



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Γεωλογίας



Αναστασία Καρακώστα

Συμβολή στη μελέτη και καταγραφή της διάβρωσης από
συμπύκνωση υδρατμών στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο
Κιλκίς

Διπλωματική Εργασία



Θεσσαλονίκη 2019





ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΚΑΡΑΚΩΣΤΑ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5117

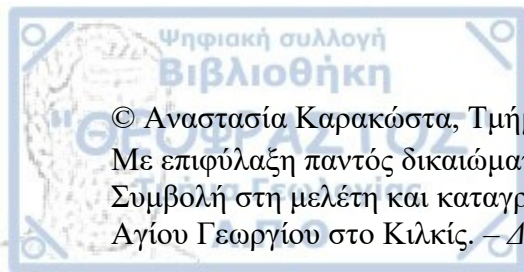
**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΠΟ
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΣΤΟ ΣΠΗΛΑΙΟ ΑΓΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΤΟ ΚΙΑΚΙΣ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας,

Επιβλέπων

Λαζαρίδης Γεώργιος, ΕΔΙΠ

.....



© Αναστασία Καρακώστα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Συμβολή στη μελέτη και καταγραφή της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς. – *Διπλωματική Εργασία*

© Anastasia Karakosta, School of Geology AUTH, 2019

All rights reserved.

Contribution to the study and documentation of condensation corrosion in Agios Georgios cave, Kilkis (Greece) – *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 ερμηνευθεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Υπόλειμμα διαβρωμένου σπηλαιοθέματος στο σπήλαιο του Κιλκίς, φωτ Γ. Λαζαρίδης.







Πρόλογος.....	1
1. Εισαγωγή.....	3
2. Γενικά.....	5
3. Μεθοδολογία.....	9
3.1 Μετρήσεις στους θόλους (cupolas)	10
3.2 Μετρήσεις στα κοραλλοειδή (Coralloids)	10
3.3 Μετρήσεις στα υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων	12
3.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας	12
3.5 Μετρήσεις pH	12
4. Σπήλαιο Αγίου Γεωργίου	13
4.1 Γεωγραφική και Γεωλογική τοποθέτηση	13
4.2 Περιγραφή του Σπηλαίου	15
4.3 Σπηλαιογένεση.....	15
4.4 Παλαιοντολογία	15
4.5 Καταγραφή Σπηλαιοθεμάτων	16
4.6 Καταγραφή Διαβρωσιγενούς Μορφολογίας.....	21
5. Αποτελέσματα	27
6. Συζήτηση.....	35
7. Συμπεράσματα	39
Βιβλιογραφία.....	41
Περίληψη.....	45
Abstract	47
Παράρτημα.....	49





Πρόλογος

Η έρευνα αυτή αποτελεί Διπλωματική Εργασία, στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος του τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Δρ. Γ. Λαζαρίδη, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, κατόπιν ανάθεσης με απόφαση του Τομέα Γεωλογίας στη συνεδρίαση 176/5/6/2019. Επίσης, οι εργασίες στο σπήλαιο και η μελέτη έχουν εγκριθεί από την Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας και Σπηλαιολογίας του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού με το υπ. αριθμ. ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΠΣ.ΓΒΕ/218939/156861/2637/310 έγγραφό της που εκδόθηκε στις 22/5/2018.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και η καταγραφή των μορφών διάβρωσης που δημιουργούνται από το φαινόμενο της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών (condensation corrosion) στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στην περιοχή του Κιλκίς. Με τη μελέτη αυτή διαπιστώνεται η έκταση και η επίδραση του φαινομένου στο σπήλαιο με τα αποτελέσματα αυτού να εμφανίζονται διάσπαρτα, τόσο στο μητρικό πέτρωμα, όσο και στα σπηλαιοθέματα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου κ. Γεώργιο Λαζαρίδη, καθώς η συμβολή του για την διεκπεραίωση της μελέτης ήταν καθοριστική. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον Αναπλ. Καθηγητή Ν. Καντηράνη, διευθυντή του τομέα Ορυκτολογίας- Πετρολογίας- Κοιτασματολογίας του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, για την παραχώρηση πρόσβασης στο όργανο μέτρησης pH του εργαστηρίου Ορυκτολογίας και Πετρολογίας. Τέλος, ευχαριστώ τις φοιτήτριες του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ, Νικολέτα Καργοπούλου και Κυριακή Φελλαχίδου για την βοήθειά τους στην υπαίθρια εργασία.



1. Εισαγωγή

Στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς, έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα ένας σημαντικός αριθμός επιστημονικών ερευνών και δημοσιεύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη αναφορά γίνεται στο Δελτίο της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας από την Πετροχείλου (1962), όπου γίνεται περιγραφή του σπηλαίου, ενώ μια πιο βελτιωμένη εκδοχή της δημοσιεύεται περίπου μια δεκαετία μετά (Πετροχείλου, 1973). Ακολουθεί η παλαιοντολογική μελέτη των απολιθωμένων οστών (Tsoukala 1992) και μια σειρά μελετών που βασίζονται στα σπηλαιοθέματα του σπηλαίου, όπως η μελέτη του παλαιοκλίματος, με τη χρήση των σταθερών ισοτόπων C και O και απόλυτων χρονολογήσεων U/Th (Αντωνέλου, 2007, Antonelou *et al.*, 2010, Dotsika *et al.*, 2010). Οι Ifandi *et al.* (2015) εντόπισαν ένα νέο περιβάλλον δημιουργίας αργιλικών ορυκτών στα σπηλαιοθέματα του σπηλαίου Αγίου Γεωργίου.

Ωστόσο, έναυσμα για την παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί η αναφορά του Γ. Λαζαρίδη, όπου επιβεβαιώνεται η δράση της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου, κατά την μελέτη των υπογενών σπηλαίων στην Ελλάδα (Lazaridis, 2017).

Για την πραγματοποίηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε εργασία πεδίου σπήλαιο Αγίου Γεωργίου, όπου έγιναν παρατηρήσεις, καταγραφή δομών που σχετίζονται με το φαινόμενο της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών, μετρήσεις για την ποσοτικοποίηση της διάβρωσης και άλλων στοιχείων που συνδέονται με αυτή.

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν συγκρίνονται με τα δεδομένα που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, ώστε να εξεταστεί ποιες δομές και πως συνδέονται με το φαινόμενο αυτής της διάβρωσης και να εκτιμηθεί το χρονικό πλαίσιο και στο οποίο έδρασε ή δρα σήμερα και ο βαθμός επίδρασης. Κάποια πρόδρομα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευτεί από τους Karakosta *et al.*, (2019).



2. Γενικά

Ως σπήλαιο ορίζεται εκλαϊκευμένα κάθε φυσικός υπόγειος χώρος στα πετρώματα του φλοιού της Γης, του οποίου το μέγεθος είναι αρκετά μεγάλο για να μπορεί να εισέλθει ο άνθρωπος (International Union of Speleology). Γεωλογικά υπάρχουν πιο σύνθετοι ορισμοί που συνδέουν τον όρο σπήλαιο με υδρολογικές ή άλλες συνθήκες και όχι το μέγεθος του ανθρώπου (Ford & Williams, 2007). Ανά τον κόσμο συναντώνται διάφοροι τύποι σπηλαίων, αλλά κυριαρχούν τα σπήλαια που δημιουργούνται σε ανθρακικά πετρώματα και είναι γνωστά σαν καρστικά σπήλαια. Ανάλογη εικόνα υπάρχει και στην Ελλάδα.

Η δημιουργία και εξέλιξη ενός φυσικού σπηλαίου καλείται σπηλαιογένεση (speleogenesis). Κύρια σπηλαιογενετική διαδικασία ενός καρστικού σπηλαίου αποτελεί η διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου CaCO_3 του πετρώματος, και ο μηχανισμός που την κατευθύνει είναι κυρίως είναι η ροή των υπόγειων υδάτων (Klimchouk, 2012). Η μορφολογία των καρστικών σπηλαίων θεωρείται αρκετά πολύπλοκη καθώς δημιουργούνται και εξελίσσονται ποικίλες τρισδιάστατες δομές μέσα στα πετρώματα. Ο παράγοντας της διάλυσης εξαρτάται από πετρολογικές, τεκτονικές, κλιματικές, βιοτικές και εδαφικές συνθήκες καθώς και μεταβολές του βασικού επιπέδου φαίνεται να επηρεάζουν και να διαμορφώνουν αυτές τις δομές (Ford & Williams, 2007).

Γενικά όταν ένα σπήλαιο δημιουργείται και εξελίσσεται κατευθυνόμενο από νερό απορροής που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια, τότε ανήκει στην κατηγορία των επιγενών σπηλαίων (epigenic). Η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων οφείλεται κυρίως στο ανθρακικό οξύ H_2CO_3 που προάγεται από αντιδράσεις με το έδαφος CO_2 . Η επιγενής σπηλαιογένεση σχετίζεται άμεσα με την κατείδωση του νερού μετεωρικής προέλευσης και συνδέεται με τοπικά συστήματα ροής και/ή σημεία εκφόρτισης σε άμεση ή σχεδόν άμεση γειτνίαση (Klimchouk, 2012).

Από υδρολογική άποψη, ένα σπήλαιο μπορεί να σχηματίζεται στις εξής υδρολογικές ζώνες (από πάνω προς τα κάτω, Palmer 2000):

1. Στην ακόρεστη ζώνη (vadose), όπου η επίδραση της βαρύτητας είναι καθοριστική στην κίνηση του νερού (βαρυτικό νερό), ενώ η συμμετοχή των τριχοειδών δυνάμεων θεωρείται αμελητέα για τη δημιουργία του σπηλαίου. Είναι σημαντικό η ταχύτητα του νερού να διατηρείται μεγάλη για σημαντικές αποστάσεις. Λόγω της βαρύτητας το νερό ακολουθεί τις πιο σύντομες καθοδικές διαδρομές, και κινείται οριζόντια μόνο αν συναντήσει ασυνέχειες ή ανθεκτικά στη διάβρωση στρώματα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται, για παράδειγμα, τα βάραθρα (Palmer, 2000).

2. Στη φρεατική ζώνη (phreatic) κοντά στο βασικό επίπεδο (πιεζομετρική επιφάνεια), όπου συμβαίνουν γρήγορες κινήσεις νερού οριζόντιας κατεύθυνσης, ακολουθώντας τις διάφορες διαθέσιμες διαδρομές, ενώ η δράση της βαρύτητας παύει να είναι καθοριστική λόγω της υδροστατικής πίεσης. Στα πρώτα στάδια εξέλιξης αναμένεται η ζώνη να είναι γεμάτη με νερό. Τα περισσότερα φρεατικά περάσματα ακολουθούν ακανόνιστες και ελικοειδείς διαδρομές (Palmer, 2000).

Έχει παρατηρηθεί ότι ανάλογα με την υδρολογική ζώνη και τις αντίστοιχες συνθήκες που επικρατούν κατά τη σπηλαιογένεση, δημιουργούνται και αντίστοιχα μοτίβα σπηλαίων (cave patterns), όπως αυτά μπορούν να παρατηρηθούν στην κάτοψη τους. Για την φρεατική ζώνη έχουν παρατηρηθεί κυρίως τα δενδροειδή δίκτυα (branchwork) όπου είναι εμφανής η οριζόντια κατά βάση ροή του νερού, δημιουργώντας περάσματα και σχεδόν καθόλου θαλάμους, καθώς και τα ανοστομοτικά σπήλαια (anostomotic pattern). Σε άλλες περιπτώσεις, όπως τα σπήλαια βαθιάς φρεατικής ζώνης ή τα υπογενή που αναφέρονται παρακάτω, παρατηρούνται οι λαβύρινθοι (network), τα σπογγοειδή δίκτυα (spongework) κ.α. (Palmer, 2000).

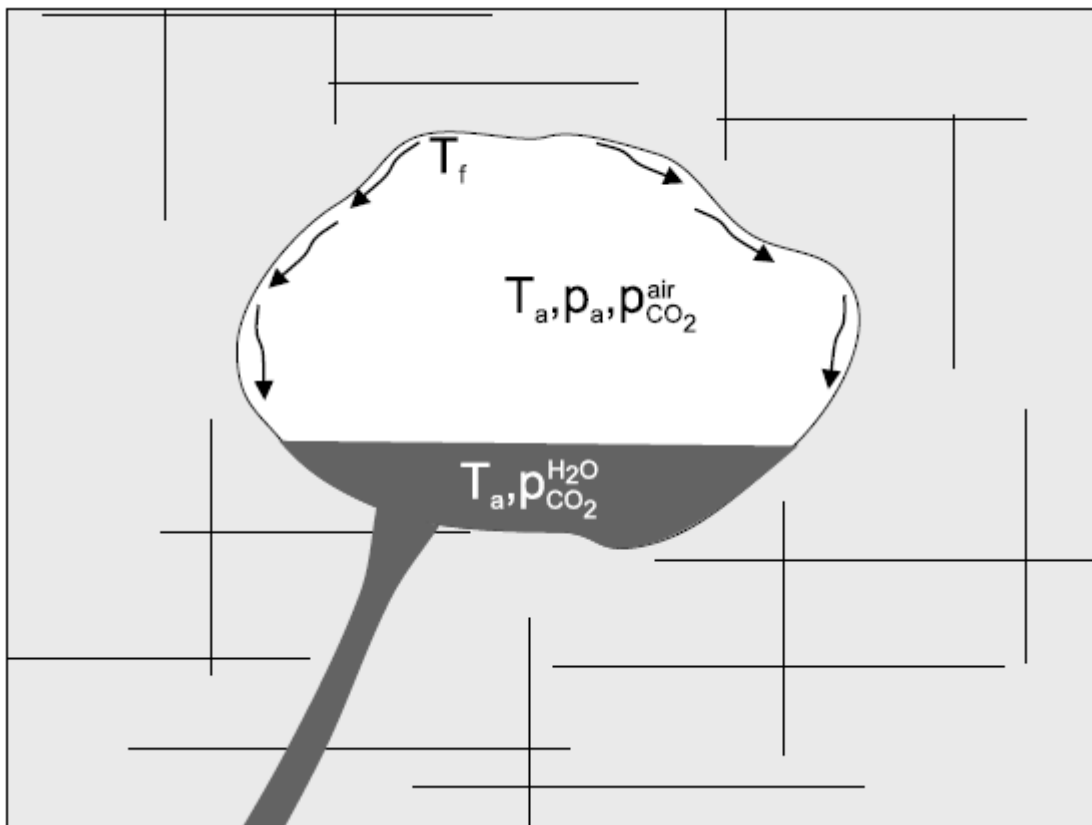
Πέρα από ότι αναφέρθηκε νωρίτερα για την επιγενή σπηλαιογένεση, ένα σπήλαιο μπορεί να δημιουργείται χωρίς την άμεση σύνδεση με το νερό κατείσδυσης. Τέτοια σπήλαια ονομάζονται υπογενή (hypogene) και σχετίζονται με νερό που προέρχεται από βάθος. Πιο συγκεκριμένα *«το υπογενές σπήλαιο ορίζεται ως ο σχηματισμός και η διεύρυνση δομών μέσω διάλυσης (συστήματα κενών αγωγών) από ανοδικά ρευστά που εκφορτίζουν στη ζώνη του σπηλαίου από χαμηλότερες υδρολογικές/ υδροστρωματογραφικές ζώνες, με προέλευση αυτών από απομακρυσμένες, αποκομμένες ή βαθιές πηγές, ανεξάρτητες από νερό απορροής από την υπερκείμενη περιοχή»* (Klimchouk, 2017). Η υπογενής σπηλαιογένεση είναι επίσης ανεξάρτητη από το κλίμα σε αντίθεση με την επιγενή. Κάποιες ενδεικτικές διαδικασίες που μπορούν να συμβάλλουν στην υπογενή σπηλαιογένεση είναι: 1. διάλυση από ανθρακικό οξύ το οποίο εδώ προέρχεται από βάθος λόγω μεταμόρφωσης ή αποσύνθεσης σε αντίθεση με τα επιγενή, 2. διάλυση από την ψύξη θερμών νερών καθώς σε ένα κλειστό σύστημα η διαλυτότητα του ασβεστίτη αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας (hydrothermal speleogenesis), 3. διάλυση με τη συμβολή υδροθείου (H_2S) που παράγεται σε βάθος από μικροβιακή ή θερμική αναγωγή θεικών αλάτων παρουσία οργανικού άνθρακα, 4. ανάμιξη των υδάτων διαφορετικού χημισμού, κ.α. (π.χ. Klimchouk, 2012). Επίσης, είναι πολύ πιθανόν να δρουν περισσότερες από μια διαδικασία, είτε σε συνδυασμό ή διαδοχικά στο χρόνο.

Μέσα στα σπήλαια παρατηρούνται διάφορες μικρότερης κλίμακας δομές που οφείλονται στην διάβρωση και τη διάλυση. Κάποιες από αυτές τις δομές οφείλουν την δημιουργία τους σε συγκεκριμένες διαδικασίες, ενώ άλλες μπορούν να οφείλονται σε περισσότερες από μια. Ανάμεσα στις διάφορες δομές που μπορεί να παρατηρήσει κανείς σε ένα σπήλαιο είναι: οι μορφές των περασμάτων, οι εγκολπώσεις (notches), τα εκκρεμή (pendants), τα φύματα (cusps), οι θόλοι (cupolas) κ.α. (Lauritzen and Lundberg, 2000).

Πέρα από τις μορφές διάλυσης, υπάρχουν και χαρακτηριστικές δομές απόθεσης χημικών ιζημάτων, τα σπηλαιοθέματα (speleothems), που αποτελούν τον διάκοσμο των σπηλαίων. Σπηλαιοθέμα καλείται κάθε δευτερογενής απόθεση ορυκτού μέσα σε ένα σπήλαιο (Moore, 1952) και αναφέρεται στη μορφή απόθεσης, όχι τη σύσταση. Το νερό μετεωρικής προέλευσης που διαρρέει μέσα από τα εδάφη μέχρι το ασβεστολιθικό υπόβαθρο είναι ικανό να απορροφήσει σημαντικές ποσότητες CO_2 από το έδαφος, δημιουργώντας ασθενές ανθρακικό οξύ. Στη συνέχεια με την κατείσδυσή του το νερό διαλύει τον ασβεστόλιθο και γίνεται κορεσμένο σε ασβεστίτη. Όταν αυτή το διάλυμα

εισέρχεται σε ένα σπήλαιο, αλλάζουν οι φυσικοχημικές συνθήκες και προκαλείται η διαφυγή του CO_2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα υπέρκορο διάλυμα, από το οποίο αποτίθεται ασβεστίτης (White, 1988). Χαρακτηριστικά σπηλαιοθέματα που συναντώνται στα σπήλαια αποτελούν οι σταλακτίτες, οι σταλαγμίτες, οι κολώνες, οι, οι κουρτίνες, τα κοραλλοειδή, τα μαργαριτάρια, οι ροόλιθοι, κ.α.

