

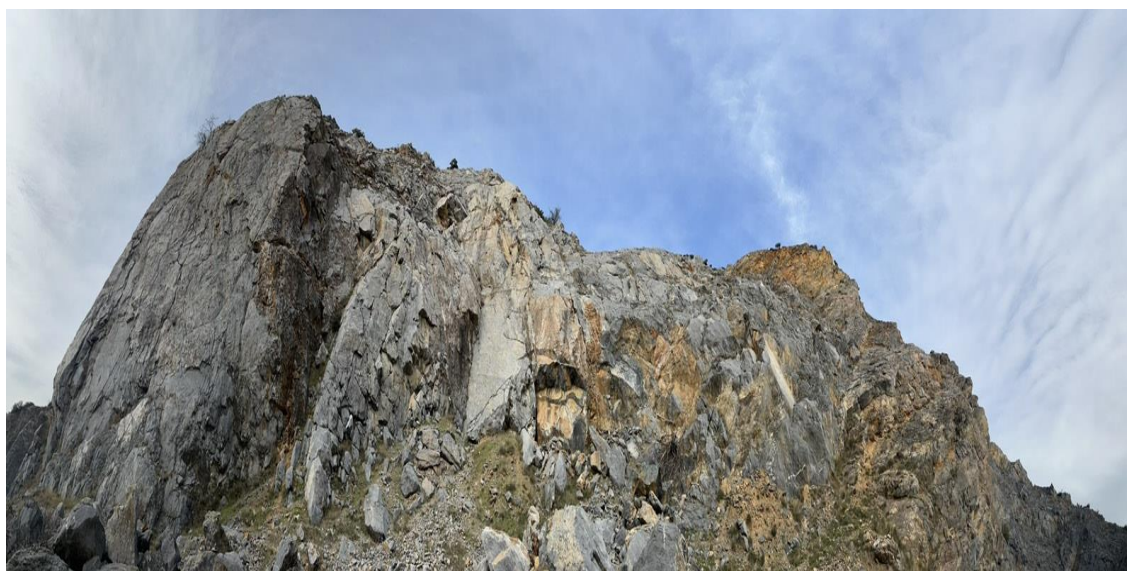


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ
ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΣΟΦΙΑ ΝΤΑΣΙΩΤΗ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ ΣΤΟ
ΛΑΤΟΜΕΙΟ ΠΑΛΑΙΟΚΑΣΤΡΟΥ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ)»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2023





ΣΟΦΙΑ ΝΤΑΣΙΩΤΗ

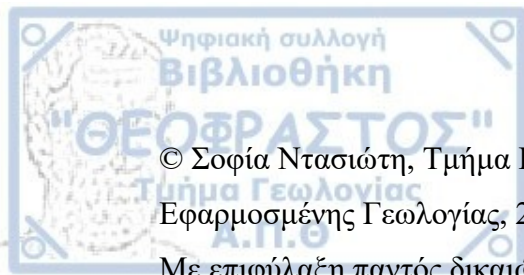
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5912

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ ΣΤΟ ΛΑΤΟΜΕΙΟ
ΠΑΛΑΙΟΚΑΣΤΡΟΥ (ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ)»

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

Επιβλέπων Καθηγητής

ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



© Σοφία Ντασιώτη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ ΣΤΟ ΛΑΤΟΜΕΙΟ

ΠΑΛΑΙΟΚΑΣΤΡΟΥ – *Διπλωματική Εργασία*

©Sofia Ntasioti, School of Geology, Dept. of Structural, Historical and Applied Geology, 2023

All rights reserved.

STUDY AND DOCUMENTATION OF THE CAVES IN PALEOKASTRO

QUARRY (THESSALONIKI, 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 ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην περιοχή του Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας κ. Γεώργιου Λαζαρίδη, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για το ενδιαφέρον θέμα που μου πρότεινε και την καθοδήγησή του. Η συμβολή του ήταν καθοριστική τόσο κατά τη διάρκεια της χαρτογράφησης της περιοχής όπου βρέθηκε το σπήλαιο, όσο και για την συγγραφή της εργασίας. Συγκεκριμένα, βοήθησε να προσκομίσω πληροφορίες για το σπήλαιο, οι οποίες ελήφθησαν με την επίσκεψη στη περιοχή και την παρατήρηση, καθώς και καθοδήγηση για τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την κ. Δέσποινα Δώρα, η οποία βοήθησε στην εκπόνηση της εργασίας κατά τη διάρκεια της επίσκεψης στο σπήλαιο, στην απόκτηση φωτογραφικού υλικού και στη σάρωση των μορφολογικών χαρακτηριστικών του σπηλαίου. Ήταν χαρά μου να εργαστώ με τόσο αξιόλογους συνεργάτες και τους ευχαριστώ για τον χρόνο τους και τη βοήθεια συλλογής πολύτιμων γνώσεων.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς, τις αδελφές και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την κατανόησή τους κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και γενικότερα κατά τα χρόνια των σπουδών μου.



Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
Πρόλογος – Αντικείμενο της εργασίας.....	3
1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Μορφολογία σπηλαίων και παράγοντες που επιδρούν.....	5
1.2 Τρόπος δημιουργίας	7
1.3 Αποθέσεις	10
2. Γεωγραφική τοποθέτηση – Μορφολογικά στοιχεία	12
3. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής – Γεωλογική χαρτογράφηση	16
3.1 Λιθοστρωματογραφία	16
3.2 Γεωτεκτονική θέση του Παλαιοκάστρου και τεκτονική ανάλυση των σχηματισμών	18
4. Γενικά για το σπήλαιο στο λατομείο του Παλαιοκάστρου.....	22
5. Μορφολογία των σπηλαιοθεμάτων.....	23
6. Μεθοδολογία	24
6.1 Αποτύπωση και τεκμηρίωση των δομών του σπηλαίου	24
6.2 Διακλάσεις και τεκτονικές ασυνέχειες.....	25
7 . Αποτελέσματα	33
7.1 Λιθολογία	33
7.2 Τεκτονική	35
7.3 Μορφές διάλυσης και μορφές απόθεσης	36
7.4 Τρισδιάστατη σάρωση	37
8. Συζήτηση και συμπεράσματα.....	39
9. Βιβλιογραφία.....	41



Εικόνα 1: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής του Παλαιοκάστρου. (Χρήση του προγράμματος Sentinel Hub Eo Browser, Sentinel – 2 L2A, 24-12-2021)	12
Εικόνα 2: Χάρτης Παλαιοκάστρου. (από Ε.Μ.Α.Σ. Φύλιππος Παλαιοκάστρου, 2015)	13
Εικόνα 3: Χάρτης Ωραιοκάστρου – Παλαιοκάστρου. (Επεξεργασία και κατασκευή στο πρόγραμμα GIS)	14
Εικόνα 4: Λατομείο Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης.....	15
Εικόνα 5: Λιθοστρωματογραφική τομή της Ενότητας Ωραιοκάστρου σχεδιασμένη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.	19
Εικόνα 6: Τεκτονοστρωματογραφική στήλη Ενότητας Ωραιοκάστρου σχεδιασμένη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.	20
Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης Ωραιοκάστρου (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), Υπόμνημα (Μάρκος Τρανός, 2011)	21
Εικόνα 8: Σχέση κύριων αξόνων τάσης και ρωγμών. Ε: Εφελκυστική διάκλαση. Οι κύριες τάσεις είναι $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. (Βαξεβανόπουλος, 2006)	25
Εικόνα 9: Κατοπτρική Γεωλογική πυξίδα κατά CLAR (Kalantari B. & Jamali H., 2015).....	26
Εικόνα 10: Δίκτυο Schimdt για διεύθυνση σπηλαίου (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	30
Εικόνα 11: Δίκτυο Schimdt για ασυνέχειες με διάλυση προς το έγκοιλο (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	30
Εικόνα 12: Δίκτυο Schimdt για στρώσεις (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	31
Εικόνα 13: Δίκτυο Schimdt για διακλάσεις ανατολικά του σπηλαίου (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	31
Εικόνα 14: Δίκτυο Schimdt διακλάσεις για 2° ρήγμα (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	32
Εικόνα 15: Δίκτυο Schimdt διακλάσεις για 3° ρήγμα (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)	32
Εικόνα 16: Ασβεστίτης.....	34
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη απεικόνιση του εσωτερικού του σπηλαίου στο λατομείο Παλαιοκάστρου.....	38



Πίνακας 1: Διεύθυνση σπηλαίου στο λατομείο Παλαιοκάστρου	27
Πίνακας 2: Μετρήσεις ασυνεχειών	27
Πίνακας 3: Μετρήσεις στρώσεων	27
Πίνακας 4: Μετρήσεις διακλάσεων 1 ^{ου} ρήγματος.....	27
Πίνακας 5: Μετρήσεις διακλάσεων 2 ^{ου} ρήγματος.....	28
Πίνακας 6: Μετρήσεις διακλάσεων 3 ^{ου} ρήγματος.....	28



Περίληψη

Στην Ελλάδα τα καρστικά φαινόμενα, και ιδιαίτερα τα σπήλαια, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της φυσικής ομορφιάς της γης. Έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες βασισμένες στην μελέτη της καρστικής εξέλιξης, οι οποίες βοήθησαν στην κατανόηση, την τεκμηρίωση και την αξιοποίηση των σπηλαίων. Συγκεκριμένα, η εργασία αφορά την τεκμηρίωση του σπηλαίου στο λατομείο του Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης. Με βάση την καρστική εξέλιξη αναπτύχθηκε μια θεωρία αναφορικά με τον τρόπο δημιουργίας αυτής της καρστικής κοιλότητας και τους παράγοντες που συνέβαλλαν στη σπηλαιογένεση. Κατά τον σχηματισμό του σπηλαίου λαμβάνουν χώρα διεργασίες όπως η διάλυση και η διάβρωση των διαπερατών πετρωμάτων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών χώρων. Χημικά ιζήματα που συσσωρεύονται με τη πάροδο του χρόνου και διαμορφώνουν συμπαγείς δομές ονομάζονται σπηλαιοθέματα, τα οποία περιλαμβάνονται στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός σπηλαίου. Η ανάπτυξη αυτών των σπηλαιοθεμάτων αναλύεται και γίνεται η αποτύπωσή τους εφαρμόζοντας τρισδιάστατη σάρωση, η οποία τεκμηριώνει τις μορφές απόθεσης που βρίσκονται στο καρστικό έγκοιλο. Επίσης, αναλύονται η λιθοστρωματογραφική και η τεκτονική εξέλιξη της περιοχής, οι οποίες αποτελούν επιπλέον στοιχεία για τον προσδιορισμό του τρόπου ανάπτυξης του σπηλαίου και τις τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν. Συνοψίζοντας, στην εργασία αυτή πραγματοποιείται η αποτύπωση και η τεκμηρίωση των μορφολογικών δομών, των συνθηκών και του τρόπου ανάπτυξης του σπηλαίου Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης.



Abstract

In Greece, karst phenomena, and especially caves, are an integral part of the Earth's natural beauty. Many researches have been conducted based on the study of karst evolution, which have helped to understand, document and exploit caves. In particular, this project concerns the documentation of the cave in the Paleokastro's quarry, in Thessaloniki. Based on the karst evolution, a theory was developed regarding the way this karst cavity created and the factors that contributed to the cave. During the formation of the cave, processes such as dissolution and erosion of permeable rocks take place, resulting in the creation of empty spaces. Chemical sediments that accumulate over time and form solid structures are called speleothems, which are included in the characteristic features of a cave. The development of these cave deposits is analysed and mapped using 3D scanning, which documents the depositional forms found in the karst cavity. Furthermore, the lithostratigraphic and tectonic evolution of the area are analysed, which are additional facts in determining the way that the cave developed and the prevailing tectonic conditions. To sum up, in this project are carried out the recording and documentation of the morphological structures, the tectonic conditions and the way of development of the Paleokastro's cave, in Thessaloniki.

Πρόλογος – Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη του σπηλαίου που βρίσκεται στο λατομείο του Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης και η αποτύπωση και τεκμηρίωση των μορφολογικών δομών που το απαρτίζουν. Το σπήλαιο αυτό εντοπίστηκε πρόσφατα και η μελέτη αυτή παρέχει βασικές πληροφορίες τόσο για την ευρύτερη περιοχή του Παλαιοκάστρου όσο και για τις διεργασίες και τα μορφολογικά γνωρίσματα του σπηλαίου. Η τεκμηρίωσή του πραγματοποιήθηκε με επίσκεψη στην ύπαιθρο, διερεύνηση της περιοχής, μελέτη των τεκτονικών συνθηκών και σάρωση του καρστικού εγκοίλου αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας του.

