



**8^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ
της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας**

8TH PAN-HELLENIC GEOGRAPHICAL CONFERENCE
of the Greek Geographical Society

Γεωμορφολογία

ΥΠΟΓΕΝΗ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΠΗΛΑΙΑ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΠΗΛΑΙΟ ΜΕΛΙΣΣΟΤΡΥΠΑ ΣΤΗΝ ΕΛΑΣΣΟΝΑ, Ν.ΛΑΡΙΣΑΣ

Βαξεβανόπουλος Μ.

*Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124, Θεσσαλονίκη, Vaxevanopoulos@hotmail.com*

Περίληψη

Τα υπογενή καρστικά σπήλαια δημιουργούνται κυρίως από διαλύματα των οποίων η διαλυτική δράση αποκτάται στο βάθος των ανθρακικών πετρωμάτων. Η γένεση και εξέλιξη των υπογενών σπηλαίων καθορίζεται από την κυκλοφορία διαλυμάτων εμπλουτισμένων σε H₂S και CO₂ και δευτερευόντως από τη δράση του μετεωρικού νερού. Τα υπογενή αυτά διαλύματα καθορίζουν τον τρόπο και το ρυθμό διάλυσης του ανθρακικού πετρώματος ενώ η διεύθυνση της σπηλαιογένεσης καθορίζεται από τις ασυνέχειες και τη λιθολογία του μητρικού πετρώματος.

Το σπήλαιο Μελισσότρυπα βρίσκεται στο Κεφαλόβρυσο της Ελασσόνας Ν.Λάρισας και αποτελεί τη σημαντικότερη γνωστή υπόγεια καρστική μορφή του καρστικού συστήματος της Κρανιάς Ελασσόνας. Διανοίγεται σε μάρμαρα της συνεχούς ανθρακικής σειράς της Κρανιάς. Αποτελεί καρστικό υπογενές σπήλαιο, το οποίο έχει περάσει από τη φρεατική φάση σπηλαιογένεσης στη ζώνη κατείσδυσης. Η υπογενής προέλευσή του αποδεικνύεται από τις εναπομένουσες μορφές διάλυσης και ανάπτυξης του σπηλαίου, τα σπηλαιοθέματα γύψου και τον εντοπισμό H₂S στις λίμνες του σπηλαίου. Η σπηλαιογένεση ακολούθησε τις επικρατούσες τεκτονικές ασυνέχειες και σήμερα συνεχίζεται πιθανά στη φρεατία ζώνη, κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της δράσης των υπογενών διαλυμάτων. Πάνω από την επιφάνεια αυτή δρουν οι διαδικασίες της ζώνης κατείσδυσης. Οι παλιοί φρεατικοί αγωγοί πλέον καταστρέφονται δίνοντας τη θέση τους σε μορφές που δημιουργούνται από τη δράση του μετεωρικού νερού.

HYPOGENIC KARSTIC CAVES. CASE STUDY OF MELISSOTRIPA CAVE IN ELASSONA, LARISSA PREFECTURE, GREECE

Vaxevanopoulos M.

*Department of Geology Faculty of Geology, Aristotelio University of Thessaloniki,
54124, Thessaloniki, Vaxevanopoulos@hotmail.com*

Abstract

Hypogenic karstic caves owe their origin to groundwater activity in carbonate rocks. **Fluid's acidity is gained** at depth of the rocks and their seeping controls the genesis and evolution of hypogenic caves. **The water's aggressiveness results from** H₂S and CO₂ components and is linked to confined or rising flow, without the direct influence of meteoric water. Hypogenic fluids control the dissolution rate of the carbonate rocks but the main cave axes depend on the penetrative discontinuities and the lithology of karstic rocks.

Melissotripa cave is located in Kefalovriso village of Elassona city, Larissa prefecture, and constitutes the most important known karstic formation. The entire cave system is developed in the neritic carbonate Kranea unit. Melissotripa cave is a hypogenic karstic cave and its speleogenesis has passed from confined processes to vadose zone evolution phase. Hypogenic origin is being proved by the remain dissolution morphologies, gypsum speleothems and the H₂S in the lakes of the cave. Melissotripa cave has been developed

under water table from hypogenic solutions following the main tectonic discontinuities. Joints and faults are the planar breaks that have served the principal structural guides for underground flows. The area's uplift leads the phreatic formed cave to the vadose zone where the phreatic tubes are destroyed under the air filled corrosion phenomena.

Λέξεις κλειδιά: καρστ, υπογενή σπήλαια, φρεάτια ζώνη, σπηλαιοθέματα, ζώνη κατεισδυσης, ασυνέχειες.

Key words: karst, hypogenic caves, phreatic zone, speleothems, vadose zone, discontinuities.

1. Εισαγωγή

Η δημιουργία και η εξέλιξη των καρστικών σπηλαίων γενικά εξαρτάται από τη διάλυση που προκαλεί το εμπλουτισμένο σε CO₂ νερό. Τα κατακρημνίσματα κατεισδύουν στη μάζα των ανθρακικών πετρωμάτων και αποτελούν τους βασικούς τροφοδότες σε δξίνο νερό μεγάλων υπογείων καρστικών μορφών. Τα περισσότερα σπήλαια που έχουν εξερευνηθεί ακολουθούν τον κανόνα της διάλυσης από διαλύματα προερχόμενα από το επιφανειακό καρστ ενώ πολύ λίγο έχει μελετηθεί η επίδραση των υπογενών διαλυμάτων.