Μια διαδικασία που μπορεί να δημιουργήσει δομές διάλυσης ή διεύρυνση περασμάτων και λαμβάνει χώρα στα σπήλαια όταν δεν είναι εντελώς πληρωμένα με νερό ή ιζήματα, είναι η διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών (condensation corrosion). Σύμφωνα με τη βασική θεωρία, οι υδρατμοί που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα ενός σπηλαίου και μπορεί να προέρχονται από λιμνάζοντα νερά μέσα σε αυτό ή όχι, επικαθόνται στα τοιχώματα του σπηλαίου σαν ένα λεπτό στρώμα νερού και έχοντας δεσμεύσει CO_2 διαβρώνουν το πέτρωμα (Cigna & Forti 1986). Για να μπορέσουν οι υδρατμοί να υγροποιηθούν στα τοιχώματα, πρέπει η θερμοκρασία αυτών T_f , να είναι μικρότερη από αυτή της ατμόσφαιρας του σπηλαίου, T_a (Εικόνα 1, Dreybrodt *et al.*, 2005).



Εικόνα 1. Το νερό εξατμίζεται από μία ελεύθερη επιφάνεια με αυξημένη θερμοκρασία T_a στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου. Οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στα τοιχώματα του σπηλαίου με θερμοκρασία $T_f < T_a$ και ρέουν προς τα κάτω ως ένα λεπτό στρώμα νερού (βελάκια), φτάνοντας εύκολα σε σημείο κορεσμού, ως προς το ορυκτό που συνθέτει το πέτρωμα (από Dreybrodt *et al.*, 2005).

Τα αποτελέσματα της διάβρωσης από συμπύκνωση είναι εντονότερα σε περίπτωση σπηλαίων με αυξημένη θερμοκρασία (thermal caves) ή σε άλλα όπου υπάρχουν πολύ

ισχυρά οξέα (H_2S and H_2SO_4) ή σε σπήλαια που κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού έχουν αυξημένες ποσότητες κορεσμένου νερού (Cigna & Forti 1986). Είναι σημαντική γενικά η κίνηση ρευμάτων αέρα και οι ευνοϊκές συνθήκες κλίματος ανάλογα το που βρίσκεται το σπήλαιο.

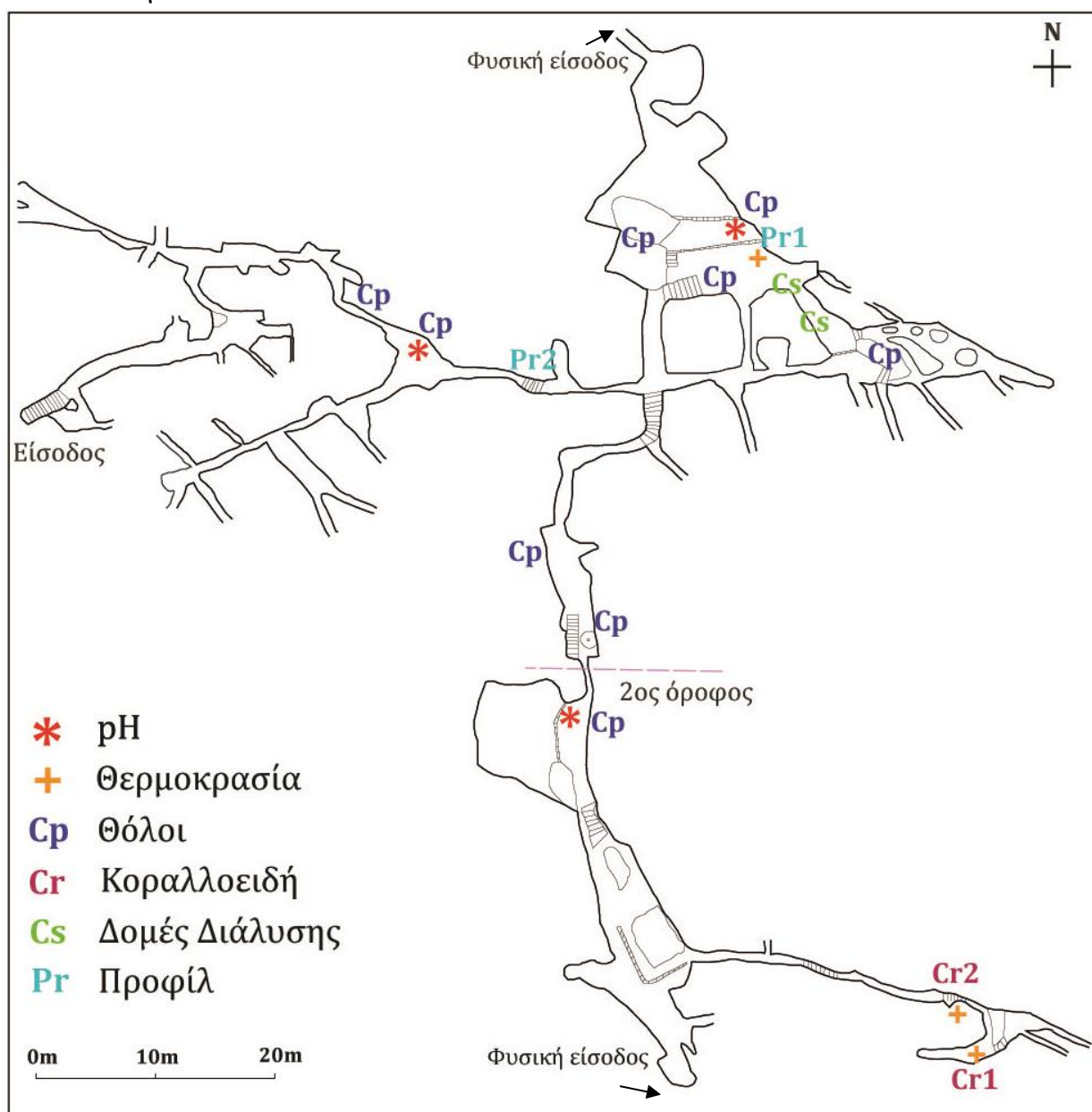
Πιο πρόσφατες μελέτες, συζητούν κάποιους επιπλέον παράγοντες για την δράση της διάβρωσης πέρα από τη βασική θεωρία, όπως η ανθρώπινη παρουσία στα επισκέψιμα σπήλαια, καθώς η ανθρώπινη αναπνοή παράγει, υδρατμούς και CO_2 στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου προάγοντας έτσι τη διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών (πχ. Avramidis *et al.*, 2001, De Freitas *et al.*, 2006). Ανάλογο αποτέλεσμα έχει και η κατοίκηση των σπηλαίων από μεγάλους πληθυσμούς νυχτερίδων, όπου ο μεταβολισμός και η αποσύνθεση του γουανό απελευθερώνουν υδρατμούς, θερμότητα, CO_2 και οξέα στην ατμόσφαιρα (Lundberg & McFarlane, 2012, 2015, Cailhol *et al.*, 2019).

Έχουν παρατηρηθεί από τους ερευνητές κάποιες μορφολογίες οι οποίες επιβεβαιώνουν την δράση της διάβρωσης από συμπύκνωση μέσα σε ένα σπήλαιο, ιδιαίτερα όταν αυτό έχει δημιουργηθεί μέσα σε ανθρακικό πέτρωμα (Dublyansky & Spötl, 2014). Αυτές αποτελούν τα λειασμένα τοιχώματα (solution-smoothed walls), οι θόλοι, οι οποίοι συχνά συναντώνται μαζί με άλλες μορφές όπως οι αψίδες (rock bridges) και τα φύματα καθώς και τα εκκρεμή.

Επιπλέον, εκτός από τις μορφές διάλυσης που αναφέρθηκαν, υπάρχουν και μορφές απόθεσης, όπως κάποια κοραλλοειδή που μπορεί να συσχετίζονται με το συμπυκνωμένο νερό στα τοιχώματα του σπηλαίου. Όπως έχει αναφερθεί, το νερό αυτό διαλύει και κυλά προς τα κάτω στα τοιχώματα φτάνοντας σε σημείο υπερκορεσμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα από κάποιο ύψος και κάτω να σχηματίζονται κοραλλοειδή από αυτό το νερό, δημιουργώντας ταυτόχρονα τα "porcorn lines" πάνω από τις οποίες δεν υπάρχουν κοράλλια (Cigna & Forti, 1986). Μια ιδιαίτερη κατηγορία αυτών των σπηλαιοθεμάτων, τα κομβιοειδή (button coralloids) αποτελούν το συνδυασμό απόθεσης από εξάτμιση και αποσάθρωση (Hill & Forti, 1997).

3. Μεθοδολογία

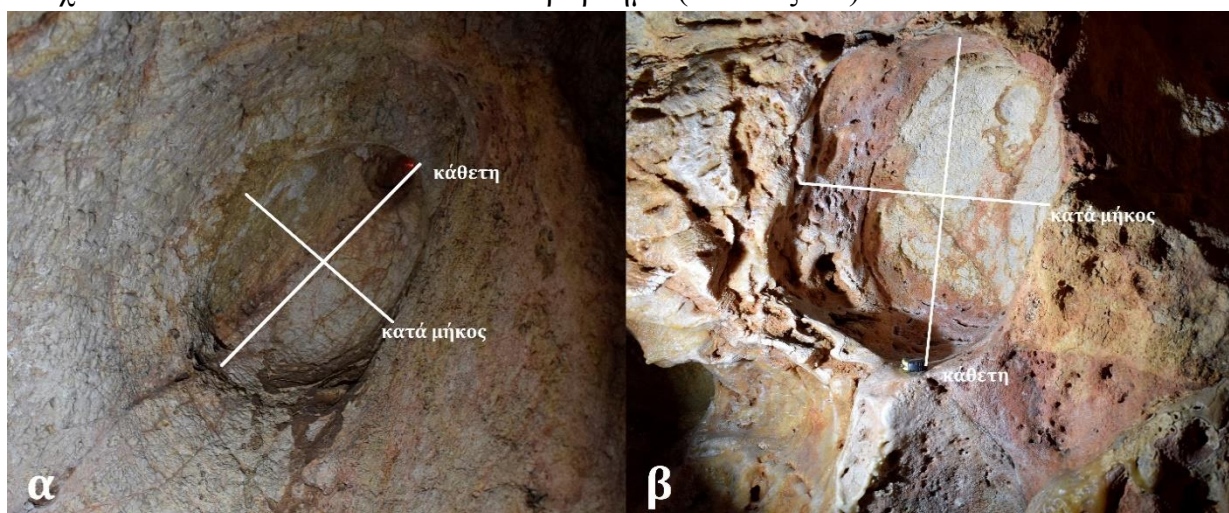
Κατά την διάρκεια του ερευνητικού σταδίου της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν 3 επισκέψεις στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς, τον μήνα Δεκέμβριο του 2018. Κατά τις επισκέψεις αυτές παρατηρήθηκαν οι μορφές διάλυσης και απόθεσης στο σπήλαιο και έγιναν μετρήσεις στους θόλους, τα κοράλλια, τα υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων, συλλέχθηκαν υδρατμοί από την ατμόσφαιρα, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας στον αέρα, τα τοιχώματα και τα σπηλαιοθέματα. Επιπλέον έγιναν μορφολογικές τομές στους θόλους με διαβρωμένα σπηλαιοθέματα και τεκμηριώθηκαν φωτογραφικά οι παρατηρήσεις. Οι κύριες θέσεις παρατηρήσεις και εργασιών πεδίου δίνονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Τοπογραφικός χάρτης (κάτοψη) του σπηλαίου Αγίου Γεωργίου, Κιλκίς. Εμφανίζονται οι θέσεις μετρήσεων και άλλα γενικά χαρακτηριστικά του σπηλαίου. (τροποποιημένο, από τους Τερζίδης Δ., *et al.*, 1992).

3.1 Μετρήσεις στους θόλους (cupolas)

Για τους θόλους έγιναν μετρήσεις σε όλο το σπήλαιο. Κάποιες ενδεικτικά σημειώνονται ως Cr στον τοπογραφικό χάρτη (Εικόνα 2). Σε κάθε θόλο μετρήθηκαν οι διαστάσεις του, κατά μήκος διάμετρος, κάθετη διάμετρος στην προηγούμενη και βάθος (Εικόνα 3). Συγκεκριμένα η έννοια του «κατά μήκος» ορίστηκε συμβατικά ως παράλληλη με το μήκος του περάσματος. Μαζί με την κάθετη σε αυτήν ορίζουν ουσιαστικά το άνοιγμα του θόλου και επομένως το βάθος μετριέται προς το ασβεστολιθικό τοίχωμα, είτε προς τα πάνω, είτε οριζόντια αν πρόκειται για θόλο οροφής ή τοιχώματος, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις έγιναν με μεζούρα και λείζερ αποστασιόμετρο. Σημειώθηκαν επίσης άλλες πληροφορίες όπως η ύπαρξη διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων και η τοποθέτησή τους στο χώρο, δηλ. αν βρίσκονται στα τοιχώματα ή στην οροφή και πόσο απέχουν από το δάπεδο και αν ακολουθούν κάποια ασυνέχεια. Συγκεκριμένα συγκεντρώθηκαν σε πίνακα τα στοιχεία 30 θόλων που δίνονται στο παράρτημα (πίνακας Α1).



Εικόνα 3. Ορισμός στοιχείων μέτρησης στους θόλους α. στην οροφή, β. στο τοίχωμα. (φωτ. Α. Καρακώστα)

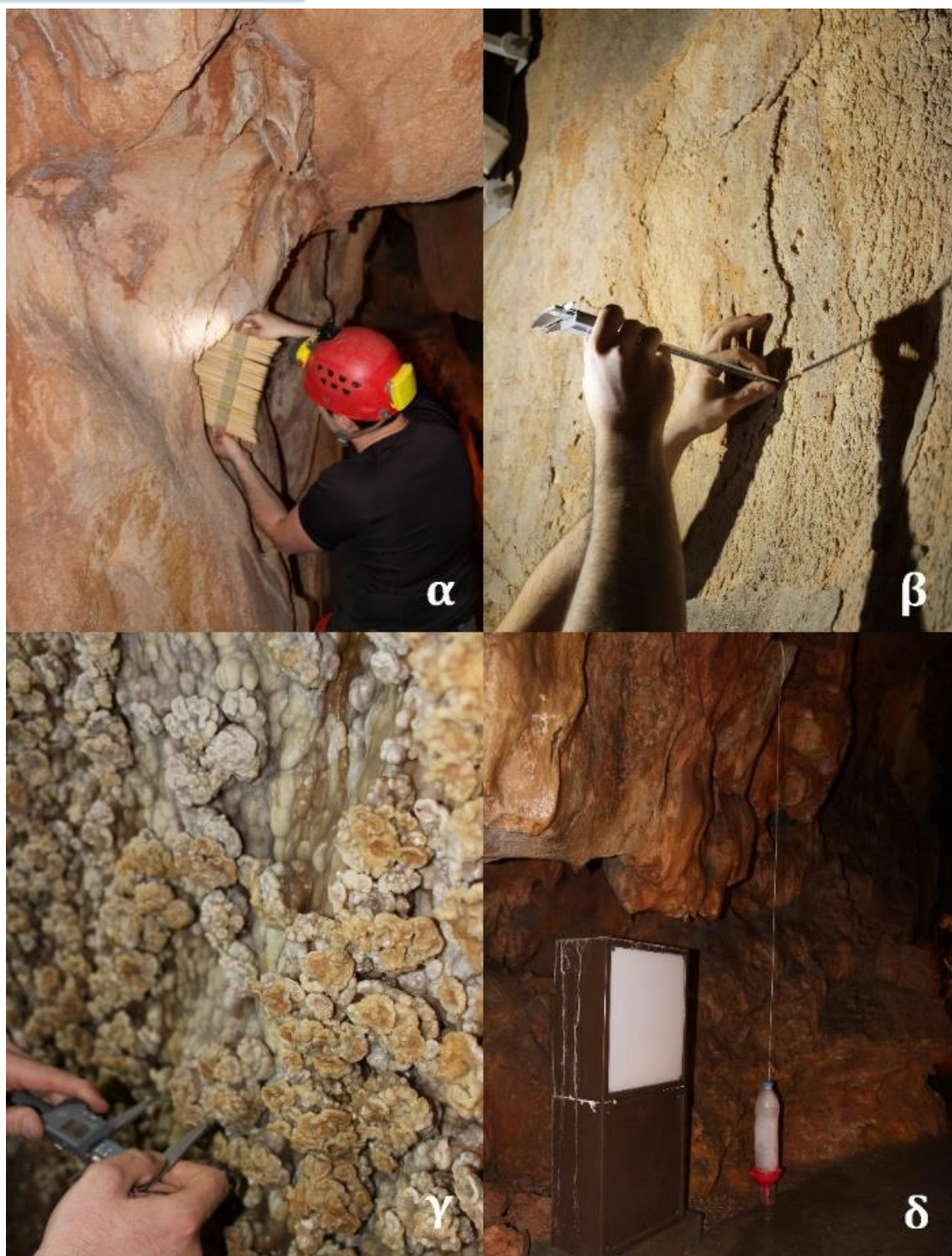
Επιπλέον, επιλέχθηκαν 2 θόλοι τοιχώματος που παρουσίαζαν ενδιαφέρον λόγω της παρουσίας διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων, όπου έγινε αποτύπωση της μορφολογίας τους με οριζόντιες και κάθετες μορφολογικές τομές, που οδήγησαν στην δημιουργία τοπογραφικού διαγράμματος. Οι θέσεις αυτών είναι οι Pr1 και Pr2 του τοπογραφικού χάρτη (Εικόνες 2, 4α).

3.2 Μετρήσεις στα κοραλλοειδή (Coralloids)

Μετρήσεις κοραλλοειδών έγιναν στον 2ο όροφο καθώς εκεί παρατηρούνται οι κύριες συγκεντρώσεις τους και έχουν μεγάλη ανάπτυξη. Επιλέχθηκαν τυχαία δύο θέσεις, οι Cr1 και η Cr2 (Εικόνες 2, 4γ), στις οποίες τα τοιχώματα καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό από αυτά τα σπηλαιοθέματα.

Με τη χρήση ψηφιακού παχυμέτρου μετρήθηκαν οι διαμέτροι των κοραλλοειδών κατά υψομετρικές ζώνες μισού μέτρου έως 2.5m ύψος. Σε δύο σημεία της θέσεως Cr1,

φωτογραφήθηκαν τα τοιχώματα για να γίνει εμβαδομέτρηση, ούτως ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό κάλυψης των τοιχωμάτων, ως ένας επιπλέον τρόπος εκτίμησης της ανάπτυξης του καθ' ύψος.



Εικόνα 4. α. Μέτρηση θόλου με προφίλόμετρο στη θέση Pr1, β. Μέτρηση πάχους διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων, γ. Μέτρηση διαμέτρου κοραλλοειδών στην θέση Cr1, δ. Συλλογή νερού για την μέτρηση του pH (φωτ. Κ. Φελλαχίδου).