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στην μορφολογία των καρστικών εγκοίλων, στον τρόπο εξέλιξής τους, στους παράγοντες που επηρεάζουν τη σπηλαιογένεση, καθώς και στην εξέλιξη της διεργασίας σχηματισμού των σπηλαιοθεμάτων που βρίσκονται στα σπήλαια. Στη συνέχεια, θα προσδιοριστεί η γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης, δηλαδή του Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης, και θα γίνει η περιγραφή της λιθοστρωματογραφίας και της γεωτεκτονικής ανάλυσης της ευρύτερης περιοχής του χωριού. Έπειτα, θα ακολουθήσει η αναλυτική μεθοδολογία για τις διαδικασίες που προκάλεσαν τον σχηματισμό του συγκεκριμένου σπηλαίου και τη μορφολογία του, καθώς και τη μορφολογία των σπηλαιοθεμάτων που προέκυψαν. Επίσης, θα αναλυθούν ο τρόπος αποτύπωσης των μορφολογικών χαρακτηριστικών της καρστικής κοιλότητας και θα εξετασθούν οι τεκτονικές ασυνέχειες της περιοχής σύμφωνα με τις μετρήσεις που λήφθηκαν στην ύπαιθρο. Στη πορεία, θα γίνει η περιγραφή της λιθολογίας και της τεκτονικής στη συγκεκριμένη περιοχή του λατομείου, θα εξετασθούν οι μορφές διάλυσης που οφείλονται στην καρστική εξέλιξη και θα επεξηγηθεί η τρισδιάστατη σάρωση που πραγματοποιήθηκε. Τέλος, θα γίνει συζήτηση και έκθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την διεκπεραίωση της έρευνας και θα παρουσιαστεί η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Το αντικείμενο της εργασίας χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, καθώς τα σπήλαια αποτελούν μοναδικά περιβάλλοντα με ιδιάζοντα χαρακτηριστικά και επιστημονικό ενδιαφέρον. Γενικότερα, η Ελλάδα είναι μια χώρα πλούσια σε καρστικά συστήματα και τα



περισσότερα σπήλαια που έχουν βρεθεί αποτελούν χώρους προσέλκυσης ανθρώπων για την εξερεύνησή τους. Όσον αφορά το επιστημονικό μέρος, η μελέτη ενός σπηλαίου παρέχει πληροφορίες τόσο για τη βιολογική προσέγγιση του οικοσυστήματος όσο και για τη γεωλογία του. Σχετικά με τη γεωλογία, τα καρστικά συστήματα προσδίδουν χρήσιμες πληροφορίες για το υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής, τη λιθολογία και τις τεκτονικές διεργασίες. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να διεξάγονται έρευνες στην ύπαιθρο, ώστε να προσδιορίζεται η γεωλογική «ταυτότητα» των σπηλαίων.

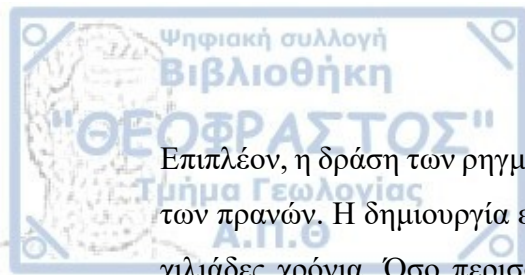
1. Εισαγωγή

1.1 Μορφολογία σπηλαίων και παράγοντες που επιδρούν

Σύμφωνα με τον γεωλογικό όρο, σπήλαιο χαρακτηρίζεται *«κάθε φυσική κοιλότητα στο εσωτερικό της οποίας επιτρέπεται η προσέλευση του ανθρώπου»* (Bogli, 1978, όπως αναφέρεται στον Lazaridis, 2022). Με βάση τον ορισμό, οι διάφορες μετρήσεις του φυσικού εγκοίλου γίνονται από τον άνθρωπο και οι περισσότερες πληροφορίες προέρχονται από προσβάσιμα μέρη του σπηλαίου (Ford and Williams, 2007). Ωστόσο, η υποκειμενικότητα της χρήσης του ανθρώπινου μεγέθους εκφράζεται με έναν άλλον ορισμό, σύμφωνα με τον οποίο, σπήλαιο ονομάζεται *«ένα φυσικό άνοιγμα στη γη που είναι αρκετά μεγάλο για να δεχθεί έναν άνθρωπο»* (White, 1988, όπως αναφέρεται στον Lazaridis, 2022). Οι διαστάσεις του μπορεί να κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως χιλιόμετρα και μπορεί να είναι είτε κατακόρυφο είτε οριζόντιο. Επιπλέον, οι Ford and Williams (2007) εισήγαγαν έναν ορισμό για ομάδες σπηλαίων που βασίζονται στις διαδικασίες εξέλιξής τους, όπως τα καρστικά σπήλαια. Σύμφωνα με αυτόν, σπήλαιο χαρακτηρίζεται *«ένα άνοιγμα που διευρύνεται με διάλυση σε μέγεθος που μπορούν να εφαρμοστούν κινητικοί ρυθμοί διάσπασης λόγω της υδροδυναμικής»*.

Τα σπήλαια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προέλευσή τους και τη λιθολογία του πετρώματος ξενιστή ή τον τύπο του ιζήματος που περιέχουν (Ford and Williams, 1989, όπως αναφέρεται στους Antonellou, Tsikouras, Papoulis και Hatzipanagiotou, 2010). Γενικότερα, ο πιο κοινός τύπος σπηλαίου είναι το σπήλαιο διάλυσης του ασβεστόλιθου, δηλαδή το καρστικό. Στην Ελλάδα το μεγαλύτερο ποσοστό σπηλαίων αναπτύσσεται σε καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα, όπως για παράδειγμα ο ασβεστόλιθος, η γύψος και ο δολομίτης.

Η μορφολογία και η γεωμετρία του καρστικού εγκοίλου επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η λιθολογία, ο χρόνος, το κλίμα, το ανάγλυφο, ο βαθμός και το είδος διακλάσεων και η υδρολογική ζώνη όπου αναπτύχθηκε το σπήλαιο. Σχετικά με τη λιθολογία, ο σχηματισμός ενός σπηλαίου μπορεί να επηρεαστεί από τον τύπο και τη δομή του πετρώματος, δηλαδή ανάλογα αν πρόκειται για ασβεστόλιθο, δολομίτη ή γύψο. Οι είσοδοι των σπηλαίων διανοίγονται εξαιτίας της κατάρρευσης της οροφής από διάβρωση των πετρωμάτων ή εξαιτίας της διάλυσης, ως είσοδοι ή έξοδοι νερού.



Επιπλέον, η δράση των ρηγμάτων ευνοεί τον σχηματισμό των εισόδων με τη διάβρωση των πρανών. Η δημιουργία ενός σπηλαίου είναι μια αργή διαδικασία, η οποία διαρκεί χιλιάδες χρόνια. Όσο περισσότερος χρόνος περνάει, τόσο πιο πολύ νερό μπορεί να διαλύσει το πέτρωμα και να σχηματίσει πολύπλοκες δομές. Αναφορικά με το κλίμα, το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό εγκοίλου και το ποσοστό κατακρήμνισης και κορεσμού στο έδαφος μπορούν να έχουν αντίκτυπο. Συγκεκριμένα, υψηλό ποσοστό βροχόπτωσης και υγρό κλίμα αυξάνουν την πιθανότητα ότι το νερό θα κινηθεί μέσα στο υπέδαφος, διαλύοντας το πέτρωμα και δημιουργώντας μεγαλύτερες κοιλότητες. Επίσης, το ανάγλυφο και η τοπογραφία επηρεάζουν σημαντικά τη διαμόρφωση ενός εγκοίλου (Μυρμηγιάννης, 2005).

1.2 Τρόπος δημιουργίας

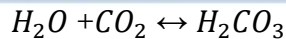
Σπηλαιογένεση χαρακτηρίζεται το σύνολο των φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων που προκαλούν τον σχηματισμό του πρώτου μικρού εγκοίλου μέσα σε ένα πέτρωμα, το οποίο εξελίσσεται σταδιακά σε σπήλαιο (Γιαννόπουλος, 2000). Με άλλα λόγια, ο όρος αυτός περιγράφει την γένεση και την εξέλιξη του καρστικού φαινομένου, δηλαδή τη διάβρωση των ανθρακικών πετρωμάτων (Τρίμης, 2013).

Καρστική εξέλιξη ονομάζεται η διαδικασία ανάπτυξης καρστικών τοπίων, τα οποία διαμορφώνονται από τη διάλυση διαπερατών πετρωμάτων, όπως ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης και η γύψος. Η διαδικασία αυτή είναι μακροπρόθεσμη και μπορεί να διαρκέσει χιλιάδες χρόνια. Βασικός παράγοντας για την διαμόρφωσή των σπηλαίων είναι το νερό, καθώς η φυσική υγρασία του πετρώματος ελέγχει σημαντικά τις διεργασίες της μηχανικής του αποσάθρωσης και την αντοχή του. Συγκεκριμένα, εξαιτίας του νερού διαταράσσεται η συνοχή και οι μηχανικές ιδιότητες του χωρίς, ωστόσο, τη μεταβολή της χημικής σύστασης. Επομένως, η μεγάλη διαπερατότητά του παίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό σπηλαίου διάλυσης, καθώς τα υπόγεια νερά κινούνται κατά μήκος των ρωγμών, των διακλάσεων και των ρηγμάτων και διαβρώνουν το περιβάλλον πέτρωμα (Γκολούμποβιτς – Δεληγιάννη Μ., 2019).

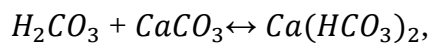
Η διαδικασία ξεκινά με τη διάλυση των πετρωμάτων από το ανθρακικό οξύ, το οποίο σχηματίζεται όταν η βροχή συνδυάζεται με το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το οξύ διαλύει τα πετρώματα δημιουργώντας ρωγμές, οι οποίες διευρύνονται με τη πάροδο του χρόνου από συνεχιζόμενη διάλυση. Καθώς το υπόγειο νερό συνεχίζει να διαλύει το πέτρωμα, δημιουργεί χαρακτηριστικές γεωμορφές όπως οι καταβόθρες και τα σπήλαια. Η διάλυση των πετρωμάτων μπορεί, ακόμη, να δημιουργήσει ασυνήθιστους γεωλογικούς σχηματισμούς, δηλαδή σταλακτίτες σταλαγμίτες και κολώνες. Επίσης, τα καρστικά τοπία μπορούν να επηρεαστούν από διαδικασίες αποσάθρωσης, όπως η διάβρωση, η βαρύτητα και η ροή του επιφανειακού νερού. Αυτές μπορούν να επιφέρουν την κατάρρευση των σπηλαίων και των καταβοθρών, δημιουργώντας λίμνες καταβοθρών και δολίνες (Γκολούμποβιτς – Δεληγιάννη, 2019).

Το νερό αποτελεί ένα ισχυρό διαλυτικό μέσο, καθώς προσλαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), και η ικανότητα αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του και από τον ρυθμό αύξησης του CO_2 . Συνεπώς, όταν το διάλυμα είναι κορεσμένο σε νερό, τότε η

διαλυτική ικανότητα αυξάνεται ακόμη περισσότερο. Αρχικά, το νερό προσλαμβάνει το CO_2 , αντιδρούν, και προκύπτει ανθρακικό οξύ :



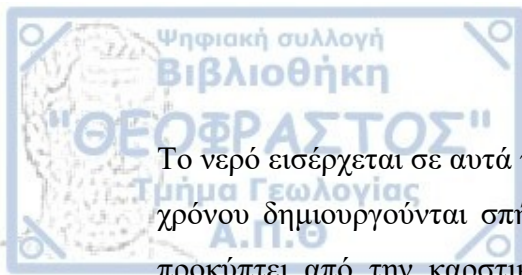
Έπειτα, το νερό που περιέχει πλέον διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τον ασβεστόλιθο, διαλύει τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου και μετατρέπονται σε όξινα ανθρακικά άλατα. Στη συνέχεια, το ανθρακικό οξύ επιδρά στον ασβεστίτη ($CaCO_3$) και παράγεται το δισόξινο ανθρακικό ασβέστιο, κατά την αντίδραση :



το οποίο μεταφέρεται διαλυμένο στο νερό. Κατά την μεταφορά του ελευθερώνει το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, με αποτέλεσμα να προκύψει η απόθεση – καθίζηση του ασβεστίτη. Στη περίπτωση που υπάρχει περίσσεια CO_2 στο νερό η παραπάνω αντίδραση μετατοπίζεται προς τα δεξιά, με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του δισανθρακικού οξέος σε διάλυση. Αντιθέτως, η αντίστροφη πορεία, δηλαδή η διαφυγή του διοξειδίου του άνθρακα από το διάλυμα, οδηγεί στη μετατροπή του $Ca(HCO_3)_2$ σε αδιάλυτο $CaCO_3$ (Βαξεβανόπουλος, 2006).

Η διαμόρφωση ενός καρστικού συστήματος οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως στις υδρολογικές συνθήκες, τη τεκτονική παραμόρφωση, το ανάγλυφο, τη λιθολογία, το κλίμα και την ανθρωπογενή δράση (Ανδρεαδάκης, 2003, όπως αναφέρεται στον Myrmigiannis, 2005).

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες που κυριαρχούν στη περιοχή ελέγχουν το ποσοστό των κατακρημνισμάτων που εισέρχεται στο υπόγειο καρστικό έγκοιλο, καθώς και τον τρόπο κίνησης του υπόγειου ύδατος. Σχετικά με τη λιθολογία, η ορυκτολογική σύσταση του μητρικού πετρώματος συνιστά μια παράμετρο καταλυτικής σημασίας για την διαδικασία ανάπτυξης του σπηλαίου. Πιο αναλυτικά, ο ασβεστόλιθος αποτελεί ανθρακικό πέτρωμα με μεγάλη συγκέντρωση ανθρακικού ασβεστίου και σφοδρότερη επιδεκτικότητα στη διάλυση σε σύγκριση με άλλα ανθρακικά πετρώματα. Αναφορικά με τη τεκτονική δράση, οι ρηξιγενείς ζώνες που αναπτύσσονται παράλληλα με τα ρήγματα συγκροτούν τον βασικότερο παράγοντα διαμόρφωσης ενός σπηλαίου. Η κίνηση του νερού ελέγχεται από τις τεκτονικές ασυνέχειες, οι οποίες απαρτίζονται από τα ρήγματα, τις διακλάσεις και τις ρωγμώσεις των ανθρακικών πετρωμάτων (Βαξεβανόπουλος, 2006).



