

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος



ΙΩΑΝΝΗΣ- ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ 22013

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΛΙΣΤΡΑΤΗΣ Ν. ΣΕΡΡΩΝ

Ειδίκευση: Εφαρμοσμένη Γεωλογία – Γεωφυσική



Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (επιβλέπων), Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ

> ΒΟΥΛΓΑΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ Καθηγητής Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ

ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ

AOHNA 2023

Προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας θεωρείται η ολική ή η μερική αναπαραγωγή του έργου άλλου προσώπου ή η παρουσίαση του έργου κάποιου άλλου ως προσωπικού του γράφοντος. Το Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη και καταδικάζει την προσφυγή σε τέτοιου είδους πρακτικές από τους Μεταπτυχιακούς Φοιτητές. Σε περιπτώσεις πρόδηλης ή εκ προθέσεως προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας, τα αρμόδια όργανα του Τμήματος δύνανται να επιβάλουν ως κύρωση έως και την οριστική διαγραφή από το ΠΜΣ. Κατά την εκπόνηση, υποβολή, εξέταση και δημοσίευση της Διπλωματικής Εργασίας Ειδίκευσης οι Μεταπτυχιακού Φοιτητές οφείλουν να τηρούν τις ακόλουθες κατευθυντήριες οδηγίες:

Η Διπλωματική Εργασία Ειδίκευσης πρέπει να αποτελεί έργο του υποβάλλοντος αυτήν φοιτητή.

Η αντιγραφή ή η παράφραση έργου τρίτου προσώπου αποτελεί προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας και συνιστά σοβαρό αδίκημα. Στο αδίκημα αυτό περιλαμβάνεται τόσο η προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας άλλου φοιτητή όσο και η αντιγραφή από δημοσιευμένες πηγές, όπως βιβλία, εισηγήσεις ή επιστημονικά άρθρα. Το υλικό που συνιστά αντικείμενο λογοκλοπής μπορεί να προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή. Η αντιγραφή ή χρήση υλικού προερχόμενου από το διαδίκτυο ή από ηλεκτρονική εγκυκλοπαίδεια είναι εξίσου σοβαρή με τη χρήση υλικού προερχόμενου από τυπωμένη πηγή ή βάση δεδομένων.

Η χρήση αποσπασμάτων από το έργο τρίτων είναι αποδεκτή εφόσον, αναφέρεται η πηγή του σχετικού αποσπάσματος. Σε περίπτωση αυτολεξεί μεταφοράς αποσπάσματος από το έργο άλλου, η χρήση εισαγωγικών ή σχετικής υποσημείωσης είναι απαραίτητη, ούτως ώστε η πηγή του αποσπάσματος να αναγνωρίζεται.

Η παράφραση κειμένου, αποτελεί προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας.

Οι πηγές των αποσπασμάτων που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να καταγράφονται πλήρως σε πίνακα βιβλιογραφίας στο τέλος της εργασίας.

Η προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας επισύρει την επιβολή κυρώσεων. Κατά την απόφαση επί των ενδεδειγμένων κυρώσεων, τα αρμόδια όργανα του Τμήματος θα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως το εύρος και το μέγεθος του τμήματος της εργασίας που οφείλεται σε προσβολή πνευματικής ιδιοκτησίας. Οι κυρώσεις θα επιβάλλονται σύμφωναμε το Άρθρο 7 Παράγραφος 7 του Κανονισμού Σπουδών.

Βεβαιώνω ότι η Διπλωματική Εργασία Ειδίκευσης, την οποία υποβάλλω, δεν περιλαμβάνει στοιχεία προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας, όπως αυτά προσδιορίζονται από την παραπάνω δήλωση, τους όρους της οποίας διάβασα και αποδέχομαι.

Παρέχω τη συναίνεσή μου, ώστε ένα ηλεκτρονικό αντίγραφο της διπλωματικής εργασίας μου να υποβληθεί σε ηλεκτρονικό έλεγχο για τον εντοπισμό τυχόν στοιχείων προσβολής πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ημερομηνία Υπογραφή Υποψηφίου

7/3/2023 Γιαννόπουλος Ιωάννης - Κωνσταντίνος

Πρόλογος

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, με τίτλο «Επιφανειακή Γεωφυσική διασκόπηση για τη διερεύνηση επέκτασης του καρστικού αγωγού Αλιστράτης (Ν. Σερρών)», που μου ανατέθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος του ΠΜΣ «Επιστήμες Γης και Περιβάλλον» (κατεύθυνση: Εφαρμοσμένη Γεωλογία - Γεωφυσική), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επιφανειακής γεωφυσικής έρευνας που εκτελέστηκε στον εξωτερικό χώρο του σπηλαίου Αλιστράτης. Απώτερος στόχος, ήταν η διερεύνηση του υπεδάφους για την εύρεση πιθανής πλευρικής επέκτασης του καρστικού αγωγού.

Η ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε από τον Ιωάννη Αλεξόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής - Τεχνικής και Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής, τον οποίο ευχαριστώ πολύ για την εμπιστοσύνη, τη βοήθεια και την υποστήριξη που μου έχει προσφέρει, όχι μόνο σε αυτό το στάδιο των σπουδών μου, αλλά και καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας. Η με κάθε τρόπο υποστήριξη και το αδιάλειπτο ενδιαφέρον του, υπήρξαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής, αλλά και στη διαμόρφωση της μέχρι τώρα επιστημονικής μου ταυτότητας

Τις θερμές ευχαριστίες μου εκφράζω στον Νικόλαο Βούλγαρη, Καθηγητή Σεισμολογίας - Τεχνικής Σεισμολογίας - Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Αντιπρύτανη του Πανεπιστημίου Αθηνών, μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για την ευκαιρία που μου έδωσε για την ένταξή μου στην επιστημονική ομάδα ερευνητικού του έργου, τις επιστημονικές μας συζητήσεις και τις συμβουλές του.

Τις θερμές ευχαριστίες μου εκφράζω επίσης στον Εμμανουήλ Βασιλάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή Τηλεανίχνευσης & Μορφοτεκτονικής, μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για τη βοήθεια και τις υποδείξεις του σε θέματα γεωλογίας, καρστικής γεωμορφολογίας και φωτογραμμετρίας και για όλες του τις συμβουλές και προτροπές σε όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Σπυρίδωνα Δίλαλο για όλη του τη βοήθεια κατά την επεξεργασία και αξιολόγηση των γεωφυσικών δεδομένων και τις συμβουλές του, την Αλίκη Κονσολάκη υποψήφια διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας, για όλη της τη βοήθεια κατά τις εργασίες υπαίθρου και ειδικά για και τη διεξαγωγή πτήσεων ΣμηΕΑ και όλες τις συμβουλές για την επεξεργασία των δεδομένων φωτογραμμετρίας, τη Γεωργία Μήτσικα, γεωλόγο Μ.Sc., για τη σημαντική βοήθεια κατά την διαδικασία λήψης των γεωφυσικών μετρήσεων και για όλες τις συμβουλές για την κατασκευή ψηφιακών χαρτών και τον συνάδελφο και φίλο Βασίλειο Γκόσιο για όλες μας τις συζητήσεις και τη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων δεδομένων. Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερα τη Μιλιάνα Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη για τις επιστημονικές μας συζητήσεις στο επιστημονικό πεδίο της καρστικής γεωμορφολογίας και της ανάλυσης του καρστικού συστήματος επίσης Αλιστράτης.

Ευχαριστώ θερμά την Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας - Σπηλαιολογίας και ιδιαίτερα τον διευθυντή της κ. Ανδρέα Ντάρλα για τη σχετική αδειοδότηση.

Ευχαριστώ επίσης την Πρόεδρο του Δ.Σ. του Σπηλαίου κυρία Γεωργία Πυρπίρη και τα μέλη του Δ.Σ. για τη φιλοξενία στον παραδοσιακό οικισμό της Αλιστράτης.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ, τον Διευθυντή του Σπηλαίου κύριο Νικόλαο Καρτάλη, Καθηγητή του Τμήματος Διεθνών και Ευρωπαϊκών Οικονομικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, για τη συνεργασία, την υποστήριξη και όλες τις διευκολύνσεις που παρείχε σε εμένα και στην ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Γεωφυσικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλα τα οικεία μου άτομα για την υποστήριξη και τη συμπαράσταση τους και ειδικά τον πατέρα μου για τη μέγιστη συμβολή του στη διαμόρφωση του επιστημονικού και όχι μόνο χαρακτήρα μου, για τις συμβουλές και τις γνώσεις που μου μετέφερε σχετικά με τα σπήλαια της περιοχής μελέτης.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	6
Abstract	7
Ευρετήριο εικόνων / Table of figures	8
Επιφανειακή γεωφυσική διασκόπηση για τη διερεύνηση επέκτασης του καρστικού αγωγού Αλιστράτης Ν. Σερρών (εκτενής περίληψη)	13
Near surface geophysical investigation for the possible extension of Alistrati cave in Serres Greece (extended abstract)	14
Εισαγωγή	17
1. Γεωλογία - Καρστική Γεωμορφολογία	18
1.1 Καρστικές διεργασίες και Γεωμορφές	18
1.1.1 Εξέλιξη και τύποι του Καρστ	18
1.1.2 Επιφανειακές Καρστικές Μορφές	20
1.1.3 Υπόγειες Καρστικές Μορφές	27
1.2 Φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της υπό έρευνας περιοχής	30
1.2.1 Γεωλογική δομή	32
1.2.2 Καρστικό σύστημα Πετρωτού – Σπήλαιο Αλιστράτης	34
1.2.3 Διερεύνηση επιφανειακής καρστικής γεωμορφολογίας με τη χρήση ΣμηΕΑ	37
2 Γεωφυσική διασκόπηση	44
2.1. Γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT)	44
2.2 Ηλεκτρομαγνητική τεχνική <i>γεωραντάρ</i> (GPR)	48
2.3 Μέθοδος VLF (Very Low Frequency)	58
2.4 Μετρήσεις πεδίου και επεξεργασία δεδομένων	65
3. Αξιολόγηση – Συμπεράσματα	85
3.1 Συνδυαστική Αξιολόγηση Γεωφυσικών Μεθόδων	85
3.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση γεωφυσικών αποτελεσμάτων - Αξιολόγηση	89
3.3 Τελικά συμπεράσματα	93
3.4 Προοπτική μελλοντικών επιστημονικών δράσεων	94
Βιβλιογραφία	95

Περίληψη

Το σπήλαιο Αλιστράτης, που χαρακτηρίζεται ως ένας ανενεργός καρστικός αγωγός, βρίσκεται στο Νομό Σερρών, κοντά στους πρόποδες του Όρους Μενοικίου, στην περιοχή Πετρωτό. Η ευρύτερη περιοχή δομείται από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους της ζώνης της Ροδόπης. Στον σχηματισμό αυτό μέσω των συστημάτων ρηγμάτων και διακλάσεων, έχει αναπτυχθεί ένα σύνθετο σύστημα καρστικοποίησης, σε τρία βασικά επίπεδα.

Στην περιοχή αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη επιφανειακή καρστική και γεωμορφολογική έρευνα, με σύγχρονες φωτογραμμετρικές τεχνικές μέσω της χρήσης ΣμηΕΑ, η οποία ανέδειξε την ανάπτυξη του επιφανειακού συστήματος καρστικοποίησης.

Για τη διερεύνηση της πιθανής επέκτασης του υφιστάμενου και προσβάσιμου καρστικού αγωγού της Αλιστράτης, σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε επιφανειακή γεωφυσική έρευνα, με την εκτέλεση: (α) γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ert) σε 4 τομές, συνολικού μήκους 940m και διασκοπικού βάθους περίπου 50 μέτρα, (β) διασκόπησης GPR σε 6 τομές, συνολικού μήκους 1.330m και (γ) ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης VLF σε συνολικά 3 τομές, συνολικού μήκους 705m. Οι 13 αυτές τομές των τριών γεωφυσικών τεχνικών που υλοποιήθηκαν, ταυτίζονται πλήρως σε 4 θέσεις και αξιολογήθηκαν συνδυαστικά, αποδίδοντας εξαιρετικά αποτελέσματα.

Τα στοιχεία της επεξεργασίας της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας ανέδειξαν την ύπαρξη δύο ιδιαίτερα αντιστατικών (>7.000 Ohm.m) 'στόχων', σε όλες τις τομές, που αξιολογούνται ως καρστικά έγκοιλα, τα οποία σκιαγραφούν την ύπαρξη και διασύνδεση των δύο πρώτων επιπέδων του καρστ, μέχρι και τα 50m βάθος και την επέκταση μέρους του καρστικού συστήματος προς βορειοανατολικά.

Από τα αποτελέσματα της διασκόπησης GPR εντοπίστηκαν ισχυρές επιφάνειες ανάκλασης του σήματος και χαρακτηριστικές δομές που παρουσιάζονται σε περίπτωση ύπαρξης καρστικών εγκοίλων και αναδείχτηκαν επιφανειακές καρστικές δομές έως και τα 15m βάθος. Συμπληρωματικά, εκτελέστηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF, τα αποτελέσματα της οποίας, μέσω της διαδικασίας της αντιστροφής, ανέδειξαν την ύπαρξη ιδιαίτερα αντιστατικών (>2.500 Ohm.m) 'στόχων' που πιθανώς να οφείλονται στην ύπαρξη καρστικών εγκοίλων.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω γεωφυσικών τεχνικών καθώς και η τρισδιάστατη απεικόνισή τους, φαίνεται να αναδεικνύουν παρόμοιες γεωφυσικές δομές/ανωμαλίες, που αξιολογούνται ως διαφόρων τύπων δομές του καρστικού συστήματος. Συμπερασματικά, η συνδυαστική γεωφυσική έρευνα που εφαρμόστηκε, ανέδειξε την ύπαρξη και διασύνδεση των δύο πρώτων επιπέδων του καρστ της περιοχής, μέχρι και το βάθος των 50m, καθώς και την πιθανή επέκταση του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης προς βορειοανατολικά. Μία δεύτερη φάση γεωφυσικής επιφανειακής έρευνας, βασισμένη στη γνώση που αποκτήθηκε από την παρούσα, θα επιβεβαιώσει και ενισχύσει την υπεδαφική καρστική δομή.

Abstract

The cave of Alistrati, which is characterized as an inactive karstic conduit, is located in the Prefecture of Serres, near the foothills of Mount Menoikio, in the area of Petroto. This area is structured by crystalline limestones of the Rhodope Massif, which through fault and joint systems lead to the development of a complex and multilevel karst system.

An extensive geomorphological survey was carried out for the accurate mapping of the karst surface above the cave of Alistrati, using an Unmanned Aerial System (UAS).