Η κύρια διαλυτική ικανότητα του νερού που κατεισδύει στο υπόγειο καρστικό περιβάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι προσλαμβάνει στην επιφάνεια το CO₂, το οποίο μετατρέπεται σε H₂CO₃ ένα ισχυρό διαλυτικό μέσο. Αντίθετα στα υπογενή σπήλαια το H₂SO₄, που προέρχεται από την οξειδωση του H₂S, αποτελεί το βασικό διαλυτικό μέσο. Τελευταίες σπηλαιολογικές έρευνες σε διάφορα μέρη του κόσμου αποδεικνύουν την υπογενή προέλευση σπηλαίων που μέχρι σήμερα θεωρούνταν ως τυπικά καρστικά με αίτιο δημιουργίας τα επιφανειακά κατακρημνίσματα. Τα υπογενή σπήλαια αντιπροσωπεύουν περίπου το 5-7% των φρεατικών σπηλαίων (Forti, 1996) και αποτελούν κλειδί στην έρευνα του πετρελαίου, κοιτασμάτων χρυσού και στη γεωμικροβιολογία.

2.Υπογενή σπήλαια

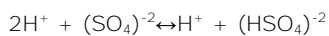
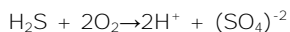
Το νερό καθίσταται ισχυρό διαλυτικό μέσο όταν εμπλουτίζεται σε CO₂. Ομοίως, η παρουσία H₂S ισχυροποιεί τη διαλυτική δράση ανερχομένων διαλυμάτων, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία μιας σειράς καρστικών σπηλαίων. Τα σπήλαια αυτά καλούνται υπογενή (*Hypogenic Caves*). Υπογενή ονομάζονται τα σπήλαια που δημιουργούνται από τη δράση διαλυμάτων των οποίων η διαβρωτική δράση αποκτήθηκε στο βάθος του ανθρακικού πετρώματος (Palmer, 2000). Στα διαλύματα που προέρχονται από το εσωτερικό του πετρώματος και όχι από την κατεισδυση όμβρου περιέχεται σε αέρια φάση H₂S και CO₂. Το H₂S προκαλεί φυσικοχημικές διαδικασίες διάβρωσης του πετρώματος και απόθεσης του διαβρωμένου υλικού, σε αντίθεση με το CO₂ που διαβρώνει μόνο σε μικρή κλίμακα (Forti *et al*, 2002).

Η διαλυτική δράση των διαλυμάτων οφείλεται στην αρχική παρουσία του S-2. Συνήθως δεν έχουν σχέση με τη διάλυση που πραγματοποιεί το εμπλουτισμένο σε CO₂ νερό στη ζώνη κατεισδυσης αλλά κυρίως στη φρεάτια ζώνη. Τις περισσότερες φορές η δημιουργία των υπογενών σπηλαίων εντοπίζεται στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα όπου το νερό της κατεισδυσης αναμιγνύεται με το πλούσιο σε H₂S διάλυμα. Η παρουσία αυτού του είδους των σπηλαίων είναι περισσότερο συχνή σε περιοχές με ενεργές ορογενετικές διαδικασίες (Palmer, 2000).

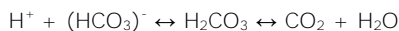
Η πηγή του S-2 μπορεί να είναι ένα κοίτασμα σουλφιδίων, υδρογονανθράκων ή πιο συχνά η παρουσία ενστρώσεων γύψου ή ανυδρίτη στο μητρικό πέτρωμα ή σε γεινιάζουσα ιζηματογενή λεκάνη (Palmer & Hill, 2005). Η παραγωγή H₂S από θειικές ενώσεις πολλές φορές υποβοηθάται από την παρουσία βακτηριδίων. Η παρουσία άφθονων πληθυσμών χημειοαυτότροφων μικροοργανισμών, που συντελούν κατά μεγάλο ποσοστό στην παραγωγή

σουλφιδίων, είναι αυτή που θα οδηγήσει στη δημιουργία ικανοποιητικών συνθηκών για σπηλαιογένεση (Palmer and Hill, 2005).

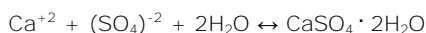
Η διαδικασία συνεχίζεται με την παραγωγή θειικού οξέος και άλλων όξινων θειικών ενώσεων ως ενδιάμεσων προϊόντων:



Στη συνέχεια το θειικό οξύ διαβρώνει το μητρικό ανθρακικό πέτρωμα:



Προοδευτικά η μερική πίεση του CO_2 P_{CO_2} αυξάνεται ενώ σε αργές ροές καθιζάνει γύψος:



Εξαιτίας της αντίδρασης των οξέων, το pH συνήθως παραμένει ουδέτερο (pH=6-7).

Ένα τυπικό υπογενές σπήλαιο αποτελείται από μία κεντρική περιοχή, όπου συντελείται η κύρια διάλυση, και συνδέεται με αγωγούς με λαβυρινθώδη δομή. Οι μικροί αγωγοί που συγκροτούν το λαβύρινθο τροφοδοτούν το σύστημα με διαλύματα πλούσια σε H_2S (Palmer and Hill, 2005). Τα ανερχόμενα διαλύματα αποβάλουν στον αέρα H_2S και CO_2 και πραγματοποιείται διάλυση από τους υδρατμούς, που συγκρατούν αυτές τις ενώσεις και διαβρώνουν τα τοιχώματα του σπηλαίου. Η συμπύκνωση των υδρατμών που συντελείται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας των αερίων διαλυμάτων και των τοιχωμάτων του σπηλαίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του σπηλαίου. Η πιο χαρακτηριστική μορφή διάλυσης που δημιουργείται από τη συμπύκνωση και τη διάβρωση που ακολουθεί είναι οι θόλοι στις οροφές των υπογενών σπηλαίων. Επιπλέον, το CaCO_3 της διάλυσης των τοιχωμάτων μεταφέρεται προς τα κάτω με τριχοειδείς διαδικασίες και δημιουργεί σπηλαιοθέματα, κυρίως κοραλλοειδή και ινώδη συσσωματώματα.