Το νερό εισέρχεται σε αυτά τα πετρώματα, διευρύνει τις ρωγμές και με τη πάροδο του χρόνου δημιουργούνται σπήλαια μέσα στην ανθρακική μάζα. Ο σχηματισμός τους προκύπτει από την καρστική διάβρωση, κατά την οποία διαλύεται το ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) και διαφεύγει μέσω του νερού. Ωστόσο, ο κορεσμός του νερού σε ανθρακικό ασβέστιο και η αδυναμία να διαλυθεί μεγαλύτερη ποσότητα πετρώματος χρειάζεται διαρκή ανανέωση (Βασιλονικολός, 2013).

Οι σπηλαιογενετικές κατηγορίες ποικίλλουν σύμφωνα με δύο βασικά κριτήρια : τα αίτια της σπηλαιογένεσης και το είδος του πετρώματος μέσα στο οποίο δημιουργήθηκε η κοιλότητα. Σχετικά με το πρώτο κριτήριο, η σπηλαιογένεση μπορεί να προκληθεί εξαιτίας τεκτονικών δράσεων, κατακρημνίσεων και κατολισθήσεων, καθώς και αιολικών φαινομένων. και της ανθρώπινης παρέμβασης, η οποία αποκαλείται «τεχνητή σπηλαιογένεση». Όσο αφορά τις διάφορες διεργασίες σε πολλούς τύπους πετρωμάτων και σε ιζήματα, η σπηλαιογένεση μπορεί να είναι αποτέλεσμα μηχανικής ή χημικής διάβρωσης του νερού μέσα στο πέτρωμα ή να λαμβάνει χώρα σε τραβερτίνη ή σε ηφαιστειακά υλικά (Γιαννόπουλος, 2000).

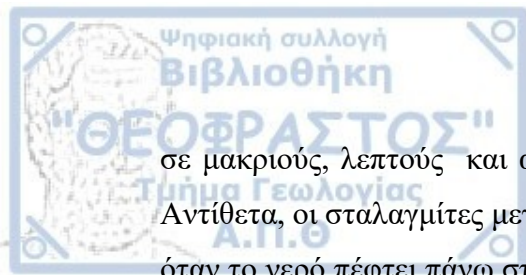
1.3 Αποθέσεις

Η αποθετική διαδικασία των υλικών σε σπήλαια γίνεται είτε βιολογικά είτε γεωλογικά. Πιο διεξοδικά, βιολογικά σχετίζεται με οργανικά υλικά, τα οποία αποτίθενται στα σπήλαια από την πανίδα της περιοχής, ενώ γεωλογικά αφορά ιζήματα που αρχίζουν να αποτίθενται μετά την αρχική του διάνοιξη (Τρίμης, 2013). Η ιζηματογένεση, δηλαδή, είναι η διαδικασία η οποία περιγράφει τις φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που οδήγησαν στη δημιουργία αποθέσεων. Οι κυριότεροι παράγοντες, στους οποίους οφείλεται η ιζηματογένεση, είναι η τωρινή μορφολογία του σπηλαίου και η παλαιομορφολογία, η υδρογεωλογία, οι κλιματολογικές συνθήκες, η γεωγραφία της περιοχής, οι τεκτονικές δράσεις, η στρωματογραφία και η ανθρώπινη παρέμβαση (Γιαννόπουλος, 2000).

Η εξέλιξη της αποθετικής διαδικασίας ενδυναμώνεται με την επιβράδυνση της διαδικασίας της σπηλαιογένεσης (Γιαννόπουλος, 2000). Οι νέες συνθήκες που προκύπτουν από γεωλογικά φαινόμενα θέτουν τα σπήλαια σε μια κατάσταση, όπου παύει σχεδόν η διαπλάτυνσή τους και ξεκινάει η απόθεση, κυρίως, ασβεστίτη.

Γεωλογικά, οι αποθέσεις ενός σπηλαίου αναφέρονται σε ορυκτά, πετρώματα και ιζήματα, τα οποία σχηματίζονται μέσα στο έγκοιλο. Ο σχηματισμός τους αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία που εξαρτάται από σοβαρούς παράγοντες, όπως είναι η σύνθεση του βράχου του σπηλαίου, η ροή του νερού και του ανέμου μέσα στο σπήλαιο και τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι αποθέσεις αυτές μπορούν να έχουν ποικίλους τύπους και σχήματα, δηλαδή σταλακτίτες, σταλαγμίτες, κολώνες, κουρτίνες, ρεόλιθους, ελικτίτες, κοράλλια, μαργαριτάρια και διάφορα άλλα. Η ανάπτυξη αυτών των ασυνήθιστων ορυκτών και κρυστάλλων εξαιρετικού μεγέθους προκύπτει από χημικές αντιδράσεις (Antonelou, Tsikouras, Papoulis and Hatzipanagiotou, 2010).

Οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες αποτελούν τις πιο διαδεδομένες αποθέσεις ενός σπηλαίου και σχηματίζονται από την αργή και σταθερή καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου από την πτώση ή τη ροή του νερού, αντίστοιχα, μέσα στο σπήλαιο. Πιο αναλυτικά, οι σταλακτίτες δημιουργούνται όταν νερό, πλούσιο σε διαλυμένα άλατα, πέφτει από την οροφή του σπηλαίου από μικρές διακλάσεις. Το νερό αυτό παραμένει στην οροφή λόγω μεταβολής συνθηκών και απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα. Με τη πάροδο του χρόνου γίνεται καθίζηση κρυσταλλικού πλέον ανθρακικού ασβεστίου γύρω από τη σταγόνα, με αποτέλεσμα αυτές οι αποθέσεις συσσωρεύονται

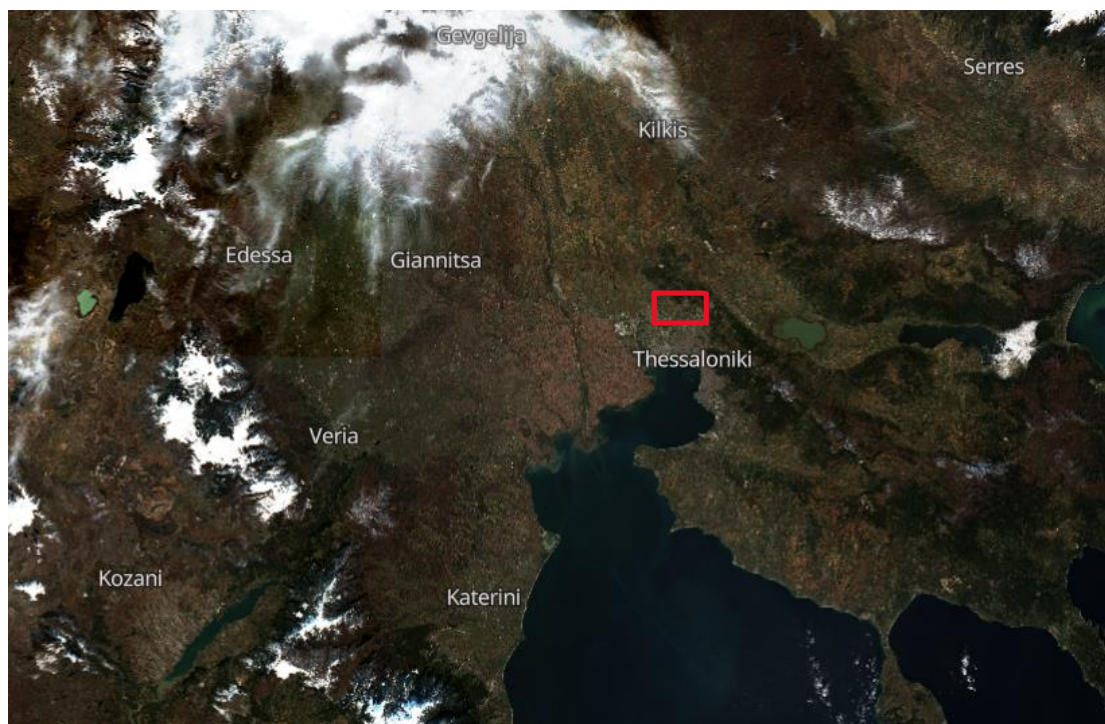


σε μακριούς, λεπτούς και αιχμηρούς σχηματισμούς που κρέμονται από την οροφή. Αντίθετα, οι σταλαγμίτες μεγαλώνουν από το πάτωμα του σπηλαίου. Δημιουργούνται όταν το νερό πέφτει πάνω στο πάτωμα, αφήνει πίσω του μια απόθεση ορυκτών και με το πέρασμα του χρόνου σχηματίζουν κολώνες. Αυτό συμβαίνει όταν οι δύο αποθέσεις, δηλαδή οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες, μπορούν να συναντηθούν και να σχηματίσουν κολώνες (Μυρμηγιάννης, 2005).

2. Γεωγραφική τοποθέτηση – Μορφολογικά στοιχεία

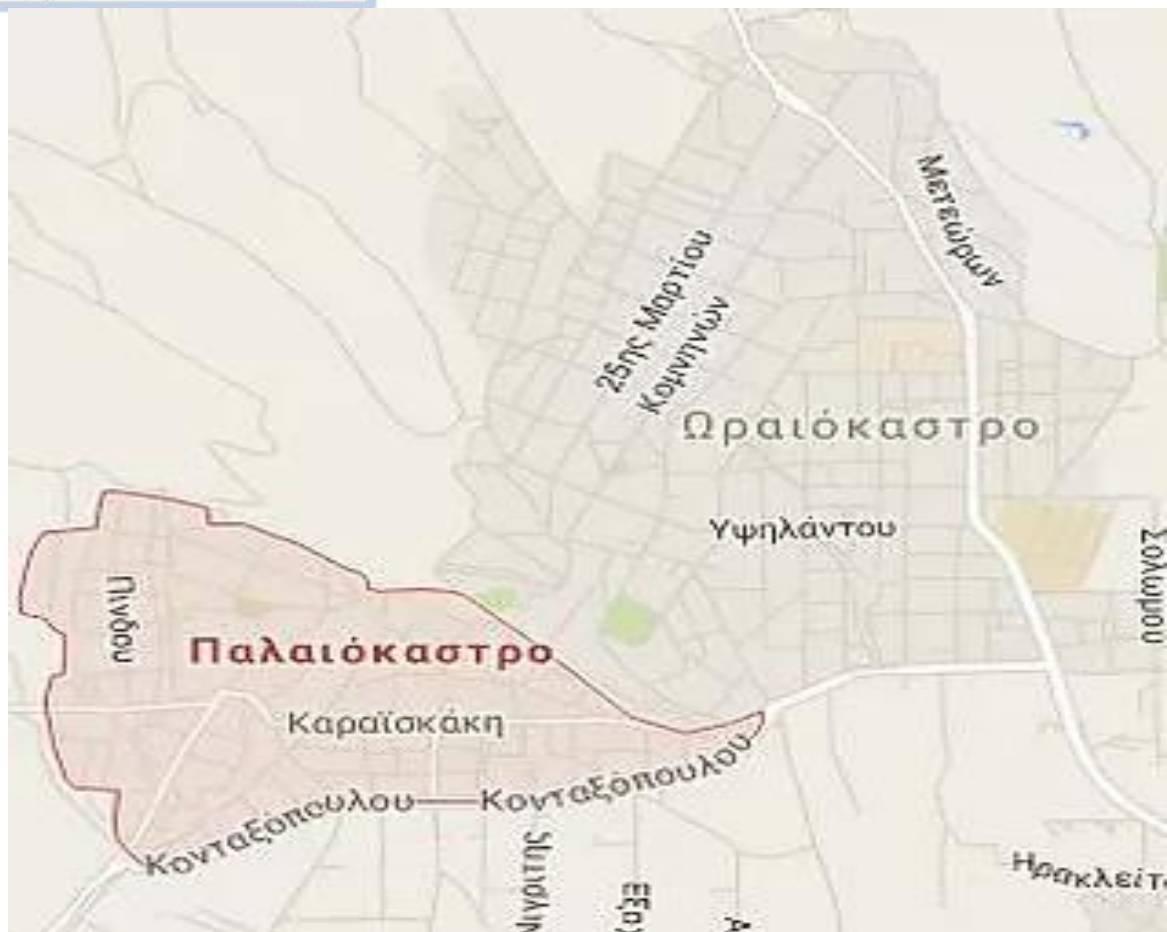
Το Παλαιόκαστρο βρίσκεται Β – ΒΔ της Θεσσαλονίκης στο νότιο τμήμα της περιοχής του Ωραιοκάστρου (Εικόνες 2 και 3). Ανήκει στην Περιφερειακή ενότητα Θεσσαλονίκης και είναι ένας οικισμός κτισμένος στους πρόποδες του βουνού του Ωραιοκάστρου, Σιβρί. Το βουνό Σιβρί, ή αλλιώς Μπάλτζα, έχει χαμηλό υψόμετρο, περίπου 560 μέτρα, και εκτείνεται από τον Χορτιάτη έως την Πικρολίμνη. Η περιοχή μελέτης, δηλαδή το λατομείο, βρίσκεται στους πρόποδες αυτού του βουνού, στη περιοχή Νεοχωρούδα – Πεντάλοφο, και συγκεκριμένα στο ύψος της κορυφής Σταυρός, δηλαδή σε υψόμετρο περίπου 290 μέτρα (Εικόνα 4).

Στην εικόνα 1 αποτυπώνεται δορυφορικά η περιοχή του Παλαιοκάστρου.