For the investigation of a possible lateral extension of the existing and accessible Alistrati karstic conduit, a detailed surface geophysical investigation was planned and carried out. More specifically, three geophysical techniques were implemented: a) the electrical resistivity tomography (ERT) at 4 profiles of 940m total length and a total investigation depth of 50m, b) the GPR technique in 6 lines of 1330m total length and c) the VLF method in 3 lines of 705m total length. These 13 lines of the three geophysical techniques are fully matched at 4 locations and were join-interpreted, yielding remarkable results.

The ERT results indicated the existence of two highly resistive (>7000 Ohm.m) anomalies, which are interpreted as karstic voids and prove the existence and interconnection of the first two levels of the karstification up to the depth of 50m, and the extension of the karst system to the northeast.

The GPR survey results identified strong signal reflection surfaces and characteristic structures derived from karstic voids. Through this technique the shallow karstic system was investigated up to the depth of 15m. Subsequently, the VLF electromagnetic method was performed, the results of which, through 2D inversion, indicated the existence of highly resistive (>2500 Ohm.m) targets probably due to the presence of karstic voids.

The comparative results of the above geophysical techniques, as well as their 3D presentation highlight similar geophysical structures/anomalies, evaluated as different types of karst system structures. In conclusion, the combined geophysical survey has indicated the existence and interconnection of the first two karst levels of the area, up to a depth of 50m, as well as the possible extension of the Alistrati karstic conduit to the northeast.

Ευρετήριο εικόνων / Table of figures

Εικόνα 1.1.1: a) Κοίλες γλυφές, b) Μαιανδρικές γλυφές c) Γλυφές στις επιφάνειες διακλάσεων, από την περιοχή άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης
Figure 1.1.1: a) kamenica, b) meanderkarren and c) karrenfield developed on a joint system, from the area above the cave of Alistrati
Εικόνα 1.1.2: Εγκατακρημνισιγενής δολίνη στην περιοχή άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης
Figure 1.1.2: Collapse doline from the area above the Alistrati cave
Εικόνα 1.1.3: Επικρεμάμενη κοιλάδα άνωθεν του καρστικού αγωγού του σπηλαίου Αλιστράτης
Figure 1.1.3: Hanging valley in the area above the cave of Alistrati
Εικόνα 1.1.4: Το φαράγγι του ποταμού Αγγίτη στην περιοχή Πετρωτό Αλιστράτης
Figure 1.1.4: The canyon of Aggitis river
Εικόνα 1.1.5: Το σπήλαιο του Αγ. Γεωργίου στην περιοχή Πετρωτό, όπου είναι εμφανής η ανάπτυξη του καρστικού αγωγού κατά μήκος συστημάτων διακλάσεων
Figure 1.1.5: The cave of St. George in "Petroto" area, where the development of the karstic system in the direction of the main joint system, is obvious
Εικόνα 1.1.6: Στιγμιότυπο από το σπήλαιο πηγών Αγγίτη σε βάθος τριών χιλιομέτρων από τη φυσική είσοδο, όπου είναι εμφανής η ύπαρξη ενεργού καρστικού αγωγού29
Figure 1.1.6: The cave of Aggitis, an example of an active karstic conduit of the area
Εικόνα 1.1.7: Στιγμιότυπο από αίθουσα του σπηλαίου Αλιστράτης (ανενεργός καρστικός αγωγός)
Figure 1.1.7: Image from Alistrati cave (inactive karstic conduit)29
Εικόνα 1.2.1: Δορυφορική εικόνα απεικόνισης των γεωγραφικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής μελέτης
Figure 1.2.1: Satelite image with the main geographic characteristics of the survey area
Εικόνα 1.2.2: Πανοραμική εικόνα του φαραγγιού του Αγγίτη, όπου διαφαίνεται η είσοδος του σπηλαίου Αλιστράτης και του σπηλαίου του Ορφέα (https://earth.google.com)31
Figure 1.2.2: Panoramic view of the Aggitis canyon, where the entrances of Alistrati and Orfeas caves are marked with yellow arrows (https://earth.google.com)
Εικόνα 1.2.3: Δορυφορική εικόνα όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των κύριων σπηλαίων της περιοχής του Πετρωτού καθώς και η θέση των πηγών Γαλάζια Νερά
Figure 1.2.3: Satelite image, where the most important caves of "Petroto" area, as well as the "Galazia Nera" springs are presented with red pins
Εικόνα 1.2.4: Τροποποιημένος γεωλογικός χάρτης (ΙΓΜΕ 1:50000, Φ.Χ Δράμα, 1978, Φ.Χ Προσοτσάνη, 1988) της ευρύτερης περιοχής μελέτης, σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας33
Figure 1.2.4: Modified geological map of the study area (IGME Sheet Drama, 1978, Sheet Prosotsani, 1988)
Εικόνα 1.2.5: Κάτοψη του σπηλαίου Αλιστράτης σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας (Προσωπικό αρχείο Γιαννόπουλου Β.)35
Figure 1.2.5: Topographic plan of the cave of Alistrati (Modified from the personal archive of Giannopoulos V.)
Εικόνα 1.2.6: Αίθουσα κατακρημνίσεων εντός του σπηλαίου Αλιστράτης36
Figure 1.2.6: A chamber of Alistrati cave filled with massive rock falls
Εικόνα 1.2.7: Επιλογή, τοποθέτηση και εντοπισμός του σταθερών σημείων (GCPs) από αεροφωτογραφία του ΣμηΕΑ
Figure 1.2.7: Selection, placement and identification of the ground control points from a UAV image

Εικόνα 1.2.8: Στιγμιότυπο από την περιοχή μελέτης όπου διακρίνεται το ΣμηΕΑ τύπου DJI Phantom-4, που χρησιμοποιήθηκε.
Figure 1.2.8: Image from the survey area, where the DJI Phantom-4 UAS is presented.
Εικόνα 1.2.9: Τελικό ορθο-φωτο-μωσαϊκό της περιοχής μελέτης διακριτικής ικανότητας 0,017 μέτρων40
Figure 1.2.9: Final orthophotomosaic of the survey area, with a resolution of 0,017m40
Εικόνα 1.2.10: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται τα συστήματα διακλάσεων μεγάλης κλίμακας (κόκκινες συνεχείς γραμμές), της περιοχής άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης41
Figure 1.2.10: Karstic – Geomorhological map, where the main joint system of the survey area are presented (red lines)41
Εικόνα 1.2.11: Πεδία αμαξοτροχιών (A,B,C,D,E,F) της περιοχής μελέτης, όπως αυτά αναγνωρίζονται από το τελικό ορθο-φωτο- μωσαϊκό
Figure 1.2.11: Karrenfields (A,B,C,D,E,F) of the survey area, as identified from the orthophotomosaic
Εικόνα 1.2.12: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται γλυφές (κίτρινες συνεχείς γραμμές) σε επιφάνειες διακλάσεων, καθώς και οι εγκατακρημνισιγενείς (κόκκινες εστιγμένες γραμμές) και διαλυσιγενείς (κίτρινες εστιγμένες γραμμές) δολίνες της περιοχής μελέτης
Figure 1.2.12: Karstic – Geomorhological map of the survey area, where karrenfields (continuous yellow lines), collapse dolines (dotted red lines) and solution dolines (yellow dotted lines) are identified from the orthophotomosaic
Εικόνα 1.2.13: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται οι επικρεμάμενες κοιλάδες (μαύρη εστιγμένη γραμμή)43
Figure 1.2.13: Karstic – Geomorhological map, where two hanging valleys (dotted black lines) of the survey area have been identified from the orthophotomosaic
Εικόνα 2.1.1: Διατάξεις ηλεκτροδίων α) Διάταξη Wenner, b) Διάταξη Schlumberger, c) Διάταξη Dipole-Dipole (Akingboye & Ogunyele, 2019)
Figure 2.1.1: a) Wenner b) Schlumberger and c) Dipole – Dipole electrode arrays (Akingboye & Ogunyele, 2019)45
Εικόνα 2.1.2: Αυτοματοποιημένη διαδικασία λήψεως γεωηλεκτρικών μετρήσεων (Wellbrock et al., 2018)46
Figure 2.1.2: Electrical resistivity tomography automatic measurement process (Wellbrock et al., 2018)46
Εικόνα 2.1.3: Γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro του οίκου IRIS Instruments
Figure 2.1.3: Syscal Pro switch 48 geoelectrical system (IRIS Instruments)47
Εικόνα 2.1.4: Διαίρεση του ημιεπιπέδου σε κελιά κατανομής της ειδικής αντίστασης βάση του συνόλου των μετρήσεων, λογισμικό Res2DInv (Geotomo Software)
Figure 2.1.4: Devision of the subsurface in model blocks with different resistivity values (Res2DINV Software)
Εικόνα 2.2.1: Σύστημα γεωραντάρ του οίκου Sensors & Software
Figure 2.2.1: Sensors & Softaware GPR system
Εικόνα 2.2.2: Τρόπος λήψης μετρήσεων του συστήματος γεωραντάρ (Iftimie et al., 2021)
Figure 2.2.2: Measurement process of the GPR system (Iftimie et al., 2021)50
Εικόνα 2.2.3: Τρόπος διάδοσης ραδιοκυμάτων στο υπέδαφος ανάκλαση τους σε υπεδαφικό στόχο (www.sensoft.ca)52
Figure 2.2.3: The GPR electromagnetic wave propagation and its reflection on a subsurface target. (www.sensoft.ca)
Εικόνα 2.2.4: Ανάκλαση και διάθλαση του κάθετου ηλεκτρικού (αριστερά) και κάθετου μαγνητικού (δεξιά) σκέλους του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Atkinson & Hancock, 2006)
Figure 2.2.4: Reflection and refraction of the perpendicular electrical (left) and magnetic (right) part of the electromagnetic wave (Atkinson & Hancock, 2006)

Εικόνα 2.2.5: Υπέρθεση ηλεκτρομαγνητικών παλμών και βελτίωση του λόγου Signal/Noise. (www.sensoft.ca)54
Figure 2.2.5: Stacking of the electromagnetic pulce for the improvement of the Signal/Noise ratio (www.sensoft.ca)
Εικόνα 2.2.6: Σύστημα γεωραντάρ Noggin 100 του οίκου Sensors & Software, όπου διακρίνονται a) η διστατικού τύπου κεραία συχνότητας 100MHz και b) ο τροχός μεταφοράς με ενσωματωμένο οδόμετρο
Figure 2.2.6: The Sensors & Software Noggin 100 GPR system with a) a 100MHz bistatic antenna and b) smart tow system with odometer
Εικόνα 2.2.7: Στιγμιότυπο κατά την 3D επεξεργασία των δεδομένων GPR από το περιβάλλον του λογισμικού SliceView του οίκου Sensors & Software
Figure 2.2.7: The 3D processing of the GPR data in the SliceView module of EKKO-Project Software
Εικόνα 2.3.1: Μεταβολή της γωνίας κλίσης θ, κατά μήκος τομής πάνω από στόχο (Τζάνης 2022)
Figure 2.3.1: Variation of the angle of inclination, along a section above a target
Εικόνα 2.3.2: Παγκόσμια κατανομή των σταθμών εκπομπής VLF σημάτων59
Figure 2.3.2: Global distribution of VLF transmitting stations
Εικόνα 2.3.3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικού διπόλου και του ΗΜ πεδίου που εκπέμπεται από αυτό (Τζάνης, 2022)59
Figure 2.3.3: Schematic representation of an electric dipole and the EM field emitted by it
Εικόνα 2.3.4: Σκαρίφημα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στη μέθοδο VLF, σε αγωγό παράταξης παράλληλης με τη διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου (Bosch & Müller, 2001)
Figure 2.3.4: Diagram of electromagnetic field propagation in the VLF method, in a conductor array parallel to the direction of propagation of the primary magnetic field (Bosch & Müller, 2001)
Εικόνα 2.3 5: Η επίδραση των τοπογραφικών ανωμαλιών ανάλογα με την διεύθυνση όδευσης Α) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF παράλληλη στην παράταξη της τοπογραφίας Β) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF κάθετη στην παράταξη της τοπογραφίας (Τζάνης, 2022).
Figure 2.3 5: The effect of topographic anomalies depending on the direction of the section A) Direction of propagation of the VLF wave parallel to the topography B) Direction of propagation of the VLF wave perpendicular to the the topography61
Εικόνα 2.3.6: Σύστημα VLF WADI του οίκου ΑΒΕΜ63
Figure 2.3.6: The ABEM WADI VLF system
Εικόνα 2.4.1: Στιγμιότυπα από την τοπογραφική αποτύπωση των σημείων/θέσεων μετρήσεων με τη χρήση δέκτη RTK-GNSS.
Figure 2.4.1: Images from the RTK-GNSS measurements of the geophysical survey lines
Εικόνα 2.4.2: Αρχικό μοντέλο για τη θεώρηση ύπαρξης ενός υπεδαφικού στόχου (καρστικού αγωγού)
Figure 2.4.2: Initial model for the existance of only one subsurface target (karstic conduit)
Εικόνα 2.4.3: Μοντέλο αντιστροφής των δεδομένων του ευθέος προβλήματος, για τη θεώρηση ύπαρξης ενός υπεδαφικού στόχου (καρστικού αγωγού)
Figure 2.4.3: Inversion model of the forward model data, for the existance of only one subsurface target (karstic conduit)68
Εικόνα 2.4.4: Αρχικό μοντέλο για τη θεώρηση ύπαρξης τριών υπεδαφικών στόχων (δύο επίπεδα καρστ)
Figure 2.4.4: Initial model for the existance of three possible subsurface targets (two karstification levels)
Εικόνα 2.4.5: Μοντέλο αντιστροφής των δεδομένων του ευθέος προβλήματος, για τη θεώρηση ύπαρξης τριών υπεδαφικών στόχων (δύο επίπεδα καρστ)
Figure 2.4.5: Inversion model of the forward model data, for the existance of three possible subsurface targets (two karstification levels)