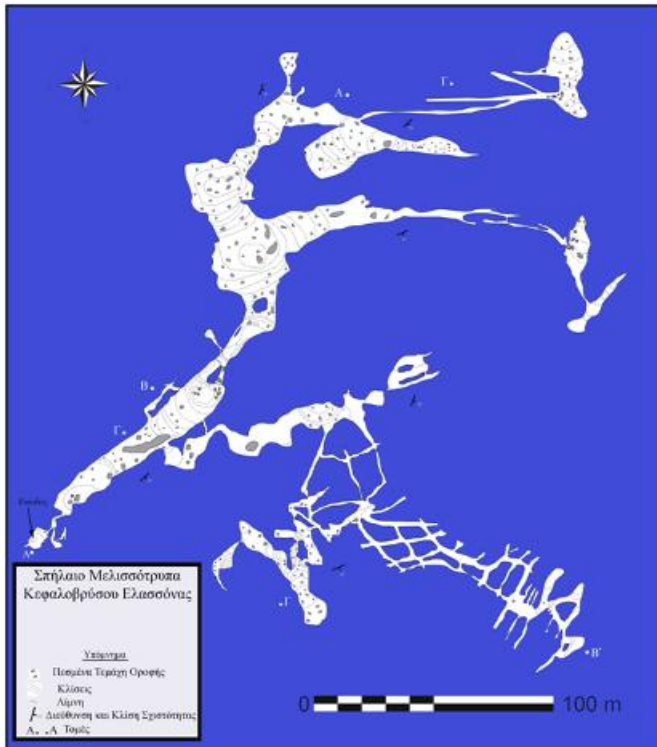
Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις υπογενών σπηλαίων απουσιάζουν τα υδροθερμικά διαλύματα με υψηλές θερμοκρασίες, η αντίδραση παραγωγής σουλφιδίων συντελείται κυρίως με τη βοήθεια βακτηριδίων (*Thiobacillus sp.*, *Thiotrix sp.*) Τα τελευταία έχουν εντοπιστεί σε διάφορα υπόγεια έγκοιλα (Forti et al, 2002).

Βασικό πρόβλημα στη διάγνωση της υπογενούς προέλευσης ενός σπηλαίου είναι το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά του διαβρώνονται από τις διαδικασίες που επιτελούνται στη ζώνη κατείδυσης. Το ποσοστό αυτών των σπηλαίων ίσως είναι μεγαλύτερο από ότι πιστεύουμε σήμερα, διότι είναι πολύ δύσκολο να διαπιστώσουμε και να εντοπίσουμε υπολείμματα υπογενών διαλυμάτων.

3.Σπήλαιο Μελισσότρυπα Κεφαλοβρύσου

Η Μελισσότρυπα Κεφαλοβρύσου αποτελεί τη σημαντικότερη γνωστή υπόγεια καρστική μορφή του καρστικού συστήματος της Κρανιάς Ελασσόνας. Το σπήλαιο καλύπτει έκταση 0,06km² και έχει συνολικό μήκος χαρτογραφημένων διαδρόμων περίπου 2103,6m. Το υψόμετρο στην περιοχή του στομίου της εισόδου είναι 299m (συσχετισμένη μέτρηση G.P.S.) ενώ στο εσωτερικό του φθάνει σε βάθος μέχρι και -47,3m δηλαδή σε απόλυτο υψόμετρο 251,7m. Το βάθος της βαραθρώδους εισόδου του είναι 14,6m.

Αποτελείται από έναν κύριο αγωγό ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης (σχήμα 1) με μήκος περίπου 110m, μέσο πλάτος και ύψος 6m και 6,4m αντίστοιχα και ορίζεται από δύο μεταπτωτικά ρήγματα. Εκτείνεται από την περιοχή της εισόδου έως τα βόρεια τμήματα του σπηλαίου.



Σχήμα 1. Κάτοψη του σπηλαιού Μελισσότρυπα (Βαξεβανόπουλος, 2006)

Εκεί αγωγοί διεύθυνσης Α-Δ συνδέουν μεγάλες αίθουσες στις οποίες παρατηρούνται έντονες καταρρεύσεις τεμαχών της οροφής. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της Μελισσότρυπας οι αγωγοί έχουν μικρότερες διαστάσεις και δομή λαβυρίνθου. Στο κεντρικό τμήμα του σπηλαιού υφίστανται οι δύο μεγαλύτεροι θάλαμοι με διαστάσεις 33x50x 8,5m (μήκος x πλάτος x ύψος) ο νότιος θάλαμος και 19x31,8x 7,6m ο βόρειος. Ο νοτιότερος θάλαμος είναι και ο μεγαλύτερος της Μελισσότρυπας.

3.1 Γεωλογία της περιοχής του σπηλαιού

Στην περιοχή της Κρανιάς κυριαρχούν τα πετρώματα της Πελαγονικής Ζώνης και μιας συνεχούς ανθρακικής σειράς. Η ανθρακική αυτή σειρά θεωρείται σχετικά αυτόχθονη και αποτελεί το τεκτονικό παράθυρο της Κρανιάς (Katsikatsos *et al* 1986, Kiliias and Mountrakis 1987, Stamatis and Migiros 1993 από Μανάκο, 1999). Στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται η ανθρακική σειρά του τεκτονικού παραθύρου της Κρανιάς, το Πελαγονικό κάλυμμα και οι επωθημένοι οφιόλιθοι.