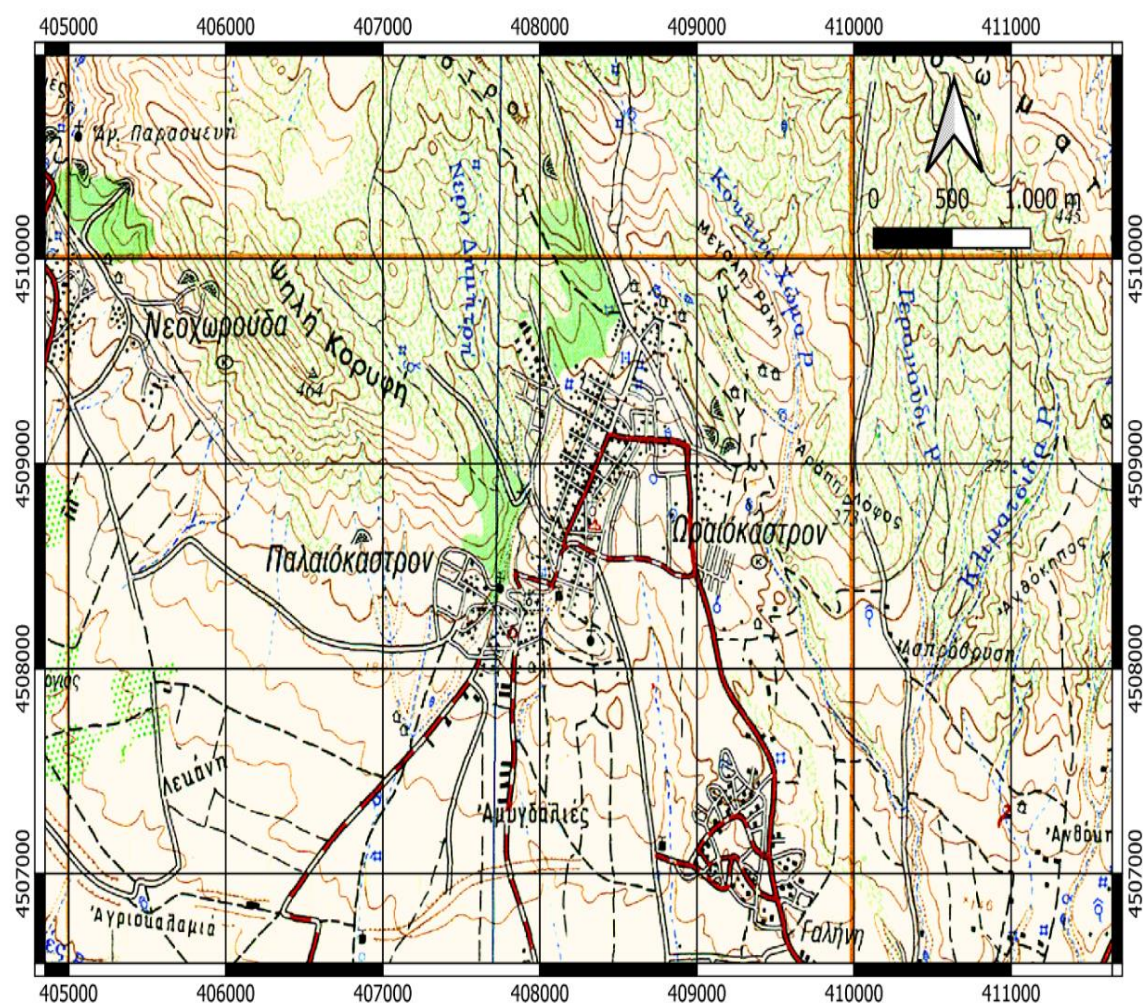


Εικόνα 1: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής του Παλαιοκάστρου. (Χρήση του προγράμματος Sentinel Hub Eo Browser, Sentinel – 2 L2A, 24-12-2021)

Στις εικόνες 2 και 3 παρουσιάζονται οι χάρτες του Ωραιοκάστρου και του Παλαιοκάστρου.



Εικόνα 2: Χάρτης Παλαιοκάστρου. (από Ε.Μ.Α.Σ. Φίλιππος Παλαιοκάστρου, 2015)



Εικόνα 3: Χάρτης Ωραιοκάστρου – Παλαιοκάστρου. (Επεξεργασία και κατασκευή στο πρόγραμμα GIS)

Στην εικόνα 4 ακολουθεί η απεικόνιση του λατομείου στο οποίο βρέθηκε το σπήλαιο μελέτης.

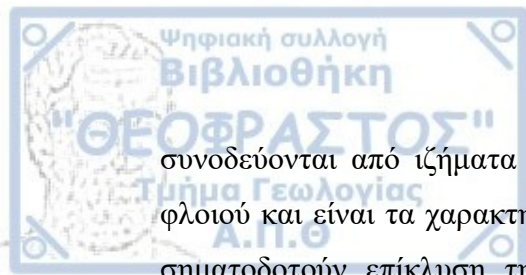


Εικόνα 4: Λατομείο Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης.

3. Γεωλογία της ευρύτερης περιοχής – Γεωλογική χαρτογράφηση

3.1 Λιθοστρωματογραφία

Το σπήλαιο που εξετάζεται βρίσκεται στη περιοχή του Παλαιοκάστρου Θεσσαλονίκης και ανήκει στην Ζώνη του Αξιού, στην υποζώνη Παιονίας και, συγκεκριμένα, στην Ενότητα Ωραιοκάστρου. Η Ενότητα αυτή εμφανίζει ανεστραμμένη σειρά σχηματισμών με τους παλιότερους να βρίσκονται πάνω από τους νεότερους (Εικόνες 5 και 6). Αναλυτικότερα, όσον αφορά τους παλιότερους, πρόκειται για διμαρμαρυγιακούς γενέσιους, χαλαζίτες και αμφιβολίτες, οι οποίοι είναι μεταμορφωμένα πετρώματα του Παλαιοζωϊκού και ανήκουν στη Σερβομακεδονική Μάζα. Τα πετρώματα αυτά επιπτεύουν τους σχηματισμούς της Ενότητας Ωραιοκάστρου και συναντώνται ΒΑ στη περιοχή. Οι γενέσιοι είναι διμαρμαρυγιακοί με πηγματιτικές φλέβες, υποδηλώνουν ύπαρξη ηπειρωτικού φλοιού και βρίσκονται δίπλα σε υλικά βαθιάς θάλασσας, τους σχιστόλιθους. Η ακολουθία της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης που έπεται είναι κανονική, δηλαδή η στρώση και η σχιστότητα κλίνουν ομόρροπα. Επίσης, χαρακτηρίζεται από αργιλοπυριτικά ιζήματα, ραδιολαρίτες που έχουν μεταμορφωθεί, κερατόλιθους, καθώς και παρεμβολές σχιστολίθων, ηλικίας Λιθανθρακοφόρου-Περμίου. Έπειτα, κατά το Περμοτριάδικό, εμφανίζεται ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά, η οποία προδίδει το άνοιγμα ωκεανού και αποτελείται από ηφαιστειακούς τόφφους και ηφαιστειακά ρυολιθικά πετρώματα. Κατά το Τριάδικό, ακολουθεί ανθρακική σειρά, η οποία χαρακτηρίζεται από ανακρυσταλλωμένους πλακώδεις και μαζώδεις ασβεστόλιθους ρηχής θάλασσας, γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι νηριτικοί. Ωστόσο, το Έστερο Τριάδικό ξεκινούν οι συνθήκες πελαγικής ιζηματογένεσης, δηλαδή οι ασβεστόλιθοι αποκτούν συνθήκες βαθιάς θάλασσας, και αρχίζει η απόθεση ασβεστοκλαστικών υλικών, δηλαδή ψαμμιτικών και αργιλικών ιζημάτων. Αυτές οι εναλλαγές λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων υλικών υποδηλώνουν την ύπαρξη τουρβιδιτών. Οι τουρβιδίτες αποτελούν ελαφρώς μεταμορφωμένα θαλάσσια ιζήματα και υποθαλάσσια ριπίδια, και κατ' επέκταση φλύσχη, δηλαδή εναλλαγές ψαμμιτικών και αργιλικών σχιστολίθων (μεταψαμμιτών και μεταπηλιτών αντίστοιχα). Στη συνέχεια, κατά το Κάτω Ιουρασικό, πάνω στη τουρβιδιτική σειρά τοποθετήθηκε με ανάστροφο ρήγμα η Εσωτερική οφιολιθική ακολουθία η οποία χαρακτηρίζεται από ουραλιτιωμένους γάββρους, δηλαδή πλουτωνικά πετρώματα αποτελούμενα από σερπεντινίτες. Οι οφιόλιθοι



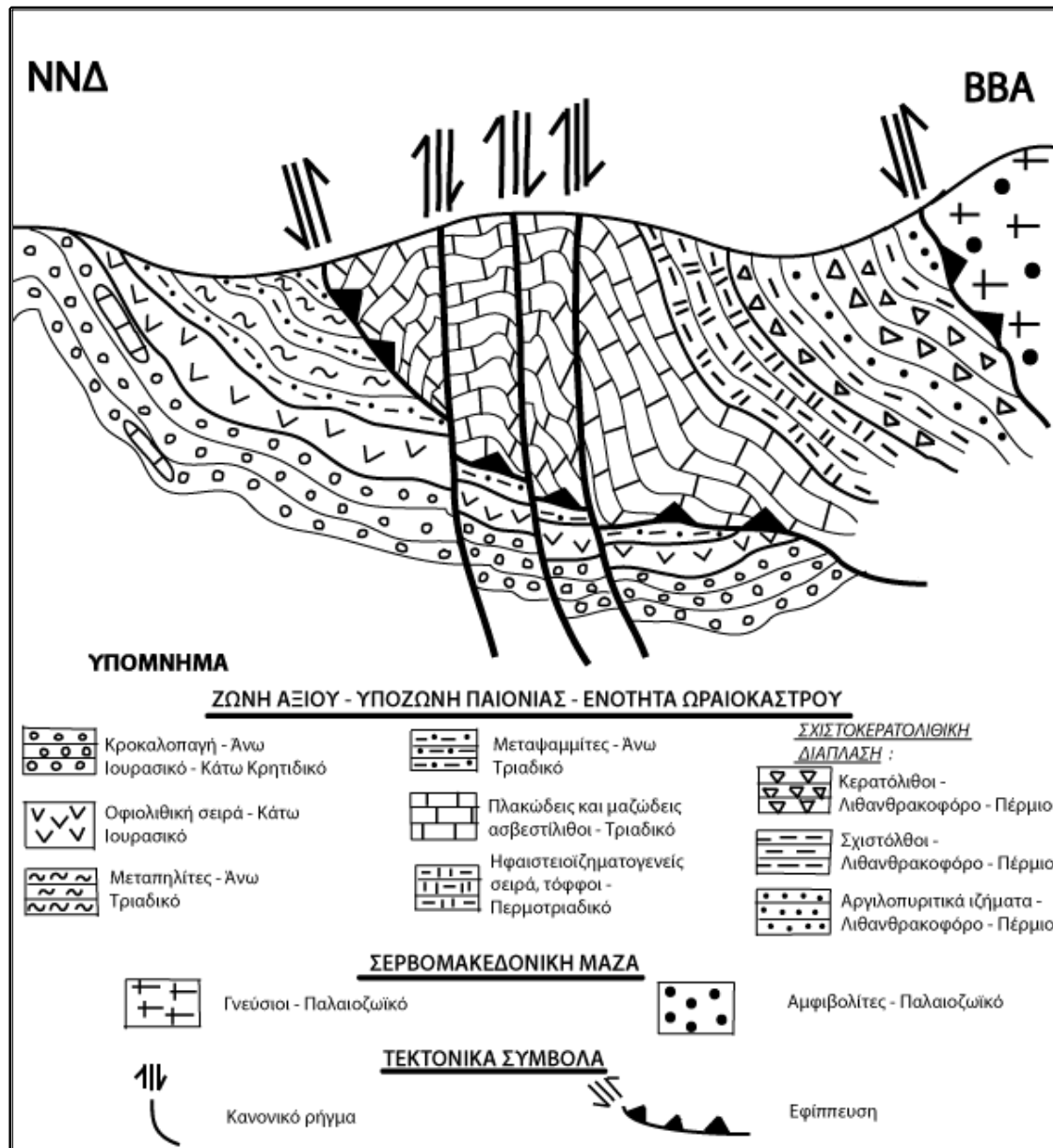
συνοδεύονται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας, αποδεικνύουν την ύπαρξη ωκεάνιου φλοιού και είναι τα χαρακτηριστικότερα πετρώματα της Υποζώνης Παιονίας, καθώς σηματοδοτούν επίκλυση της θάλασσας. Τέλος, πάνω σε αυτούς, κατά το Άνω Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό στη περιοχή του Νεοχωρούδας, τοποθετήθηκαν κροκαλοπαγή, τα οποία εμπεριέχουν ασβεστολιθικά και μαργαϊκά σώματα, χαρακτηρίζονται από γωνιώδεις κροκάλες και υποδηλώνουν το κλείσιμο του ωκεανού (Εικόνα 7) (Μουντράκης, 2020).