3.3 Μετρήσεις στα υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων

Στον μεγάλο θάλαμο του σπηλαίου και συγκεκριμένα στις θέσεις Cs (Εικόνα 2) εντοπίστηκαν διαβρωμένα υπολείμματα σπηλαιοθεμάτων, όπως κρούστες, υπολείμματα κουρτινών και σταλακτιτών, στα τοιχώματα του ασβεστολίθου. Σε αυτά μετρήθηκε το ελάχιστο πάχος της απόθεσης που εκτιμάται ότι έχει διαβρωθεί. Οι μετρήσεις έγιναν με ψηφιακό παχύμετρο (Εικόνα 4β).

3.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας

Με τη χρήση θερμομέτρου λείζερ έγιναν μετρήσεις κυρίως σε κοραλλοειδή, στις ίδιες θέσεις Cr1 και Cr2 και ύψη που ορίστηκαν για την μέτρηση των διαμέτρων τους (Εικόνα 2). Μετρήσεις έγιναν και σε θόλους τοιχώματος, πχ. θέση Pr1 (Εικόνα 2). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μέρος ενός συνόλου δεδομένων για θερμοκρασίες αέρα μέσα στο σπήλαιο από τα έτη 2007-2008 που συλλέχθηκαν με ψηφιακά data-loggers HOBO Pro-V2. Επιτόπου μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα έγιναν με απλό θερμόμετρο που υπάρχει στο σπήλαιο.

3.5 Μετρήσεις pH

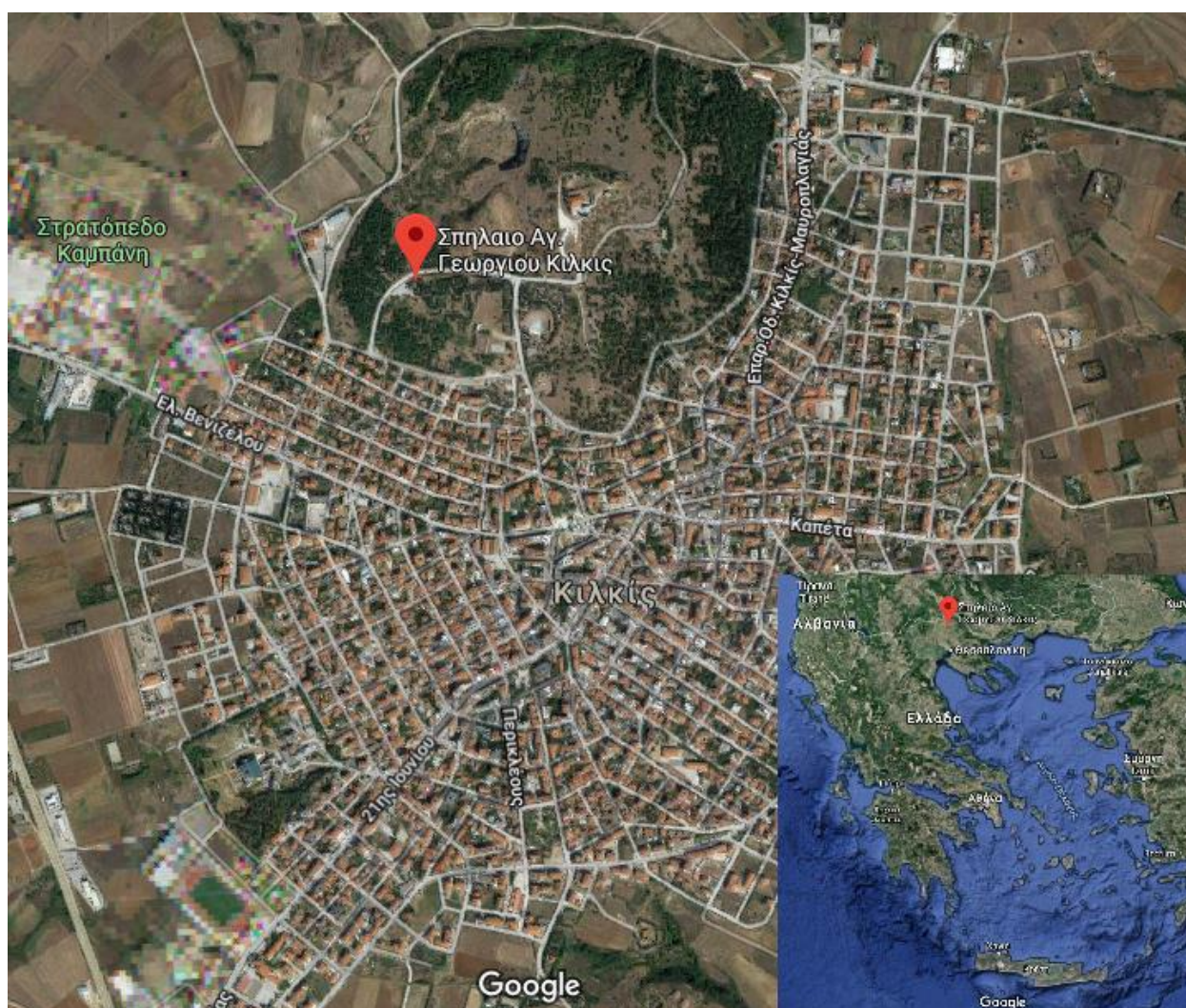
Κατά την επίσκεψη στο σπήλαιο στις 19 Δεκεμβρίου 2019, συλλέχθηκαν υδρατμοί από την ατμόσφαιρα του σπηλαίου από τρεις θέσεις, δύο στον κάτω όροφο και μία στον πάνω (Εικόνα 2). Για την συλλογή χρησιμοποιήθηκαν μπουκάλια που περιείχαν πάγο, τα οποία κρεμάστηκαν σε ύψος (Εικόνα 4δ) από το δάπεδο, με σκοπό τη συλλογή του υγροποιημένου νερού σε δοχεία. Όλες οι επιφάνειες των σκευών που χρησιμοποιήθηκαν καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό πριν την έναρξη της διαδικασίας. Τέλος το pH των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν, μετρήθηκε στο εργαστήριο Ορυκτολογίας και Πετρολογίας του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ.

4. Σπήλαιο Αγίου Γεωργίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται γενικές πληροφορίες που αφορούν το σπήλαιο, όπως η γεωλογία, η παλαιοντολογία, η μορφολογία, τα σπηλαιοθέματα, οι διαβρωσιγενείς δομές καθώς και πιο λεπτομερείς που αφορούν ειδικές παρατηρήσεις μέσα σε αυτό.

4.1 Γεωγραφική και Γεωλογική τοποθέτηση

Το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του ομώνυμου λόφου της πόλης Κιλκίς, στη Κεντρική Μακεδονία (Εικόνα 5). Γενικά η περιοχή του Κιλκίς χαρακτηρίζεται ως πεδινή, ενώ το κλίμα χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό, με ψυχρούς χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια.

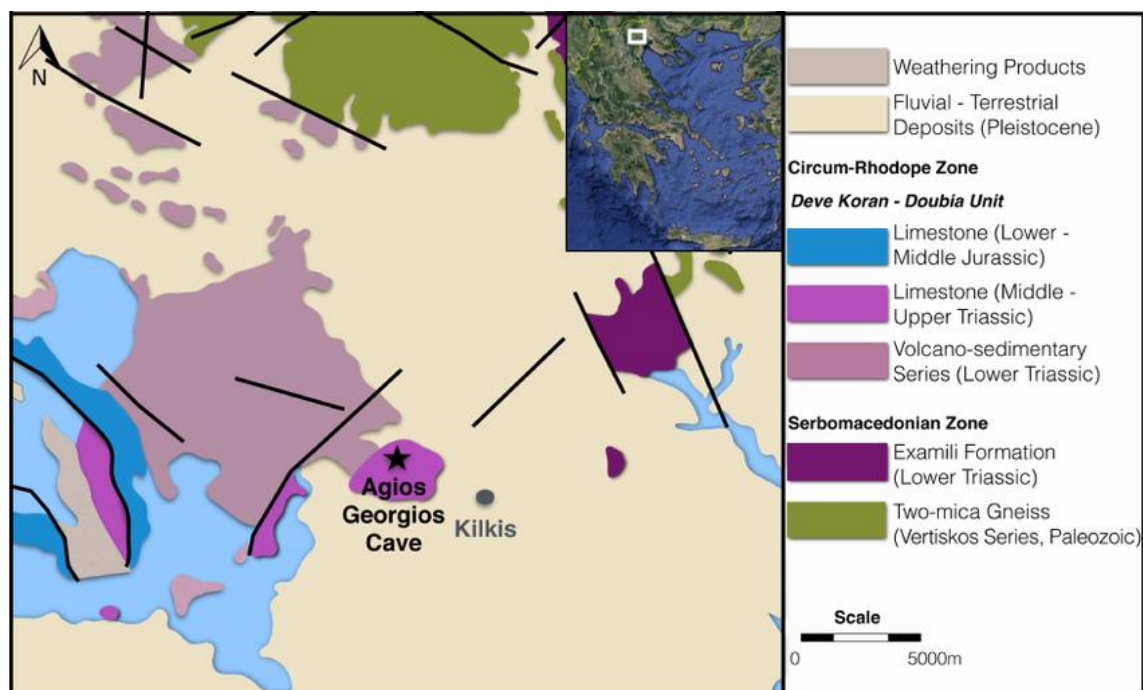


Εικόνα 5. Δορυφορική εικόνα της περιοχής του Κιλκίς, όπου διακρίνεται η θέση του σπηλαίου Αγίου Γεωργίου, (από Google maps 2019).

Από γεωλογική άποψη, το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου έχει διανοιχθεί στους ασβεστολίθους του Μέσο-Άνω Τριαδικού, που ανήκουν γεωτεκτονικά στην ενότητα Ντεβέ Κοράν -Δουμπιά της Περιοδοπικής ζώνης (π.χ. Μουντράκης, 2010).

Η Περιοδοτική ζώνη (Kauffmann *et al.* 1976), πλάτους 10-20 km, ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες, αποτελείται από Περμοτριάδικα και Ιουρασικά μετα- ιζήματα και θεωρείται ότι αντιπροσώπευε την ηπειρωτική κατωφέρεια των ηπειρωτικών μαζών της Ενδοχώρας (Σερβομακεδονική Μάζα και Μάζα Ροδόπης) προς την ωκεάνια περιοχή της ζώνης Αξιού. Παρουσιάζει μεταμόρφωση χαμηλού βαθμού, Πρασινοσχιστολιθικής φάσης, ηλικίας Ανώτερο Ιουρασικό- Κάτω Κρητιδικό και έχει επηρεαστεί από 2 φάσεις πτυχώσεων και είναι μια πολύπλοκη τεκτονική επιπνευτική μεγαδομή με κίνηση ΝΔ που περιλαμβάνει λείπια (Tranos, 1999). Αποτελείται από 3 ενότητες : 1. Ενότητα Ντεβέ Κοράν - Δουμπιά, 2. Ενότητα Μελισσοχωρίου - Χολομώντα, 3. Ενότητα Άσπρης Βρύσης – Χορτιάτη (Μουντράκης, 2010).

Συγκεκριμένα, η ενότητα Ντεβέ Κοράν στη βάση της αποτελείται από ένα σχηματισμό μετακλαστικών ιζημάτων Περμίου, που ονομάζεται «Σχηματισμός Εξαμυλίου». Από πάνω ακολουθεί μια ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά που χρονολογείται στο Περμίο - Κάτω Τριαδικό, με την ηφαιστειότητα αυτή να χαρακτηρίζεται ως “bimodal” καθώς περιέχει τόσο όξινα όσο και βασικά πετρώματα σημάδι αρχικής ηπειρωτικής διάρρηξης. Προς τα πάνω συνεχίζεται η ιζηματογένεση με την απόθεση μιας ανθρακικής σειράς με ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, ψαμμιτικούς και μαργαϊκούς με φύκη και κοράλλια ηλικίας Μέσο Τριαδικό- Μέσο Ιουρασικό. Στις ανώτερες στάθμες της παρουσιάζει ορισμένες αργιλικές και μαργαϊκές ενστρώσεις, πελαγικής φάσης (Μουντράκης, 2010).



Εικόνα 6. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης του Κιλκίς. Εμφανίζεται η θέση του σπηλαίου Αγίου Γεωργίου και η γεωλογική του τοποθέτηση στους ασβεστόλιθους του Μέσο-Ανω Τριαδικού της ενότητας Ντεβέ Κοράν (από Ifandi *et al.*, 2015, βασισμένο στους Kockel & Ioannides, 1979).

4.2 Περιγραφή του Σπηλαίου

Το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς, αποτελεί επισκέψιμο σπήλαιο. Ανακαλύφθηκε τυχαία από έναν λατόμο, τον Γεώργιο Παυλίδη (Μπουλασίκη), κατά την ώρα εργασίας, γύρω στο 1925, ενώ η πρώτη χαρτογράφηση έγινε το 1960 από την Άννα Πετροχείλου, της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας (Ε.Σ.Ε.). Υπό την επίβλεψη της ίδιας, έγιναν εργασίες αξιοποίησης του σπηλαίου από το 1977 έως το 1986.

Η έκταση του σπηλαίου είναι περίπου 800 m² και αποτελείται από στενά και ψηλά περάσματα συνολικού μήκους 500 m (Lazaridis, 2017). Τα περάσματα αυτά ακολουθούν τεκτονικές ασυνέχειες Α-Δ και Β-Ν έως ΒΔ-ΝΑ. Το σπήλαιο χωρίζεται σε 2 ορόφους, οι οποίοι ενώνονται με εσωτερική σκάλα. Ωστόσο, αναπτύσσεται όλο στο ίδιο περίπου υψόμετρο.

Οι λιγοστοί θάλαμοι που συναντώνται έχουν σχηματιστεί κυρίως από καταρρεύσεις τμημάτων της οροφής. Η κύρια είσοδος αποτελεί ένα στενό πέραςμα, ενώ στο παρελθόν φαίνεται να υπήρχαν και άλλες ανοιχτές φυσικές εισοδοί που επέτρεπαν την είσοδο ζώων κατά το Άνω Πλειστόκαινο και πλέον έχουν πληρωθεί με ιζήματα που σχηματίζουν κώνους κορρημάτων.

Το σπήλαιο παρουσιάζει ποικιλία σπηλαιοθεμάτων. Στον πρώτο όροφο συναντώνται σταλακτίτες, σταλαγμίτες, κουρτίνες και ροόλοθοι κατά βάση, ενώ στον δεύτερο κυριαρχούν τα κοραλλοειδή, όπως καταγράφονται στην παράγραφο 4.5.

Η μέση θερμοκρασία του σπηλαίου όπως καταγράφηκε από μετρήσεις στον μεγάλο θάλαμο το 2007 ήταν 15.85 °C, και εύρος 15.5-15.9 °C για το διάστημα 15 Ιουλίου με 15 Αυγούστου και με μέγιστο 16.2 °C κατά τους χειμερινούς μήνες (Λαζαρίδης, προσ. επικοινωνία). Το θερμόμετρο του σπηλαίου στο μεγάλο θάλαμο κατά τις επισκέψεις το μήνα Δεκέμβριο έδειχνε 14.8 °C.

4.3 Σπηλαιογένεση

Το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου έχει χαρακτηριστεί ως υπογενές (Lazaridis, 2017) και έχει δημιουργηθεί στην βαθιά φρεατική ζώνη. Από την παρατήρηση του σπηλαίου δεν φαίνεται κάποια κατεύθυνση του νερού, δηλαδή δεν υπάρχει προτίμηση ροής που να συμπεραίνεται από την μορφολογία. Το μοτίβο σπηλαίου που προκύπτει από την εικόνα της κάτοψης αυτού, αντιστοιχεί σε λαβύρινθο με την ύπαρξη λίγων θαλάμων. Αποτελεί υδροθερμικό σπήλαιο, το οποίο δημιουργήθηκε στο βάθος και ανήλθε τεκτονικά στη σημερινή του θέση. Οι φυσικές εισοδοί μάλλον άνοιξαν ως τομές της κατά βάθος διάβρωσης και του σπηλαίου. Η διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών αναμένεται να έδρασε μετά την τουλάχιστον μερική κένωση του σπηλαίου από το νερό που το δημιούργησε.

4.4 Παλαιοντολογία

Στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου υπάρχει παλαιοντολογικό ενδιαφέρον εφόσον έχουν βρεθεί περισσότερα από 200 απολιθώματα οστών, δοντιών, κεράτων και κοπρόλιθων. Τα

περισσότερα έχουν βρεθεί κοντά στις φυσικές εισόδους του σπηλαίου. Από τα πιο χαρακτηριστικά είδη που βρέθηκαν είναι η ύαινα, *Crocota crocuta spelaea* (GOLDFUSS) η οποία κατοίκησε στο σπήλαιο, όπως φαίνεται από την ύπαρξη απολιθωμάτων που ανήκουν σε νεαρά άτομα και κοπρόλιθων (Tsoukala 1992).

Τα απολιθώματα αυτά χρονολογούνται βιοχρονολογικά στο Άνω Πλειστόκαινο (Tsoukala, 1992). Η απόλυτη χρονολόγησή ενός δείγματος δοντιού ύαινας με τη μέθοδο Electron Spin Resonance, έδωσε ηλικία 12.2 ± 2.5 Ka (Bassiakos & Tsoukala, 1996) και δύο επιπλέον δείγματα από ύαινα και άλογο ραδιοχρονολογήθηκαν στα 29.349 Ka και 28.530 Ka, αντίστοιχα (Makridis *et al.*, 2013).

4.5 Καταγραφή Σπηλαιοθεμάτων

Κατά την έρευνα που πραγματοποιήσαμε στο σπήλαιο έγινε διερεύνηση των σπηλαιοθεμάτων και λεπτομερής καταγραφή αυτών, όπου επιβεβαιώθηκε η παρουσία των σπηλαιοθεμάτων που αναφέρουν παλιότεροι ερευνητές και συμπληρώθηκε ο κατάλογος με την αναγνώριση και επιπλέον μορφών. Δίνονται παρακάτω ορισμένα στοιχεία για τα σπηλαιοθέματα αυτά.