Το σπήλαιο αναπτύσσεται σε μάρμαρα Μεσοζωικής ηλικίας της συνεχούς ανθρακικής σειράς της Κρανιάς. Η είσοδος της Μελισσότρυπας διανοίγεται σε κορήματα που επικάθονται σε εντόνων τεκτονισμένα μάρμαρα λόγω της ύπαρξης μεταπτωτικού ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ.

Στην περιοχή του σπηλαιού της Μελισσότρυπας εμφανίζονται οι σειρές της Ελασσόνας, που ανήκουν στο Πελαγονικό κάλυμμα (Sfeikos, 1992), αποτελούμενες από το πολυμεταμορφωμένο κρυσταλλικό υπόβαθρο γνευσίων και σχιστολίθων. Η ακολουθία αυτή μεταβαίνει βαθμιαία προς τα κάτω σε γνευσιοσχιστόλιθους, χωρίς να είναι εύκολος ο

διαχωρισμός τους, αφού δεν υπάρχει ασυμφωνία. Πρόκειται για γνευσιοσχιστόλιθους σε εναλλαγές με σχιστόλιθους, αμφιβολιτικούς γνεύσιους, πρασινοσχιστόλιθους, επιδοιπτικούς και αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους (Ι.Γ.Μ.Ε., 1982). Μέσα στους γνευσιοσχιστόλιθους υφίστανται παρεμβολές μαρμάρων.

Η γεωμορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από γενικά έντονο ανάγλυφο, ιδιαίτερα στην περιοχή του σπηλαίου. Επιφανειακά παρατηρούνται δακτυλιογλυφές, ίχνη βροχής και άλλες μικρές μορφές του επιφανειακού καρστ ενώ μεγάλες επιφανειακές καρστικές μορφές όπως δολίνες και πόλγες δεν έχουν εντοπιστεί. Βορειοανατολικά του σπηλαίου υφίσταται η πηγή του Κεφαλοβρύσου που αποτελεί τη μοναδική εκφόρτιση του καρστικού συστήματος της Κρανιάς (Μανάκος, 1999).

3.2 Υδρογεωλογία

Το σπήλαιο Μελισσότρυπα ανήκει στο ευρύτερο καρστικό σύστημα της Κρανιάς Ελασσόνας. Το καρστικό σύστημα έχει έκταση πάνω από 90km² και δημιουργείται στην αυτόχθονη ανθρακική σειρά της Κρανιάς πάχους 1850m περίπου (Ι.Γ.Μ.Ε., 1982). Η σειρά αυτή εμφανίζεται με τρεις διακριτούς λιθοστρωματογραφικούς ορίζοντες. Ο βαθμός καρστικοποίησης μειώνεται από τα ανώτερα μέλη της σειράς προς τα κατώτερα. Η κατώτερη σειρά εμφανίζει μια δολομιτωμένη ένσθρωση, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της υπόγειας καρστικής υδροφορίας. Η υπόγεια στάθμη του καρστικού υδροφορέα για το χρονικό διάστημα 1988-1993 κυμάνθηκε σε απόλυτα υπόμετρα μεταξύ 255,17 έως 257,68m (Μανάκος, 1999). Μέσα στο σπήλαιο της Μελισσότρυπας καταγράφεται σε υψόμετρο 251,7m (μέτρηση 12-12-2005). Όπως προκύπτει από τα συμπεράσματα της έρευνας του Μανάκου στην περιοχή (Μανάκος, 1999), η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που δέχεται η ελεύθερη επιφάνεια των μαρμάρων και από τα επιφανειακά νερά των υδρορρεμάτων Δεσκάτης και Δασοχωρίου (Παλιομάντανου).

Πίνακας 1. Ανάλυση των υδάτων και του αέρα της Μελισσότρυπας (Βαξεβανόπουλος, 2006) σε σύγκριση με τις εισόδους και τις πηγές άλλων υπογενών σπηλαίων. Πηγή στοιχείων για τα υπόλοιπα υπογενή σπήλαια από Palmer and Hill 2005.

	Μελισσότρυπα	Lower Kane inlets	Villa Luz spring
pH	7	7.0	7.14
Ca ²⁺ (mg/L)	68	97	393
Mg ²⁺ (mg/L)	13.67	31	88
(HCO ₃) ⁻ (mg/L)	176	218	477
H ₂ S (mg/L)	1.25	6±1.5	17.5±3
CO ₂ (αέρα)	0.04-0.22% κ.ο.	0.05-0.14% κ.ο.	3% κ.ο.

Η ανάλυση των υδάτων των λιμνών του σπηλαίου έδειξε παρουσία H₂S (Πίνακας 1), το οποίο διαλύει με τις ανάλογες αντιδράσεις το CaCO₃. Οι λίμνες αυτές αποτελούν επιφανειακή έκφραση του υδροφόρου ορίζοντα και παρουσιάζουν ανάλογη αυξομείωση στη στάθμη τους.