Εικόνα 2.4.6: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας	70
Figure 2.4.6: The ERT lines positions	70
Εικόνα 2.4.7: Στιγμιότυπα από την εφαρμογή της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στη θέση ERT2	71
Figure 2.4.7: Images from the application of the Electrical Resistivity Tomography technique in ERT2 line	71
Εικόνα 2.4.8: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων γεωηλεκτρικής τομής ERT1	/ της 72
Figure 2.4.8: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT1	72
Εικόνα 2.4.9: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων γεωηλεκτρικής τομής ERT2	/ της 72
Figure 2.4.9: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT2	72
Εικόνα 2.4.10: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων γεωηλεκτρικής τομής ERT3	/ της 73
Figure 2.4.10: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT3	73
Εικόνα 2.4.11: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων γεωηλεκτρικής τομής ERT4	/ της 73
Figure 2.4.11: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT4	73
Εικόνα 2.4.12: Ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση των τομών της γεωηλεκτρικής τομογραφίας	74
Figure 2.4.12: Pseudo-3D presentation of the ERT sections.	74
Εικόνα 2.4.13: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής γεωραντάρ	75
Figure 2.4.13: The GPR lines positions.	75
Εικόνα 2.4.14: Στιγμιότυπα κατά την εφαρμογή της τεχνικής γεωραντάρ στην περιοχή μελέτης	76
Figure 2.4.14: Images from the application of the GPR technique in the survey area.	76
Εικόνα 2.4.15: Επεξεργασία δεδομένων GPR, εφαρμογή φίλτρων Dewow, Background Substraction, DynaT και SEC2 Gain	77
Figure 2.4.15: GPR data processing in LineView module of the EKKO_Project Software, with the application of Dev Background Subtraction, DynaT and SEC2 Gain filters.	vow, 77
Εικόνα 2.4.16: Τομή GPR1 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	77
Figure 2.4.16: Processed GPR section for GPR1 line	77
Εικόνα 2.4.17: Τομή GPR2 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	78
Figure 2.4.17: Processed GPR section for GPR2 line	78
Εικόνα 2.4.18: Τομή GPR3 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	78
Figure 2.4.18: Processed GPR section for GPR3 line	78
Εικόνα 2.4.19: Τομή GPR4 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	79
Figure 2.4.19: Processed GPR section for GPR4 line.	79
Εικόνα 2.4.20: Τομή GPR5 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	79
Figure 2.4.20: Processed GPR section for GPR5 line.	79
Εικόνα 2.4.21: Τομή GPR6 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project	79
Figure 2.4.21: Processed GPR section for GPR6 line.	79
Εικόνα 2.4.22: Ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση των τομών γεωραντάρ (GPR1, GPR2, GPR3, GPR4)	80

Figure 2.4.22: Pseudo-3D presentation of the GPR sections (GPR1, GPR2, GPR3, GPR4)80
Εικόνα 2.4.23: Ισοεπιφάνειες έντασης ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, στα 12m βάθος
Figure 2.4.23: Isosurfaces of the GPR reflection intensities, in 12m depth
Εικόνα 2.4.24: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής VLF82
Figure 2.4.24: The VLF lines positions
Εικόνα 2.4.25: Στιγμιότυπο κατά την εφαρμογή της μεθόδου VLF στην περιοχή μελέτης.
Figure 2.4.25:Image of the application of the VLF technique in the survey area
Εικόνα 2.4.26: Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό KHFFILT, στη θέση VLF1.
Figure 2.4.26: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF1 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software
Εικόνα 2.4.27: Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό KHFFILT, στη θέση VLF3.
Figure 2.4.27: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF3 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software
Εικόνα 2.4.28: Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό KHFFILT, στη θέση VLF4.
Figure 2.4.28: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF4 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software
Εικόνα 2.4.29: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF1
Figure 2.4.29: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF1 line, after processing in INV2DVLF software
Εικόνα 2.4.30: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF3
Figure 2.4.30: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF3 line, after processing in INV2DVLF software
Εικόνα 2.4.31: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF4
Figure 2.4.31: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF4 line, after processing in INV2DVLF software
Εικόνα 3.1.1: Συνδυαστική τομή γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ για τις θέσεις 1 (επάνω) και 2 (κάτω)88
Figure 3.1.1: Combined presentation and interpretation of the ERT and GPR results for line 1 (up) and line 2 (down)
Εικόνα 3.1.2: Συνδυαστική τομή γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ για τις θέσεις 3 (επάνω) και 4 (κάτω)90
Figure 3.1.2: Combined presentation and interpretation of the ERT and GPR results for line 3 (up) and line 4 (down)90 Εικόνα 3.2.1:Τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10000 Ohm.m) της ERT, όπου αναδεικνύεται η ύπαρξη δύο επιπέδων καρστικοποίησης. Άποψη προς Δύση
Figure 3.2.1: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, which highlights the existance of the two first karstification levels. View to the West
Εικόνα 3.2.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10000 Ohm.m) της ERT, σε συνδυασμό με την απεικόνιση των επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών

Figure 3.2.2: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, where the surface and
subsurface karstic geomorphs are also presented on the 3D orthomosaic
Εικόνα 3.2.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10000 Ohm.m) της ERT, όπου αναδεικνύεται η ύπαρξη δύο επιπέδων καρστικοποίησης, άποψη προς Ανατολή94
Figure 3.2.3: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, which highlights the existance of the two first karstification levels. View to the East

Επιφανειακή γεωφυσική διασκόπηση για τη διερεύνηση επέκτασης του καρστικού αγωγού Αλιστράτης Ν. Σερρών (εκτενής περίληψη)

Το σπήλαιο Αλιστράτης βρίσκεται στο Νομό Σερρών, κοντά στους πρόποδες του Όρους Μενοικίου, στην περιοχή Πετρωτό (Εικ.1.2.1). Όπως υποδηλώνει και το όνομά της, η συγκεκριμένη περιοχή δομείται από συμπαγή, βραχώδη πετρώματα και συγκεκριμένα από κρυσταλλικούς ασβεστολίθους της ζώνης της Ροδόπης (Εικ.1.2.4). Ο σχηματισμός αυτός μέσω των συστημάτων ρηγμάτων και διακλάσεων ευνοεί την υπόγεια κυκλοφορία του νερού, που με τη σειρά της, μέσω του φαινομένου της χημικής διάλυσης και της διάβρωσης έχει αναπτύξει εντός αυτού ένα σύνθετο σύστημα καρστικοποίησης. Στο βορειοανατολικό τμήμα του σπηλαίου συναντάται μία αίθουσα με έντονες κατακρημνίσεις, όπου και διακόπτεται απότομα η περαιτέρω ανάπτυξή του (Εικ. 1.2.6).

Στην περιοχή αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη καρστική και γεωμορφολογική έρευνα με σύγχρονες φωτογραμμετρικές τεχνικές με τη χρήση ΣμηΕΑ (Εικ. 1.2.8). Από τα αποτελέσματα της φωτογραμμετρικής ανάλυσης των δεδομένων πραγματοποιήθηκε η κατασκευή τρισδιάστατου νέφους σημείων, ορθο-μωσαϊκού (Εικ. 1.2.9) και ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου της περιοχής. Σε συνδυασμό με τις επιτόπου γεωμορφολογικές παρατηρήσεις διαπιστώθηκε ότι το καρστικό σύστημα του Πετρωτού αναπτύσσεται σε τρία κυρίως επίπεδα, ένα επιφανειακό, ένα βαθύτερο, τμήμα του οποίου αποτελεί και το σπήλαιο Αλιστράτης και ένα σύγχρονο, ακόμα βαθύτερο. Αναγνωρίστηκαν και αποτυπώθηκαν επιφανειακές καρστικές μορφές, όπως πεδία αμαξοτροχιών (μεγάλης έκτασης γλυφές) (Εικ. 1.2.11, 1.2.12), δολίνες (Εικ.1.2.12) και επικρεμάμενες κοιλάδες (Εικ.1.2.13), οι οποίες συνέβαλαν στον χαρακτηρισμό και την κατανόηση του καρστικού συστήματος του Πετρωτού.

Για τη διερεύνηση πιθανής πλευρικής επέκτασης του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης, σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε επιφανειακή γεωφυσική διερεύνηση, άνωθεν της αίθουσας των κατακρημνίσεων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν και εκτελέστηκαν τρεις γεωφυσικές τεχνικές, κάθετα στην κύρια διεύθυνση ανάπτυξης του σπηλαίου και της πιθανής επέκτασής του.

Αρχικά, εκτελέστηκε η τεχνική της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (electrical resistivity tomography, ERT) σε τέσσερις (4) τομές, συνολικού μήκους 940m, με ισοαπόσταση ηλεκτροδίων 5m με την γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro του Εργαστηρίου Γεωφυσικής. Δύο (2) τομές εκτελέστηκαν υπεράνω του υπάρχοντος σπηλαίου, ως τομές 'βαθμονόμησης' και άλλες δύο (2), παράλληλα στις δύο πρώτες, προς την αναμενόμενη επέκταση του καρστικού αγωγού (Εικ. 2.4.6). Με τη χρήση του λογισμικού RES2DInv, πραγματοποιήθηκε η δισδιάστατη αντιστροφή και η τοπογραφική διόρθωση των δεδομένων, γνωρίζοντας τις θέσεις των μετρήσεων έπειτα από τον υπολογισμό τους με διαφορικό σύστημα GNSS (Εικ. 2.4.1). Σε όλες τις τομές τα αποτελέσματα ανέδειξαν την ύπαρξη δύο ιδιαίτερα αντιστατικών στόχων (>7.000 Ohm.m), ενός επιφανειακού, μέχρι τα 15m βάθος και ενός βαθύτερου μέχρι το βάθος των 50m (Εικ. 2.4.8, 2.4.9, 2.4.10, 2.4.11). Οι δύο αυτοί 'στόχοι' αξιολογείται ότι αποτελούν αποτύπωμα των δύο πρώτων επιπέδων καρστικού συστήματος προς βορειοανατολικά (επιφανειακό και βαθύτερο επίπεδο καρστ - σπήλαιο Αλιστράτης) (Εικ. 2.4.12).

Ακολούθως, εφαρμόστηκε η τεχνική γεωραντάρ (GPR), σε έξι (6) τομές, συνολικού μήκους 1330m με το σύστημα της Sensors and Software και κεραία 100 MHz του Εργαστηρίου Γεωφυσικής (Εικ. 2.4.13). Για την επεξεργασία των δεδομένων (ΕΚΚΟ_Project) εφαρμόστηκε διαδικασία εφαρμογής φίλτρων (dewow, background removal, band pass, sec2 gain) (Εικ. 2.4.15) και migration. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε τοπογραφική διόρθωση των δεδομένων. Έπειτα από την παραπάνω επεξεργασία εντοπίστηκαν ισχυρές επιφάνειες ανάκλασης του σήματος και χαρακτηριστικές δομές που παρουσιάζονται σε περίπτωση ύπαρξης καρστικών εγκοίλων (Εικ. 2.4.16, 2.4.17, 2.4.18, 2.4.19, 2.4.20, 2.4.21). Με τη συνεισφορά της τεχνικής GPR αναδείχθηκε περισσότερο η ύπαρξη του επιφανειακού συστήματος καρστικοποίησης, το οποίο αναπτύσσεται σε βάθη μέχρι και τα 15m (Εικ. 2.4.22, 2.4.23).

Συμπληρωματικά εκτελέστηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος πεδίου συχνότητας VLF, σε τρεις (3) τομές, συνολικού μήκους 705m, στις ίδιες θέσεις με τις τομές ERT και GPR (Εικ. 2.4.24). Η επεξεργασία των δεδομένων περιλάμβανε την εφαρμογή των φίλτρων Frazer και Karous-Hjelt, από τα οποία προέκυψε η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους (Εικ. 2.4.26, 2.4.27, 2.4.28). Στη συνέχεια, μέσω λογισμικού INV2DVLF πραγματοποιήθηκε η δισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων και η τοπογραφική τους διόρθωση, όπου η πυκνότητα ρεύματος ανάγεται σε ειδική αντίσταση (Εικ. 2.4.29, 2.4.30, 2.4.31). Τα αποτελέσματα της μεθόδου VLF ανέδειξαν την ύπαρξη ιδιαίτερα αντιστατικών στόχων (>2.500 Ohm.m) που πιθανώς να οφείλονται στην ύπαρξη καρστικών εγκοίλων των δύο επιπέδων καρστικοποίησης.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω γεωφυσικών τεχνικών φαίνεται να αναδεικνύουν παρόμοιες γεωφυσικές δομές/ανωμαλίες, που αξιολογούνται ως δομές διαφόρων τύπων του καρστικού συστήματος. Από την συνδυαστική απεικόνιση των δεδομένων ERT και GPR (Εικ. 3.1.1, 3.1.2) πραγματοποιήθηκε σχεδιαστική απεικόνιση παράθεσης των γεωφυσικών ανωμαλιών και ταύτιση των χαρακτηριστικών δομών που εμφανίζονται και στις δύο τεχνικές. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10.000 Ohm.m) που προέκυψαν από την τεχνική της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, συνδυάζοντας το τρισδιάστατο μοντέλο αναγλύφου και το ορθο-φωτο-μωσαϊκό της περιοχής, όπως αυτό προέκυψε από την φωτογραμμετρική ανάλυση των δεδομένων του ΣμηΕΑ. Από την τρισδιάστατη αυτή απεικόνιση και η διασύνδεσή τους με επιφανειακές καρστικές μορφές (Εικ. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3).

Συμπερασματικά, η πολυπαραμετρική γεωφυσική έρευνα που εφαρμόστηκε, ανέδειξε την ύπαρξη και διασύνδεση των δύο πρώτων επιπέδων του καρστ της περιοχής και την πιθανή επέκταση του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης προς βορειοανατολικά στο ίδιο επίπεδο που αναπτύσσεται το ήδη υπάρχον σπήλαιο (30 – 50 m βάθος).

Η μελλοντική επέκταση της διερευνηθείσας περιοχής, προς βορειοανατολικά, καθώς και η δημιουργία ενός πυκνότερου δικτύου τομών των γεωφυσικών τεχνικών, σε συνδυασμό με τη συνέχιση της επιφανειακής καρστικής-γεωμορφολογικής μελέτης, θα αναδείξουν με σαφώς μεγαλύτερη λεπτομέρεια το σύνθετο καρστικό σύστημα της περιοχής Πετρωτού και της πιθανής πλευρικής επέκτασης του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης.

Near surface geophysical investigation for the possible extension of Alistrati cave in Serres Greece (extended abstract)

The cave of Alistrati is located in the Prefecture of Serres, near the foothills of Mount Menoikio, in the area of Petroto (Fig. 1.2.1). This area is structured by solid, rocky formations and specifically crystalline limestones of the Rhodope Massif (Fig. 1.2.4). This formation, through fault and fracture systems, favours the underground circulation of water. The precipitation of the water to lower levels triggers the phenomenon of dissolution and erosion, which consequently lead to the development of a complex and multilevel karst system. In the north-eastern part of the cave, a chamber filled with massive rock falls, derived from the cave's ceiling, is found. Beyond this chamber the further development of the cave is abruptly interrupted (Fig. 1.2.6).