- **Κοραλλοειδή (Coralloids).** Τα κοραλλοειδή αποτελούν το κυρίαρχο σπηλαιόθεμα στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου, και παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη ιδιαίτερα στον 2ο όροφο. Συναντάμε διάφορες μορφές όπως κομβιοειδή και βοτριοειδή, και πολλές φορές δημιουργούν συσσωματώματα (Εικόνα 7). Επιπλέον παρατηρούμε ότι μπορούν να σχηματίζονται κατευθείαν πάνω στον ασβεστόλιθο ή πάνω σε άλλα σπηλαιοθέματα (Εικόνα 7). Έχουν μικρό μέγεθος, από μερικά mm έως λίγα cm. Γενικά, δημιουργούνται και αναπτύσσονται με ομόκεντρες επιφλοιώσεις και ορυκτολογικά αποτελούνται συνήθως από ασβεστίτη. Χωρίζονται σε αυτά που σχηματίζονται κάτω από το νερό (subaqueous) και σε αυτά που σχηματίζονται πάνω από το νερό (subaerial). Αποτελούν ένα αμφιλεγόμενο σπηλαιόθεμα και μόνο για την δημιουργία αυτών που σχηματίζονται πάνω το νερό, έχουν προταθεί περίπου 6 τρόποι (Hill & Forti, 1997). Η εξάτμιση λόγω ρευμάτων αέρα πιστεύεται ότι προκαλεί την ανάπτυξη κοραλλιών με προσανατολισμό. Ο DeSaussure το 1961 (από Hill & Forti, 1997) παρατήρησε ότι τα κοράλλια εμφανίζονται περισσότερο στις πλευρές των σταλακτιτών, σταλαγμιτών και κολώνων, όπου κοιτάζουν τις εξόδους.
- **Σταλακτίτες (Stalactites).** Οι σταλακτίτες συναντώνται σε διάφορα σημεία του σπηλαίου τόσο στον 1° όσο και στον 2° όροφο (Εικόνα 8). Δημιουργούνται στην οροφή πάντα ενός σπηλαίου, από μια σταγόνα νερού η οποία συγκρατείται λόγω επιφανειακών τάσεων ενάντια στη βαρύτητα. Αρχικά δημιουργείται ένα σωληνοειδές (soda straw) το οποίο διαμορφώνουν 2 διαφορετικές ταχύτητες νερού, και συμβαίνουν 2 αποθέσεις ασβεστίτη, μια εξωτερικά και μια εσωτερικά του σωληνοειδούς. Όταν η εξωτερική ροή είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική τότε το σωληνοειδές φράζει και η απόθεση του CaCO_3 συνεχίζει εξωτερικά. Λόγω ρευμάτων αέρα ή τεκτονικής μπορεί να αλλάζει

αναλόγως η κλίση τους. Δημιουργούν διάφορα σχήματα ανάλογα την παροχή νερού και του CaCO_3 επομένως σχηματίζονται σταλακτίτες διαφόρων αναλογιών.



Εικόνα 7. Κοραλλοειδή σε διάφορες θέσεις του σπηλαιού Αγίου Γεωργίου. α. Κομβιοειδή κοραλλοειδή στη θέση Cr1, β. Βοτρυοειδή και κομβιοειδή κοραλλοειδή, γ. Κοραλλοειδή στη θέση Cr2, δ. Κομβιοειδή κοραλλοειδή στη θέση Cr1 (φωτ. α Α. Καρακώστα, β, γ, δ φωτ. Γ. Λαζαρίδης).



Εικόνα 8. Σταλακτίτες στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Κ. Φελλαχίδου).

- **Σταλαγμίτες (Stalagmites).** Οι σταλαγμίτες δημιουργούνται στο δάπεδο ενός σπηλαίου συνήθως κάτω από σταλακτίτες, και σχετίζονται με το στάλαγμα. Η μορφή τους συνήθως είναι ακανόνιστη, μπορεί να είναι κυκλικοί, κωνικοί, ογκώδεις κλπ. Μαζί με τους σταλαγμίτες είναι βασικά σπηλαιothέματα που συναντάει κάποιος στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Τομή σταλαγμίτη στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Α. Καρακώστα).



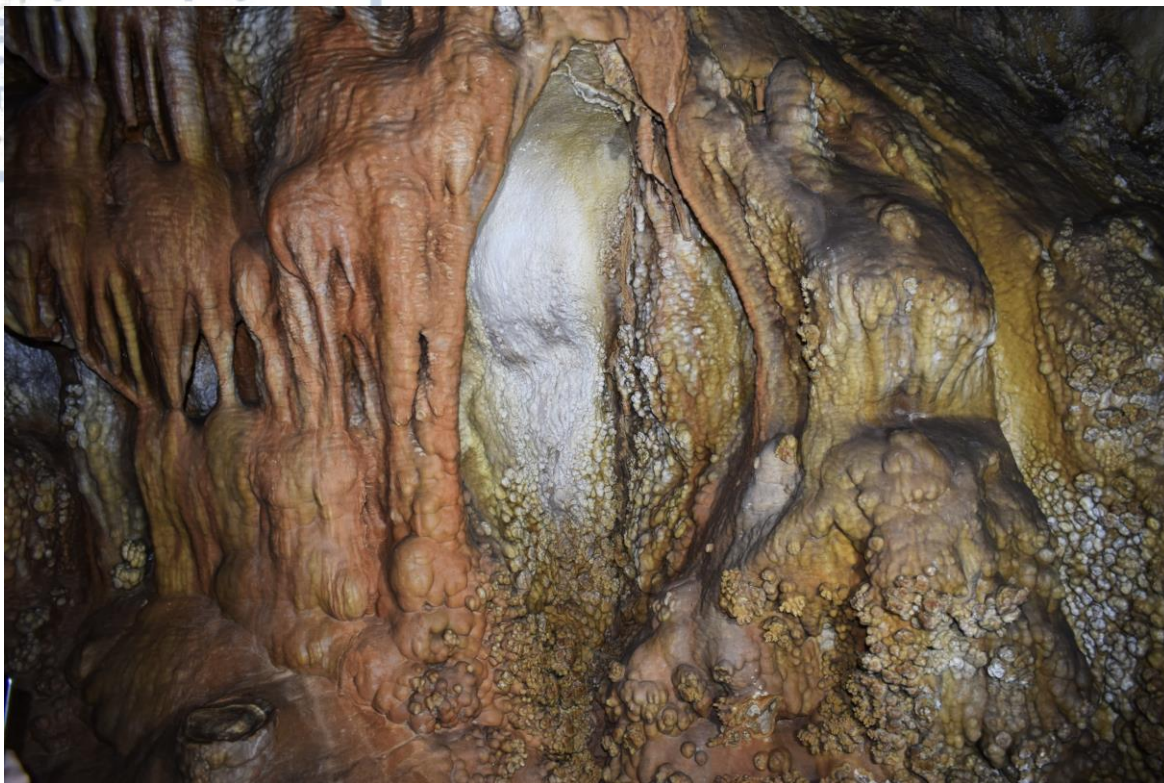
Εικόνα 10. Κολώνες μερικών cm στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Α. Καρακώστα).

- **Κολώνες (Columns).** Οι κολώνες σχηματίζονται από την ένωση ενός σταλακτίτη με έναν σταλαγμίτη (Εικόνα 10). Το νερό σε αυτές ρέει εξωτερικά. Μπορεί να έχουν ύψος από μερικά cm έως πολλά m.
- **Κουρτίνες (Draperies).** Οι κουρτίνες δημιουργούνται από το νερό που διατρέχει κεκλιμένες οροφές του σπηλαίου. Διαδοχικές ροές νερού δημιουργούν τα διαδοχικά στρώματα της κάθε κουρτίνας. Μπορεί να είναι ευθύγραμμες ή να εμφανίζουν μαιανδρισμό. Στο σπήλαιο είναι αρκετά διαδεδομένο σπηλαιόθεμα (Εικόνα 11).



Εικόνα 11. Τομές Κουρτινών στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Κ. Φελλαχίδου).

- **Ροόλιθοι (Flowstones).** Τα σπηλαιοθέματα αυτά εμφανίζονται ως καλύμματα, και έχουν παράλληλη ανάπτυξη ως προς την επιφάνεια του πετρώματος στο σπήλαιο (Εικόνα 12). Συναντώνται τόσο στα τοιχώματα όσο και στο δάπεδο.
- **Εκκεντρίτες - Ελικτίτες (helicties-eccentrics).** Οι ελικτίτες είναι ένα ακόμη σπηλαιοθέμα που φαίνεται να αναπτύσσεται ενάντια στις δυνάμεις της βαρύτητας, εξαιτίας της υδροστατικής πίεσης. Έχουν μικρό μέγεθος, μπορούν να αναπτύσσονται προς διάφορες κατευθύνσεις και διαθέτουν ένα μικροσκοπικό κανάλι με τριχοειδές νερό (νερό κορεσμένο και υπό πίεση). Δημιουργούν μορφές που αναπτύσσονται προς διάφορες κατευθύνσεις, ευθύγραμμα ή ελικοειδώς και τα συναντάμε πάνω σε άλλα σπηλαιοθέματα, και σπανιότερα πάνω στο ανθρακικό πέτρωμα (Εικόνα 13).



Εικόνα 12. Χαρακτηριστικές μορφές ροόλιθων στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Α. Καρακώστα).



Εικόνα 12. Ανάπτυξη Ελικτιτών πάνω στην επιφάνεια κουρτινών, Σπήλαιο Αγίου Γεωργίου (φωτ. Κ. Φελλαχίδου).

- **Δίσκοι (cave shields).** Ο δίσκος αποτελεί ένα σπηλαιόθεμα με πεπλατυσμένο-ελλειπτικό σχήμα το οποίο στο ένα άκρο του στηρίζεται στο δάπεδο ή το τοίχωμα. Αποτελείται από 2 παράλληλες επιφάνειες όπου ανάμεσα τους ρέει το νερό το οποίο

αποθέτει CaCO_3 μεγεθύνοντας το δίσκο (Kunsky, 1950 στο Λαζαρίδης, 2005) Στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου βρέθηκε ένας δίσκος στον 2^ο όροφο (Εικόνα 14).



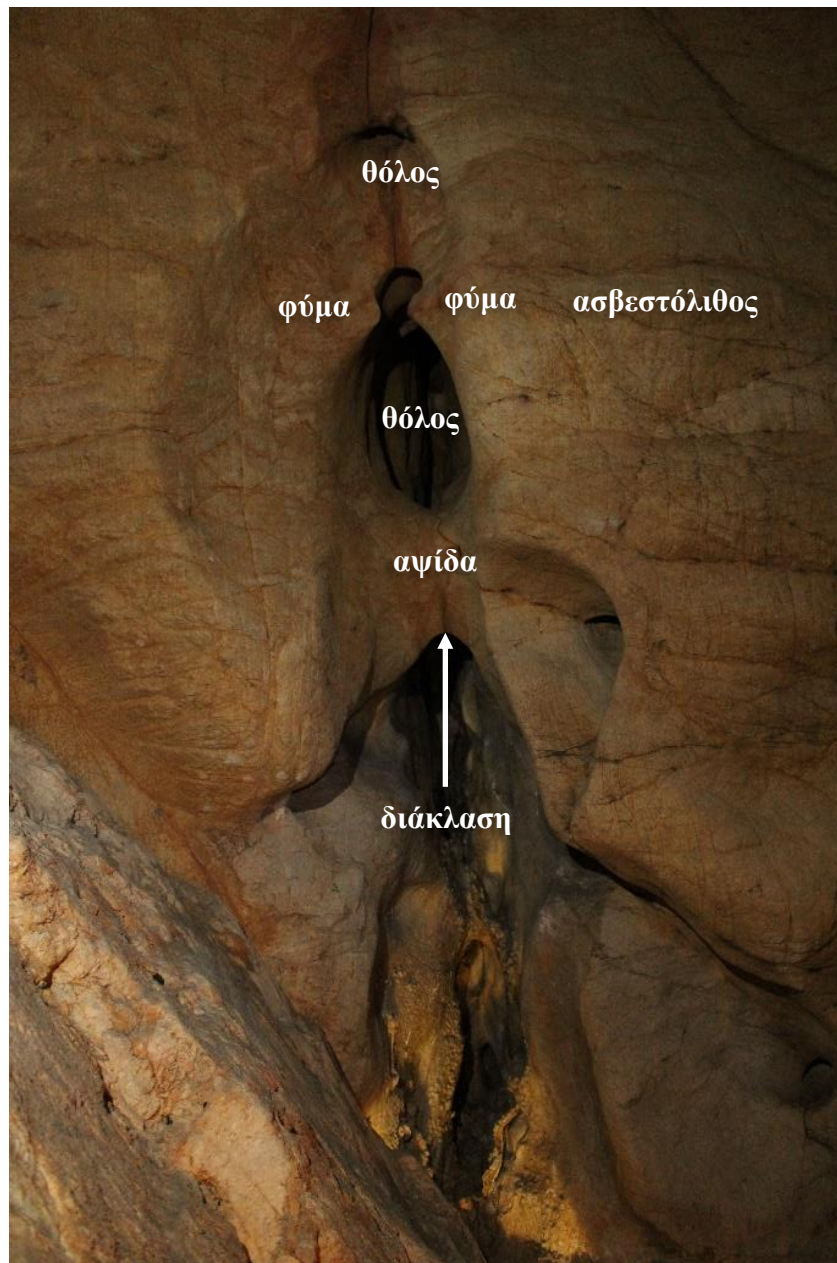
Εικόνα 14. Δίσκος στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου, στον 2^ο όροφο (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).

4.6 Καταγραφή Διαβρωσιγενούς Μορφολογίας

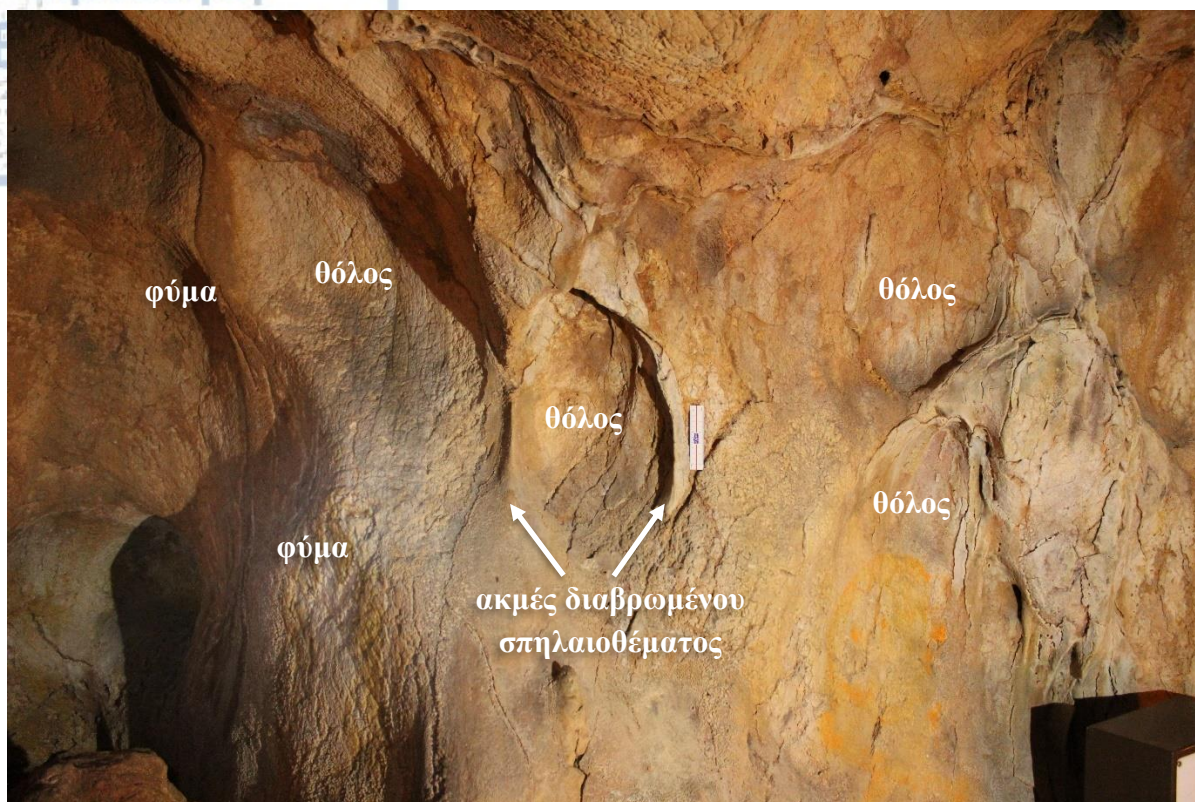
Στο σπήλαιο αναγνωρίστηκαν οι παρακάτω πολυγενετικές μορφές διάλυσης που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και τα σπηλαιοθέματα:

- **Θόλοι (Cupolas ή Side-wall pockets).** Οι θόλοι είναι δομές διάβρωσης με θολωτή μορφή (Osborne, 2004). Στο σπήλαιο συναντώνται σε 2 μορφές, σε αυτούς που βρίσκονται στην οροφή του σπηλαίου (cupolas) και σε αυτούς που βρίσκονται στα τοιχώματα (side-wall pockets) (Εικόνες 3, 15, 16, 17). Οι θόλοι οροφής πολλές φορές φαίνεται να ακολουθούν την τεκτονική και να τέμνονται από διακλάσεις, πιο συχνά από ότι παρατηρείται στους θόλους των τοιχωμάτων. Υπάρχει προβληματισμός για τον τρόπο δημιουργίας τους και για αυτό το λόγο θεωρούνται πολυγενετικές μορφές (Dublyansky, 2013). Φυσικά όλες οι θεωρίες δημιουργίας τους σχετίζονται με διαδικασίες διάλυσης, απλώς οφείλονται σε διάφορους μηχανισμούς. Ένας από αυτούς είναι η διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών (π.χ. Osborne, 2004, Dublyansky & Spötl 2014).

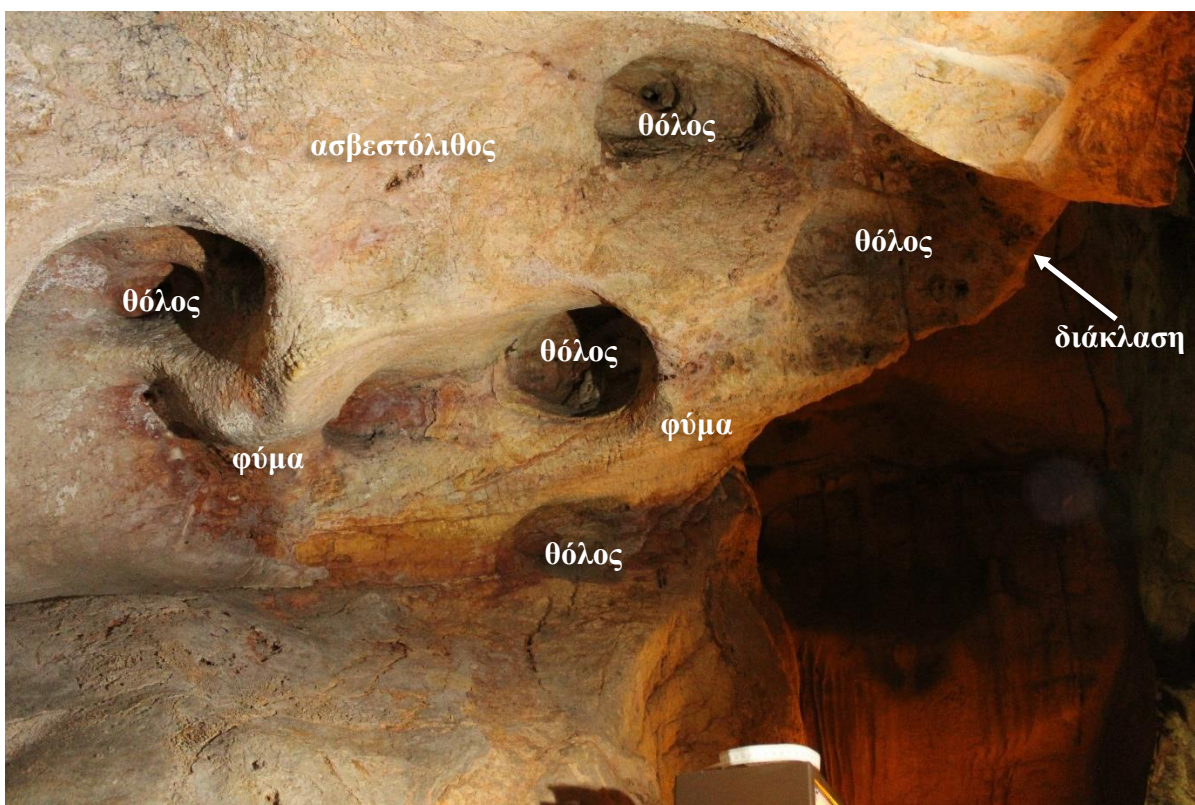
- Φύματα (Cusps), Αψίδες (rock bridges) κ.α.. Αυτές οι μορφές συνήθως εμφανίζονται σε συνδυασμό μαζί με τους θόλους, τόσο στα τοιχώματα, όσο και στην οροφή όπως φαίνεται στις Εικόνες 15, 16 και 17. Αποτελούν υπολείμματα μητρικού πετρώματος από τη διαδοχική συνένωση θόλων και είναι εξίσου πολυγενετικές μορφές (Dublyansky, 2013).