Η καρστικοποίηση της συνεχούς ανθρακικής σειράς της Κρανιάς λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την αποκάλυψη του πρώτου φακού αυτών των πετρωμάτων (~Άνω Ολιγόκαινο). Οι περιοχές αυτών των φακών είναι που τροφοδοτούν με όξινο νερό το υπόγειο καρστ. Στη μάζα των ανθρακικών πετρωμάτων και σε βάθος δημιουργούνται φρεατικές μορφές, παρά την παρουσία του υπερκείμενου Πελαγονικού καλύμματος και αυτό λόγω της δράσης των υπογενών διαλυμάτων H₂S. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι οι φρεατικές μορφές σπηλαίων δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτούνται από την επιφάνεια με όξινο νερό. Είναι δυνατό να δημιουργείται υπόγεια καρστική μορφή σε ανθρακικό πέτρωμα υποκείμενο πετρώματος μη επιδεκτικού σε καρστικοποίηση από τη δράση υπογενών διαλυμάτων. Στις περιοχές της σειράς της Κρανιάς που έχουν αποκαλυφθεί δημιουργούνται παράλληλα και σπήλαια στη

ζώνη κατείδυσης λόγω της κατά βάθος διάβρωσης.

3.3 Σπηλαιοθέματα

Η μέγιστη συγκέντρωση χημικών ιζημάτων στο σπήλαιο Μελισσότρυπα εντοπίζεται στο νότιο τμήμα του σπηλαίου. Τα πιο κοινά σπηλαιοθέματα είναι οι σταλακτίτες, σταλαγμίτες, κολώνες, ρεόλιθοι και ελικτίτες.

Τα κοραλλοειδή και οι βελόνες είναι επίσης διαδεδομένα σπηλαιοθέματα στο σπήλαιο. Τα κοραλλοειδή είναι βοτρυοειδή, σφαιρικά, κομβοειδή ασβεστιτικά συγκρίματα που μοιάζουν με κοράλλια. Παρουσιάζουν συγκεντρικής ανάπτυξης δακτυλίους στους οποίους οι κρύσταλλοι είναι κάθετοι και ακτινωτά γύρω από το κοραλλοειδές. Τα συγκεντρικά στρώματα έχουν διαφορετικό χρώμα, λάμψη, μέγεθος και σχήμα κρυστάλλων. Στο σπήλαιο Μελισσότρυπα τα κοραλλοειδή δημιουργούνται από τη διάβρωση που προκαλεί η συμπύκνωση υδρατμών στα τοιχώματα του σπηλαίου και τη μετέπειτα μεταφορά και απόθεση CaCO_3 λόγω τριχοειδών φαινομένων. Από το Νοέμβριο έως τον Απρίλιο η συμπύκνωση των υδρατμών (που περιέχουν CO_2 και H_2S) είναι μέγιστη με αποτέλεσμα να διαλύεται και να επαναποτίθεται CaCO_3 του πετρώματος ενώ από το Μάιο έως τον Οκτώβριο η κρυστάλλωση του CaCO_3 που προκαλείται είναι μέγιστη. Χαρακτηριστικό αυτού είναι ότι η κύρια μάζα των κοραλλιών δημιουργείται κάτω από μια γραμμή, τη γραμμή της συμπύκνωσης των υδρατμών. Τα ρεύματα αέρος είναι αυτά που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη και το μέγεθός τους.

Οι βελόνες σχηματίζουν ακτινωτές ομάδες κρυστάλλων. Το χρώμα τους είναι λευκό μέχρι και γαλάζιο. Το μήκος των βελονών γενικά κυμαίνεται από μερικά mm μέχρι και 4cm και η σύστασή τους είναι αραγωνιτική. Η δημιουργία τους σχετίζεται με την τριχοειδή κίνηση του νερού στις επιφάνειες του σπηλαίου. Η απόθεση του CaCO_3 οφείλεται στη συνεχή συμπύκνωση και εξάτμιση του νερού.

Ένα ιδιότυπο σπηλαιοθέμα του σπηλαίου είναι ο διακλασίτης, ο οποίος συναντάται στα τοιχώματα και στις οροφές των σπηλαίων γενικά. Αποτελείται κυρίως από κρυσταλλικό CaCO_3 , το οποίο πληρώνει αρχικά διακλάσεις (συστηματικές και μη) μικρού σχετικά ανοίγματος δημιουργώντας ένα σύστημα φλεβών τύπου λαβυρίνθου. Η προοδευτική και συχνά ταχεία διάβρωση του μητρικού πετρώματος και η μικρότερου βαθμού των φλεβών θα οδηγήσει στη δημιουργία του διακλασίτη. Αυτός δίνει την εντύπωση πολυάριθμων πολυγωνικών κουτιών, οι πλευρές των οποίων προεξέχουν.



Σχήμα 2. Σπηλαιόσκηνη από το νότιο τμήμα του σπηλαίου της Μελισσότρυπας



Σχήμα 3. Σπηλαιοφλύκταινες σε διάκλαση τοιχώματος

Σε περιοχές της Μελισσότρυπας όπου παρατηρείται ροή νερού ή ποσότητες στάσιμου νερού παρατηρούνται κλιμακωτές λίμνες υπερχείλισης, χείλη λιμνών, μαργαριτάρια των σπηλαίων και σπηλαιόσκηνη.

Η σπηλαιόσκηνη αποτελεί ένα ασύνδετο σπηλαιοθέμα που συστατικά του είναι κόκκοι κρυστάλλων διαφόρων ορυκτών με μέγεθος από 10 έως 50μm.