An extensive geomorphological survey was carried out initially, for the accurate mapping of the karst surface above the cave of Alistrati, using an Unmanned Aerial System (UAS) (Fig. 1.2.8). A 3D dense point cloud, a detailed orthomosaic (Fig. 1.2.9) and a digital elevation model of the area were indirectly induced by the photogrammetric processing of the UAS images. Thus, the surface karstic landforms and the morphological structures were detected and represented in detail, in karstic-geomorphological maps. Based on this photogrammetric analysis and the field observations the karstic system of Petroto seems to be developed in three main levels. From this high resolution photogrammetric products, the detection and development of the surface karst landforms was possible. More specifically, karrenfields (Figs. 1.2.11, 1.2.12), dolines (Fig. 1.2.12) and hanging valleys (Fig. 1.2.13) of the study area were identified.

For the investigation of a possible lateral extension of the Alistrati karstic void, a detailed surface geophysical investigation was planned and carried out above the chamber with the rockfalls. More specifically, three geophysical techniques were selected and executed perpendicular to the main direction of the cave development and its possible extension.

The electrical resistivity tomography (ERT) was initially executed at four (4) profiles of 940 m total length and an electrode spacing of 5m, using the SyscalPro switch 48 unit. Two (2) profiles were performed over the existing cave for the calibration of the investigated resistivity values, while the other two (2) were carried out perpendicular to the expected direction of the karstic void (Fig. 2.4.6). The 2D inversion and topographic correction of the data was performed, after calculating the coordinates of each section by differential GNSS system (Fig. 2.4.1). The processing results, from the Res2DINV software, indicated the existence of two highly resistive targets (>7.000 Ohm.m), a shallow one up to 15m depth and a deeper to the depth of 50m (Figs. 2.4.8, 2.4.9, 2.4.10, 2.4.11). These geophysical anomalies are interpreted as the signature of the first two levels of karstification in the north-east, concerning both the first (near surface) and the second deeper (Alistrati cave) karstic levels (Fig. 2.4.12).

Moreover, the GPR technique was performed in six (6) profiles of 1.330 m total length (Fig. 2.4.13), using the Sensors & Software GPR system with a 100 MHz antenna. A standard filtering procedure, using the EKKO_Project software, was applied to process the data, including the *dewow*, *background removal*, *band pass*, *sec2 gain* (Fig. 2.4.15) and Migration filters. In addition, topographic correction of

the data was performed. The results of the technique highlighted strong signal reflection surfaces and typical reflection structures often caused by karstic voids (Figs. 2.4.16, 2.4.17, 2.4.18, 2.4.19, 2.4.20, 2.4.21). The results seem to reveal the existence of the first karstification system, which is developed at depths up to 15m (Figs. 2.4.22, 2.4.23).

Subsequently, the electromagnetic VLF method was applied to three (3) of the ERT/GPR profiles in a total length of 705 m (Fig. 2.4.24), using the ABEM WADI VLF system. The data processing, through KHFFILT software, included the application of the Frazer and Karous-Hjelt filters and determined the subsurface distribution of current density (Figs. 2.4.26, 2.4.27, 2.4.28). Moreover, the 2D inversion of the VLF data and their topographic corrections were performed in INV2DVLF software, to convert the current density to resistivity distribution (Figs. 2.4.29, 2.4.30, 2.4.31). The results of the VLF method indicated the occurrence of highly resistive targets (>2.500 Ohm.m) probably affected by the existence of karstic voids of the first two karstification levels.

The comparative results of the above-mentioned geophysical techniques appear to highlight similar geophysical anomalies, which are interpreted as different types of structures of the karst system. From the combined presentation of the ERT and GPR data (Figs. 3.1.1, 3.1.2), a comparison of geophysical anomalies and identification of characteristic structures present in both techniques was performed. Furthermore, the 3D presentation of resistive volumes (>10.000 Ohm.m), derived from the electrical resistivity tomography technique was performed, combining the 3D elevation model and the orthophoto-mosaic of the area, produced from from the photogrammetric analysis of the UAS data. From this 3D model, the development of the first two levels of karstification and their interconnection with surface karstic landforms became more obvious (Figs. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3).

In conclusion, the combined geophysical survey indicated the existence and connection of the first two karst levels of the area and the possible extension of the Alistrati karstic conduit to the northeast at the same level where the existing cave develops (30-50 m depth).

The future extension of the explored area, to the northeast, and the establishment of a denser network of sections of the geophysical techniques, in combination with the extension of the surface karst-geomorphological survey, will highlight in much greater detail the complex karst system of the Petroto area and the possible lateral extension of the Alistrati karst conduit.

Εισαγωγή

Το σπήλαιο της Αλιστράτης βρίσκεται στην περιοχή «Πετρωτό», 6 km από το Δημοτικό Διαμέρισμα Αλιστράτης, του Νομού Σερρών. Το σπήλαιο, σύμφωνα με προφορικές μαρτυρίες, ήταν γνωστό στους κατοίκους της περιοχής, πριν την εκτενή εξερεύνηση και μελέτη του. Το 1975, η ύπαρξή του γνωστοποιήθηκε στην Ελληνική Σπηλαιολογική Εταιρεία και έκτοτε πραγματοποιήθηκε σειρά επισκέψεων και εξερευνήσεων, τόσο από την ΕΣΕ, όσο και από το Πανεπιστήμιο Αθηνών. Οι εργασίες αξιοποίησής του ξεκίνησαν στα μέσα της δεκαετίας του '80 και το 1997 η λειτουργία του ανατέθηκε από το Υπουργείο Πολιτισμού στην Τοπική Αυτοδιοίκηση της Αλιστράτης.

Η συνολική επιφάνεια του σπηλαίου υπολογίζεται σε 25.000 m², ενώ το συνολικό μήκος των διαδρόμων του ανέρχεται στα 3km. Η είσοδος των επισκεπτών γίνεται μέσω τεχνητής σήραγγας. Με αφετηρία την πρώτη αίθουσα, το σπήλαιο αναπτύσσεται προς τρεις κύριες κατευθύνσεις. Η ανάπτυξή του είναι οριζόντια και δαιδαλώδης. Οι διάδρομοί του είναι επιμήκεις στην πλειονότητά τους ευρύχωροι, κυμαινόμενου πλάτους και ύψους, ενώ το δάπεδό τους συνίσταται από σημαντικού πάχους αργιλικές επιχώσεις. Ο κύριος κλάδος του σπηλαίου ταυτίζεται σχεδόν με την τουριστική διαδρομή και έχει συνολικό μήκος περίπου 1000m. Οι δύο δευτερεύοντες κλάδοι εκτείνονται εκατέρωθεν του σημείου της τεχνητής εισόδου. Ο ανατολικός κλάδος οδηγεί προς τη φυσική βαραθρώδη είσοδο του σπηλαίου.

Στο βορειανατολικό τμήμα του σπηλαίου, κοντά στην τελευταία αίθουσα του αξιοποιημένου τμήματος αναπτύσσεται η τελευταία εξερευνηθείσα αίθουσα όπου διαπιστώνεται η εμφάνιση μεγάλου όγκου κατακρημνίσεων, που προέρχονται από την οροφή του σπηλαίου. Από το σημείο αυτό δίνεται η εντύπωση ότι ο κύριος καρστικός αγωγός συνεχίζει την ανάπτυξη του προς βορειοανατολικά, υπόθεση που ενισχύεται και από την ύπαρξη ρεύματος αέρα πίσω από τον όγκο των κατακρημνίσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, αναπτύχθηκε η ιδέα διεξαγωγής γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης στον εξωτερικό χώρο του σπηλαίου έπειτα από την αίθουσα κατακρημνίσεων με σκοπό την εύρεση πιθανής πλευρικής επέκτασης προς βορειανατολικά του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης, γεγονός που αποτελεί τον κύριο στόχο της παρούσας εργασίας.

1. Γεωλογία - Καρστική Γεωμορφολογία

Ο όρος Καρστ έχει Ινδοευρωπαϊκές ρίζες, και προέρχεται από τη λέξη karra, η οποία σημαίνει πετρώδες, άγονο έδαφος. Το φαινόμενο της καρστικοποίησης περιλαμβάνει πρωταρχικά τη χημική διάλυση των καρστικών πετρωμάτων από το νερό και δευτερογενώς την μηχανική αποσάθρωσή τους, μέσω της δευτερογενούς περατότητάς τους. Η καρστικοποίηση είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη συμμετοχή μετεωρικού νερού, υπόγειων υδροθερμικών ρευστών και κυρίως από την ανάμιξη δύο ή περισσότερων ειδών νερού, με διαφορετική οξύτητα.

1.1 Καρστικές διεργασίες και Γεωμορφές

Το χαρακτηριστικό καρστικό ανάγλυφο δημιουργείται κατά βάση σε ανθρακικούς γεωλογικούς σχηματισμούς όπως ασβεστολίθους, δολομίτες και μάρμαρα, στους εβαπορίτες, όπως γύψους, ανυδρίτες και άλατα, αλλά και σε μικρότερο ποσοστό σε ανθρακικά ιζήματα. Οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από επιφανειακές και υπόγειες καρστικές μορφές, οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερα υδρολογικά χαρακτηριστικά.

1.1.1 Εξέλιξη και τύποι του Καρστ

Η εξέλιξη του Καρστ είναι αργή και συνεχόμενη και εξελίσσεται σε μεγάλες επιφανειακές και υπόγειες εκτάσεις, συντελώντας στη δημιουργία επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του Καρστ μίας περιοχής, εκτός από την χημική διάλυση και τη μηχανική αποσάθρωση, κατέχει πρωταρχικά η γεωγραφική θέση της, η γεωλογική δομή της περιοχής, ο τεκτονισμός, η υδρολογία, το κλίμα και η βλάστηση που επικρατεί.

Η εξέλιξη του καρστικού αναγλύφου είναι έντονη και εξηγείται μέσω του υδρογραφικού δικτύου και του κλίματος της περιοχής, ενώ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2019):

- 1° στάδιο: Το πρώτο στάδιο εξέλιξης περιλαμβάνει τον προ-καρστικό ποτάμιο κύκλο διάβρωσης των ασβεστολιθικών περιοχών. Σε αυτή τη φάση η επιφάνεια του εδάφους είναι μόνιμα υγρή η εξέλιξη της βλάστησης είναι κανονική, ενώ στα ασβεστολιθικά πετρώματα αναπτύσσονται λίγες ρωγμές οι οποίες συνήθως είναι καλυμμένες από βλάστηση και ιζήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται ρηχά και συντελεί στην ανάπτυξη των ποταμών και των κοιλάδων.
- 2° στάδιο: Σε αυτή τη φάση εξέλιξης πραγματοποιείται δημιουργία και διάνοιξη των ρωγμών. Αυτές με τη σειρά τους απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και των επιφανειακών υδάτων συντελώντας με αυτόν τον τρόπο στη βαθύτερη κυκλοφορία τους. Η βαθύτερη αυτή κυκλοφορία των υδάτων συνεισφέρει στην έντονη καρστικοποίηση και διάβρωση. Παρατηρείται μετάβαση από την μονίμως υγρή ζώνη σε περιοδική υδρολογική ζώνη, ενώ η καρστικοποίηση είναι πλέον εμφανής.
- 3° στάδιο: Στο τρίτο στάδιο εξέλιξης παρατηρείται διεύρυνση των ρωγμών και εμφάνιση επιφανειακών καρστικών μορφών όπως γλυφές και δολίνες. Η καρστικοποίηση αντικαθιστά την διάβρωση του ποτάμιου κύκλου και τα υδατορεύματα και τα μικρότερα ποτάμια σταδιακά αποξηραίνονται.

- 4° στάδιο: Σε αυτό το στάδιο, οι ρωγμές έχουν διευρυνθεί τόσο, ώστε να εμποδίζουν εντελώς την επιφανειακή απορροή. Οι καρστικές επιφάνειες είναι πλέον εμφανώς ξηρές και το υδρογραφικό δίκτυο έχει υποχωρήσει υπογείως, ρέοντας μέσω καρστικών αγωγών, ενώ παράλληλα παρατηρείται ο σχηματισμός καταβοθρών.
- 5° στάδιο: Στο στάδιο αυτό παρατηρείται δημιουργία δολινών στους πυθμένες των υπογείων κοιτών. Εμφανίζονται παλαιά στόμια ποταμών σε διαφορετικά επίπεδα από τον κύριο ποταμό, ενώ οι κοιλάδες μεταβαίνουν προοδευτικά σε τυφλές κοιλάδες. Οι καρστικοί αγωγοί και οι κοιλότητες των σπηλαίων εμφανίζονται αισθητά διευρυμένες.
- 6° στάδιο: το έκτο στάδιο είναι ουσιαστικά το τελευταίο στάδιο εξέλιξης του Καρστ. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται εμφάνιση καταβοθρών στις τυφλές κοιλάδες, με αποτέλεσμα οι υπόγειοι ποταμοί να αποξηραίνονται. Οι δολίνες ενώνονται και δημιουργούνται ουβάλες. Η καρστικοποίηση είναι έντονη, διαλύοντας και λεπταίνοντας το στρώμα του επικαρστ, με αποτέλεσμα, την κατάπτωση των οροφών των σπηλαίων και των καρστικών αγωγών και την έκθεσή τους στην επιφάνεια.
- 7° στάδιο: το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την διακοπή της καρστικοποίησης. Όλες οι επιφανειακές καρστικές μορφές καλύπτονται από νεότερα ιζήματα, ενώ οι υπόγειες σταθεροποιούνται και ενώνονται μεταξύ τους.

Η διαφορετική μορφή και οι διαφορετικές συνθήκες και παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη του καρστ είναι αυτοί που καθιστούν απαραίτητο τον διαχωρισμό του σε διαφορετικές κατηγορίες. Στη φύση συναντώνται περιοχές με ανεπτυγμένο καρστ τόσο επιφανειακό όσο και υπόγειο καρστ. Ωστόσο, υπάρχουν και περιοχές όπου η εμφάνιση επιφανειακών καρστικών μορφών είναι σπάνια, ενώ οι ασβεστολιθικές εμφανίσεις είναι συχνά καλυμμένες από ιζήματα και παρουσιάζουν ρηχές μεμονωμένες καρστικές μορφές. Η πρώτη περίπτωση ονομάζεται ολοκαρστ ενώ η δεύτερη μεροκαρστ. Ενδιάμεσα των δύο αυτών ακραίων περιπτώσεων συναντώνται και άλλοι μεταβατικοί τύποι καρστ

Ο τύπος του ολοκαρστ όπως υποδεικνύει και η λέξη πρόκειται για ολοκληρωμένο καρστ όπου οι περιοχές στις οποίες αναπτύσσεται παρατηρείται ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό επιφανειακής κάλυψης από ανθρακικούς παχυστρωματώδεις σχηματισμούς, έντονη υπόγεια κυκλοφορία του νερού σε μεγάλα βάθη, ελάχιστη έως καθόλου φυτοκάλυψη και έντονος τεκτονισμός με παρουσία ρηγμάτων και διακλάσεων που ενισχύουν το φαινόμενο της καρστικοποίησης.