Εικόνα 15. Διαβρωσιγενείς δομές, σε θόλους οροφής όπου ακολουθούν την τεκτονική (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).



Εικόνα 16. Θόλοι τοιχώματος και συνοδές διαβρωσιγενείς μορφές (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).



Εικόνα 17. Θόλοι οροφής στο μεγάλο θάλαμο. Σε κάποιους διακρίνεται η ασυνέχεια που ακολουθούν (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).

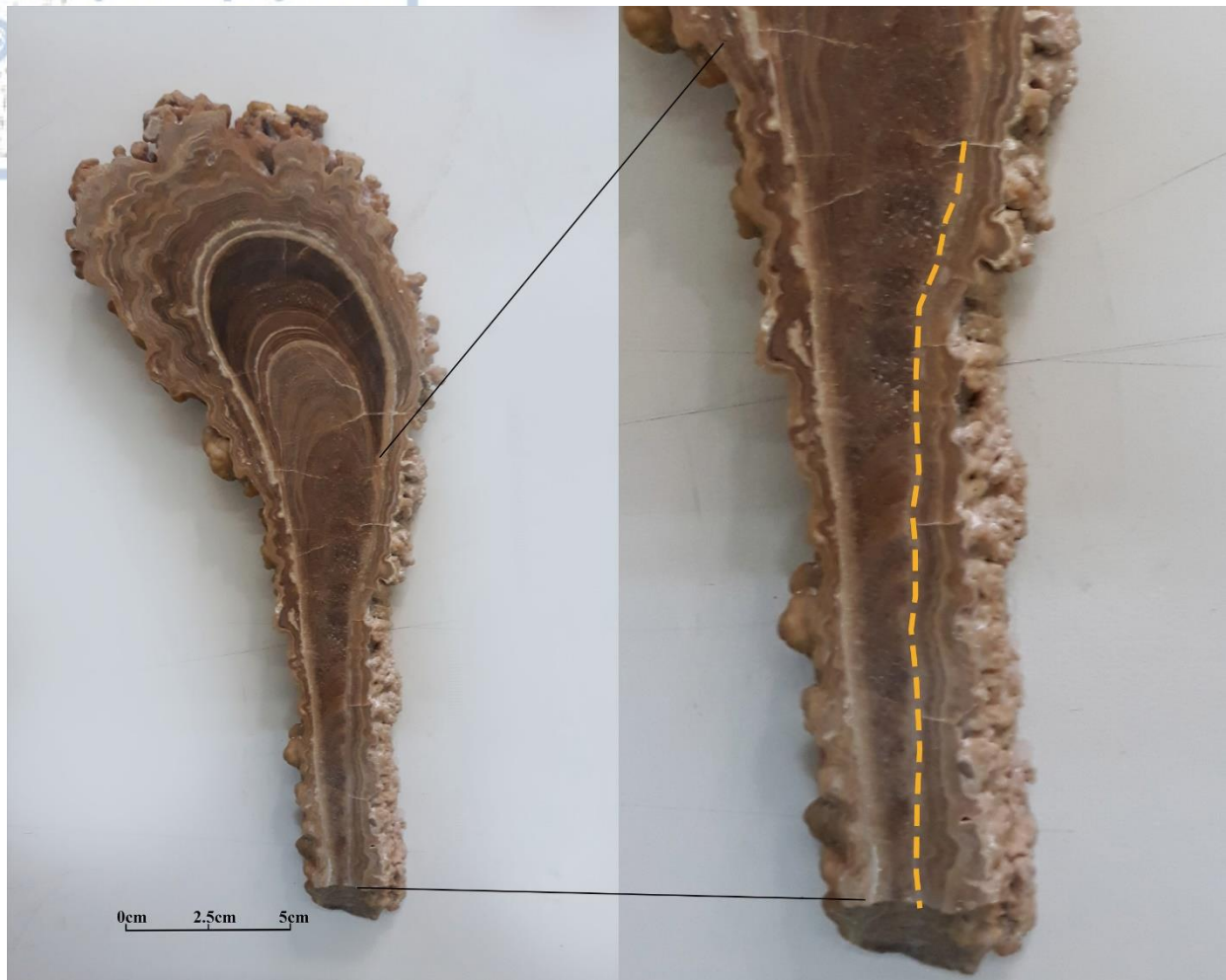
- Υπολείμματα Διαβρωμένων Σπηλαιοθεμάτων (Corroded Speleothems). Εκτός από τις δομές που αναφέρθηκαν παραπάνω και εμφανίζονται να επηρεάζουν το μητρικό πέτρωμα του σπηλαίου, η διάβρωση, μπορεί να επηρεάζει και τα σπηλαιοθέματα. Κάποιες υπολειμματικές δομές σπηλαιοθεμάτων εμφανίζονται σε διάφορα σημεία του σπηλαίου, στα τοιχώματα γενικά (Εικόνα 18), ή ειδικότερα στα όρια θόλων τοιχώματος (Εικόνες 16, 19). Επιπλέον σε ορισμένες τομές σπηλαιοθεμάτων παρατηρούνται διαβρωμένα τμήματα (Εικόνα 20).



Εικόνα 18. Υπολείμματα σπηλαιοθεμάτων στον ασβεστόλιθοστη θέση Cs (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).



Εικόνα 19. Υπόλειμμα σπηλαιοθέματος (κουρτίνα) με μορφή ακμής στο άκρο του θόλου τοιχώματος στη θέση Pr2 (φωτ. Α. Καρακώστα).



Εικόνα 20. Τομή σπηλαιοθέματος (κουρτίνα) από το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου. Στο δεξιό τμήμα του παρατηρούνται διαβρωμένα στρώματα ασβεστίτη και στη συνέχεια νεότερη απόθεση στρωμάτων και κοραλλοειδών (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).

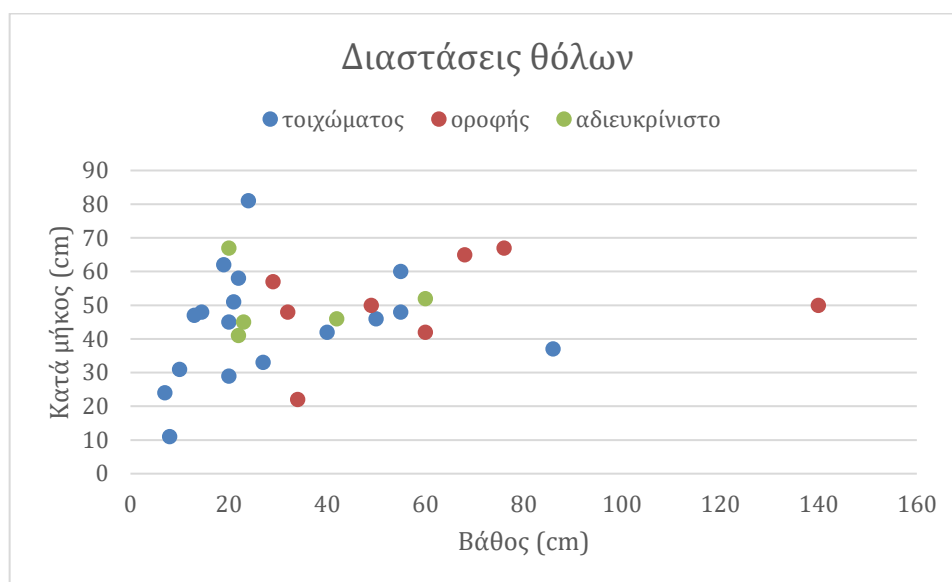


5. Αποτελέσματα

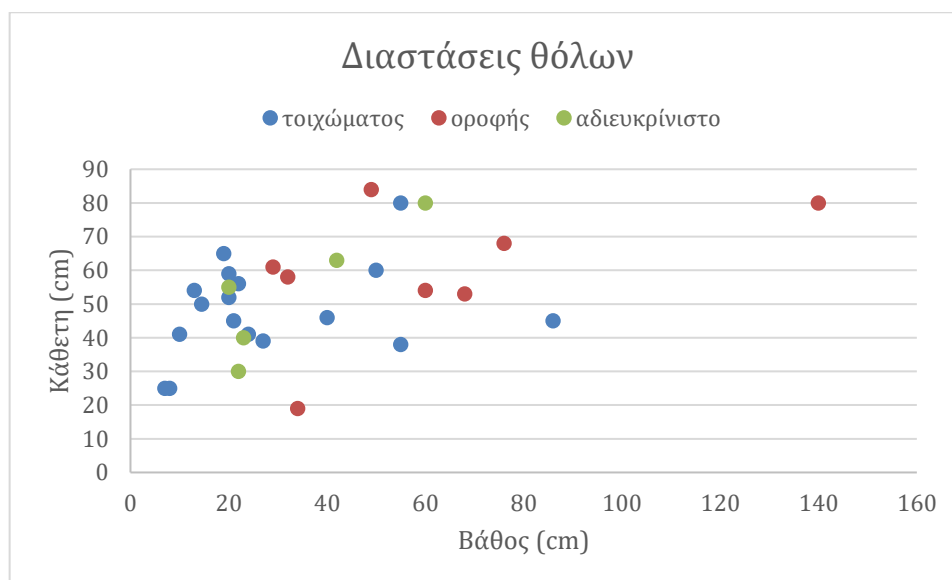
Σε αυτό το κεφάλαιο συγκεντρώνονται λεπτομερώς όλα τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις που προκύπτουν τόσο από την επί τόπου παρατήρηση μέσα στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου, όσο και από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων έχουν δημιουργηθεί διαγράμματα, σχέδια, και πίνακες.

- **Θόλοι**

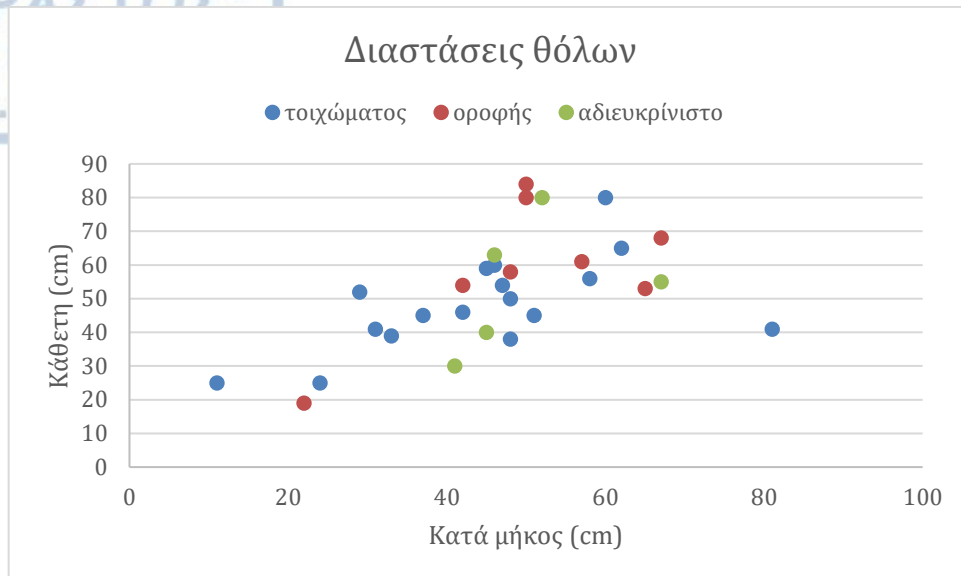
Από τις μετρήσεις των 30 θόλων (Πίνακας Α1 παράρτημα), δημιουργήθηκαν τρία διαγράμματα διασποράς, όπου εξετάζονται οι τρεις διάμετροι που μετρήθηκαν κατά ζεύγη (Γραφήματα 1, 2 & 3), χωρισμένα σε τρεις κατηγορίες: τοιχώματος, οροφής και αδιευκρίνιστο για όσα διατηρείται αμφιβολία.



Γράφημα 1. Η κατά μήκος διάμετρος ως προς το βάθος των θόλων.



Γράφημα 2. Η κάθετη στο μήκος διάμετρος ως προς το βάθος των θόλων.

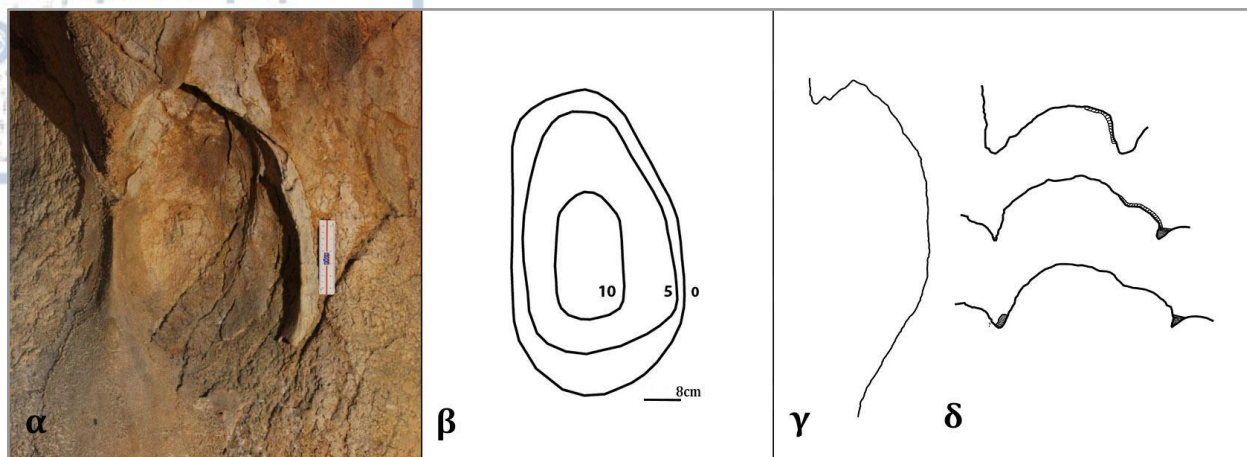


Γράφημα 3. Η κάθετη στο μήκος διάμετρος ως προς την κατά μήκος διάμετρο των θόλων.

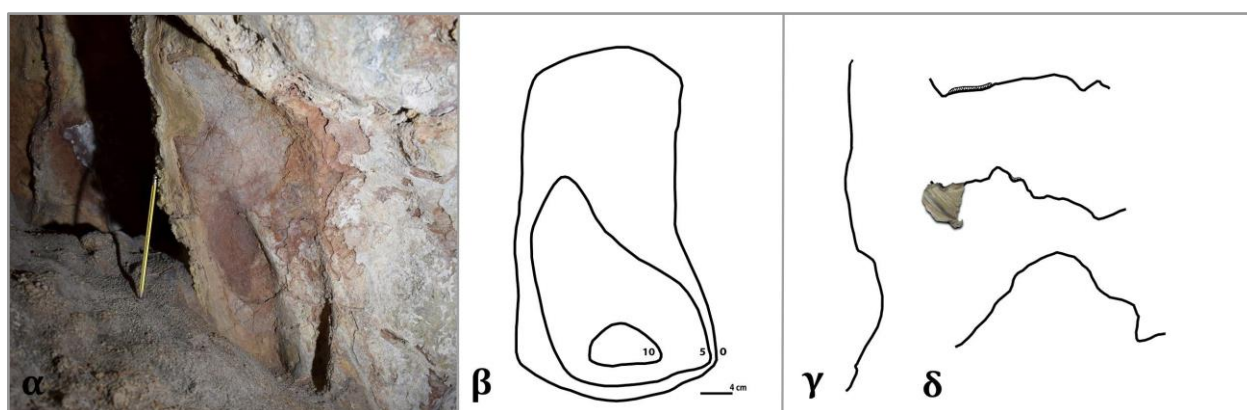
Γενικά παρατηρείται πως η κάθετη διάσταση, τείνει να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις στις άλλες δύο. Αυτό αποδεικνύεται καλύτερα από τον υπολογισμό των λόγων μεταξύ των διαστάσεων βάθος/κάθετη και κατά μήκος/κάθετη, με τιμές 0.73 και 0.93, αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε, επίσης, πως οι θόλοι οροφής παρουσιάζουν μεγαλύτερα βάθη σε σχέση με τους θόλους τοιχώματος.

Όσον αφορά την αποτύπωση οριζόντιων και κάθετων εγκάρσιων μορφολογικών τομών και την δημιουργία τοπογραφικών διαγραμμάτων που έγιναν για 2 θόλους τοιχώματος, τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στην εικόνα 21 για την θέση Pr1 και στην εικόνα 22 για την θέση Pr2.