Το πιο κοινό αίτιο δημιουργίας της είναι η αφυδάτωση ένυδρων ενώσεων ορυκτών (Hill & Forti, 1997) και η απώλεια κρυσταλλικού νερού. Επίσης η παρουσία ενός ισχυρού οξέος είναι δυνατό να δημιουργήσει σπηλαιόσκονη, όπως του H_2SO_4 με απόθεση $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Στο σπήλαιο Μελισσότρυπα η σπηλαιόσκονη εμφανίζεται σε διάφορα μέρη και αποτελείται από $CaCO_3$ και $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Οι σπηλαιοφλύκταινες (*Cave Blisters*) αποτελούν ημισφαιρικές ασβεστιτικές αποθέσεις συνήθως πληρωμένες με αργιλικό ή αμμώδες υλικό. Αποτελούν εξογκώματα του πετρώματος και συνήθως εφάπτονται σε ασβεστιτική κρούστα. Η σύστασή τους είναι συνήθως ασβεστιτική, αποτελούμενη από μικροκρυσταλλικό ασβεσίτη. Στη Μελισσότρυπα συναντώνται σε μεγάλα μεγέθη κυρίως στο ανατολικό και νοτιοανατολικό της τμήμα. Τα εξογκώματα είναι λευκού χρώματος, ασβεστιτικά με προσμίξεις γύψου και σχηματίζονται σε σειρά ανάλογα με τη διεύθυνση της διάκλασης. Το εσωτερικό της φούσκας είναι κενό και έχει διάμετρο μέχρι και 6cm. Κατά την ανάπτυξή όμως το εσωτερικό κενό πληρώνεται με κρυσταλλικό ασβεσίτη. Πληρωμένες σπηλαιοφλύκταινες συναντώνται στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα του σπηλαίου, στα λαβυρινθώδη τμήματα.

3.4 Σπηλαιογένεση

Η δημιουργία της υπόγειας καρστικής μορφής της Μελισσότρυπας οφείλεται κυρίως στη δράση υπογενών διαλυμάτων (Βαξεβανόπουλος, 2006). Η ανάπτυξη του σπηλαίου ακολούθησε τις επικρατούσες τεκτονικές ασυνέχειες. Συστήματα διακλάσεων, μεταπτωτικά ρήγματα, καθώς και ρήγματα αποκόλλησης (*detachment* σε παλιές γραμμές επώθησης) διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του υπόγειου καρστικού συστήματος. Τόσο η οριζόντια όσο και η κατά βάθος επέκταση του υπογείου συστήματος οδηγήθηκε από τις τεκτονικές ασυνέχειες. Η αρχική τεκτονική επίδραση οφείλεται στα ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, ενώ ρήγματα ΒΒΑ-ΝΝΔ και Α-Δ διεύθυνσης δείχνουν να ανήκουν σε νεώτερο τεκτονικό καθεστώς.

Δευτερευόντως η στρώση του πετρώματος επηρέασε αυτή τη διαμόρφωση και ιδιαίτερα την οροφή και το δάπεδο του σπηλαίου. Αυτό οφείλεται στις μικρές κλίσεις που έχει στην ευρύτερη περιοχή του σπηλαίου που δεν ξεπερνούν τις 30°. Ουσιαστικά πρόκειται για τη σχιστότητα S_1 , που στα μάρμαρα της συνεχούς ανθρακικής σειράς της Κρανιάς ακολουθεί τη προϋπάρχουσα στρώση του πρωτόλιθου ασβεστολίθου. Οι μικρές κλίσεις της σχιστότητας των μαρμάρων και η πυκνότητα των τεκτονικών ασυνεχειών οδήγησε τη σπηλαιογένεση στη φρεατία ζώνη σε ένα επίπεδο (White, 2003).



Σχήμα 4. Στροβιλοειδείς θόλοι στην οροφή του σπηλαίου.



Σχήμα 5. Στροβιλοειδείς θόλοι και γλυφές στον κεντρικό αγωγό του σπηλαίου.

Οι θόλοι στην οροφή των αγωγών δημιουργούνται κυρίως από το στροβιλισμό των υπογενών διαλυμάτων στη φρεάτια ζώνη ή από τη συμπύκνωση υδρατμών που περιέχουν H_2S στη ζώνη κατείδυσης (Σχήμα 4). Ακολουθούν τις κύριες τεκτονικές ασυνέχειες του καρστικού αγωγού όπως και οι στροβιλοειδείς γλυφές (*scallops*) στα τοιχώματα του σπηλαίου (Σχήμα 5). Η έλλειψη σαφούς προσανατολισμού των γλυφών και ο μεγάλος αριθμός θόλων σε περιοχές λιμνών του σπηλαίου με ποσότητες H_2S καταδεικνύει την έντονη δράση των υπογενών διαλυμάτων.

Η σπηλαιογένεση της Μελισσότρυπας αρχίζει όταν διαλύματα ανερχόμενα από το βάθος των πετρωμάτων εμπλουτίζουν τον υδροφόρο με H_2S . Η διαλυτική δράση του H_2CO_3 από διαλύματα της επιφάνειας σε συνδυασμό με τη δράση του H_2SO_4 διαλύουν με μεγαλύτερο ρυθμό το $CaCO_3$ στις επιφάνειες των ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες αυτές είναι κυρίως τεκτονικές, αποτελούμενες από ομάδες διακλάσεων που συνδέονται με μεταπτωτικά ρήγματα. Η φάση ηωδιάλυσης έχει λήξει με το πέρασμα στην κύρια φάση διεύρυνσης των καρστικών αγωγών. Δημιουργείται ένας κεντρικός αγωγός, ο οποίος τροφοδοτεί τα επιμέρους τμήματα του καρστ με όξινο διάλυμα. Οι καρστικοί αγωγοί είναι πληρωμένοι με νερό δημιουργώντας μορφές της φρεάτιας ζώνης.