Η πλέον σύγχρονη και πλέον αποδεκτή κατηγοριοποίηση των τύπων του καρστ είναι αυτή των Klimchouk & Ford (2000), στην οποία περιλαμβάνονται

- i. το συγγενετικό καρστ,
- ii. το ενδοστρωματικό καρστ,
- iii. το εκτεθειμένο καρστ,
- iv. το καλυμμένο καρστ και
- ν. το παλαιοκαρστ.

Το συγγενετικό καρστ αφορά μία σπάνια μορφή καρστ η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη του φαινομένου της καρστικοποίησης κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά την απόθεση και την ανύψωσή τους.

Το ενδοστρωματικό καρστ είναι ο τύπος καρστ, όπου τα ανθρακικά πετρώματα και η καρστικοποίησή τους λαμβάνει χώρα σε κάποιο βάθος, σε εναλλαγή με άλλα μη διαλυτά πετρώματα. Το ενδοστρωματικό καρστ με τη σειρά του διαχωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες, οι οποίες είναι το <u>βαθύ καρστ</u>, που δεν είναι καθόλου εμφανές στην επιφάνεια, το <u>υποκείμενο καρστ</u>, που βρίσκεται κάτω από αδιάλυτα στρώματα αλλά εμφανίζεται κατά τόπους στην επιφάνεια και το <u>περιχαρακωμένο καρστ</u>, στο οποίο οι κοιλάδες το ποταμών περιβάλλουν και έχουν διαβρώσει περιμετρικά όλο το πάχος των καρστικών και αδιάλυτων πετρωμάτων.

Το *εκτεθειμένο καρστ*, όπως μαρτυρά και το όνομά του αφορά τον τύπο καρστ που βρίσκεται στην επιφάνεια, δίχως την παρουσία κάποιου υπερκείμενου αδιάλυτου καλύμματος. Περιλαμβάνει τρεις υποκατηγορίες, οι οποίες είναι το ανοικτό καρστ, το απογυμνωμένο και το αποκαλυμμένο καρστ.

Στο *ανοικτό καρστ* τα καρστικά πετρώματα δεν έχουν καλυφθεί ποτέ στο παρελθόν από άλλα μη διαλυτά στρώματα, αναπτύσσεται σχεδόν εξ ολοκλήρου κατά την έκθεσή του και ελέγχεται από την επιφανειακή και υπο-επιφανειακή καρστικοποίηση.

Το απογυμνωμένο καρστ προσδιορίζει το υποκείμενο ή περιχαρακωμένο καρστ του οποίου το αδιάλυτο κάλυμμα αφαιρέθηκε. Οι καρστικές μορφές που συναντώνται σε αυτόν το τύπο καρστ δημιουργούνται κατά την έκθεσή ή κληρονομούνται από προηγούμενο στάδιο ανάπτυξης.

Τέλος, το *αποκαλυμμένο καρστ* πρόκειται για *ενδοστρωματικό καρστ* που έχει έρθει στην επιφάνεια έπειτα από τη διάβρωση του των ιζημάτων που το κάλυπταν. Συνήθως, τα ιζήματα που κάλυπταν τον τύπο αυτό προέρχονται από τη διάβρωση των ίδιων των ανθρακικών σχηματισμών.

Το καλυμμένο και ενταφιασμένο καρστ αφορά το καρστ το οποίο αρχικά εκτέθηκε στην επιφάνεια και στη συνέχεια καλύφθηκε από μη συνεκτικά ιζήματα. Το καλυμμένο καρστ έχει μικρό πάχος καλύμματος και η καρστικοποίηση συνεχίζεται, ενώ το ενταφιασμένο καρστ βρίσκεται θαμμένο βαθύτερα όπου η διαδικασία της καρστικοποίησης έχει τερματιστεί.

Τέλος, ο τελευταίος τύπος καρστ είναι το *παλαιοκαρστ*, το οποίο είναι απολιθωμένο καρστ που το υδρολογικό του δίκτυο είναι εντελώς αποκομμένο και δεν παρουσιάζει καμία επικοινωνία με το σύγχρονο.

1.1.2 Επιφανειακές Καρστικές Μορφές

Το φαινόμενο της καρστικοποίησης πρωταρχικά αναγνωρίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, όπου είναι υπεύθυνο για το χαρακτηριστικό ανάγλυφο και τις γεωμορφές που καθιστούν την μορφολογία του ξεχωριστή εν σχέση με οποιαδήποτε άλλη μη καρστική περιοχή.

Οι κύριες επιφανειακές καρστικές μορφές είναι

- i. οι γλυφές,
- ii. οι δολίνες,
- iii. οι ουβάλες,
- iv. οι πόλγες,
- ν. οι καρστικές πηγές και
- vi. οι καρστικές κοιλάδες.

Οι **γλυφές** είναι οι μικρότερες αναγνωρίσιμες επιφανειακές καρστικές μορφές. Δημιουργούνται σε εκτεθειμένες επιφάνειες των καρστικών πετρωμάτων, έπειτα από χρόνια διάλυση. Πιο αναλυτικά, λόγω της προοδευτικής επιφανειακής κατά βάθος διάλυσης αναπτύσσεται και η οριζόντια έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αυλακώσεων. Το διαλυόμενο υλικό συγκεντρώνεται στο δάπεδο των αυλακώσεων και έτσι διατηρείται η υγρασία η οποία συμβάλει στην συνέχιση της διάλυσης κατά βάθος.

Ανάλογα με το βάθος και το μήκος ανάπτυξης τους διακρίνονται σε μικρογλυφές, με μέγεθος μικρότερο από 1cm, σε γλυφές, από 1cm μέχρι 10m και σε πεδίο γλυφών με μέγεθος μεγαλύτερο από 10m.

Ο σχηματισμός τους λαμβάνει χώρα κυρίως σε επιφάνειες του εδάφους, σε κάθετες στρώσεις, σε επιφάνειες στρωμάτων και κατά μήκος διακλάσεων, ενώ η ανάπτυξη τους εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση, τη λιθολογία του σχηματισμού, την κλίση της επιφάνειας, την κατεύθυνση ροής του νερού και την ύπαρξη βλάστησης.

Διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις *επιφανειακά ελεύθερες γλυφές* και τις <u>καλυμμένες από</u> <u>βλάστηση γλυφές</u>.

Οι *επιφανειακά ελεύθερες γλυφές* ανάλογα με τη γεωμετρία και τον τρόπο ανάπτυξής τους διαχωρίζονται περαιτέρω (Εικ. 1.1.1)

- σε κοίλες γλυφές,
- II. σε ημικυκλικές κλιμακωτές γλυφές,
- III. σε μαιανδρικές γλυφές,
- IV. σε αυλακοειδείς και ρηχές αυλακοειδείς γλυφές,
- V. σε συραγγοειδείς γλυφές και
- VI. σε αιχμηρές γλυφές

Οι **δολίνες** είναι οι αμέσως επόμενες σε μέγεθος καρστικές μορφές και αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της διάλυσης και εμβάθυνσης των καρστικών σχηματισμών, της κατάρρευσης ή καθίζησης και της διεύρυνσης των ρωγμών και των γλυφών. Μορφολογικά, οι δολίνες αποτελούν κλειστά κυκλικά κυκλώματα με υπόγεια αποστράγγιση. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως δεκάδες μέτρων, η διάμετρός τους μπορεί να φτάσει έως και 1.000m και η κλίση των τοιχωμάτων τους μπορεί να είναι απότομη ή ομαλή.



Εικόνα 1.1.1: a) Κοίλες γλυφές, b) Μαιανδρικές γλυφές c) Γλυφές στις επιφάνειες διακλάσεων, από την περιοχή άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης.

Figure 1.1.1: a) kamenica, b) meanderkarren and c) karrenfield developed on a joint system, from the area above the cave of Alistrati.

Η κατηγοριοποίησή τους με βάση τα μορφοτεκτονικά τους χαρακτηριστικά περιλαμβάνει τις παρακάτω κατηγορίες (Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011):

- i. *Στρωματοειδείς δολίνες*, οι οποίες αναπτύσσονται στις επιφάνειες στρώσης, σε λεπτά γεωλογικά στρώματα, έχουν ήπιες κλίσεις, κυκλικό σχήμα και μικρό βάθος ανάπτυξης.
- Δολίνες σε ζώνες διάρρηξης, οι οποίες αναπτύσσονται σε ζώνες διάρρηξης, συνήθως καλύπτονται από πεδία γλυφών και το σχήμα τους είναι ακανόνιστο, ακολουθώντας τις τεκτονικές δομές
- iii. Οι στρωματοειδείς διαρρηγμένες δολίνες, συνδυαστική κατηγορία των παραπάνω
- iv. *Ρηξιγενείς*, οι οποίες αναπτύσσονται στις ρηξιγενείς ζώνες και ακολουθούν τη διεύθυνση της
 ζώνης, ενώ η ανάπτυξή τους καθορίζεται από το βάθος ανάπτυξης της ζώνης αυτής.
- *Δολίνες κοντά σε ρήγμα,* είναι οι δολίνες που η μία τους πλευρά συνορεύει με ρήγμα και η κατεύθυνση ανάπτυξης τους ακολουθεί αυτή του ρήγματος.
- vi. Δολίνες σε ζώνες ρηγμάτων, είναι οι δολίνες που αναπτύσσονται εξ ολοκλήρου εντός ρηξιγενών ζωνών και ακολουθούν πλήρως την διεύθυνση ανάπτυξής τους.

- vii. Δολίνες γεωλογικής επαφής, είναι οι δολίνες που αναπτύσσονται κατά μήκος της επαφής δύο σχηματισμών
- νiii. Επαναλαμβανόμενες δολίνες, οι οποίες σχηματίζονται σε οριζόντιες επιφάνειες ανθρακικών πετρωμάτων, που επικαλύπτονται από αδιαπέρατα πετρώματα.

Η κατηγοριοποίηση των δολινών, με βάση το σχήμα τους, έχει όπως παρακάτω:

- Δισκοειδείς δολίνες. Πρόκειται για δολίνες με δισκοειδές σχήμα, που η διάμετρός τους είναι αισθητά μεγαλύτερη από το βάθος τους. Τα τοιχώματά τους παρουσιάζουν ήπιες κλίσεις και το δάπεδο τους είναι καλυμμένο με αδιάλυτα ιζήματα όπως terra rossa.
- *Δολίνες καθίζησης*. Αυτός ο τύπος δολινών σχηματίζεται σε λιγότερο διαλυτούς ανθρακικούς σχηματισμούς, όπως δολομίτες, μέσω της ταχείας ή βαθμιαίας καθίζησης λόγω της διάβρωσης του βασικού επιπέδου του ενδοστρωματικού καρστ.
- iii. Χοανοειδείς διαμορφωμένες δολίνες. Αναπτύσσονται υπό τη μορφή χοανών και η διάμετρός τους είναι παραπλήσια με το βάθος τους. Τα πρανή τους είναι πιο απότομα και ο σχηματισμός τους λαμβάνει χώρα σε έντονα διαλυμένους και τεκτονικά καταπονημένους ανθρακικούς σχηματισμούς. Στο κατώτερο σημείο του δαπέδου τους παρατηρείται συνήθως η ύπαρξη καταβόθρας.
- iv. Εγκατακρημνισιγενείς δολίνες (Εικ. 1.1.2). Παρουσιάζουν τη μορφή φρεατίου και συνήθως σχηματίζονται στην τομή δύο κάθετων ρηγμάτων, έπειτα από την κατάρρευση της οροφής κάποιου υπόγειου καρστικού εγκοίλου. Τα τοιχώματά τους είναι κατακόρυφα και το βάθος τους είναι συχνά μεγαλύτερο από τη διάμετρό τους.

Άλλοι τύποι δολινών είναι επίσης οι παρακάτω:

- i. Λιμνο-δολίνες. Πρόκειται ουσιαστικά για καρστικές λίμνες ή καρστικές κοιλότητες, όπου το νερό συγκρατείται λόγω της ύπαρξης κάποιου αδιαπέρατου στρώματος.
- *Δολίνες* διάλυσης. Οι δολίνες που σχηματίζονται με τη συνέχιση της χημικής διάλυσης και την διεύρυνση των γλυφών.
- iii. Καλυμμένες δολίνες. Έπειτα από την καρστικοποίηση και διαμόρφωση των κοιλοτήτων του βασικού ανθρακικού πετρώματος παρατηρείται καθίζηση και απορρόφηση των υπερκείμενων κλαστικών ιζημάτων και δημιουργία αυτού του τύπου των δολινών
- iv. Ανθρωπογενείς Δολίνες. Οι δολίνες που σχηματίστηκαν από ανθρώπινη παρέμβαση, ή που η από κατάρρευση λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας.



Εικόνα 1.1.2: Εγκατακρημνισιγενής δολίνη στην περιοχή άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης. Figure 1.1.2: Collapse doline from the area above the Alistrati cave.

Οι επόμενες σε μέγεθος καρστικές γεωμορφές είναι οι **ουβάλες**. Πρόκειται για μεγάλα καρστικά βυθίσματα με πολύπλοκο σχήμα και περίγραμμα. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στην ένωση των δολινών. Πολύ συχνά συναντώνται στους πυθμένες των ξηρών και τυφλών κοιλάδων. Με την ροή του νερού στους πυθμένες των καρστικών αυτών κοιλάδων ξεκινά η διάβρωση και η δημιουργία δολινών και στη συνέχεια αυτή επεκτείνεται και στις περιοχές ανάμεσα στις δολίνες με αποτέλεσμα τη δημιουργία ουβάλων. Στην περίπτωση των τυφλών κοιλάδων το νερό ρέει υπόγεια και δημιουργεί ένα κοίλωμα που αποτελεί *ουβάλα*. Οι διαστάσεις των ουβάλων είναι από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι κάποια χιλιόμετρα, ενώ το βάθος τους μπορεί να ανέλθει μέχρι τα εκατό μέτρα.

Οι **πόλγες** είναι οι μεγαλύτερες σε έκταση επιφανειακές καρστικές μορφές και αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της συνεχόμενης καρστικής εξέλιξης. Ένας από τους πιο αποδεκτούς ορισμούς για τις πόλγες υποστηρίζει, σύμφωνα με τον Gams (2001) ότι:

«Οι πόλγες είναι μεγάλες κλειστές λεκάνες του καρστ, με επίπεδο πυθμένα, με απότομες κλίσεις στις πλαγιές τους και με αποστράγγιση των επιφανειακών νερών».