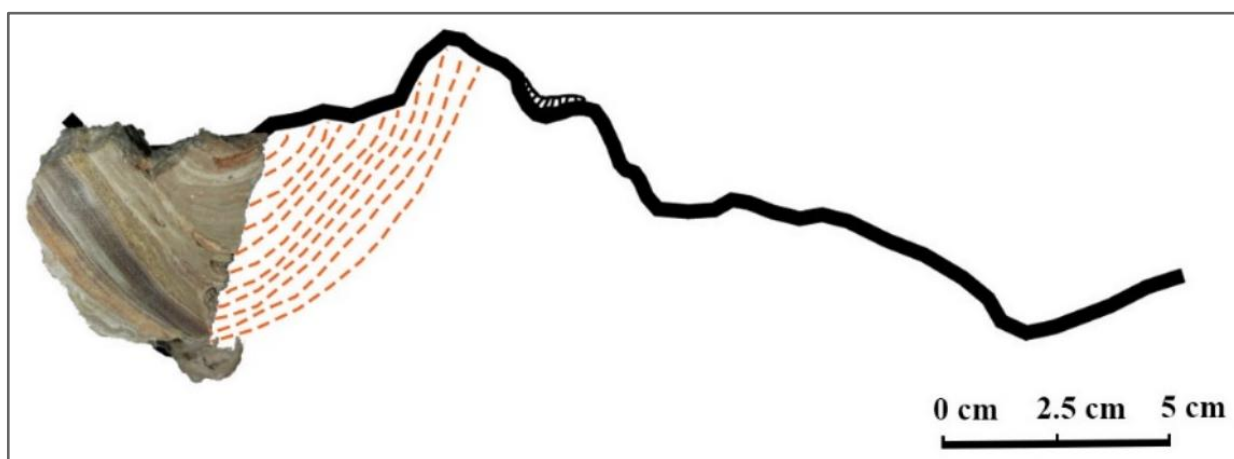
Όπως έχει προαναφερθεί οι θόλοι αυτοί, παρουσιάζουν στα άκρα τους ακμές υπολειμμάτων σπηλαιοθεμάτων που έχουν δημιουργηθεί από την διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών. Συγκεκριμένα και στις δύο αυτές θέσεις, όπως και σε άλλες πχ. εικόνα 19, τα τεμνόμενα/διαβρωμένα στρώματα των σπηλαιοθεμάτων είναι ορατά εσωτερικά, στην ένωση αυτών με τον θόλο που σημαίνει ότι η ίδια διαδικασία διέβρωσε και τις δύο δομές. Στις εγκάρσιες τομές αποτυπώνονται επίσης οποιαδήποτε υπολείμματα σπηλαιοθεμάτων υπάρχουν (Εικόνες 21δ, 22δ) με βάση τα οποία μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του ελάχιστου πάχους που διαβρώθηκε. Ειδικά για τον θόλο της θέσης Pr2, έχει γίνει τοποθέτηση της τομής του διαβρωμένου σπηλαιοθέματος στην εγκάρσια οριζόντια τομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Σε ένα επιπλέον θόλο τοιχώματος της θέσης Pr2 που εμφανίζει επίσης υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων στα άκρα του, έγινε η αποτύπωση της εγκάρσιας τομής στο μέσο αυτού (Εικόνα 24).



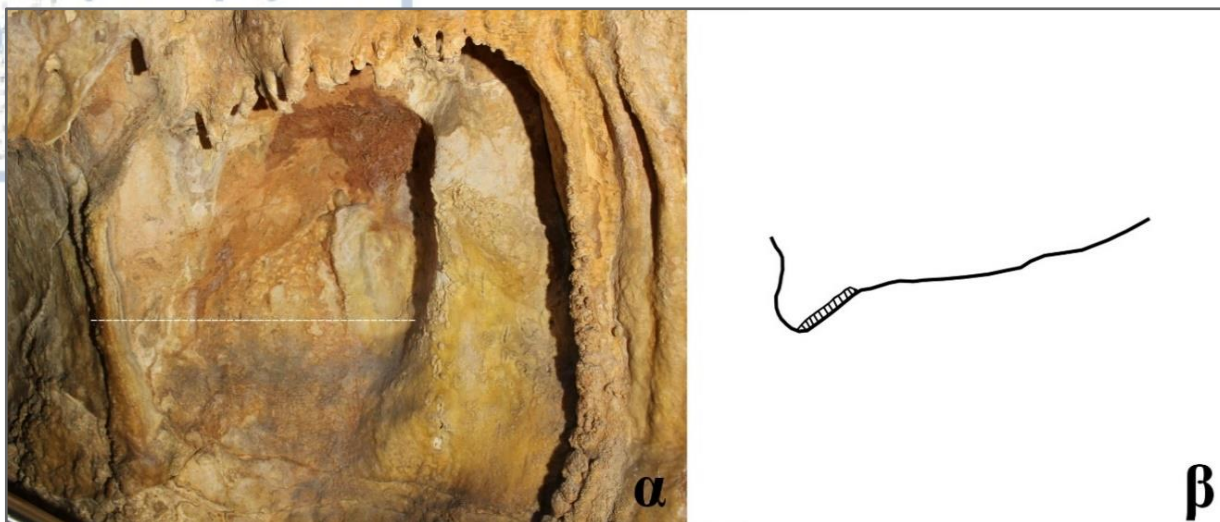
Εικόνα 21. α. Φωτογραφία του θόλου Pr1 στα τοιχώματα του μεγάλου θαλάμου, β. Τοπογραφικό διάγραμμα του θόλου με ισοδιάσταση 5 cm, γ. Μορφολογική τομή παράλληλα στη μέγιστη διάμετρο του θόλου (52cm), δ. Εγκάρσιες τομές κάθετες στην γ. ανά 15 cm (φωτ. Γ. Λαζαρίδης).



Εικόνα 22. α. Φωτογραφία του θόλου Pr2, β. τοπογραφικό διάγραμμα του θόλου με ισοδιάσταση 5 cm, γ. Μορφολογική τομή παράλληλα στη μέγιστη διάμετρο του θόλου (44cm), δ. Εγκάρσιες τομές κάθετες στην γ. ανά 15 cm (φωτ. Α. Καρακώστα).



Εικόνα 23. Εγκάρσια οριζόντια τομή στο μέσο του θόλου Pr2, όπου διακρίνεται η τομή του διαβρωμένου σπηλαιοθέματος και η απότομη διακοπή της συνέχειας των διαδοχικών στρωμάτων ασβεστίτη, λόγω της διάβρωσης από συμπίκνωση.



Εικόνα 24. Εγκάρσια οριζόντια τομή περίπου στο μέσο του θόλου κοντά στη θέση Pr2, με αποτυπωμένη την επιφάνεια διάβρωσης (πάχος ~ 4cm) του σπηλαιοθέματος στο αριστερό άκρο (φωτ. Α. Καρακώστα).

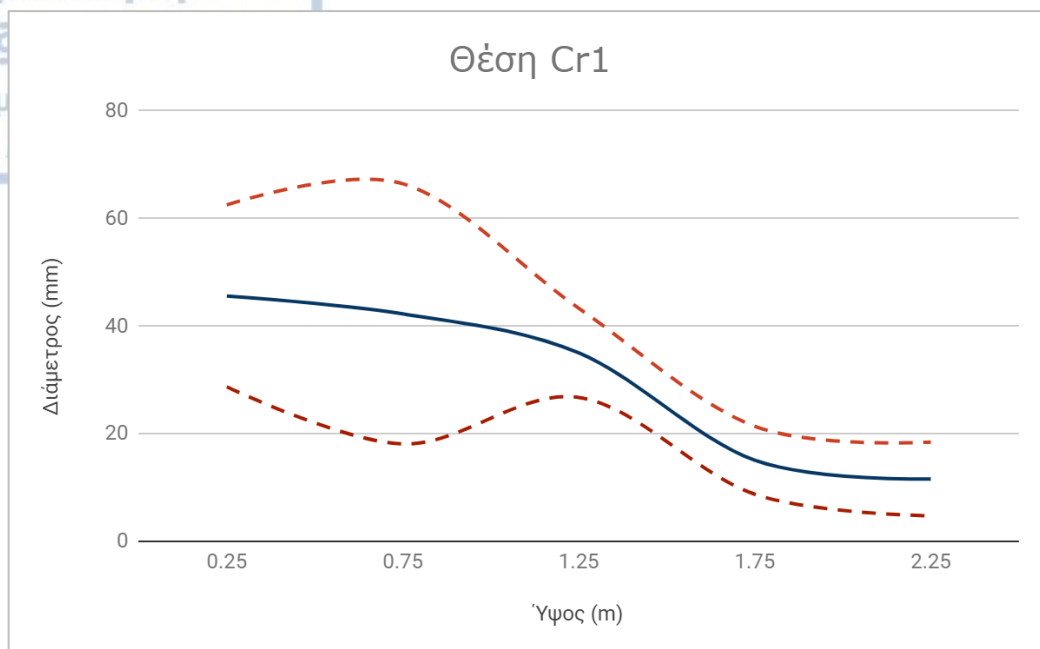
- **Κοραλλοειδή**

Με μια πρώτη εκτίμηση παρατηρούμε ότι στον 2^ο όροφο του σπηλαίου Αγίου Γεωργίου, όπου τα κοραλλοειδή καλύπτουν μεγάλα τμήματα των τοιχωμάτων, αυτά φαίνεται να μειώνονται με το ύψος. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στην μέτρηση των διαμέτρων των κοραλλοειδών στις θέσεις Cr1 και Cr2 όπως αυτές συγκεντρώνονται αντίστοιχα στους Πίνακες A1, A2 του παραρτήματος.

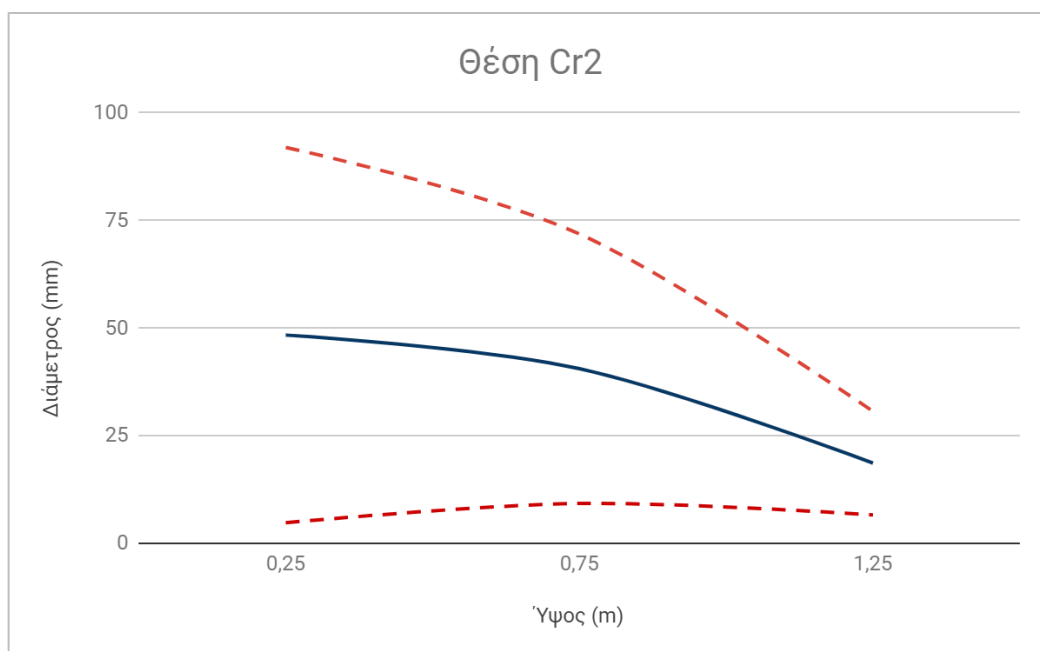
Στον πίνακα 1 καταγράφονται οι μέσες τιμές των διαμέτρων των κοραλλοειδών των 2 θέσεων Cr1 και Cr2 για υψόμετρα από 0- 2.5m. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται σε διαγράμματα μαζί με το 95% διάστημα εμπιστοσύνης για τη μέγιστη διάμετρο τους (Γραφήματα 4, 5).

Θέση	Cr1	Cr2
Ύψος (m)	M.T Διαμέτρων (mm)	M.T Διαμέτρων (mm)
0-0.5	45.61	48.38
0.5-1	42.28	40.57
1-1.5	35.02	18.64
1.5-2	15.07	-
2-2.5	11.60	-

Πίνακας 1. Μέση τιμή των διαμέτρων των κοραλλοειδών για ύψη μετρήσεων από 0 έως 2.5 m.



Γράφημα 4. Γραφική παράσταση των μέσων τιμών των διαμέτρων των κοραλλοειδών στην θέση Cr1, για τα διαστήματα 0-0.5, 0.5-1, 1-1.5, 1.5-2, 2-2+ m. Οι 2 κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν το εύρος της μέσης τιμής ± 2 τυπικές αποκλίσεις.



Γράφημα 5. Γραφική παράσταση των μέσων τιμών των διαμέτρων των κοραλλοειδών στην θέση Cr2, για τα διαστήματα 0-0.5, 0.5-1, 1-1.5, 1.5 m. Οι 2 κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν το εύρος της μέσης τιμής ± 2 τυπικές αποκλίσεις.

Παρατηρείται στα διαγράμματα πως οι διάμετροι των κοραλλοειδών μειώνονται με την αύξηση του ύψους από το δάπεδο του σπηλαίου. Ανάλογη συμπεριφορά φαίνεται να έχει το ποσοστό κάλυψης του τοιχώματος από τα κοραλλοειδή. Αυτή η άποψη διερευνάται με εμβοδομέτρηση (Εικόνα 25).



Εικόνα 25. Εμβαδομέτρηση κοραλλοειδών. α. Στήλη 1 ύψους 1.5 m, θέση Cr1, β. Εμβαδομέτρηση στη στήλη 1, γ. Στήλη 2 ύψους 2.5m, θέση Cr1.

Η εμβαδομέτρηση έγινε στην θέση Cr1 σε 2 σημεία περάσματος (βόρειο και νότιο τοίχωμα), που ορίστηκαν ως στήλες: στήλη 1 είναι η νότια και στήλη 2 η βόρεια. Οι 2 αυτές στήλες χωρίστηκαν σε τμήματα ανά 0.5 m, ούτως ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα για τα ποσοστά κάλυψης του τοιχώματος από τα κοραλλοειδή με αυτά από τις διαστάσεις των διαμέτρων τους που αναφέρθηκαν παραπάνω (Εικόνα 25). Η στήλη 1 είχε ύψος 1.5m , ενώ η στήλη 2, 2.5m.

Από την 1η στήλη, θέση Cr1, προκύπτει ότι η κάλυψη για το διάστημα 0-0.5m είναι 68%, για το διάστημα 0.5-1m, είναι 42% και για το διάστημα 1-1.5m, είναι 25%. Στη 2η στήλη στην θέση Cr1, προκύπτει ότι η κάλυψη για 0-0.5m είναι 66%, για το διάστημα 0.5-1m, είναι 30%, για το διάστημα 1-1.5m, είναι 53%, για το διάστημα 1.5-2m, είναι 39%, και για το διάστημα 2-2.5m είναι 28%. Φαίνεται, δηλαδή, ότι σε τοιχώματα που καλύπτονται από κοραλλοειδή, η κάλυψη μειώνεται με το ύψος. Η κάλυψη μειώνεται πιο απότομα με το ύψος, συγκριτικά με την μείωση της διαμέτρου. Επομένως, προς τα πάνω μειώνεται το μέγεθος αλλά και ο αριθμός των κοραλλοειδών.

- Υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων

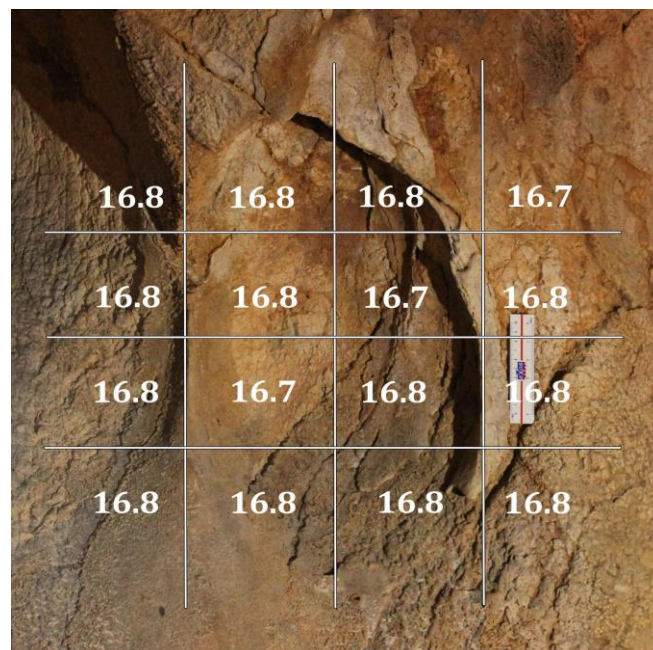
Όσον αφορά τα υπολείμματα σπηλαιοθεμάτων στην θέση Cs, όπου αυτές εμφανίζονται ως κρούστες, επιφλοιώσεις κλπ, υπολογίζουμε ένα εύρος τιμών από 2.2 mm (ελάχιστο), έως 16.3 mm (μέγιστο). Σε σπηλαιοθέματα που συνοδεύουν θόλους το μέγιστο ήταν 60 mm.

Στο υπόλειμμα της Εικόνας 18γ, υπολογίστηκαν τα πάχη 3mm, 6.95mm, 3.25mm, 3mm, 16mm, επομένως η κρούστα εδώ ήταν τουλάχιστον 16 mm πάχος. Σε άλλες θέσεις βρέθηκαν τιμές μέχρι 9.3mm βάθος διάβρωσης. Στον θόλο Pr2, το πάχος της διάβρωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23, εκτιμάται στα περίπου 40 mm. Περισσότερες τιμές βρίσκονται στους Πίνακες A3, A4.

- Θερμοκρασία

Για την ημερομηνία 19 Δεκεμβρίου 2018, η θερμοκρασία στο θερμόμετρο του μεγάλου θαλάμου ήταν 14.8 °C, ενώ στο τοίχωμα 16.8 °C. Παρατηρούμε μία διαφορά 2 °C μεταξύ της ατμόσφαιρας και του τοιχώματος. Θερμοκρασίες μετρήθηκαν στο τοίχωμα-μητρικό πέτρωμα του σπηλαίου, σε διάφορες θέσεις στο σπήλαιο όμως δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορά με το εύρος τιμών να βρίσκεται μεταξύ 16.5 και 17.4 °C.

Μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν επίσης σε θόλους τοιχώματος του σπηλαίου, με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 26. Δεν παρατηρήθηκε παρόλα αυτά κάποια αξιοσημείωτη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μέσα στη δομή του θόλου, ούτε μεταξύ θόλου- τοιχώματος.



16.8	16.8	16.8	16.7
16.8	16.8	16.7	16.8
16.8	16.7	16.8	16.8
16.8	16.8	16.8	16.8

Εικόνα 26. Τιμές θερμοκρασιών (°C) στο θόλο τοιχώματος Pr1.

Μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν επίσης, στον 2^ο όροφο και συγκεκριμένα στις θέσεις των κοραλλοειδών Cr1, Cr2. Ακολουθήθηκε ξανά η διαδικασία ορισμού διαστημάτων 0.5m όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις που αφορούσαν τα κοραλλοειδή. Στον

Πίνακα 2 καταγράφονται ενδεικτικές θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν για τα 3 υψόμετρα, τόσο πάνω σε κοραλλοειδή, όσο και στο τοίχωμα ακριβώς δίπλα σε αυτά.