Στα πλευρικά τμήματα του κεντρικού αγωγού δημιουργούνται τμήματα τύπου λαβυρίνθου, χαρακτηριστικά υπογενούς σπηλαίου. Η άνοδος της περιοχής σε συνδυασμό με την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα οδηγεί στην αποκάλυψη των τμημάτων του υπογενούς σπηλαίου. Από τις μορφές διάλυσης φρεατικού σταδίου που παρατηρήθηκαν στο σπήλαιο υπολογίζεται ότι ο υδροφόρος έφθανε μέχρι και 22m πάνω από τη σημερινή στάθμη.

Τα τμήματα του σπηλαίου που αποκαλύφθηκαν δέχονται τη δράση του νερού στη ζώνη κατείδυσης. Οι φρεατικοί αγωγοί πλέον καταστρέφονται δίνοντας τη θέση τους σε μορφές που δημιουργούνται από την κατά βάθος διάβρωση. Παράλληλα, υπογενή τμήματα του σπηλαίου δημιουργούνται κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από διαλύματα με H_2S , όπως έδειξε η ανάλυσή τους.

Ο κεντρικός αγωγός έχει περάσει από τη φρεάτια ζώνη στη ζώνη κατείδυσης. Η εκκένωση νερού που προκαλείται οδηγεί σε καθεστώς καταρρευσιγενούς μορφολογίας (Βαξεβανόπουλος, 2003), αφού τα τοιχώματα και η οροφή χάνουν μέχρι και 35% της αντοχής τους (με βάση την αρχή του Αρχιμήδη). Στο κέντρο του αγωγού δημιουργούνται δόμοι κατάρρευσης από τη συγκέντρωση τεμαχών που καταρρέουν.

Σήμερα μόνο το δυτικό τμήμα του σπηλαίου βρίσκεται σε μάζα μαρμάρων με άμεση επαφή με το επιφανειακό καρστ ενώ το ανατολικό βρίσκεται κάτω από γνευσιοσχιστόλιθους της Πελαγονικής ζώνης (Σχήμα 6).

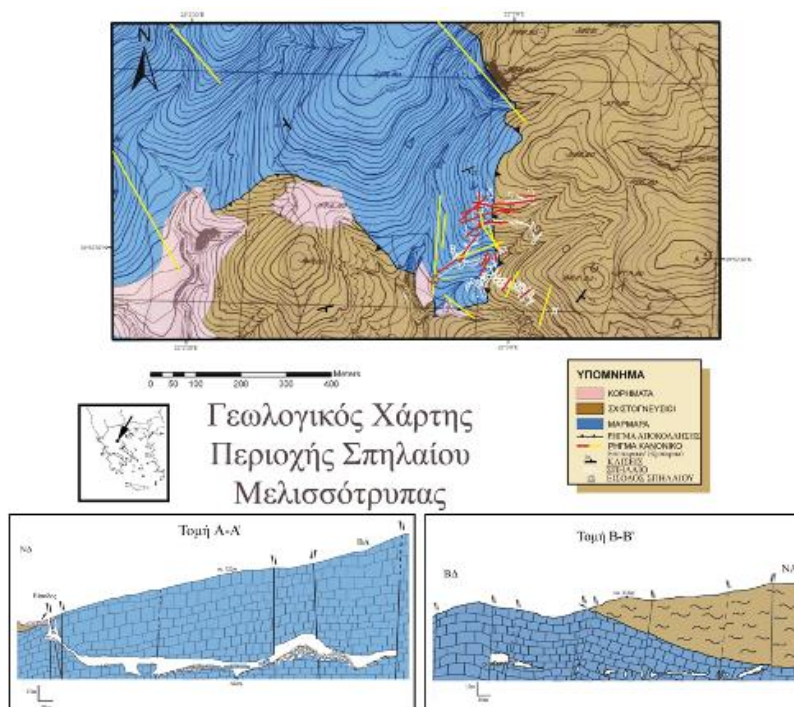
Ειδικά η νοτιοανατολική περιοχή του σπηλαίου όπου παρατηρείται η μέγιστη συγκέντρωση σπηλαιοθεμάτων τροφοδοτείται με νερό από υπερκείμενο χειμάρρο. Τα ανάντι του χειμάρρου βρίσκονται σε περιοχές βορειοανατολικά της εισόδου του σπηλαίου σε γνευσιοσχιστόλιθους. Στο σημείο της επαφής γνευσιοσχιστόλιθων-μαρμάρων το νερό του χειμάρρου κατειδύει εξ ολοκλήρου στο υπόγειο καρστ. Ακριβώς στο σημείο αυτό, υπόγεια, παρατηρείται έντονη σταγονοροή και κατά περιοχές έντονη κατακόρυφη ροή.

4.Σύνοψη

Τα καρστικά υπογενή σπήλαια αποτελούν σημαντικό εργαλείο στη μελέτη της συμπεριφοράς των υπογείων νερών και της γένεσης υπογείων καρστικών μορφών. Παρά το γεγονός ότι πολύ λίγα υπογενή σπήλαια έχουν μελετηθεί παγκοσμίως, η σημασία τους στη σπηλαιολογία, στην κοιτασματολογία, στην υδρογεωλογία και στη βιολογία είναι αναμφισβήτητη.

Η Μελισσότρυπα Κεφαλοβρύσου αποτελεί καρστικό υπογενές σπήλαιο, το οποίο έχει

περάσει στη σπηλαιογενετική φάση στη ζώνη κατεΐσδυσης. Η υπογενής προέλευσή του αποδεικνύεται τόσο από τις εναπομένουσες μορφές διάλυσης και ανάπτυξης του σπηλαίου, τα σπηλαιοθέματα γύψου, όσο και από τον εντοπισμό συγκέντρωσης H₂S στις λίμνες του σπηλαίου (Βαξεβανόπουλος, 2006).