Στους πυθμένες των πολγών συναντώνται ασβεστόλιθοι, κλαστικό υλικό και μεικτά στρώματα που προέρχονται από τη διάβρωση και διάλυση των απότομων πλαγιών τους. Επίσης, στην περίπτωση που ποταμός διαρρέει την πόλγη στο επίπεδο του πυθμένα της παρατηρείται συσσώρευση ποτάμιων ιζημάτων, ενώ επίσης αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ιζημάτων μίας πόλγης είναι λιμναίας φάσης. Το πάχος αυτού του συσσωρευμένου υλικού μπορεί να φτάσει και εκατοντάδες μέτρα. Η ύπαρξη των ιζημάτων λιμναίας φάσης υποδεικνύει το προηγούμενο στάδιο ανάπτυξης μίας πόλγης κατά το οποίο, πριν τον σχηματισμό καταβοθρικών συστημάτων αποτελούσε

καρστική μορφή σε συνθήκες λίμνης. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των *πολγών* αποτελούν οι καταβόθρες, οι οποίες αποφορτίζουν τα επιφανειακά ύδατα και συντελούν στην υπόγεια κυκλοφορία τους.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των *πολγών* είναι ο ενεργός τεκτονισμός, η πρόσφατη και ενεργή υδρολογία και οι μορφο-κλιματικές συνθήκες.

Σύμφωνα με την εξέλιξη των διαφορετικών λεκανών οι πόλγες μπορούν να ταξινομηθούν σε τεκτογενείς πόλγες, σε ενδο-ορεινές και σε πόλγες τροπικών περιοχών.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μίας πόλγης εξαρτώνται κυρίως από τη θέση της επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα. Εφόσον αυτή βρίσκεται σε μεγάλο βάθος από τον πυθμένα της πόλγης, τότε αυτή παραμένει ξηρή, ενώ αν βρίσκεται σχετικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους τότε η πόλγη χαρακτηρίζεται ως υδρολογικά ενεργή. Σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση στην πόλγη παρατηρείται:

- Εισροή υδάτων από καρστικές πηγές και ποταμούς
- Αποφόρτιση των επιφανειακών υδάτων από τις καταβόθρες
- Ύπαρξη εσταβέλων, μίας ιδιαίτερης γεωμορφής από την οποία εκτοξεύεται νερό λόγω της αλλαγής του πιεζομετρικού επιπέδου του υπεδαφικού νερού
- Υπαρξη εποχιακών ή μόνιμων λιμνών και ελών

Σύμφωνα με τους Ford & Williams (1989) οι πόλγες είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Πόλγες ορίων επαφής, οι οποίες αναπτύσσονται σε περιοχές μεταξύ διαλυτών και μη διαλυτών πετρωμάτων
- Δομικές πόλγες, όπου ο πυθμένας τους αποτελείται από μη καρστικά και αδιαπέρατα πετρώματα, με αποτέλεσμα να αναπτύσσουν ρηχό υδροφόρο ορίζοντα και τα ύδατα τους να ρέουν αναγκαστικά επιφανειακά
- Πόλγες επιπέδων βάσης, των οποίων ο πυθμένας τους αποτελείται από καρστικά πετρώματα και ο υδροφόρος ορίζοντας ανέρχεται σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων οδηγώντας στον σχηματισμό εποχιακών λιμνών.

Ένας άλλος τύπος επιφανειακά αναγνωρίσιμης καρστικής γεωμορφής είναι οι **καρστικές πηγές**. Αυτές συναντώνται στους πυθμένες κοιλάδων, στις βάσεις πλαγιών των βουνών, στα όρια πολγών και σε σημεία που τα ρήγματα φτάνουν στο επίπεδο της υπόγειας ροής των υδάτων.

Τέλος, ένας άλλος τύπος επιφανειακών καρστικών μορφών είναι οι *καρστικές κοιλάδες*. Πρόκειται για επιμήκεις καρστικές μορφές με απότομα πρανή, όπου παρατηρείται η ύπαρξη ρωγμών, διακλάσεων και ρηγμάτων, στα οποία εισρέει ένα ποσοστό των υδάτων, μειώνοντας έτσι την κινητική του ενέργεια και την ικανότητα μηχανικής διάβρωσης.

Το νερό διαπερνώντας τα ρήγματα τις ρωγμές και τις διακλάσεις διαλύει τα τοιχώματα της κοιλάδας και διευρύνει τα όποια ανοίγματα, με αποτέλεσμα να εισρέει σε μεγαλύτερο βάθος και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τα ανοίγματα που σχηματίζονται, όπου παρατηρείται συνολική απώλεια του νερού ονομάζονται **καταβόθρες**.

Σε άλλη περίπτωση, όταν παρατηρείται μείωση της κινητικής ενέργειας, της ταχύτητας ροής του νερού και της κατά βάθος διάβρωσης, τότε η ροή ενός παραποτάμου, στο σημείο ένωσης με μία κύρια κοιλάδα, δεν μπορεί να ακολουθήσει τον ρυθμό της κατά βάθος διάβρωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία απότομη πτώση προς την κύρια κοιλάδα. Αυτή η μορφή ονομάζεται **επικρεμάμενη** κοιλάδα.

Με την ύπαρξη καταβοθρών η ροή του νερού σταματάει και έτσι οι *επικρεμάμενες κοιλάδες* μεταβαίνουν σε ξηρές κοιλάδες. Σε αυτές παρατηρείται διακοπή της ποτάμιας διάβρωσης και όποια αλλαγή τους οφείλεται στην καρστική εξέλιξη (Εικ. 1.1.3).



Εικόνα 1.1.3: Επικρεμάμενη κοιλάδα άνωθεν του καρστικού αγωγού του σπηλαίου Αλιστράτης. Figure 1.1.3: Hanging valley in the area above the cave of Alistrati.

Σε επόμενο στάδιο, παρατηρείται η συνέχιση της διάβρωσης αντίθετα με τη ροή του ποταμού.

Συγχρόνως, κατάντη της καταβόθρας, σταματά η διάβρωση. Στη θέση της καταβόθρας προκαλείται ο σχηματισμός κατακόρυφων πλαγιών, σχηματίζοντας έτσι τη γεωμορφή της τυφλής κοιλάδας. Σε τελικό στάδιο, η ροή του νερού με αντίθετη κατεύθυνση συνεχίζεται ανάντη της καταβόθρας και αν σχηματιστεί άλλη καταβόθρα τότε ανάμεσα των δύο αναπτύσσεται *ξηρή* και *τυφλή κοιλάδα*. Ακολούθως, ανάντη της καινούργιας καταβόθρας παρατηρείται ο σχηματισμός τυφλής κοιλάδας. Το φαινόμενο αυτό της εξέλιξης της κοιλάδας ονομάζεται επιπεδωμένη τυφλή κοιλάδα.

Μία ιδιαίτερα σημαντική επιφανειακή γεωμορφή είναι και τα *φαράγγια* σε καρστικές περιοχές. Αυτά χαρακτηρίζονται ως βαθιές χαράδρες με απότομες κατακόρυφες πλαγιές. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στη έντονη κατά βάθος διαβρωτική δράση ιδιαίτερα ορμητικών υδατορευμάτων στα καρστικά συστήματα, σε συνδυασμό με τεκτονικές διεργασίες (Εικ. 1.1.4).



Εικόνα 1.1.4: Το φαράγγι του ποταμού Αγγίτη στην περιοχή Πετρωτό Αλιστράτης. Figure 1.1.4: The canyon of Aggitis river.

1.1.3 Υπόγειες Καρστικές Μορφές

Η καρστικοποίηση ενός καρστικού πετρώματος λαμβάνει χώρα από την επιφάνεια προς το υπέδαφος. Τα επιφανειακά ύδατα κατεισδύουν υπόγεια μέσω συστημάτων διακλάσεων και ρωγμών και συντελούν στην υπόγεια διάλυση του καρστικού πετρώματος.

Η εξέλιξη ενός καρστικού συστήματος ξεκινά από την επιφάνεια και καταλήγει υπόγεια και για τον λόγω αυτό οι επιφανειακές καρστικές μορφές συνδέονται άμεσα με τις υπόγειες.

Οι κύριες υπόγειες καρστικές μορφές είναι

- i. τα καρστικά φρέατα,
- ii. τα *σπήλαια* και
- iii. οι καρστικοί αγωγοί.

Τα *καρστικά φρέατα* είναι υπόγειοι χώροι που ξεκινούν από επιφανειακά ανοίγματα και κατευθύνονται κατακόρυφα προς το βάθος φτάνοντας σε πολλές περιπτώσεις πάνω από ένα χιλιόμετρο. Σχηματίζονται από φρεατιοειδείς δολίνες και από κάθετες τομές δύο ή περισσότερων ρηγμάτων. Πρόκειται για παλιές καταβόθρες ή οδούς διέλευσης υδάτων και αποτελούν τη μετάβαση από τις επιφανειακές στις υπόγειες καρστικές μορφές.

Τα **σπήλαια** είναι υπόγειοι οριζόντιοι και υπο-οριζόντιοι χώροι που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της Γης, ενώ πολύ συχνά έχουν άμεση σύνδεση με την επιφάνεια. Η δημιουργία και η εξέλιξη των σπηλαίων καρστικού τύπου έχει άμεση σχέση με την καρστικοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών, όπως των ασβεστολίθων, των δολομιτών και των μαρμάρων. Η χημική διάλυση των πετρωμάτων ευνοείται από την ύπαρξη ασυνεχειών, διακλάσεων και ρηγμάτων, που αναπτύσσονται ιδιαίτερα σε τέτοιου τύπου πετρώματα (Εικ. 1.1.5). Ακολουθώντας τις κατευθύνσεις των τεκτονικών δομών τα σπήλαια μπορούν να φτάσουν σε μήκος αρκετών χιλιομέτρων.

Τέλος, οι *καρστικοί αγωγοί* έχουν άμεση σχέση με τις υπόλοιπες υπόγειες καρστικές μορφές και αποτελούν διόδους κυκλοφορίας υπόγειων υδάτων και ποταμών. Όταν το νερό τρέχει προς τα υπόγεια τμήματα τα ψηλότερα συστήματα καρστικών αγωγών παραμένουν ξηρά, ενώ τα χαμηλότερα διαποτισμένα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη ενεργών καρστικών αγωγών όπως για παράδειγμα το σπήλαιο πηγών Αγγίτη (Εικ. 1.1.6) και την ύπαρξη ανενεργών καρστικών αγωγών όπως είναι το σπήλαιο Αλιστράτης (Εικ. 1.1.7)



Εικόνα 1.1.5: Το σπήλαιο του Αγ. Γεωργίου στην περιοχή Πετρωτό, όπου είναι εμφανής η ανάπτυξη του καρστικού αγωγού κατά μήκος συστημάτων διακλάσεων. Figure 1.1.5: The cave of St. George in "Petroto" area, where the development of the karstic system in the direction of the main joint system, is obvious.



Εικόνα 1.1.6: Στιγμιότυπο από το σπήλαιο πηγών Αγγίτη σε βάθος τριών χιλιομέτρων από τη φυσική είσοδο, όπου είναι εμφανής η ύπαρξη ενεργού καρστικού αγωγού. Figure 1.1.6: The cave of Aggitis, an example of an active karstic conduit of the area.



Εικόνα 1.1.7: Στιγμιότυπο από αίθουσα του σπηλαίου Αλιστράτης (ανενεργός καρστικός αγωγός). Figure 1.1.7: Image from Alistrati cave (inactive karstic conduit).

1.2 Φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της υπό έρευνας περιοχής

Οι κυριότερες μορφολογικές διακυμάνσεις της περιοχής ενδιαφέροντος είναι ο **ορεινός όγκος του Παγγαίου**, στα νότια, ο **ορεινός όγκος του Μενοικίου**, στα βορειοδυτικά, το **όρος Φαλακρό** στα βόρεια, η **κοιλάδα της Δράμας** και η **κοιλάδα του Στρυμόνα** (Εικ. 1.2.1).



Εικόνα 1.2.1: Δορυφορική εικόνα απεικόνισης των γεωγραφικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Figure 1.2.1: Satelite image with the main geographic characteristics of the survey area.

Το **όρος Παγγαίο** αναπτύσσεται νότια της περιοχής μελέτης και αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στη ροή των επιφανειακών υδάτων (ποταμών) προς τον νότο. Το μέγιστο υψόμετρό του φθάνει τα 1956m. Ο κυριότερος ορεινός όγκος που έχει και άμεση σχέση με την ανάπτυξη του καρστικού συστήματος του Πετρωτού, είναι αυτός του **Μενοικίου**. Ξεκινώντας από την κοινότητα Αλιστράτης αναπτύσσεται δυτικά-βορειοδυτικά μέχρι τα σύνορα της Βουλγαρίας. Έχει μέγιστο υψόμετρο 1.963m και τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατά του τροφοδοτούν τις λεκάνες της Δράμας και του Στρυμόνα.

Η **λεκάνη της Δράμας** αναπτύσσεται σε διεύθυνση BΔ – NA. Έχει μήκος περίπου 50 χιλιόμετρα και μέσο πλάτος 15 χιλιομέτρων, ενώ λειτουργεί ως φυσικός συλλέκτης των υδάτων των ορεινών όγκων του Μενοικίου, του Φαλακρού και του Παγγαίου. Οι επιμέρους ποταμοί που αναπτύσσονται στη λεκάνη της Δράμας καταλήγουν στον ποταμό Αγγίτη, ο οποίος πηγάζει από το όρος Φαλακρό (Σπήλαιο Πηγών Αγγίτη) και κατευθύνεται νοτιοδυτικά διασχίζοντας το γνωστό φαράγγι των στενών της Πέτρας, το οποίο αποτελεί τη μοναδική διέξοδο των επιφανειακών απορροών της λεκάνης της Δράμας, καταλήγοντας στη λεκάνη του Στρυμόνα και συμβάλλοντας με τον ποταμό Στρυμόνα. Αυτός με την σειρά του εκβάλλει στον Στρυμονικό κόλπο. Το απόλυτο υψόμετρο της κοίτης του Αγγίτη στην περιοχή του φαραγγιού είναι 45m.

Παρά την ορεινή μορφολογία της ευρύτερης περιοχής, **η περιοχή του Πετρωτού** χαρακτηρίζεται από ήπια μορφολογία, με υψόμετρα που δεν ξεπερνούν τα 250m. Η ήπια αυτή μορφολογία συνεχίζεται και νοτιότερα του φαραγγιού μέχρι τους πρόποδες του Παγγαίου. Το φαράγγι του ποταμού Αγγίτη (Εικ. 1.2.2) αποτελεί την μόνη μορφολογική ανωμαλία της περιοχής και αναπτύσσεται σε διεύθυνση BBA – NNΔ.

Οι παριές του φαραγγιού είναι απότομες με μέγιστο ύψος 70m, ενώ το πλάτος του κυμαίνεται από 100m έως 140 m.