3.2 Γεωτεκτονική θέση του Παλαιοκάστρου και τεκτονική ανάλυση των σχηματισμών

Η Υποζώνη Παιονίας, στην οποία βρίσκεται το σπήλαιο του λατομείου, αντιπροσωπεύει τα ιζήματα που αποτέθηκαν σε ανοιχτή βαθιά θάλασσα. Το βασικό της χαρακτηριστικό, όσον αφορά την τεκτονική της εξέλιξη, είναι η λεπιοειδής τεκτονική, η οποία προέκυψε από συμπίεση κατά το Τριτογενές. Η Ενότητα Ωραιοκάστρου χαρακτηρίζεται ως ένα μεγαλέπι με συγκεκριμένους σχηματισμούς, όπως και οι υπόλοιπες ενότητες αυτής της υποζώνης. Συνδέεται με την Πρώιμη Ορογενετική δράση, κατά την οποία λαμβάνουν χώρα: καταστροφή της ωκεάνιας λεκάνης της Τηθύος, ενδοωκεάνια υποβύθιση του φλοιού της κάτω από την Ελληνική Ενδοχώρα, επώθηση οφιολίθων και ηπειρωτική σύγκρουση του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχους με τα αντίστοιχα της Ενδοχώρας. Στη περιοχή μελέτης η Πρώιμη Ορογενετική δράση αποδεικνύεται με την απόθεση κροκαλοπαγών, που υποδέχεται η επικλυσιογενής σειρά οφιολίθων, η οποία δηλώνει το κλείσιμο του ωκεανού της Τηθύος και την επώθηση των οφιολίθων. Η τεκτονική αυτή τοποθέτηση των οφιολίθων και των συνοδών ιζημάτων του ωκεανού της ζώνης Αξιού πάνω στο ανατολικό ηπειρωτικό περιθώριο της Πελαγονικής ζώνης παρουσιάζεται με τη μορφή τεκτονικού καλύμματος, το οποίο ονομάζεται Ηωελληνικό κάλυμμα (Τρανός, 2011).

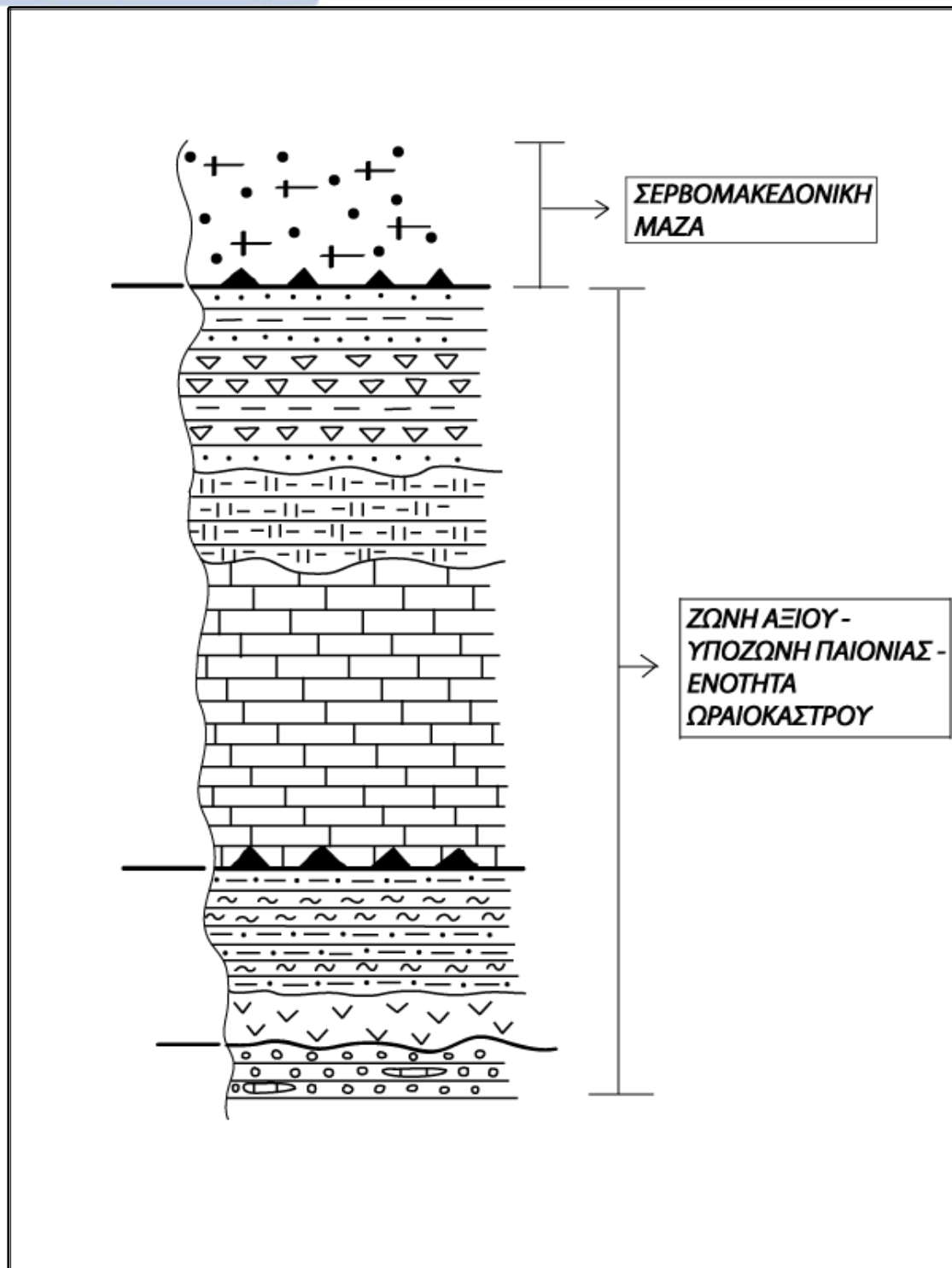
Όσον αφορά τους σχηματισμούς της Ενότητας Ωραιοκάστρου, παρατηρούνται διαφορές στα γεωτεκτονικά τους περιβάλλοντα και συνολικά επιβεβαιώνουν ότι πρόκειται για την Πρώτη Ορογενετική δράση, η οποία χρονολογείται Μέσο – Άνω Ιουρασικό. Εκτενέστερα, οι γνεύσιοι αντιπροσωπεύουν τμήματα του ηπειρωτικού περιθωρίου και αποτελούν τα πιο μεταμορφωμένα πετρώματα της περιοχής, με τοποθέτηση στα ΒΑ. Οι τουρβιδίτες και ο φλύσχος υποδεικνύουν την βάση της ηπειρωτικής κατωφέρειας, ενώ η ανθρακική σειρά τις ηπειρωτικές πλατφόρμες, δηλαδή τις υφαλοκρηπίδες. Οι σχιστόλιθοι αντιπροσωπεύουν την παράκτια ζώνη και τα μεταβατικά περιβάλλοντα ιζηματογένεσης. Τέλος, οι οφιόλιθοι υποδηλώνουν την επίκλυση της θάλασσας, σε αντίθεση με τα κροκαλοπαγή που δείχνουν χέρσευση. Συγκεκριμένα, οι οφιόλιθοι χαρακτηρίζουν παλιό ωκεάνιο χώρο με ωκεάνιο φλοιό και ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Με άλλα λόγια, η Πρώιμη Ορογένεση δημιουργήθηκε όταν τμήματα του ωκεάνιου φλοιού τοποθετήθηκαν πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο, δηλαδή γνεύσιοι και ανθρακικές πλατφόρμες, έπειτα άνοιξε ο ωκεανός λόγω των οφιολίθων και τέλος έκλεισε ξανά και η περιοχή χέρσευσε (Τρανός, 2011).

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η λιθολογία και η τεκτονική της Ενότητας Ωραιοκάστρου σε λιθοστρωματογραφική τομή.



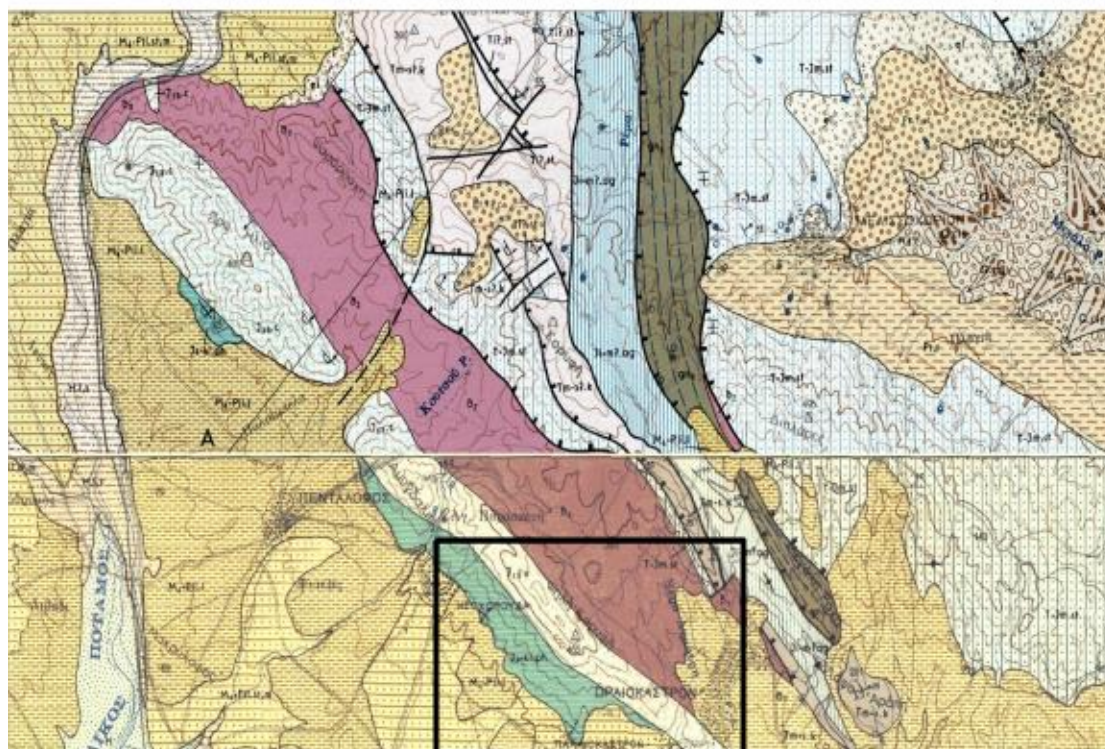
Εικόνα 5: Λιθοστρωματογραφική τομή της Ενότητας Ωραιοκάστρου σχεδιασμένη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στην εικόνα 6 αποτυπώνονται η λιθολογία και η τεκτονική της περιοχής σε τεκτονοστρωματογραφική στήλη.



Εικόνα 6: Τεκτονοστρωματογραφική στήλη Ενότητας Ωραιοκάστρου σχεδιασμένη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στην εικόνα 7 ακολουθεί η απεικόνιση του γεωλογικού χάρτη της περιοχής του Ωραιοκάστρου.



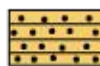
ΥΠΟΜΝΗΜΑ



Χαλαρές αποθέσεις
Νεογενές - Τεταρτογενές



Ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές
Άνω Ιουραϊκό - Κάτω Κρητιδικό



Κροκαλοπαγή
Νεογενές - Τεταρτογενές



Οφιολιθική σειρά
Τριαδικό - Κάτω - Μέσο Ιουραϊκό



Σχιστολιθική σειρά : Ψαμμίτες
Κάτω Κρητιδικό

Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης Ωραιοκάστρου (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών), Υπόμνημα (Μάρκος Τρανός, 2011)

4. Γενικά για το σπήλαιο στο λατομείο του Παλαιοκάστρου

Ο σχηματισμός των καρστικών εγκοίλων προκύπτει από διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην εκάστοτε περιοχή. Οι διαδικασίες αυτές διακρίνονται σε διάλυση, διάβρωση και απόθεση. Όλες αυτές οι διεργασίες μπορούν να συμβάλλουν στα στάδια εξέλιξης του σπηλαίου και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι στη τεκμηρίωση των μορφολογικών δομών του εγκοίλου. Η μορφολογία των σπηλαίων εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο τους πετρώματος ή του ιζήματος, από το οποίο σχηματίζεται, καθώς και από το επίπεδο ροής του νερού και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Επίσης, η μορφολογία τους μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των εξελισσόμενων γεωλογικών διεργασιών (Waele & Gutierrez, 2022).

Το σπήλαιο στο λατομείο του Παλαιοκάστρου χαρακτηρίζεται ως σπήλαιο διάλυσης και ανήκει στην πλειοψηφία των σπηλαίων. Οι διαδικασίες διάλυσης και διάβρωσης του ασβεστόλιθου αποτελούν βασικούς παράγοντες κατανόησης της εξέλιξης των καρστικών συστημάτων (Gabrovsek & Perik, 2006, όπως αναφέρεται στους Waele, D' Angeli et al., 2022).. Αναλυτικότερα, η αποσάθρωση και η διάλυση του ανθρακικού πετρώματος στις ρωγμές και τις ασυνέχειες του πετρώματος προκαλούν διαπλάτυνση με την πάροδο του χρόνου και εξέλιξη σε μεγάλους υπόγειους χώρους. Ακόμη, η διάλυση του ασβεστόλιθου είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό των μορφολογικών γνωρισμάτων του σπηλαίου. Συνεπώς, η μορφολογία ενός σπηλαίου αντιπροσωπεύει σημαντικό τεκμήριο της σπηλαιογένεσης.

Το σπήλαιο μελέτης είναι μια κοιλότητα που σχηματίστηκε σε ασβεστόλιθο. Οι ιδιότητες του πετρώματος επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη ενός σπηλαίου και την ύπαρξή του ή την καταστροφή του. Επομένως, ανάλογα με την λιθολογία και κατ' επέκταση, με τη χημική και ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος της περιοχής ενδείκνυται η ανθεκτικότητα και η αντοχή του εγκοίλου. Ακόμη, παράγοντας πρώτιστης σημασίας για την «γένεση» του σπηλαίου στο λατομείο είναι η τεκτονική δραστηριότητα. Συγκεκριμένα, τα ρήγματα και οι διακλάσεις αποτέλεσαν διόδους μέσα από τις οποίες διαπέρασε το νερό και προκλήθηκε η διάνοιξη μικρών κοιλοτήτων.