Θέση	Cr1 (νότια)		Cr1 (βόρεια)		Cr2	
Ύψος (m)	Θερμοκρασία (°C)		Θερμοκρασία (°C)		Θερμοκρασία(°C)	
	Κοραλλοειδές	Τοίχωμα	Κοραλλοειδές	Τοίχωμα	Κοραλλοειδές	Τοίχωμα
0-0.5	16.8	16.5	16.6	16.5	16.5	16.5
0.5-1	17.2	16.9	16.7	16.7	16.5	16.5
1-1.5	17.4	17.1	16.5	16.7	16.5	16.5

Πίνακας 2. Τιμές θερμοκρασιών κοραλλοειδών και τοιχώματος για στις 2 θέσεις παρατήρησης Cr1, Cr2.

Παρατηρείται ότι στην θέση Cr1 ειδικά στο νότιο τοίχωμα, υπάρχει μια διαφοροποίηση στην θερμοκρασία πάνω στο κοραλλοειδές και σε αυτή του πετρώματος, με την πρώτη να είναι λίγο μεγαλύτερη. Στο δεξιό τοίχωμα επίσης παρατηρείται μια μικρή διαφορά ανάλογα το ύψος, όχι όμως μεταξύ κοραλλοειδούς-τοιχώματος. Αυτό δεν παρατηρείται στην θέση Cr2, καθώς η θερμοκρασία παραμένει ίδια τόσο πάνω στην επιφάνεια των κοραλλοειδών όσο και στο τοίχωμα ακριβώς δίπλα.

- pH

Από τις μετρήσεις pH των υδρατμών της ατμόσφαιρας, προέκυψε ότι στις 2 θέσεις του 1ου ορόφου οι τιμές ήταν σχεδόν ίδιες, 6.8 και 6.9, με pH δηλαδή ελαφρώς όξινο. Αντίθετα στον 2ο όροφο φαίνεται να αυξάνεται η τιμή του pH στο 7.7 και χαρακτηρίζεται ως βασικό.

6. Συζήτηση

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε μία λεπτομερής καταγραφή των μορφών διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών, στα ασβεστολιθικά πετρώματα και τα σπηλαιοθέματα στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς. Η προσέγγιση του θέματος έγινε τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά, γεγονός που σημαίνει ότι καταγράφηκαν τόσο ο τρόπος που διαβρώνονται τα σπηλαιοθέματα ή δημιουργούνται κάποια από αυτά, π.χ. κοραλλοειδή, όσο και ότι δημιουργήθηκε ένα σύνολο δεδομένων που περιγράφει ποσοτικά τις μορφές διάβρωσης στο μητρικό πέτρωμα. Αυτό από μόνο του το γεγονός δίνει το πλεονέκτημα σύγκρισης με άλλα σπήλαια ανά τον κόσμο σε μελλοντικές διερευνήσεις. Άλλωστε το φαινόμενο μελετάται όλο και εντατικότερα τα τελευταία χρόνια και αυτό φαίνεται από την αύξηση των σχετικών δημοσιευμένων εργασιών παγκοσμίως. Μεταξύ των διαφόρων εργασιών και μελετών που έχουν γίνει συμπεριλαμβάνονται οι εξής:

Οι Cigna & Forti (1986) στη μελέτη τους, θεωρούν την δράση-ανταλλαγή ρευμάτων αέρα μέσω μεταγωγής (convection), σημαντικό σπηλαιογενετικό παράγοντα. Αυτό το συνδυάζουν/παρατηρούν με 1. τα υδροθερμικά σπήλαια (thermal phreatic caves) που η θερμοκρασία είναι αυξημένη, 2. την δράση ισχυρών οξέων π.χ. H_2SO_4 , H_2S μέσα στο νερό, ή 3. με το κλίμα, π.χ., όταν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε εύκρατα κλίματα η υγρασία του κορεσμένου νερού που εισέρχεται στο σπήλαιο είναι υψηλή. 4. και σε hypokarst σπήλαια.

Οι Tarhule-Lips & Ford (1998) πραγματοποιούν πείραμα για τον υπολογισμό της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών, με πλάκες από γύψο που τοποθετούνται μέσα σε σπήλαια της Καραϊβικής και αποδεικνύουν ότι η διάβρωση δρα κοντά στις εισόδους, όπου υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της ατμόσφαιρας του σπηλαίου και του κλίματος εξωτερικά. Υπολογίζουν ρυθμό διάβρωσης $2.4 \cdot 10^{-2}$ cm/yr.

Οι Avramidis *et al.*, (2001) προσεγγίζουν την διάβρωση από συμπύκνωση με αφορμή την ανθρώπινη παρουσία στα επισκέψιμα σπήλαια, καθώς μέσω της αναπνοής, παράγονται υδρατμοί και CO_2 και είναι πιθανό να συμβάλλουν στη διαδικασία. Πραγματοποιούν πείραμα με τοποθέτηση μαρμάρινων πλακών σε επισκέψιμα σπήλαια για τη μέτρηση της διάβρωσης.

Οι Auler & Smart (2004) υπολογίζουν ρυθμούς διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών στα σπηλαιοθέματα (σταλαγμίτες) χρησιμοποιώντας χρονολογήσεις (U/Th) και δίνουν μέγιστους ρυθμούς διάβρωσης $4 \cdot 10^{-5}$ cm/year, σε σπήλαια της βορειοανατολικής Βραζιλίας.

Οι Dreybrodt *et al.*, (2005) προσεγγίζουν την διαδικασία της διάβρωσης από συμπύκνωση σε θεωρητικό επίπεδο και αναλύουν τη βασική θεωρία, προτείνοντας ένα προσεγγιστικό μοντέλο της διάβρωσης. Σημαντικοί παράγοντες είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πετρώματος- ατμόσφαιρας για τη μεταφορά θερμότητας, οι ετήσιες ή καθημερινές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Ύπαρξη λίμνης με θερμά νερά στη βασική θεωρία για παροχή υδρατμών. Με βάση το μοντέλο τους υπολογίζουν ρυθμό διάβρωσης σπηλαιοθεμάτων 10^{-4} με 10^{-5} cm/year.

Οι De Freitas *et al.*, (2006) επίσης προσεγγίζουν το αντικείμενο με βάση την ανθρώπινη παρουσία στα τουριστικά σπήλαια, κάνοντας μετρήσεις στο σπήλαιο Glowworm Cave, της Νέας Ζηλανδίας, με ηλεκτρονικούς αισθητήρες για την συμπίκνωση και την εξάτμιση των υδρατμών καθώς και πειράματα με τις εισόδους για την μελέτη της ατμοσφαιρικής επιρροής εξωτερικά και εσωτερικά.

Οι Dublyansky *et al.*, (2014, 2017) μελέτησαν σπήλαια στην Νεβάδα και την Καλιφόρνια κάνοντας παρατηρήσεις σχετικά με τις μορφολογικές δομές που δημιουργούνται από την διάβρωση λόγω συμπίκνωσης υδρατμών σε σπήλαια και συζητούν για τις συνθήκες που συμβάλλουν στην εμφάνιση της διαδικασίας. Αυτές είναι 1. Δομικές, για παράδειγμα η ύπαρξη επιφάνειας προς διάβρωση, 2. Θερμικές, πχ. οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας, τα ρεύματα αέρα, 3. μικροκλιματικές, πχ. η διάβρωση από συμπίκνωση είναι πιο δραστική μακριά από τον όγκο θερμού νερού, όχι άμεσα κοντά λόγω μικρής διαφοράς θερμοκρασίας. Προτείνουν ότι δράση της παύει αν αλλάξουν οι μέχρι τώρα συνθήκες που ισχύουν πχ. με ξαφνική αλλαγή του μικροκλίματος πχ με αερισμό (ventilation) μπορεί να πάψει η δράση της σε ένα ερημικό κλίμα, όπως αυτό στο οποίο βρίσκονται τα σπήλαια που μελετούν και κατά τη θερινή περίοδο μπορεί η είσοδος θερμού και ξηρού αέρα να αποτρέψει την εμφάνιση του φαινομένου.

Οι Cailhol *et al.*, (2019) σε σπήλαια της Κύπρου μελετούν την διαδικασία της διάβρωσης με βάση τις μορφολογικές δομές που παρατηρούνται, τα ρεύματα αέρα, το κλίμα κλπ. προσθέτοντας έναν ακόμη παράγοντα, την ύπαρξη μεγάλων αποικιών νυχτερίδων, καθώς θεωρείται ότι με τον μεταβολισμό, και την αποσύνθεση του γουανό απελευθερώνονται υδρατμοί, θερμότητα, CO₂ και οξέα στην ατμόσφαιρα. Αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά πρόσφατη όπως έχει ήδη αναφερθεί από τους Lundberg & McFarlane (2012, 2015).

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει για την διαδικασία αυτή, αφορούν σπήλαια στα οποία η ύπαρξη θερμού όγκου νερών, πχ λίμνης, παίζει καθοριστικό ρόλο για την παραγωγή υδρατμών, ειδικά στην απόδειξη ότι η διάβρωση από συμπίκνωση είναι ενεργή ακόμα. Στο σπήλαιο του Αγίου Γεωργίου, δεν υπάρχει λιμνάζων όγκος θερμού νερού για παροχή κορεσμένων υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, αν και η ύπαρξη τέτοιου νερού προάγει τη διαδικασία, ή απουσία του δεν την αποτρέπει. Επιπλέον δεν υπάρχει κάποια ένδειξη για δράση ισχυρών οξέων που μπορεί να εντείνει την διαδικασία (Cigna & Forti 1986). Δεν υπάρχει πληθυσμός νυχτερίδων για την παραγωγή γουανό, αν και στο παρέλθον υπήρχε σύμφωνα με τα απολιθώματα και το γουανό που βρέθηκαν στο σπήλαιο. Ένας άλλος παράγοντας που θα μπορούσε να κρατά σήμερα τη διαδικασία ενεργή, είναι το γεγονός ότι το σπήλαιο είναι επισκέψιμο (Avramidis 2001, De Freitas 2006) και ίσως η ανταλλαγή αέρα εσωτερικά και εξωτερικά μέσω της εισόδου (Cigna & Forti 1986).

Ωστόσο, η πιο σημαντική προϋπόθεση για την υγροποίηση των υδρατμών είναι θερμοκρασία του τοιχώματος του σπηλαίου να είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτήν της ατμόσφαιρας (Dreybrodt, 2005). Σε αντίθεση με αυτό, οι τιμές που μετρήθηκαν στα τοιχώματα τον Δεκέμβριο του 2018 ήταν όλες μεγαλύτερες από το εύρος τιμών της ατμοσφαιρικής θερμοκρασία στο σπήλαιο σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Άρα

τουλάχιστον κατά τη διάρκεια του χειμώνα το φαινόμενο σήμερα δεν είναι ενεργό στο σπήλαιο, όμως υπάρχει η πιθανότητα να δρα κατά τους θερινούς μήνες (Cigna & Forti 1987).

Παρόλα αυτά, η δράση της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών είναι εμφανής στο σπήλαιο, γεγονός που αποδεικνύεται από τις διάφορες μορφολογικές δομές που παρατηρούνται (θόλοι, αψίδες, υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων, κοραλλοειδή κλπ). Γενικά, στο παρελθόν η διαδικασία έλαβε χώρα σε κάποια φάση που το σπήλαιο είχε τουλάχιστον εν μέρει κενωθεί από το νερό. Από τις χρονολογήσεις των σπηλαιοθεμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη του παλαιοπεριβάλλοντος προκύπτει με βάση τις ραδιοχρονολογήσεις ότι η απόθεση ξεκινά τουλάχιστον στις 640 χιλιάδες χρόνια (Dotsika *et al.*, 2010). Άρα οποιαδήποτε διάβρωση σπηλαιοθεμάτων δεν αναμένεται με βάση τους προτεινόμενους ρυθμούς διάβρωσης να ξεπερνά τα 6.4 cm (π.χ. Dreybrodt *et al.*, 2005). Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι οι μέγιστες διαβρώσεις που βρέθηκαν στο σπήλαιο κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης (60 mm) συμφωνούν με το χρονικό πλαίσιο δημιουργίας των σπηλαιοθεμάτων και τους ρυθμούς που προτείνονται στη θεωρία.

Κάνοντας την παραδοχή ότι ισχύουν οι προϋποθέσεις του μοντέλου των Dreybrodt *et al.* (2005), δηλ. σταλαγμίτης με διάμετρο από 0.1 έως μερικά m, σε σπήλαιο στο οποίο υπάρχουν ημερήσιες διαφορές στην θερμοκρασία 10 °C, τότε μπορούν να αναμένονται ρυθμοί διάβρωσης της τάξεως των 10^{-3} - 10^{-4} mm/yr. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο πάχος των υπολειμμάτων διαβρωμένων σπηλαιοθέμα των 60 mm αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα 60.000-600.000 χρόνια.

Αν σήμερα θεωρηθεί με βάση τα παραπάνω ότι δεν υπάρχει διάλυση λόγω συμπύκνωσης υδρατμών ή και αν υπάρχει είναι πολύ περιορισμένη σε κάποια χρονικά διαστήματα του έτους, τότε θα πρέπει να αναζητηθούν διαστήματα του παρελθόντος με διαφορετικές συνθήκες στο σπήλαιο. Ένα τέτοιο διάστημα είναι η περίοδος που λειτούργησαν οι φυσικές εισοδοί της σπηλιάς, χωρίς ωστόσο να είναι γνωστό αν λειτούργησαν μεμονωμένα ή ταυτόχρονα δημιουργώντας ένα δυναμικό κλιματικά σπήλαιο. Πάντως αυτό το χρονικό πλαίσιο μπορεί να προσδιοριστεί από τις απόλυτες χρονολογήσεις ηλικίες των απολιθωμάτων που έχουν γίνει και δείχνουν ότι το σπήλαιο ήταν ανοιχτό από τις 12.5 έως σχεδόν τις 30 χιλιάδες χρόνια πριν από σήμερα. Αν ισχύει κάτι τέτοιο τότε η εκτιμώμενη διάρκεια της διάβρωσης λόγω συμπύκνωσης υδρατμών, μπορεί να σημαίνει και για μεγαλύτερο διάστημα ανοιχτές εισόδους στο σπήλαιο, άρα και πιθανή ύπαρξη παλαιότερων ιζημάτων και ίσως απολιθωμάτων μέσα σε αυτό. Διαφορετικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο μέσος ρυθμός διάβρωσης ήταν μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο.

Η μελέτη των θόλων στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου πέρα από ότι οφείλονται στην διάβρωση από συμπύκνωση, δείχνει ότι μεταξύ των θόλων τοιχώματος και οροφής το βάθος είναι μεγαλύτερο στα δεύτερα, ενώ τις περισσότερες φορές αυτά ακολουθούν διακλάσεις. Επίσης, σε αυτά που σχηματίζονται στην οροφή δεν έχουν εντοπιστεί διαβρωμένα σπηλαιοθέματα, γεγονός που ίσως σημαίνει διαφορετικές αιτίες δημιουργίας. Αυτά ωστόσο που αναπτύσσονται στα τοιχώματα και έχουν διαβρωμένα σπηλαιοθέματα

μπορούν να αποδοθούν στη διάβρωση λόγω συμπύκνωσης υδρατμών. Οι διαστάσεις τους είναι γενικά συγκρίσιμες με μετρήσεις από ελληνικά σπήλαια (Trantalidou *et al.*, 2015, Lazaridis *et al.*, 2019). Γενικά οι θόλοι υπάρχουν διάσπαρτοι στο σπήλαιο.

Από τη μελέτη στα κοραλλοειδή προκύπτει από την επί τόπου παρατήρηση και από την εμβοδομέτρηση, στα τοιχώματα που είναι καλυμμένα από κοραλλοειδή, όπως είναι οι θέσεις Cr1, Cr2, τόσο η διάμετρος αυτών όσο και το ποσοστό κάλυψης στο τοίχωμα, μειώνονται με το ύψος. Το φαινόμενο της διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών συνοδεύει πολλές φορές η παρουσία "porcorn lines" που στο σπήλαιο δεν παρατηρήθηκαν να υπάρχουν σαφώς. Επιπλέον δείχνουν αύξηση μεγέθους και πλήθους κοντά στο δάπεδο που σημαίνει ότι καταρχήν οφείλουν το σχηματισμό τους σε τριχοειδές νερό. Το δε σχήμα τους, το κομβιοειδές, οφείλει τη δημιουργία τους και στην αποσάθρωση, εκτός από την απόθεση λόγω εξάτμισης. Σε αυτό πιθανόν να έχει επιδράσει η συμπύκνωση υδρατμών. Ωστόσο, οι τιμές pH που μετρήθηκαν για τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας ήταν για τον πρώτο όροφο 6.8, 6.9 και για τον δεύτερο 7.7. Δηλαδή στις περιοχές που υπάρχει μέγιστη εξάπλωση κοραλλοειδών το pH είναι βασικό, ενώ στην περιοχή που υπάρχει μέγιστη παρουσία διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων το pH είναι ελαφρώς όξινο. Άρα, δεν ενθαρρύνεται και ιδιαίτερα η σύνδεση της διάβρωσης λόγω συμπύκνωσης υδρατμών και της δημιουργίας αυτών των κοραλλοειδών.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρείχε μια λεπτομερή καταγραφή δομών διάβρωσης από συμπύκνωση υδρατμών στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς, καθώς και παρατηρήσεις επί των σπηλαιοθεμάτων που μπορεί να έχουν σχέση με το φαινόμενο αυτό.

Εφόσον το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου είναι επισκέψιμο, η ανθρώπινη παρουσία ενδέχεται να συμβάλλει στην αύξηση της θερμότητας και του CO₂, και θεωρητικά να εντείνει την διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών, όπως έχει μελετηθεί σε άλλα σπήλαια (Avramidis 2001, De Freitas 2006). Ωστόσο, κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου έγινε και η εργασία πεδίου, δεν υπήρξαν παρατηρήσεις θερμοκρασιών στα τοιχώματα και τον ατμοσφαιρικό αέρα που να δείχνουν ότι συμβαίνει συμπύκνωση υδρατμών. Όμως, μπορεί για μικρά χρονικά διαστήματα μεγάλης επισκεψιμότητας ή κατά τους θερινούς μήνες, όπως παρατηρείται σε άλλα σπήλαια, να ενεργεί το φαινόμενο της διάβρωσης από υγραποίηση υδρατμών και σήμερα.

Από τη μορφολογική ανάλυση των θόλων προέκυψε ότι υπάρχει ένας βασικός διαχωρισμός μεταξύ των θόλων οροφής και αυτών του τοιχώματος με βάση τη διάσταση του βάθους που είναι μεγαλύτερη στους πρώτους. Επιπλέον, συχνά φαίνεται να ακολουθούν ασυνέχειες. Από την άλλη, οι θόλοι των τοιχωμάτων συνδέονται υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων.

