. Speleol. Soc. Bull., 37 (1975), pp. 56-76

Palmer, A. N. (2000). Hydrogeologic control of cave patterns. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville: National. Speleological Society, 77-90.

Palmer, A. N. & Audra, P. (2004). Patterns of caves. In Gunn, J. (Ed.). Encyclopedia of Cave and Karst Science. Fitzroy Dearborn, London, 573-574.

Palmer, A. N. (2007). Cave Geology. Cave Books, Dayton, 454 p.

Palmer, A. N. (2011). Distinction between epigenic and hypogenic maze caves. Department of Earth Sciences, State University of New York. Oneonta, NY 13820-4015, USA,

Papanikolaou, D. & Panagopoulos, A. (1981). Observations on the structural style of the Southern Rhodope. Geologica Balcanica, 11, 12-22.

Piccini, L. (2011). Speleogenesis in highly geodynamic contexts: The quaternary evolution of Monte Corchia multi-level karst system. Geomorphology 134(1):49-61.

Psilovikos, A., Papaphilippou-Pennou, E., Albanakis K., Vouvalidis, K. (1994). Bedload Transport and deposition in the river Strymon artificial channel before its reach to the Kerkini reservoir. Bulletin of the geological society of Greece vol. xxx/4, 149-155, Proceedings of the 7th Congress, Thessaloniki (1994)

White, W. B., & Culver, D. C. (Eds.). (2011). Encyclopedia of caves. Academic Press.