5. Μορφολογία των σπηλαιοθεμάτων

Σπηλαιοθέματα ονομάζονται «τα δευτερεύοντα κοιτάσματα ορυκτών που σχηματίζονται σε σπήλαια» (Moore, 1952, όπως αναφέρεται στους Borsato, Frisia et al., 2000).

Χαρακτηρίζονται ως διάκοσμος και αποτελούνται, κυρίως, από ανθρακικό ασβέστιο και συγκεκριμένα τους δύο κρυσταλλικούς του τύπους, τον ασβεστίτη και τον αραγωνίτη (Γιαννόπουλος, 2000). Χημικές αντιδράσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τη διείσδυση του νερού και του ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο προέρχεται από τη διάλυση του ασβεστόλιθου, στις ρωγμές του σπηλαίου και την απόθεσή του. Η ανάπτυξη αυτών των ασυνήθιστων ορυκτών πραγματοποιείται σε σταθερά περιβάλλοντα σπηλαίων με αργή ανάπτυξη, καθώς και σε συνθήκες όπου η ανάπτυξη επηρεάζεται και από τις αλλαγές στη διαδικασία διάλυσης.

Τα σπηλαιοθέματα στο υπό μελέτη σπήλαιο κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες μορφολογικές ομάδες, τα ογκώδη, τα οποία αποτελούνται από συμπαγείς όγκους υλικού, και τα κοραλλοειδή (Waele, Frau et al, 2015). Τα ογκώδη σπηλαιοθέματα του χώρου μελέτης, είναι οι ρεόλιθοι οι οποίοι εμφανίζουν κυματισμό ή ραβδώσεις στην επιφάνειά τους και δημιουργούνται από τη ροή των υδάτων στις επιφάνειες των τοιχωμάτων που ορίζουν τον χώρο του σπηλαίου (Hill and Forti, 1997, όπως στους Borsato, Frisia et al., 2000). Εκτενέστερα, οι ρεόλιθοι σχηματίζονται όταν νερό ρέει πάνω από επικλινή επιφάνεια και αφήνει πίσω του απόθεση ασβεστιτικού συγκρίματος (Βαξεβανόπουλος, 2006). Η απόθεση συσσωρεύεται, με τη πάροδο του χρόνου, και δημιουργεί μια λεία ή κυματιστή επιφάνεια. Οι κρύσταλλοί τους έχουν προσανατολισμό κάθετο, συνήθως, στην επιφάνεια ανάπτυξης του σπηλαιοθέματος (Borsato, Frisia et al., 2000).

Τα κοραλλοειδή αποτελούν κονδυλοειδή, βοτρυοειδή και σφαιρικά ασβεστιτικά συγκρίματα που έχουν τη μορφή κοραλλιών και εμφανίζουν δακτυλίους ανάπτυξης στους οποίους σχηματίζονται οι κρύσταλλοι του ορυκτού κάθετα. Ο σχηματισμός τους προκύπτει από τη μεταφορά και απόθεση ανθρακικού ασβεστίου με τριχοειδή ροή, με διασκόρπιση σταγόνων που στάζουν ή ακόμη και σε συνδυασμό με τις διαβρωτικές συνθήκες που προξενούνται εξαιτίας της συμπύκνωσης υδρατμών στα τοιχώματα του σπηλαίου. Τα σπηλαιοθέματα αυτά μπορούν να σχηματιστούν στις οροφές, τους τοίχους και τα δάπεδα των σπηλαίων (Βαξεβανόπουλος, 2006).

6. Μεθοδολογία

6.1 Αποτύπωση και τεκμηρίωση των δομών του σπηλαίου

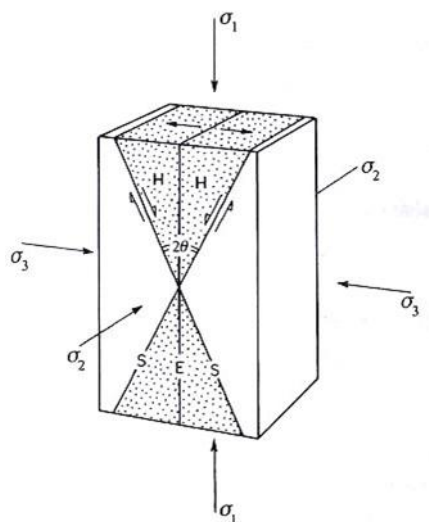
Η αποτύπωση των μορφολογικών στοιχείων του σπηλαίου πραγματοποιήθηκε με την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, η οποία καταγράφει και περιγράφει τη γεωμετρία του αντικειμένου, χρησιμοποιώντας την εφαρμογή σάρωσης Polycam. Το Polycam αποτελεί εφαρμογή απεικόνισης συντεταγμένων τριών διαστάσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω μιας συσκευής προηγμένης τεχνολογίας. Η εφαρμογή αυτή υποστηρίζεται από το Object Capture της Apple, με το οποίο γίνεται η επεξεργασία φωτογραμμετρίας στο cloud. Συγκεκριμένα, η σάρωση έγινε με την εναλλαγή των μεθόδων LiDAR και Photo Mode μέσω των οποίων ένας αισθητήρας ανιχνεύει αποστάσεις και βάθη.

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε, ανήκει στην κατηγορία σαρωτών χωρίς επαφή, καθώς συλλέγει δεδομένα χωρίς να έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο μελέτης. Αντιθέτως, λειτουργεί με τη χρήση οπτικής επαφής, όπως τα λέιζερ. Επιπλέον, συλλέγει μεγάλες ποσότητες σημείων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με τους σαρωτές με επαφή.

Κατά τη σάρωση του σπηλαίου που μελετάται, πραγματοποιείται η ανάλυση των πραγματικών μορφολογικών στοιχείων του και η συλλογή δεδομένων. Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, δηλαδή την ανάλυση, καταγράφονται και περιγράφονται με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σαρωμένης επιφάνειας, όπως για παράδειγμα το μέγεθος, το χρώμα, το σχήμα και οι κοιλότητες, και προσδιορίζονται από τα νέφη σημείων (Rode, Kadam et al., 2019). Τα νέφη σημείων αποτελούν σύνολο κορυφών σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z), όπου οι κορυφές συμβολίζουν την εξωτερική επιφάνεια της σαρωμένης περιοχής. Πιο αναλυτικά, γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων των γωνιών οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης και της απόστασης που διέτρεξε η ακτίνα λέιζερ της συσκευής και προέκυψε ένα πολύ πυκνό σύννεφο μετρημένων σημείων, που αποκαλείται ως «Πυκνό ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας – DDSM». Με άλλα λόγια, το νέφος σημείων αντιπροσωπεύει το σύμπλεγμα σημείων που μετρά ο ψηφιακός σαρωτής (Αγγελόπουλος, 2012). Σχετικά με το δεύτερο κομμάτι, δηλαδή τα συλλεγμένα δεδομένα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση, γίνεται εφικτή η χρήση τους για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων, τα οποία αξιοποιούνται στη τεκμηρίωση των μορφολογικών στοιχείων του σπηλαίου (Rode, Kadam et al., 2019).

6.2 Διακλάσεις και τεκτονικές ασυνέχειες

Οι τεκτονικές ασυνέχειες, δηλαδή οι διακλάσεις και τα ρήγματα, συνέβαλλαν σημαντικά στη σπηλαιογένεση, δηλαδή την ανάπτυξη του καρστικού συστήματος. Εννοιολογικά, οι διακλάσεις χαρακτηρίζονται ως ασυνέχειες του ανθρακικού πετρώματος, των οποίων τα τεμάχια εκατέρωθεν δεν παρουσιάζουν κίνηση. Διακλάσεις, δηλαδή, θεωρούνται ρηξιγενείς επιφάνειες, εκατέρωθεν των οποίων παρατηρούνται μετατοπίσεις πολύ μικρής κλίμακας. Υποδηλώνουν το σύστημα των τάσεων που κυριαρχεί τη στιγμή της διάνοιξής τους και οι διαστάσεις τους τείνουν σε διαπλάτυνση στη περίπτωση συνθηκών μεγάλης πίεσης (Βαξεβανόπουλος, 2006). Στη περιοχή μελέτης παρατηρούνται εφελκυστικές διακλάσεις, οι οποίες δημιουργούνται παράλληλα με τον άξονα σ_1 , ενώ ο άξονας σ_3 είναι κάθετος σε αυτές (όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8).



Εικόνα 8: Σχέση κύριων αξόνων τάσης και ρωγμών. Ε: Εφελκυστική διάκλαση. Οι κύριες τάσεις είναι $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. (Βαξεβανόπουλος, 2006)

Κατά την διαδικασία της χαρτογράφησης της ερευνηθείσας περιοχής, χρησιμοποιήθηκε η κατοπτρική γεωλογική πυξίδα κατά CLAR (Εικόνα 9). Η πυξίδα αυτή αποτελεί το βασικότερο γεωλογικό όργανο μέτρησης στοιχείων των γεωλογικών επιφανειών, όπως η στρώση, οι διακλάσεις και τα ρήγματα, καθώς και γραμμικά στοιχεία, δηλαδή γραμμώσεις και άξονες πτυχών. Καθορίζει τη μέγιστη κλίση και τη διεύθυνση κλίσης των επιφανειών και τη βύθιση και διεύθυνση βύθισης των γραμμικών στοιχείων. Η πυξίδα Clar συγκροτείται από τη μαγνητική βελόνα, η οποία προσδιορίζει τη διεύθυνση κλίσης του στρώματος, και τον

περιστρεφόμενο δίσκο, ή διαφορετικά τον άξονα περιστροφής, ο οποίος μετρά την κλίση. Η διεύθυνση αποτελεί την γωνία κλίσης μιας γεωλογικής δομής σε σχέση με την οριζόντια επιφάνεια. Επίσης, διαθέτει καπάκι, το οποίο έχει την ικανότητα να μετατοπίζεται 360 μοίρες και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στη στεφάνη της γεωλογικής πυξίδας σημειώνονται μοίρες, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση της γωνίας ανάμεσα στον γεωλογικό σχηματισμό που μελετήθηκε και στον μαγνητικό Βορρά. Η γωνία αυτή είναι γνωστή ως παράταξη και αποτελεί σημαντική παράμετρο στη γεωλογική χαρτογράφηση, καθώς βοηθάει στην κατανόηση του προσανατολισμού και της δομής των πετρωμάτων (Kalantari B. & Jamali H., 2015).

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η κατοπτρική γεωλογική πυξίδα κατά CLAR.



Εικόνα 9: Κατοπτρική Γεωλογική πυξίδα κατά CLAR (Kalantari B. & Jamali H., 2015)



Με αυτή την πυξίδα υπολογίστηκαν η διεύθυνση του σπηλαίου μελέτης, οι ασυνέχειες με διάλυση προς το έγκοιλο, οι στρώσεις, καθώς και οι διακλάσεις της περιοχής.

Αναλυτικότερα, οι μετρήσεις που πάρθηκαν παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες :

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΠΗΛΑΙΟΥ	294 ΒΔ (40°43'51" Β, 22°53'47" Α)
---------------------------	--

Πίνακας 1: Διεύθυνση σπηλαίου στο λατομείο Παλαιοκάστρου

ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΜΕ ΔΙΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΓΚΟΙΛΟ	350/70
	018/70

Πίνακας 2: Μετρήσεις ασυνεχειών

ΣΤΡΩΣΕΙΣ	007/70
	352/70

Πίνακας 3: Μετρήσεις στρώσεων

ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΤΟΥ ΣΠΗΛΑΙΟΥ	022/70
	097/82
	143/70
	025/60
	142/45
	040/78

Πίνακας 4: Μετρήσεις διακλάσεων 1^{ου} ρήγματος

ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ 2^ο ΡΗΓΜΑΤΟΣ	265/70
	278/65
	280/68
	270/72
	295/70
	285/75
	270/60
	298/72
	280/65
	290/78
	276/80
	283/75
	275/68

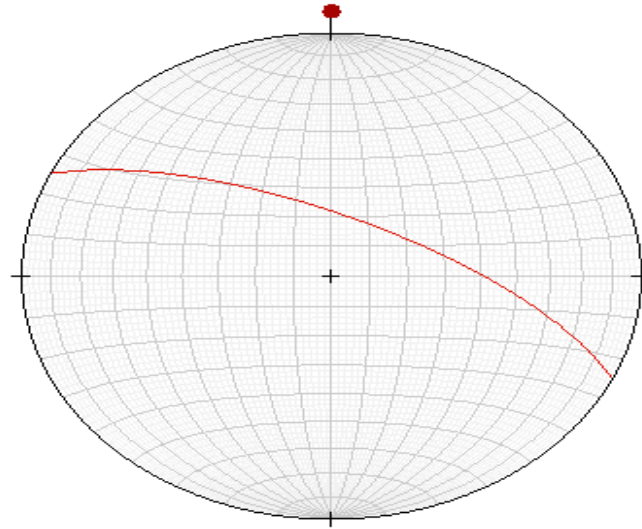
Πίνακας 5: Μετρήσεις διακλάσεων 2^ο ρήγματος

ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ 3^ο ΡΗΓΜΑΤΟΣ	300/70
	290/80
	301/78
	275/65
	283/72
	285/75
	278/76
	010/70
	350/78
	357/75
	015/68
	305/70
	018/75
	287/80
	005/82
	010/78