Εικόνα 1.2.2: Πανοραμική εικόνα του φαραγγιού του Αγγίτη, όπου διαφαίνεται η είσοδος του σπηλαίου Αλιστράτης και του σπηλαίου του Ορφέα (https://earth.google.com). Figure 1.2.2: Panoramic view of the Aggitis canyon, where the entrances of Alistrati and Orfeas caves are marked with yellow arrows (https://earth.google.com).

<u>Το γερασμένο</u> ανάγλυφο της περιοχής του Σπηλαίου και γενικότερα του Πετρωτού, σε συνδυασμό με τα πετρώματα έχει συμβάλει στο αμελητέο υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται κατά τη διεύθυνση των κυρίων ρηγμάτων.

Στην περιοχή του Πετρωτού εκτός από το ήδη γνωστό τουριστικό Σπήλαιο της Αλιστράτης και το Σπήλαιο του Ορφέα, έχουν σχηματιστεί και άλλα σημαντικά καρστικά έγκοιλα όπως το Σπήλαιο του Αγ. Γεωργίου σε πολύ μικρή απόσταση από το σπήλαιο του Ορφέα, το Σπήλαιο Περιστερώνας στην νοτιοανατολική περιοχή του Πετρωτού και πολλά άλλα σπήλαια, σπηλαιοβάραθρα, βραχοσκεπές και δολίνες που δείχνουν την έντονη καρστικοποίηση αυτής της περιοχής (Εικ. 1.2.3).



Εικόνα 1.2.3: Δορυφορική εικόνα όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των κύριων σπηλαίων της περιοχής του Πετρωτού καθώς και η θέση των πηγών Γαλάζια Νερά. Figure 1.2.3: Satelite image, where the most important caves of "Petroto" area, as well as the "Galazia Nera" springs are presented with red pins

1.2.1 Γεωλογική δομή

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή του Σπηλαίου Αλιστράτης είναι ουσιαστικά δύο.

- Ο πρώτος σχηματισμός αποτελείται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα, κυρίως χαλαρά, ενώ,
- II. Ο δεύτερος ανήκει στην μεταμορφωμένη μάζα της Ροδόπης και εμφανίζεται στην περιοχή με τους κρυσταλλικούς ασβεστολίθους (Εικ. 1.2.4).

Μια μικρή εμφάνιση πλουτωνικών πετρωμάτων, και ειδικότερα γρανοδιορίτη, νότια – νοτιοανατολικά του σπηλαίου, δεν θεωρείται σημαντική τόσο ως προς την έκταση εμφάνισης όσο και ως προς την επιρροή της στην σπηλαιογένεση και το καρστ της περιοχής.

Σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του IFME, Φ.Χ Δράμα και Φ.Χ Προσοτσάνη, και σύμφωνα με τον Γιαννόπουλο (2000) τα τεταρτογενή ιζήματα αποτελούνται αναλυτικά από:

- Μη συνεκτικές σύγχρονες προσχώσεις (άμμο, άργιλο, κροκάλες) και κατά θέσεις ιλύες και χάλικες, που έχουν μεταφερθεί από τον ποταμό Αγγίτη. Οι προσχώσεις αυτές απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος της πεδιάδας της Δράμας και ιδίως του κεντρικού τμήματος αυτής.
- Ποτάμια αναβαθμίδα του ποταμού Αγγίτη νοτια-νοτιοδυτικά της εμφάνισης των ασβεστολίθων, που αποτελείται από άμμο, χάλικες και κροκάλες, τα οποία κατά το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχονται από τα Μειοκαινικά κροκαλοπαγή που αναπτύσσονται βόρεια και νότια του ποταμού. Το ύψος αυτής της αναβαθμίδας φθάνει τα 10 μ. πάνω από την σημερινή κοίτη.
- Πολύ μικρές εμφανίσεις, στην περιοχή των σπηλαίων Αλιστράτης και Ορφέα, συνεκτικών κροκαλολατυποπαγών και κώνων κορημάτων που οφείλουν την δημιουργία τους στις εμφανίσεις των κρυσταλλικών ασβεστολίθων και στην μορφολογία του εδάφους. Μεγάλες

εμφανίσεις αυτών των κροκαλολατυποπαγών παρατηρούνται κατά μήκος των βόρειοβορειοδυτικών πρανών της πεδιάδας της Δράμας.

- Καστανοκόκκινους πηλούς, στους τοπογραφικά χαμηλότερους ορίζοντες και συνήθως σε επαφή με τα κροκαλολατυποπαγή, αναπτύσσονται με διάσπαρτες κροκάλες από μάρμαρο. Σε ακόμη χαμηλότερους ορίζοντες, μεταπίπτουν σε ποταμολιμναίες αποθέσεις, κυρίως αργιλικές.
- Εμφανίσεις λιμναίας φάσεως από μάργες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Κατά θέσεις και κυρίως γύρω από τα πρανή του ασβεστολιθικού όγκου, μέσα στον οποίο αναπτύσσεται το σπήλαιο,
- Μη συνεκτικά κροκαλοπαγή και μάργες με κροκάλες από γνεύσιο και ασβεστόλιθο, που συνδέονται μεταξύ τους με μαργαϊκό υλικό, δυτικά και νοτιοδυτικά των ασβεστολίθων της περιοχής αναπτύσσονται, σε μεγάλη σχετικά έκταση.



Εικόνα 1.2.4: Τροποποιημένος γεωλογικός χάρτης (ΙΓΜΕ 1:50000, Φ.Χ Δράμα, 1978, Φ.Χ Προσοτσάνη, 1988) της ευρύτερης περιοχής μελέτης, σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας. Figure 1.2.4: Modified geological map of the study area (IGME Sheet Drama, 1978, Sheet Prosotsani, 1988).

Τα τεταρτογενή ιζήματα και κυρίως οι μάργες, αν και σήμερα δεν έχουν άμεση σχέση με το σπήλαιο, στο παρελθόν σίγουρα επηρέαζαν την ανάπτυξη του υπόγειου καρστ, ρυθμίζοντας το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα.

Ο δεύτερος σχηματισμός, όπως ήδη αναφέρθηκε, ανήκει στην μεταμορφωμένη μάζα της Ροδόπης και κάνει την εμφάνισή του στην περιοχή με τους κρυσταλλικούς μεσοζωικούς ασβεστολίθους (μάρμαρα), χρώματος υπόλευκου έως τεφρού. Στα μάρμαρα αυτά παρεμβάλλονται σε φακούς και ενστρώσεις διμαρμαρυγιακοί σχιστογνεύσιοι.

Εξαιτίας του τεκτονισμού και των γενικότερων συνθηκών που επικράτησαν στο παρελθόν, μέσα σε αυτόν τον σχηματισμό αναπτύχθηκε ένα μεγάλο καρστικό σύστημα, τμήμα του οποίου σήμερα αποτελεί το σπήλαιο Αλιστράτης.

Οι τεκτονική επίδραση στον μεταμορφωμένο ασβεστόλιθο, είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία πτυχών και διακλάσεων. Ο μεγαλύτερος αριθμός των διακλάσεων έχει κλίσεις αρκετά μεγάλες που κυμαίνονται από 50° έως 75°. Οι διακλάσεις πάνω από την φυσική είσοδο παρουσιάζουν τιμές κλίσεων μεταξύ 75° και 89°. Οι διακλάσεις στον χώρο του σπηλαίου κατέχουν σημαντικό ρόλο στην γεωμετρία και γενικότερα στην μορφολογία του σπηλαίου. Η συνέχιση του μεγάλου ρήγματος με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που βρίσκεται στην επαφή των Μαρμάρων της μάζας Ροδόπης με τις βορείως από αυτά μάργες και πηλούς, είναι αναμενόμενη, τουλάχιστον μέχρι του σημείου της καρστικής πηγής "Γαλάζια Νερά". Επίσης αναμενόμενη είναι και η ύπαρξη ενός ακόμη ρήγματος στην νότια επαφή των μαρμάρων της μάζας Ροδόπης με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ (ίδια διεύθυνση με τα περισσότερα ρήγματα καθώς και με τη διεύθυνση σε αυτό το τμήμα του ποταμού Αγγίτη) (Γιαννόπουλος, 2000).

1.2.2 Καρστικό σύστημα Πετρωτού – Σπήλαιο Αλιστράτης

Το **καρστικό σύστημα του Πετρωτού** είναι ένα από τα πλέον σημαντικά και αναγνωρίσιμα συστήματα στον Ελλαδικό χώρο. Το χαρακτηριστικό του πετρώδες και άγονο ανάγλυφο, ο βαθμός ανάπτυξης των υπέργειων και υπόγειων γεωμορφών, η σχετική απουσία βλάστησης και η έλλειψη εδαφικού καλύμματος είναι από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του, τα οποία συνάδουν στον χαρακτηρισμό του με βάση τις κατηγορίες που περιεγράφηκαν παραπάνω.

Πιο συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο καρστικό σύστημα ανήκει στο 5° στάδιο ανάπτυξης όπου οι διακλάσεις έχουν διευρυνθεί τόσο, ώστε να εμποδίζουν εντελώς την επιφανειακή απορροή. Οι καρστικές επιφάνειες είναι ξηρές και το υδρογραφικό δίκτυο έχει υποχωρήσει υπογείως, ρέοντας μέσω καρστικών αγωγών, ενώ παράλληλα παρατηρείται ο σχηματισμός καταβοθρών. Επιπλέον παρατηρείται δημιουργία δολινών στους πυθμένες των υπογείων κοιτών. Οι κοιλάδες μεταβαίνουν προοδευτικά σε τυφλές κοιλάδες. Οι καρστικοί αγωγοί και οι κοιλότητες των σπηλαίων εμφανίζονται αισθητά διευρυμένες.

Το καρστικό σύστημα του Πετρωτού μπορεί επιπλέον να χαρακτηριστεί ως Ολοκαρστικού τύπου, δηλαδή ως ολοκληρωμένου καρστικού συστήματος. Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης παρατηρείται σε ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό κάλυψης από τον παχυστρωματώδη σχηματισμό των κρυσταλλικών ασβεστολίθων και μαρμάρων, σχετική απουσία φυτοκάλυψης και έντονη παρουσία τεκτονισμού υπό τη μορφή ρηγμάτων και διακλάσεων, που ενισχύουν το φαινόμενο της καρστικοποίησης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνηγορούν στον χαρακτηρισμό του συστήματος ως <u>ολοκαρστ</u>.

Τέλος, σύμφωνα με την πλέον σύγχρονη κατηγοριοποίηση των καρστικών συστημάτων κατά τους Klimchouk & Ford (2000) συγκεκριμένο καρστικό σύστημα χαρακτηρίζεται ως **ανοικτού τύπου καρστ**.

Στην ευρύτερη περιοχή του Πετρωτού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτός από το Σπήλαιο Αλιστράτης έχουν αναπτυχθεί και άλλα σημαντικού μεγέθους <u>καρστικά έγκοιλα</u>, όπως το **σπήλαιο του Ορφέα**, το **σπήλαιο του Αγ. Γεωργίου** και του **Περιστερώνα** καθώς, επίσης και πλήθος **βαράθρων** και **βραχοσκεπών**.

Η έντονη καρστικοποίηση που παρατηρείται στην περιοχή, είναι δυνατόν να διαχωριστεί σε **τρία** (3) διαφορετικά **επίπεδα καρστικοποίησης**,

- 1° επίπεδο: Επιφανειακό σύστημα πάχους ~15m (A.Y. >130m)
- 2° επίπεδο: Σπήλαιο Περιστερώνα Αλιστράτης Ορφέα Αγ. Γεωργίου πάχους ~30m (Α.Υ. ~80- 115m)
- 3° επίπεδο: Πηγές Γαλάζια Νερά (Α.Υ.~45m)

Συγκεκριμένα, το Σπήλαιο Αλιστράτης αποτελεί τον πλέον σημαντικό και αναγνωρίσιμο καρστικό αγωγό της περιοχής καθώς επίσης και το μεγαλύτερο σε μέγεθος *καρστικό έγκοιλο*. Ο καρστικός αγωγός αναπτύσσεται σε ένα επίπεδο με μέσο απόλυτο υψόμετρο 106 m ± 0,5 m, ενώ το μέσο ύψος οροφής του σπηλαίου είναι 9 m.

Τέλος, το μέσο απόλυτο υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους, άνωθεν του σπηλαίου ανέρχεται στα 145 m.

Από τα παραπάνω δεδομένα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μέσο απόλυτο υψόμετρο της οροφής του σπηλαίου συναντάται στα 115 m περίπου και το μέσο πάχος του υπερκείμενου του σπηλαίου πετρώματος ανέρχεται στα 30 m.

Στην εικόνα 1.2.5 παρουσιάζεται η τοπογραφική κάτοψη του σπηλαίου Αλιστράτης, με υπόβαθρο την δορυφορική φωτογραφία της περιοχής. Σε αυτή διακρίνονται (μαύρα βέλη) η τεχνητή και η φυσική είσοδος του σπηλαίου, τα γραφεία και ο χώρος αναψυχής.

Στο τέλος του εξερευνηθέντος τμήματος του καρστικού αγωγού εμφανίζεται μία μεγάλης διάστασης αίθουσα με έντονες κατακρημνίσεις (Εικ. 1.2.6) που προέρχονται από την οροφή του σπηλαίου και είναι απόρροια της συμβολής δύο ρηγμάτων στη θέση αυτή. Έπειτα από την αίθουσα αυτή δεν είναι δυνατή η συνέχιση της υπόγειας εξερεύνησης του σπηλαίου.

<u>Ωστόσο η γενική κατεύθυνση του αγωγού και η ύπαρξη ρεύματος αέρα, ενδεχομένως να</u> <u>υποδηλώνει την επέκταση του καρστικού αγωγού έπειτα από την αίθουσα αυτή</u>.


Εικόνα 1.2.5: Κάτοψη του σπηλαίου Αλιστράτης σε υπόβαθρο δορυφορικής εικόνας (Προσωπικό αρχείο Γιαννόπουλου Β.)

Figure 1.2.5: Topographic plan of the cave of Alistrati (Modified from the personal archive of Giannopoulos V.)



Εικόνα 1.2.6: Αίθουσα κατακρημνίσεων εντός του σπηλαίου Αλιστράτης. Figure 1.2.6: A chamber of Alistrati cave filled with massive rock falls.