Για τα κοραλλοειδή προέκυψε ότι το ποσοστό κάλυψης των τοιχωμάτων από αυτά μειώνονται με το ύψος, καθώς επίσης και η μέγιστη διάμετρός τους. Γενικά, δηλαδή η συγκέντρωσή τους αυξάνεται κοντά στο δάπεδο, υποδεικνύοντας ότι η δημιουργία τους έχει σχέση με τριχοειδές νερό και εξάτμιση.

Τα ποσοτικά δεδομένα για τους θόλους και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αποτελέσουν υλικό σύγκρισης για αντίστοιχες μελλοντικές εργασίες σε άλλα σπήλαια. Ένα μέρος των δεδομένων που αφορά θόλους με διαβρωμένα σπηλαιοθέματα, μπορεί να συσχετιστεί με ασφάλεια με το φαινόμενο της διάβρωσης λόγω συμπύκνωσης υδρατμών στα σπήλαια, αποκλείοντας άλλους τρόπους δημιουργίας αυτών των πολυγενετικών δομών.

Τέλος, υπολογίστηκε σε 60.000-600.000 χρόνια η περίοδος που μπορεί να έδρασε κατά το παρελθόν η διάβρωση λόγω συμπύκνωσης υδρατμών με βάση τους ρυθμούς διάβρωσης που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Το εύρος αυτό συγκρίνεται με τις ηλικίες που έχουν βρεθεί από τις χρονολογήσεις σπηλαιοθεμάτων και απολιθωμάτων στο σπήλαιο. Εκτιμάται ότι είναι πολύ πιθανό το φαινόμενο να λειτούργησε εντατικά κατά τη διάρκεια που λειτούργησαν οι φυσικές εισοδοί του σπηλαίου (τουλάχιστον από τις 12.5 έως ~30 Ka). Ωστόσο, το σημαντικό πάχος της διάβρωσης, μπορεί να σημαίνει ότι υπήρξε μεγαλύτερος από τον συνηθισμένο ρυθμό διάβρωσης ή ότι οι εισοδοί λειτούργησαν για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και επομένως στο σπήλαιο μπορεί να βρεθούν και παλαιότερες αποθέσεις ή απολιθώματα.



Antonelou, A., Tsikouras, B., Papoulis, D., & Hatzipanagiotou, K. (2010). Investigation of the formation of speleothems in the Agios Georgios Cave, Kilgis (N. Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(2), 876-885.

Auler, A. S., & Smart, P. L. (2004). Rates of condensation corrosion in speleothems of semi-arid northeastern Brazil. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2(2), pp 2.

Avramidis, P., Hong, J., Barnes, C., & James, J. J. (2001). A new method of measuring condensation corrosion. In 13th International Congress of Speleology, Brasilia, DF.

Bassiakos, J. E., & Tsoukala, E. (1996). ESR dating suitability of Quaternary fossil remains; a hyaenid tooth example and new data on the fauna from Agios Georgios Cave (Kilkis, Macedonia). In *Proceedings 2nd Symposium of the Hellenic Archaeometrical Society* (26-28 March 1993), Thessaloniki.

Cailhol, D., Audra, P., Nehme, C., Nader, F., Garašić, M., Heresanu, V., Gücel, S., Charalambidou, I., Satterfield, L., Cheng, H., & Edwards, R. L. (2019). The contribution of condensation-corrosion in the morphological evolution of caves in semi-arid regions: preliminary investigations in the Kyrenia range, Cyprus. In *Acta Carsologica* 48/1, 5-27.

Cigna, A. A., & Forti, P. (1986). The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1st contribution. *International Journal of Speleology*, 15. pp 41-52.

De Freitas, C. R. & Schmokal, A. (2006). Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm Cave, New Zealand. *International Journal of Speleology*, 35(2), 3

Dotsika, E., Psomiadis, D., Zanchetta, D., Spyropoulos, N., Leone, G., Tzavidopoulos, I., & Poutoukis, D. (2010). Pleistocene palaeoclimatic evolution from Agios Georgios Cave speleothem (Kilkis, N. Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(2), 886-895.

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

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*

Dublyansky, Y., Klenke, J., & Spötl, C. (2017). Condensation corrosion speleogenesis in the Amargosa Desert and the Tecopa Basin. In *Hypogene Karst Regions and Caves of the World* (pp. 565-573). Springer, Cham

Ford, D., & Williams, P. D. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, 1-562.

Hill C.A. & Forti P. (1997) – *Cave minerals of the world*. (2nd ed). National Speleological Society, Huntsville, 463 p.

Ifandi, E., Tsikouras, B., Papoulis, D., Hatzipanagiotou, K., & Antonelou, A. (2015). A new microenvironment for the formation of clay minerals: the example of authigenic halloysite-7Å and gibbsite in a stalactite from Agios Georgios Cave, Kilkis, north Greece. *International Journal of Speleology*, 44(3), 10.

Karakosta A., Lazaridis G., Kargopoulou N., (2019). Documenting condensation corrosion in Agios Georgios cave (Kilkis, Greece). *GSG International Conference, Athens, Greece*. Volume of Extended Abstracts: 485-486.

Kaufmann G., Kockel F. & Mollat H. (1976). Notes on the stratigraphic and paleogeographic position of the Svoula Formation in the Innermost Zone of the Hellenides (northern Greece). *Bulletin de la Societe Geologique de France*, (18): 225-230.

Klimchouk, A., (2012). Speleogenesis, Hypogenic. In White, W. B., & Culver, D. C. (Eds.) *Encyclopedia of caves*. Academic Press, p. 748-765.

Klimchouk, A. (2017). Types and Settings of Hypogene Karst. In A. Klimchouk, A. N. Palmer, J. De Waele, A. S. Auler & P. Audra (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. 1-39. Springer.

Kockel, F., & Ioannides, K. (1979). Geological map of Greece, 1: 50000 scale, Kilkis sheet. Institute of Geology and mineral exploration (IGME), Athens.

Lauritzen, S. E., & Lundberg, J. (2000). Solutional and erosional morphology. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*, National Speleological Society, Huntsville, 408-426.

Lazaridis, G. (2017). Hypogene Speleogenesis in Greece. In A. Klimchouk, A. N. Palmer, J. De Waele, A. S. Auler & P. Audra (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World* (pp. 225-239): Springer.

Lazaridis, G., Fellachidou, K. & Efraimidou, S. (2019). Cupola-related morphology of the Mesolakkia Caves, Greece. GSG International Conference, Athens, Greece. Volume of Extended Abstracts: 475-476.

Lundberg, J. & McFarlane, D.A. (2012). Post-speleogenetic biogenic modification of Gomantong Caves, Sabah, Borneo. - *Geomorphology*, 157–158, 153– 168.

Lundberg, J. & McFarlane, D.A. (2015). Microclimate and niche constructionism in tropical bat caves: a case study from Mount Elgon, Kenya. -In: Feinberg J., Gao Y. & E.C. Alexander Jr. (eds.) *Caves and Karst Across Time*. Geological Society of America Special Paper, 516, pp. 19.

Makridis V., Tsoukala E., Vlachos E., Tsekoura K., van Logchem W. & Mol D., (2013) Agios Georgios Cave, Kilikis: 50 years of history, 30,000 years of prehistory. *Deposits Magazine*, (34) 30-36.

Moore, G. W. (1952). Speleothem—a new cave term. *National Speleological Society News*, 10(6), 2.

Osborne, R.A.L., (2004). The troubles with cupolas. *Acta Carsologica*, 33: 9-36.

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

Tarhule-Lips, R. F., & Ford, D. C. (1998). Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and Isla de Mona. *Journal of caves and karst studies*, 60, 84-95.

Tranos, M., Kiliyas, A., & Mountrakis, D, (1999). Geometry and kinematics of the Tertiary post-metamorphic Circum Rhodope Belt Thrust System (CRBTS), Northern Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 33, 5-16.

Trantalidou K., Lazaridis, G., Trimmis, K-P., Gerometta, K., Maniatis, Y., Milidaki, V., Papadea, A. Zikidi, C-A., Kotzamani G., Papayianni, K., Chatzitheodorou, T. & Stefanou, P. (2015). Consumed by the Darkness: The Archaeological Assemblages Uncovered During the 2011 Excavation Season at the Kataphygadi Cave, on Kythera1, p. 65-100.

Tsoukala, E. S. (1992). The Pleistocene large mammals from the Agios Georgios cave, Kilikis (Macedonia, N. Greece). *Geobios*, 25(3), 415-433.

White, W.B. (1988). Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York. Oxford University Press, Inc.: 464 p.

White, W. B., & Culver, D. C. (Eds.). (2012). Encyclopedia of caves. Second edition Academic Press, 945p.

Αντωνέλου Α. (2007). Μελέτη Σπηλαιοθεμάτων από το Σπήλαιο Αγίου Γεωργίου του Νομού Κιλκίς: Διερεύνηση των Παλαιοκλιματικών Περιβαλλοντικών Συνθηκών με Χρήση των Σταθερών Ισοτόπων C και O. Διπλωματική εργασία ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 183.

Λαζαρίδης, Θ. Γ. (2005). Παρατηρήσεις επί των δίσκων του σπηλαίου του Κύκλωπα Πολύφημου στη Μαρόνεια (νομός Ροδόπης)= Observations on the shields of the Cyclop Polyphemus cave-Maronia (Thrace, Greece). Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, 37, 168-178.

Μουντράκης, Δ. (2010). Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. University studio press. 374.

Πετροχείλου, Α. (1962). Το σπήλαιον Μπουλασίκι ή Τρύπα του Αγ. Γεωργίου Κιλκίς. Δελτίον της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, VI, 5: 14-15.

Πετροχείλου, Α. (1973). Σπήλαιον Αγίου Γεωργίου ή ‘Μπουλασίκη’ Κιλκίς. Δελτίον της Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας, XII,2: 36- 41.

Τερζίδης Δ., Βαφειάδης Α., Κεμεντζετζίδης Π., Κωνσταντινίδης Κ. (1992). Αδημοσίευτο τοπογραφικό διάγραμμα του σπηλαίου Άγιος Γεώργιος, του Κιλκίς.

Το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου στο Κιλκίς (Β. Ελλάδα) είναι ένα επισκέψιμο σπήλαιο που έχει δημιουργηθεί μέσα σε ασβεστολίθους ηλικίας Μέσο- Άνω Τριαδικό, που ανήκουν στην ενότητα Ντεβέ Κοράν Δουμπιά της Περιοδοπικής ζώνης (Kauffmann *et al.*, 1976, Μουντράκης, 2010). Υπάγεται στα υπογενή σπήλαια της Ελλάδας, έχει έκταση 800m² και χαρακτηρίζεται από μοτίβο λαβυρίνθου σε κάτοψη, εμφανίζοντας λιγοστούς θαλάμους και στενά και ψηλά περάσματα που ακολουθούν κυρίως τεκτονικές ασυνέχειες (Lazaridis, 2017, Karakosta *et al.*, 2019).

Μια διαδικασία που μπορεί να δημιουργήσει δομές διάλυσης ή διεύρυνση περασμάτων και λαμβάνει χώρα στα σπήλαια όταν δεν είναι εντελώς πληρωμένα με νερό ή ιζήματα, είναι η διάβρωση από συμπύκνωση υδρατμών (condensation corrosion). Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί στο σπήλαιο του Κιλκίς στο παρελθόν (Lazaridis, 2017) και εξετάζεται και τεκμηριώνεται στην παρούσα εργασία με λεπτομέρεια.

Παρατηρήθηκαν οι μορφές διάλυσης και απόθεσης στο σπήλαιο και έγιναν μετρήσεις στους θόλους, τα κοράλλια, τα υπολείμματα διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων, συλλέχθηκαν υδρατμοί από την ατμόσφαιρα, έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας στον αέρα, τα τοιχώματα και τα σπηλαιοθέματα. Επιπλέον έγιναν μορφολογικές τομές στους θόλους με διαβρωμένα σπηλαιοθέματα και τεκμηριώθηκαν φωτογραφικά οι παρατηρήσεις.

Με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αναλύεται και συζητιέται η μορφολογία των δομών διάλυσης στο πέτρωμα και τα σπηλαιοθέματα και γίνεται μια εκτίμηση του χρονικού πλαισίου όπου έδρασε το φαινόμενο αυτής της διάβρωσης στο σπήλαιο.

Σήμερα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα τουλάχιστον, το φαινόμενο είναι ανενεργό, χωρίς να μπορεί να αποκλειστεί η επίδρασή του κατά τη θερινή περίοδο ή σε ημέρες μεγάλης επισκεψιμότητας.

Με βάση το ελάχιστο πάχος της διάβρωσης υπολογίστηκε η περίοδος που μπορεί να έδρασε κατά το παρελθόν η διάβρωση λόγω συμπύκνωσης υδρατμών σε 60.000-600.000 Ka. Εκτιμάται ότι είναι πολύ πιθανό το φαινόμενο να λειτουργήσει εντατικά κατά τη διάρκεια που λειτουργήσαν οι φυσικές είσοδοι του σπηλαίου για τις οποίες εκτιμάται ότι λειτουργήσαν για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την ηλικία των απολιθωμάτων ή ότι ο ρυθμός διάβρωσης υπήρξε μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο.



Abstract

The Agios Georgios show cave is located at a small hill in the town of Kilgis (N. Greece). It has been formed in the limestones of Middle-Upper Triassic that belong to the Deve Koran-Doubia subzone of the Circum-Rhodope geotectonic zone (i.e. Mountrakis, 2010 and references therein). The cave is hypogene and covers an area of 800 m². It is a 2-dimensional maze with narrow and high fracture-guided passages. Some chambers are mainly formed due to breakdown (Lazaridis, 2017, Karakosta et al., 2019).

A dissolution process that occurs in caves that are not totally filled with water or sediment is the condensation corrosion. This process has been observed in the Agios Georgios Cave of Kilgis, Greece (Lazaridis, 2017) and it is documented in detail and discussed in this study.

Dissolution forms and speleothems are observed and measured. In particular the three main axis of cupolas are measured, the size and coverage of coralloids on side walls and the thickness of corroded speleothems too. Vapors where condensed and collected for pH measurements and air and wall temperatures were measured in various places inside the cave. Furthermore, profiles and topographic diagrams of cupolas including corroded speleothems are drawn.

On the basis of these data the cupola morphology is discussed and the duration of the condensation corrosion in the cave is also estimated, according to the rates of dissolution proposed in the literature.

Nowadays, the process is inactive during winter. However, it cannot be excluded to occur during summer or on days with many cave visitors.

Depending on the minimum thickness of corroded speleothems, the duration of condensation corrosion is estimated to 60.000-600.000 Ka. It is plausible that it mainly acted when the natural entrances of the cave where formed and thus it is expected that they remained open for much longer period than the fossils revealed up to now. Otherwise a significantly higher rate of dissolution has to be assumed.



Πίνακας Α1. Διαστάσεις και χαρακτηριστικά των θόλων στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου

κατά μήκος (cm)	κάθετη (cm)	βάθος (cm)	ύψος (m)	είδος	ακμές σπηλαιοθεμάτων	διάκλαση
51	45	21	1.6	τοιχώματος	-	-
48	50	14,5	1.5	τοιχώματος	-	-
31	41	10	1.5	τοιχώματος	-	-
24	25	7	1.3	τοιχώματος	8.1 mm	-
46	60	50	2.5	τοιχώματος	-	-
11	25	8	1.5	τοιχώματος	1mm και 0.9 mm	-
47	54	13		τοιχώματος	Ναι (τομή)	-
50	80	140	1.8	οροφής	-	ναι
52	80	60	1.8	αδιευκρίνιστο	-	-
29	52	20	1.6	τοιχώματος	Pr1 (11/9.5/4 mm)	-
50	84	49	1.6	οροφής	-	ναι?
48	58	32	1.6	οροφής	-	ναι?
42	54	60		οροφής	-	ναι?
67	68	76	2+	οροφής	-	ναι?
46	63	42	2+	αδιευκρίνιστο	?	?
48	38	55	2+	τοιχώματος	ναι	-
45	40	23	2+	αδιευκρίνιστο	ναι	-
41	30	22		αδιευκρίνιστο	ναι	-
57	61	29	1	οροφής	-	-
67	55	20	2	αδιευκρίνιστο	?	-
60	80	55	χαμηλά	τοιχώματος	-	-
45	59	20	1.8	τοιχώματος	ναι	-
58	56	22	2	τοιχώματος	?	-
42	46	40	1.5	τοιχώματος	?	-
62	65	19	1.8	τοιχώματος	?	-
81	41	24	3	τοιχώματος	?	-
33	39	27	3	τοιχώματος	?	?
65	53	68	5.5	οροφής	-	ναι
22	19	34	5.5	οροφής	-	ναι
37	45	86	χαμηλά	τοιχώματος	Κοραλλοειδή	-

Πίνακας Α2. Διάμετροι κοραλλοειδών, θέση Cr1

0-0,5 m Διάμετρος (mm)	0,5-1 m Διάμετρος (mm)	1- 1,5 m Διάμετρος (mm)	1,5- 2 m Διάμετρος (mm)	2- 2+ m Διάμετρος (mm)
52	35.3	36.5	12.88	12.04
51	45.43	35.7	9.55	15.25
44.92	34.49	33.71	13.83	14.8
36.88	37.29	41.13	16.03	8.7
63.4	61.51	34.57	17.22	8.43
49	49.8	32.09	13.5	14.53
42.1	59.8	38.86	16.86	6.13
34.88	43.95	27.6	21.96	12.9
51.6	26.18		14.54	
30	29		13.32	
33			16.09	
51.3				
37				
46.47				
52				
45				
48.78				
42.73				
54.53				
45.61	42.28	35.02	15.07	11.60

Πίνακας Α3. Διάμετροι κοραλλοειδων, θέση Cr2

0- 0,5 m Διάμετρος (mm)	0,5- 1 m Διάμετρος (mm)	1- 1,5 m Διάμετρος (mm)
46	37.1	21.66
31.5	26.95	21.3
29.19	20.29	21
71.73	49.6	26.43
76.35	39.94	19.09
91.25	43.96	23.6
57.04	32	13.19
48.17	75	7
25.03	40.29	14.46
33.79		
69.4		
19.49		
32.95		
45.47		
48.39	40.57	18.64

Πίνακας Α4. Τιμές παχών (mm) υπολειμμάτων διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων στην θέση Cs.

5.3	6.1	3	7
12	3	5.3	6.7
8.19	6.95	4.5	6.4
6.47	3.25	7.2	2.8
4.36	3	5.3	2.2
5.9	16	2.6	9.2
3.65	9.4	8.36	13.3
4.1	9.3	8.8	10.75
7.15	2.9	5.5	12.76
3	4.3	4.5	6.13
6.5	16.3	5.5	7.9
	11.49		
		M.O:	6.76

Πίνακας Α5. Τιμές παχών (mm) υπολειμμάτων διαβρωμένων σπηλαιοθεμάτων που βρίσκονται μαζί με τους θόλους, στις θέσεις Pr1, Pr2.

Pr1	11	9.5	4	25	20
	50	60	50	28	18
Pr2	3	2	5		
	40				
				M.O:	26.46