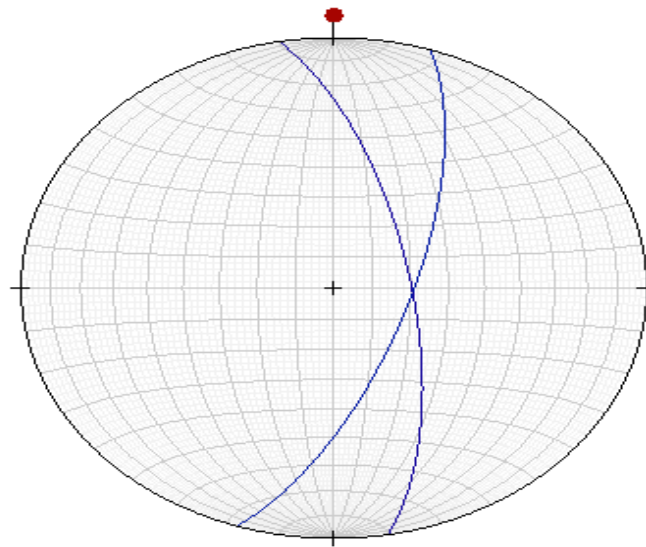
Πίνακας 6: Μετρήσεις διακλάσεων 3^ο ρήγματος



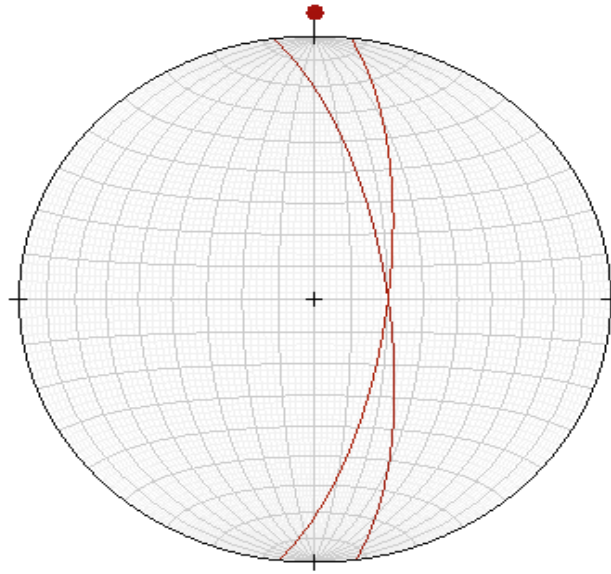
Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μετρήσεις, υλοποιήθηκε η σχεδίαση του δικτύου Schmidt με τη βοήθεια του προγράμματος Stereonet – Visible Geology. Το δίκτυο Schmidt αντικατοπτρίζει τη στερεογραφική απεικόνιση του επιπέδου του ρήγματος και μεταβάλλει ένα ημισφαίριο σε επίπεδο. Η μεταφορά των μετρήσεων της πυξίδας σε αυτό το δίκτυο πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας το αζιμούθιο, δηλαδή την παράταξη, στη περιφέρεια του δικτύου, καθώς και την κλίση στον Ισημερινό από την περιφέρεια προς το κέντρο. Τοποθετώντας τις τιμές στο πρόγραμμα Stereonet προέκυψαν τα διαγράμματα που φαίνονται στις εικόνες 10 έως 15 :



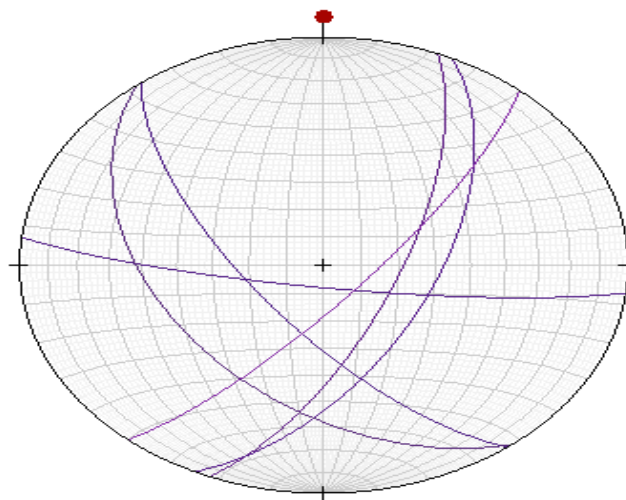
Εικόνα 10: Δίκτυο Schimdt για διεύθυνση σπηλαίου (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)



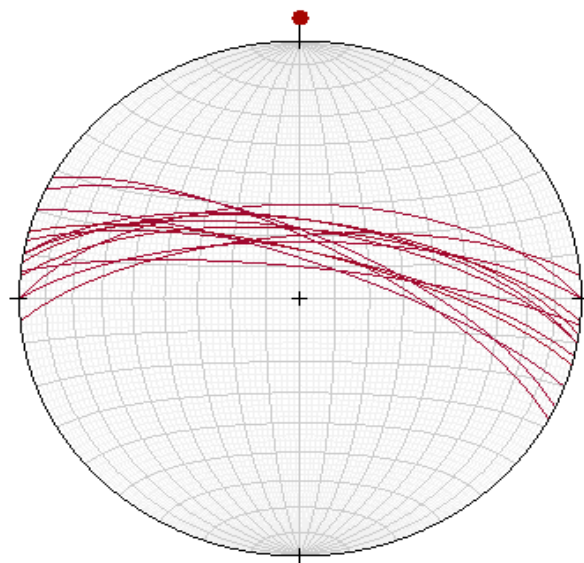
Εικόνα 11: Δίκτυο Schimdt για ασυνέχειες με διάλυση προς το έγκοιλο (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)



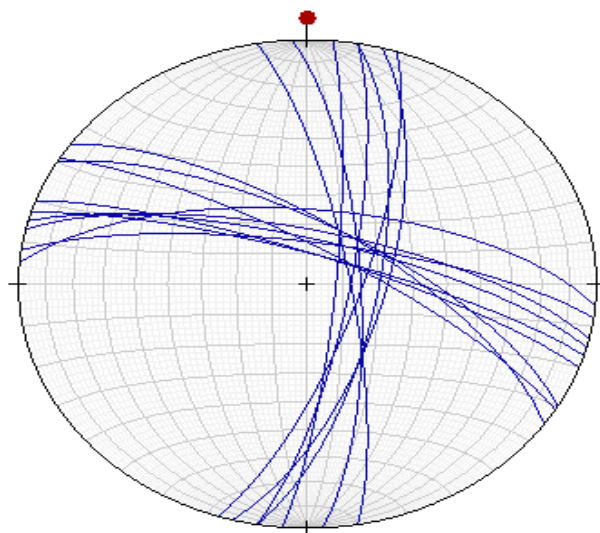
Εικόνα 12: Δίκτυο Schimdt για στρώσεις (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)



Εικόνα 13: Δίκτυο Schimdt για διακλάσεις ανατολικά του σπηλαίου (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)



Εικόνα 14: Δίκτυο Schimdt διακλάσεις για 2° ρήγμα (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)



Εικόνα 15: Δίκτυο Schimdt διακλάσεις για 3° ρήγμα (Κατασκευή στο πρόγραμμα Stereonet)

7. Αποτελέσματα

7.1 Λιθολογία

Στο λατομείο του Παλαιοκάστρου, όπου βρέθηκε το σπήλαιο που μελετάται, παρατηρήθηκε ανθρακική σειρά και συγκεκριμένα νηριτικοί παχυστρωματώδεις και ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι και ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές. Επίσης, παρατηρήθηκαν εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και ασβεστόλιθων, οι οποίοι κλίνουν ομόρροπα, καθώς και κορήματα (Τρανός, 2011). Ο ασβεστόλιθος είναι ιζηματογενές πέτρωμα, καρστικοποιημένος και διαπερατός και χρονολογείται την Τριαδική περίοδο. Περιέχει ασβεστίτη σε μεγάλη ποσότητα, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διακόσμου (Γιαννόπουλος 2000). Ο ασβεστόλιθος είναι ο πιο κοινός τύπος πετρώματος που συνδέεται με τον σχηματισμό ενός σπηλαίου, καθώς είναι πολύ διαλυτός στο νερό. Το ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές της Νεοχωρούδας χρονολογείται το Άνω Ιουρασικό-Κάτω Κρητιδικό και αποτελείται από κροκάλες ασβεστίτη, χαλαζία, ψαμμιτικά υλικά και λίγα υπερβασικά, με παρουσία θραυσμάτων κοραλλίων και αμμωνιτών και ασβεστιτικό-ψαμμιτικό υλικό πλήρωσης. Τα κορήματα αποτελούν όλες τις χαλαρές μεταλλικές αποθέσεις του Νεογενούς – Τεταρτογενούς, δηλαδή κροκαλοπαγή που δεν έχουν επηρεαστεί από την Αλπική ορογένεση (Τρανός, 2011). Στο σπήλαιο του λατομείου εμφανίζεται κρυσταλλικός ασβεστίτης (Εικόνα 16), ο οποίος προέρχεται από λιμνάζοντα ύδατα και σχηματίζει ρεόλιθους σε διάφορες θέσεις του λατομείου εκτός του σπηλαίου.

Ακολουθεί η απεικόνιση δείγματος ασβεστίτη που βρέθηκε στο λατομείο του Παλαιοκάστρου στην εικόνα 16.



Εικόνα 16: Ασβεστίτης

7.2 Τεκτονική

Στην περιοχή όπου βρέθηκε το σπήλαιο παρατηρήθηκε έντονη παραμορφωτική δράση και ισχυρή συμπίεση. Οι συνθήκες αυτές προκάλεσαν σχεδόν όρθια πτύχωση με τις πτέρυγες να κλίνουν αντίρροπα, επομένως δημιουργήθηκε αντίκλινο. Οι πτυχές υποδεικνύουν καμπύλωση των στρώσεων και, κατ' επέκταση, πλαστική παραμόρφωση. Η κλειστή αυτή πτυχή σχηματίστηκε μετά το Κάτω Κρητιδικό και σηματοδότησε την απαρχή των συμπίεσεων και των λεπιώσεων της περιοχής (Τρανός, 2011).

Επιπλέον, παρατηρήθηκαν αρκετά κανονικά συζυγή ρήγματα, γεγονός που προδίδει την ύπαρξη εφελκυστικής τεκτονικής στη περιοχή. Με άλλα λόγια, έπειτα από την πτύχωση και την πλαστική παραμόρφωση των σχηματισμών, ακολούθησε θραυσιγενής παραμόρφωση. Η εφελκυστική τεκτονική είναι ένας τύπος παραμόρφωσης που συμβαίνει όταν τα πετρώματα υπόκεινται σε εφελκυστικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν την επιμήκυνση και τη διάσπασή τους. Σχετίζεται με περιοχές του φλοιού της γης που έχουν αποσπαστεί, όπως αποκλίνοντα όρια πλακών και ηπειρωτικές ζώνες ρηγμάτων (Τρανός, 2011).

Συγκεκριμένα, στο λατομείο του Παλαιοκάστρου, η τεκτονική εξέλιξη που παρατηρήθηκε περιγράφεται από δύο εφελκυσμούς και λεπιώσεις. Ο πρώτος εφελκυσμός αντιστοιχεί στο νεότερο ρήγμα, το οποίο εκτείνεται από ΝΑ προς ΒΔ κατά το Πλειόκαινο – Πλειστόκαινο. Ο δεύτερος εμφανίζεται στο διπλανό πρηνές από ΝΔ προς ΒΑ κατά το Άνω Μειόκαινο. Τέλος, οι λεπιώσεις εκτείνονται προς ΝΔ κατά το Κάτω Τριτογενές και δείχνουν ημιθραυσιγενείς συνθήκες και πολύ ισχυρή συμπίεση (Τρανός, 2011).

Το σπήλαιο βρέθηκε με διεύθυνση 294 ΒΔ και εντάσσεται στις διακλάσεις από το πιο πρώιμο εφελκυστικό γεγονός ακολουθώντας τη γενική διαπίστωση ότι οι διευθύνσεις του σπηλαίου και των ρηγμάτων έχουν κοινό προσανατολισμό (Γιαννόπουλος, 2000). Συνεπώς, η γεωμετρία του σπηλαίου έχει άμεση συσχέτιση με τη διεύθυνση και το είδος των διακλάσεων (Μυρμηγιάννης, 2005).

Η διάπλαση των ρηγμάτων και γενικότερα των καρστικών κενών ρυθμίζει τη κίνηση των υδάτων και αποτελεί σημαντικό παράγοντα σπηλαιογένεσης. Ο υδρογεωλογικός και σπηλαιογενετικός αυτός ρόλος των ρηγμάτων εξαρτάται από τον τύπο του



ρήγματος, το μέγεθος και το βαθμό της διαγένεσης του πετρώματος (Βαξεβανόπουλος, 2006).

7.3 Μορφές διάλυσης και μορφές απόθεσης

Σχετικά με τις αποθέσεις του σπηλαίου, παρατηρήθηκαν κλαστικά ιζήματα, τα οποία αποτελούν σημαντική πηγή πληροφοριών για την ιστορία του σπηλαίου. Συγκεκριμένα, τα ιζήματα αυτά αποτελούν υπολειμματικές αποθέσεις που προέκυψαν από τη διάλυση του ανθρακικού πετρώματος. Ορισμένα ιζήματα προέρχονται από τον εσωτερικό κι άλλα από τον εξωτερικό χώρο. Όσον αφορά όσα προέρχονται από το εσωτερικό του σπηλαίου, προκύπτουν από τη χημική ή μηχανική διάβρωση, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση ογκόλιθων και χαλικιών στο έδαφος. Ωστόσο, όσα ιζήματα προέρχονται από τον εξωτερικό χώρο παρασύρονται προς το εσωτερικό με διάφορους φορείς, όπως το νερό κι ο αέρας.