Σχήμα 6. Γεωλογικός χάρτης και τομές από την περιοχή του σπηλαίου. (Βαξεβανόπουλος 2006)

Τα σπηλαιοθέματα γύψου δημιουργούνται στο πέρασμα του τμήματος του σπηλαίου στη ζώνη κατεΐσδυσης. Οι διαδικασίες όμως της κατά βάθος διάβρωσης πλέον σβήνουν τα σημάδια της υπογενούς προέλευσης του σπηλαίου.

Η ανάπτυξη του σπηλαίου και η πρώτη περίοδος ηωγένεσης των καρστικών αγωγών σχετίζεται με τη δημιουργία μιας ρηξιγενούς ζώνης ενός κανονικού ρήγματος ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης. Ο κύριος αγωγός του σπηλαίου σχηματίστηκε παράλληλα σε αυτή τη ζώνη ενώ αναπτύχθηκαν αγωγοί παράλληλα σε αυτόν. Η δημιουργία αυτής της υπόγειας μορφής οφείλεται στη δράση υπογενών διαλυμάτων τα οποία έχουν αφήσει τα σημάδια τους στις οροφές και στα τοιχώματα των αγωγών (στροβιλοειδείς θόλοι, γλυφές). Στα πλευρικά τμήματα του κυρίου αγωγού και σε χαμηλότερα υψόμετρα δημιουργούνται φρεατικοί λαβυρινθώδεις αγωγοί, που ακολουθούν το κύριο δίκτυο διακλάσεων.

Επίσης δημιουργείται μια δεύτερη ομάδα αγωγών με μικρότερες διαστάσεις με διευθύνσεις Α-Δ και ΒΒΑ-ΝΝΔ (βόρειο τμήμα του σπηλαίου).

5. Συμπεράσματα

Το σπήλαιο Μελισσότρυπα αποτελεί απόδειξη για την δημιουργία υπογείων καρστικών μορφών σε ανθρακικό πέτρωμα υποκείμενο πετρώματος μη επιδεκτικού σε καρστικοποίηση από τη δράση υπογενών διαλυμάτων.

Η σπηλαιογένεση σήμερα συνεχίζεται πιθανά στη φρεάτια ζώνη, κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της δράσης των υπογενών διαλυμάτων. Πάνω από αυτήν την επιφάνεια δρουν οι διαδικασίες της ζώνης κατεισδυσης.

Περαιτέρω έρευνα στην περιοχή του Κεφαλοβρύσου Ελασσόνας ίσως οδηγήσει στην ανακάλυψη νέων ανεξερεύνητων υπογενών σπηλαίων. Γενικότερα, η ενδεδειγμένη έρευνα της γένεσης των ελληνικών υπόγειων καρστικών μορφών είναι πιθανό να καταδείξει έναν πιο πρωταγωνιστικό ρόλο της δράσης των υπογενών διαλυμάτων.

Βιβλιογραφία

Βαξεβανόπουλος, Μ., 2003: Καταρρευσιγενής Μορφολογία και γένεση του Σπηλαίου των Νυχτερίδων στα Πετράλωνα Χαλκιδικής, 3ο Συμπόσιο Αρχαιολογίας, Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας Σπηλαίων, 17-19 Νοεμβρίου, Αθήνα.

Βαξεβανόπουλος, Μ., 2006: Τεκτονικές συνθήκες σπηλαιογένεσης στο σπήλαιο Μελισσότρυπα Κεφαλοβρύσου Ελασσόνας. Μετ. Διατριβή Ειδικ., τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη, σ.105.

Ι.Γ.Μ.Ε., 1982: Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδος, 1:50000, φύλλο Ελασσών, Αθήνα.

Μανάκος, Α., 1999: Υδρογεωλογική συμπεριφορά και στοχαστική προσομοίωση του καρστικού υδροφόρου συστήματος Κρανιάς Ελασσόνας. Διδακτ. Διατριβή, τμ. Γεωλογίας Α.Π.Θ. Θεσσαλονίκη, σ. 214.

Forti, P., 1996: Thermal karst systems. *Acta Carsologica* XXV, 99-117.

Forti, P., Galdenzi, S., Sarbu, S., M., 2002: The hypogenic caves: a powerful tool for the study of seeps and their environmental effects, *Continental Shelf Research* 22 (2002) 2373-2386.

Hill, C. & Forti, P., 1997: Cave minerals of the world, 2nd ed., National speleological Society, Inc., Huntsville, Alabama, U.S.A.

Palmer, N. A., C. Hill, 2005: Sulfuric acid caves. In: Culver, D., C. & White, W., B.: *Encyclopedia of caves*, Elsevier Academic Press, Burlington, U.S.A. 573-581.

Palmer, N., A., 2000: Hydrogeologic control of cave patterns. In: Klimchouk, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., Eds *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama, 77-90pp.

Sfeikos, A., 1992: Geology, analysis of deformation and kinematics of the Pelagonian nappe system, Kamvounia mountains (North Thessaly, Greece). *Tübingen Geowissenschaftliche Arbeiten*, A12, 110s, 59Abb., 22 Bilder, Tübingen.

White, B., W., 2003: Conceptual models for karstic aquifers, *Speleogenesis and evolution of Karst Aquifers*, *Virtual Scientific Journal*, www.speleogenesis.info, p.2.