7.4 Τρισδιάστατη σάρωση

Τρισδιάστατη σάρωση είναι η διαδικασία συλλογής δεδομένων από ένα φυσικό αντικείμενο και η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου. Η διεργασία αυτή διεξάγεται με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως οι οπτικοί σαρωτές, οι σαρωτές laser ή το λογισμικό φωτογραμμετρίας. Το ψηφιακό μοντέλο που προκύπτει μπορεί, έπειτα, να τροποποιηθεί και να αξιοποιηθεί για διάφορους σκοπούς.

Η χρήση του σαρωτή Polycam συνέβαλε στη σάρωση της περιοχής του σπηλαίου και στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων υψηλής ποιότητας και ακρίβειας (Εικόνα 17). Με άλλα λόγια, αποτέλεσμα της σάρωσης αποτελεί η ακριβής και στιγμιαία λήψη ενός τρισδιάστατου μοντέλου που είναι πανομοιότυπο με το αρχικό φυσικό αντικείμενο και προσδίδει τα φυσικά χαρακτηριστικά των στοιχείων του σπηλαίου. Παρόλο, δηλαδή, που η μέτρησή τους γενικά καθίσταται δύσκολη, χάρη στη διαδικασία της σάρωσης γίνεται εφικτή. Επομένως, κατά τη σάρωση «αιχμαλωτίζεται» σε πραγματικό χρόνο μια τρισδιάστατη απεικόνιση της λήψης πολλών μεμονωμένων μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η σάρωση επιτυγχάνεται με τη λήψη των δεδομένων σε μορφή τριγωνικού πλέγματος και νέφους σημείων. Όσον αφορά τη ποιότητα των τρισδιάστατων σκαναρισμένων δεδομένων, διαπιστώθηκε ότι στηρίζεται στην ποιότητα του λείζερ και της κάμερας και επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η σκαναρισμένη επιφάνεια χρώματος, η γεωμετρία, η λάμψη, το φως του περιβάλλοντος και η ανάλυση του σαρωτή. Γενικά, όταν το περιβάλλον φως είναι αμυδρό, αποτελεί σημαντική πηγή σφαλμάτων, καθώς καθίσταται δύσκολο η κάμερα της συσκευής να «συλλάβει» τμήματα του σπηλαίου απουσία φωτός (Rode, Kadam et al., 2019). Ωστόσο, το σπήλαιο που μελετάται είναι ένα πολύ μικρό έγκοιλο με διαρκή φωτισμό όλη τη μέρα, με αποτέλεσμα οι πιθανότητες σφάλματος να είναι ελάχιστες. Επομένως, η αποτύπωση των σαρωμένων στοιχείων, μέσω του αισθητήρα και της κάμερας, ποικίλλει ανάλογα και με τις εξωτερικές συνθήκες. Επιπροσθέτως, η καταγραφή της τιμής της έντασης της ακτινοβολίας που επιστρέφει εξυπηρετεί στην αναγνώριση της υφής των επιφανειών των σχηματισμών που υπάρχουν στο σπήλαιο (Μυρμηγιάννης, 2005).

Στην εικόνα 17 φαίνεται η τρισδιάστατη σάρωση στο εσωτερικό του σπηλαίου



Εικόνα 17: Τρισδιάστατη απεικόνιση του εσωτερικού του σπηλαίου στο λατομείο Παλαιοκάστρου.

8. Συζήτηση και συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη σπηλαιογένεση, οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση των καρστικών εγκοίλων είναι η τεκτονική της περιοχής, οι κλιματολογικές συνθήκες, η κλίση της επιφάνειας του εδάφους και η χημική σύσταση των πετρωμάτων. Σχετικά με την τεκτονική, τα ρήγματα και οι διακλάσεις έχουν καταλυτικό ρόλο στο υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής και στον σχηματισμό σπηλαίων. Το κλίμα του σπηλαίου χαρακτηρίζεται από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς το καρστικό έγκοιλο χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό υγρασίας. Τα περισσότερα σπήλαια δημιουργούνται από τις διεργασίες της διάλυσης και εξελίσσονται μέσα σε διαλυτά πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος. Με βάση την καρστικοποίηση, ο ασβεστόλιθος διαλύεται στο νερό με διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα την διάλυση του δυσδιάλυτου ανθρακικού ασβεστίου, τη διεύρυνση των ρωγμών και τη δημιουργία εγκοίλων.

Η διαδικασία διάλυσης του ανθρακικού πετρώματος προκαλεί την απόθεση υλικών στο σπήλαιο, δηλαδή τον σχηματισμό σπηλαιοθεμάτων. Η μορφολογία τους διαφέρει ανάλογα με τις ιδιάζουσες συνθήκες του περιβάλλοντος του σπηλαίου, όπως ο τύπος του πετρώματος, η χημεία του νερού και τα μοτίβα ροής του αέρα μέσα στο σπήλαιο. Οι αποθέσεις αυτές δημιουργούνται από ορυκτά που καθιζάνουν από το νερό, καθώς αυτό διαρρέει μέσα από τις ρωγμές στην οροφή ή στο πάτωμα του σπηλαίου. Συγκεκριμένα, τα κοραλλοειδή και τα ογκώδη σπηλαιοθέματα που παρατηρήθηκαν στο σπήλαιο μελέτης διαφοροποιούνται λόγω του ρυθμού ανάπτυξης. Οι ρεόλιθοι χαρακτηρίζονται από αργή ανάπτυξη κι αργή εξομάλυνση των προσανυξήσεων, ενώ τα κοραλλοειδή έχουν πιο γρήγορη ανάπτυξη στις προσανυξήσεις. Η αποτύπωση και η σάρωση των παραπάνω δομών προσδιορίζει τη γεωμετρία των φυσικών επιφανειών του σπηλαίου, η οποία απεικονίζεται με τη μορφή πυκνών σημείων. Τα μορφολογικά αυτά χαρακτηριστικά, δηλαδή τα σπηλαιοθέματα, σχηματίζονται από διάλυση και μηχανική διάβρωση και μπορούν να διαμορφώσουν τις οροφές, τους τοίχους και τα δάπεδα των σπηλαίων. Συνεπώς, τα σπηλαιοθέματα παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τον σχηματισμό του εγκοίλου και κυρίως για τα τελευταία στάδια της ανάπτυξής του.

Σπηλαιογένεση χαρακτηρίζεται η ανάπτυξη καλά οργανωμένων συστημάτων καρστικών εγκοίλων από ρευστά που διεισδύουν σε σχισμές ενός διαλυτού και διαπερατού πετρώματος. Το σπήλαιο στο λατομείο του Παλαιοκάστρου εξελίχθηκε σε

πτυχωμένο και διαρρηγμένο καρστικοποιημένο ασβεστολιθικό πέτρωμα, το οποίο βρίσκεται υποκείμενο από αδιαπέρατα πετρώματα, όπως ο σχιστόλιθος και τα μεταλλικά κλαστικά ιζήματα. Σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη κατανόηση της σπηλαιογένεσης αποτελούν οι φυσικές και χημικές διεργασίες στο υπέδαφος, η εξέλιξη του υδρογεωλογικού συστήματος, καθώς και η μελέτη των τεκτονικών ασυνεχειών. Η τελευταία παράμετρος, δηλαδή η τεκτονική δράση της περιοχής, αποτέλεσε τον κύριο γνώμονα της τεκμηρίωσης του σπηλαίου στο Παλαιόκαστρο. Η παρουσία ρηγμάτων είναι σημαντική στη γεωλογία, καθώς αυτά παρέχουν στοιχεία της τεκτονικής δραστηριότητας του παρελθόντος και μπορούν να βοηθήσουν στη κατανόηση της εξέλιξης του φλοιού της γης με τη πάροδο του χρόνου. Τα ρήγματα και οι διακλάσεις μετρήθηκαν με την γεωλογική πυξίδα κατά CLAR, η οποία αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού και της διεύθυνσης γεωλογικών δομών.

Οι χημικές αποθέσεις ενός σπηλαίου χαρακτηρίζονται ως σπηλαιοθέματα και ο σχηματισμός τους μπορεί να διαρκέσει χιλιάδες χρόνια. Επίσης, αποτελούν σημαντική πηγή πληροφοριών για τη γεωλογική ιστορία της περιοχής, καθώς υποδεικνύουν τις γεωλογικές διεργασίες που έχουν λάβει χώρα. Συγκεκριμένα, στο σπήλαιο του λατομείου η αποτύπωση των δομών του πραγματοποιήθηκε με σύστημα σάρωσης, χρησιμοποιώντας αισθητήρα LiDAR και κάμερα, τα οποία αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ακριβέστερη και πιο έγκυρη «αιχμαλώτιση» των σαρωμένων στοιχείων. Η διαδικασία της αποτύπωσης συγκροτεί στοιχεία που επωφελούν τις γεωλογικές και παλαιοντολογικές μελέτες, καθώς και μελέτες ανάδειξης και αξιοποίησης σπηλαίων.

9. Βιβλιογραφία

- Antonelou, A., & Tsikouras, B., & Papoulis, D., & Hatzipanagiotou, K. (2017). Investigation of the formation of speleothems in the Agios Georgios cave, Kilkis (N. Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 43(2), 876 - 885.
- Bogli, A. (1978). In book: *Karsthydrographie und Physische Spelaeologie.*, Springer Verlag, Heidelberg.
- D' Angeli, I., & De Waele, J., & Parise, M., & Vattano, M., & Madonia, G. (2022). Dissolution – Corrosion measurements with limestone and gypsum tablets in active sulphuric acid caves of southern Italy. 18th International Congress of Speleology. IV, 177 - 180.
- De Waele, J., & Gutierrez, F. (2022). Cave Geomorphology. In book: *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*.
- De Waele, J., & Frau, F., & Caddeo G. A., & Railsback, L.B. (2015). Stable isotope data as constraints on models of coralloid and massive speleothems: The interplay of substate, water supply, degassing and evaporation. 318, 130 - 141.
- Ford, D & Williams, P. D. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons. 1 – 562.
- Frisia, S., & Borsato, A., & Fairchild I., & McDermott, F. (2000). Calcite fabrics, Growth mechanisms and Environments of formation in speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*. 70(5), 1183 - 1196.
- Hill C. A. & Forti, P. (1997). *Cave minerals of the world*. (2nd ed). National Speleological Society, Huntsville.
- Kalantari, B., & Jamali, H., (2015). A study in various techniques, advances, and issues for rock masses. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*. 3 (6), 12 - 20.
- Lazaridis, G. (2022). Definition and Process – based classification of caves. *Acta Carsologica*. 51(1), 65 - 77.
- Moore, G. W. (1952). Speleothem – a new cave term. *National Speleological Society News*. 10 (6), 2.
- Rode, S., & Kadam, A., & More, K., & Fernandes, F., & Heber G. (2019). Design and development of 3d scanner. 1 - 5.

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

Ελληνική βιβλιογραφία

Αγγελόπουλος, Ν. (2012). Διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης και επεξεργασίας δεδομένων με ειδικό λογαριασμό. Διπλωματική εργασία, Κρήτη.

Βαξεβανόπουλος, Μ. (2006). Τεκτονικές συνθήκες σπηλαιογένεσης στο σπήλαιο Μελισσότρυπα Κεφαλοβρύσου Ελασσόνας. Διατριβή ειδίκευσης. Θεσσαλονίκη. 38 - 62.

Βασιλονικολός, Ε. (2013). Χρήση μορφομετρικών δεικτών για τον προσδιορισμό σπηλαιογενετικών διεργασιών σε σπήλαια της Β. Ελλάδος. Διπλωματική εργασία. 6 - 8.

Γιαννόπουλος Β., (2000). Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλαιών περιβαλλόντων των πλέον σημαντικών ελληνικών σπηλαίων. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Γκολούμποβιτς – Δεληγιάννη Μ., (2019). Περιβαλλοντική καρστική γεωμορφολογία. Εκδοτικός Όμιλος Ιων. 26 - 27.

Μουντράκης, Δ. Μ. (2010). Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη, University Studio Press (2^η εκδ). 69 -70.

Μυρμηγιάννης, Ι. (2005). Μοντελοποίηση Καρστικού Σπηλαίου στα πλαίσια Ανάδειξης και Προβολής Φυσικών Πόρων. Διπλωματική Εργασία, Κρήτη, 15 - 34.

Τρανός, Μ. (2011). Μάθημα : Χαρτογραφήσεις Υπαίθρου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Τρίμμης, Π. Κ. (2013). Αρχαιολογία σπηλαίων και Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Θεσσαλονίκη, 11.

Διαδικτυακές πηγές

Bulletin of the Geological Society of Greece, <https://www.researchgate.net/journal/Bulletin-of-the-Geological-Society-of-Greece-2529-1718>, προσπελάστηκε 8/2023.



18th International Congress of Speleology, 2022, <http://uis-speleo.org/index.php/event/18th-international-congress-of-speleology-2/>, προσπελάστηκε 8/23.

Sedimentary Geology, <https://www.researchgate.net/journal/Sedimentary-Geology-0037-0738>, προσπελάστηκε 8/23.

Journal of Sedimentary Research, <https://www.researchgate.net/journal/Journal-of-Sedimentary-Research-1938-3681>, προσπελάστηκε 8/23.

Acta Carsologica, <https://www.researchgate.net/journal/Acta-Carsologica-Karsoslovni-Zbornik-1580-2612>, προσπελάστηκε 8/23.

National Speleological Societ News, <https://caves.org/nssnews/>, προσπελάτηκε 8/23.