1.2.3 Διερεύνηση επιφανειακής καρστικής γεωμορφολογίας με τη χρήση ΣμηΕΑ

Η σύγχρονη τεχνολογική ανάπτυξη έχει αυξήσει ραγδαία τον αριθμό **Συστημάτων μη επανδρωμένων** Εναέριων Πλατφορμών – Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ). Ο όρος μη επανδρωμένο εναέριο σύστημα (Unmanned Aerial System - UAS) περιλαμβάνει ολόκληρο το σύστημα που αποτελείται από το εναέριο όχημα/πλατφόρμα (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) και τον επίγειο σταθμό ελέγχου (Ground Control Station - GCS). Στο παρελθόν, τα συστήματα UAV αναπτύχθηκαν κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς και εφαρμογές. Ωστόσο, τη σύγχρονη εποχή, τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα, τα οποία αποκαλούνται επίσης drones, αποτελούν μια εναλλακτική λύση για την απόκτηση εικόνων με πολύ υψηλή χωρική ανάλυση για τοπογραφική χαρτογράφηση μεγάλης κλίμακας παρέχοντας τρισδιάστατη χωρική κάλυψη. Σε σύγκριση με τις δορυφορικές εικόνες, οι εικόνες που αποκτώνται με UAS έχουν συνήθως υψηλότερη χρονική και χωρική ανάλυση.

Οι σταθμοί ελέγχου εδάφους (**GCS**) είναι σταθερές ή μεταφερόμενες συσκευές για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Τα **GCS** είναι απαραίτητα για τη λειτουργία, καθώς παρακολουθούν κάθε αλλαγή στη διαδρομή του **UAS**, και κάθε ενδεχόμενο σφάλμα στην εναέρια πλατφόρμα.

Τα συστήματα **GNSS** είναι επίσης απαραίτητα για την πλοήγηση των πλατφορμών, προκειμένου να προβλεφθούν τα σημεία λήψης και ενδεχομένως να πραγματοποιηθεί άμεση γεωαναφορά (Vassilakis et al., 2021). Η χρήση των ΣμηΕΑ αποτελεί έναν από τους πιο γρήγορους και οικονομικούς τρόπους συλλογής δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, μωσαϊκών και ορθοφωτογραφιών. Στη χαρτογράφηση, οι παράμετροι πτήσης των **UAS** είναι κρίσιμες για την επίτευξη επαρκούς χωρικής ανάλυσης στα παραγόμενα γεωμετρικά προϊόντα (Fahlstrom & Gleason, 2012). Τα **UAV** είναι ικανά να εκτελούν τη φωτογραμμετρική λήψη δεδομένων και μπορούν να πετούν με χειροκίνητες, ημιαυτόματες και αυτόνομες λειτουργίες

Όπως και στην παραδοσιακή φωτογραμμετρία, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται επεξεργάζονται επικαλυπτόμενες εικόνες που αποκτήθηκαν από πολλαπλά σημεία θέασης. Κυρίως, οι τεχνικές αυτές βασίζονται σε τεχνικές απεικόνισης που ονομάζονται Structure-from-motion (SfM).

Η τεχνική *SfM* λειτουργεί βάσει των ίδιων βασικών αρχών με τη στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, δηλαδή ότι η τρισδιάστατη δομή μπορεί να επιλυθεί από μια σειρά επικαλυπτόμενων, μετατοπισμένων εικόνων. Ωστόσο, η φωτογραμμετρία *SfM* διαφέρει από τις συμβατικές φωτογραμμετρικές προσεγγίσεις υπολογίζοντας τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας, τη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας. Οι αλγόριθμοι *SfM* χρειάζονται μεγάλο αριθμό επικαλυπτόμενων εικόνων για να καλύψουν την περιοχή ενδιαφέροντος, γεγονός που επηρεάζει τη διάρκεια της πτήσης (Konsolaki, 2020).

Οι θέσεις της κάμερας που προκύπτουν από την τεχνική *SfM*, σε αντίθεση με την παραδοσιακή φωτογραμμετρία, δεν έχουν τον προσανατολισμό και την κλίμακα που παρέχουν οι συντεταγμένες επίγειου ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, το σχετικό σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο παράγονται τα τρισδιάστατα νέφη σημείων πρέπει να ευθυγραμμιστεί με ένα πραγματικό σύστημα συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτός ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων σε ένα πραγματικό σύστημα συντεταγμάνων είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού, ο οποίος βασίζεται σε ένα μικρό αριθμό γνωστών σημείων επίγειου ελέγχου (*Ground Control points – GCPs*).

Η χρήση των σύγχρονων αυτών συστημάτων αεροφωτογράφισης έχει εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια σε πλήθος ερευνητικών εργασιών, παρέχοντας ευελιξία, ταχύτητα και οικονομία κατά τη συλλογή των δεδομένων σταθερής αλλά και κινούμενης εικόνας (Konsolaki et al., 2019; Vassilakis et al., 2022; Konsolaki et al., 2022). Ειδικότερα, η εμφάνιση των αυτόματων και ημιαυτόματων ΣμηΕΑ, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη σύγχρονων αισθητήρων χαμηλού βάρους, έχει προσεγγίσει το ερευνητικό ενδιαφέρον διαφορετικών επιστημών, με ποικίλες εφαρμογές (Kruger et al., 2016). Τα τελικά προϊόντα είναι υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας και παρουσιάζουν ποικίλες χρήσεις. Πολύ συχνή είναι η χρήση τους στην γεωμορφολογική μελέτη και στην αναγνώριση επιφανειακών καρστικών δομών (Zhu et al., 2014; Silva et al., 2017),καθώς επίσης και ο συνδυασμός τους με γεωφυσικές διασκοπήσεις (Fernandes Jr et al., 2015; Furtado et al., 2022; Hussain et al., 2022).

Από το σύνολο των φωτογραφικών δεδομένων που συλλέγονται με τη χρήση ΣμηΕΑ και την επεξεργασία τους σε εξειδικευμένα λογισμικά, μέσω της εφαρμογής κατάλληλων μεθοδολογιών και αλγορίθμων. προκύπτουν φωτογραμμετρικά προϊόντα, διανυσματικά και καννάβου.

Σ' αυτά, συμπεριλαμβάνονται πυκνά τρισδιάστατα νέφη σημείων, 3D μοντέλα εδάφους και γενικότερων επιφανειών, ορθοφωτογραφίες και ορθο-φωτο-μωσαϊκά.

Για τη γεωμορφολογική διερεύνηση της περιοχής άνωθεν του Σπηλαίου Αλιστράτης, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί ένα σύνολο πτήσεων χαμηλού υψομέτρου πάνω από τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Αρχικά, ορίστηκαν και μετρήθηκαν τέσσερα (4) σημεία ελέγχου (*Ground control points*), με μία ορθή κατανομή κάλυψης της περιοχής μελέτης με σύγχρονο δέκτη GNSS και στα οποία τοποθετήθηκαν τετράγωνοι στόχοι μεγέθους 15x15 cm ώστε να διακρίνονται εμφανώς σε μεγάλο αριθμό αεροφωτογραφιών (Εικ. 1.2.7). Τα επίγεια σημεία ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη φωτογραμμετρική επεξεργασία και οφείλει η επίλυση των θέσεών τους να έχει πολύ μικρό σφάλμα, γεγονός που επετεύχθη κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας.



Εικόνα 1.2.7: Επιλογή, τοποθέτηση και εντοπισμός του σταθερών σημείων (GCPs) από αεροφωτογραφία του ΣμηΕΑ Figure 1.2.7: Selection, placement and identification of the

> ground control points from a UAV image.

Για την επεξεργασία των εικόνων που λήφθηκαν και την παραγωγή των τελικών προϊόντων, έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μια σύνθετη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία επιτυγχάνεται ο συνδυασμός τεχνικών που εφαρμόζονται από την Όραση Υπολογιστών και τη Φωτογραμμετρία. Τα σύγχρονα λογισμικά του εμπορίου που έχουν αναπτυχθεί, σε συνδυασμό με αυτά ανοικτού κώδικα που έχουν εμφανιστεί στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια, κάνουν χρήση αλγορίθμων και τεχνικών που συνδυάζονται μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται επιτυχώς από την επιστημονική κοινότητα. Τα ειδικά σχεδιασμένα αυτά λογισμικά δέχονται τα δεδομένα από την πτήση και περιλαμβάνουν τα επιμέρους στάδια της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας, από την εισαγωγή εικόνων μέχρι την τελική παραγωγή νέφους σημείων, ορθο-φωτογραφιών και τρισδιάστατων μοντέλων με υφή.

Από την αποτύπωση της περιοχής με τη χρήση drone, **ελήφθησαν συνολικά 1.406 αεροφωτογραφίες από σταθερό ύψος πτήσης 68,2 μέτρων, καλύπτοντας μια περιοχή με εμβαδόν 0,496 km**².

Χρησιμοποιήθηκε ένα ΣμηΕΑ τύπου DJI Phantom-4, εφοδιασμένο με κάμερα τύπου FC330X, με φακό εστιακής απόστασης 3,61 mm και ενσωματωμένο δέκτη GNSS (Εικ. 1.2.8). Η κάθε μία φωτογραφία συντίθεται από 12.000 (4.000*3.000) τετράγωνα εικονοστοιχεία με διαστάσεις πλευράς 1,56 μm, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαστάσεις 1,81 cm στο έδαφος.



Εικόνα 1.2.8: Στιγμιότυπο από την περιοχή μελέτης όπου διακρίνεται το ΣμηΕΑ τύπου DJI Phantom-4, που χρησιμοποιήθηκε. Figure 1.2.8: Image from the survey area, where the DJI Phantom-4 UAS is presented.

Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Agisoft Metashape Professional v.1.6.4. Η διαδικασία επεξεργασίας με το λογισμικό περιλάμβανε:

- Την ευθυγράμμιση των αεροφωτογραφιών. Το σύνολο των εικόνων (1.406) καλύπτουν το σύνολο της περιοχής μελέτης με επτά λήψεις. Υπολογίζεται η θέση της φωτογραφικής μηχανής για την κάθε εικόνα ενώ ταυτόχρονα αναζητούνται τα κοινά σημεία (2.147.729) στις φωτογραφίες που έχουν αλληλοεπικάλυψη.
- Τον εντοπισμό των επίγειων σημείων ελέγχου με γνωστές συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ'87) που τοποθετήθηκαν στο χώρο κατά τη φάση της εργασίας υπαίθρου.
- Τη δημιουργία πυκνού νέφους σημείων στο χώρο με 409.428.168 σημεία.
- Τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου DEM (Digital Elevation Model), σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ'87

Την παραγωγή ορθο-φωτο-μωσαϊκού με διακριτική ικανότητα 0,017 m, σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ'87 (Εικ.1.2.9).



Εικόνα 1.2.9: Τελικό ορθο-φωτο-μωσαϊκό της περιοχής μελέτης διακριτικής ικανότητας 0,017 μέτρων. Figure 1.2.9: Final orthophotomosaic of the survey area, with a resolution of 0,017m.

Πρωταρχικό ρόλο στην αναγνώριση και στον χαρακτηρισμό ενός καρστικού συστήματος κατέχει η επιφανειακή καρστική γεωμορφολογία, δηλαδή η μελέτη και αναγνώριση όλων των επιφανειακών καρστικών γεωμορφών του καρστικού αναγλύφου.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, πολύ σημαντική προς αυτήν την κατεύθυνση, εκτός από την αναγνώριση στο πεδίο, ήταν η σύγχρονη τεχνική της αποτύπωσης μέσω ΣμηΕΑ. Η ιδιαίτερα λεπτομερής αποτύπωση της περιοχής μελέτης με τη χρήση ΣμηΕΑ και η κατασκευή του τελικού ορθοφωτο-μωσαϊκού με μεγάλη ακρίβεια, όπως περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, κατέστησε δυνατή τη λεπτομερή αναγνώριση και αποτύπωση των τεκτονικών δομών και των καρστικών γεωμορφών (*Zhu J et al., 2014*) Συγκεκριμένα, αναγνωρίστηκαν επιφανειακές γραμμώσεις που αποτελούν μεγάλης κλίμακας διακλάσεις οι οποίες ψηφιοποιήθηκαν και αποτυπώθηκαν σε περιβάλλον λογισμικού ArcGISPro (Εικ. 1.2.10)



Εικόνα 1.2.10: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται τα συστήματα διακλάσεων μεγάλης κλίμακας (κόκκινες συνεχείς γραμμές), της περιοχής άνωθεν του σπηλαίου Αλιστράτης. Figure 1.2.10: Karstic – Geomorhological map, where the main joint system of the survey area are presented (red lines).

Επιπλέον, αναγνωρίστηκαν και οροθετήθηκαν έξι (6) πεδία **αμαξοτροχιών** (Εικ. 1.2.11), που έχουν αναπτυχθεί κατά μήκος συστημάτων διακλάσεων. Σε αυτά τα πεδία γλυφών αποτυπώθηκαν με τη χρήση του λογισμικού ArcGISPro όλες οι επιφάνειες γραμμικές επιφανειακές αναπτύξεις των γλυφών (Εικ. 1.2.12).



Εικόνα 1.2.11: Πεδία αμαξοτροχιών (A,B,C,D,E,F) της περιοχής μελέτης, όπως αυτά αναγνωρίζονται από το τελικό ορθο-φωτο-μωσαϊκό.

Figure 1.2.11: Karrenfields (A,B,C,D,E,F) of the survey area, as identified from the orthophotomosaic.

Από την αποτύπωση τόσο των διακλάσεων όσο και των επιφανειών των γλυφών εξάγεται το συμπέρασμα ότι και τα δύο αυτά συστήματα, τα οποία αλληλοεπιδρούν, αναπτύσσονται σε τρεις κύριες διευθύνσεις, BBA-NNΔ, BBΔ-NNA και Α-Δ. Οι κύριες αυτές διευθύνσεις των διακλάσεων και των γλυφών φαίνεται να ταυτίζονται πλήρως με τις κύριες διευθύνσεις των μεγαλύτερης κλίμακας ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής και συνακόλουθα με τις διευθύνσεις ανάπτυξης του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης, αλλά και των άλλων σπηλαίων του Πετρωτού. Επιπροσθέτως, με τη συμβολή του ορθο-φωτο-μωσαϊκού, καθώς και έπειτα από τη δημιουργία σκιασμένου μοντέλου αναγλύφου (Hillshade) και από το DEM που κατασκευάστηκε, κατέστη δυνατή η αναγνώριση βυθισμάτων και δολινών της περιοχής (Εικ. 1.2.12) (Mihevc & Mihevc, 2021).



Εικόνα 1.2.12: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται γλυφές (κίτρινες συνεχείς γραμμές) σε επιφάνειες διακλάσεων, καθώς και οι εγκατακρημνισιγενείς (κόκκινες εστιγμένες γραμμές) και διαλυσιγενείς (κίτρινες εστιγμένες γραμμές) δολίνες της περιοχής μελέτης. Figure 1.2.12: Karstic – Geomorhological map of the survey area, where karrenfields (continuous yellow lines), collapse dolines (dotted red lines) and solution dolines (yellow dotted lines) are identified from the orthophotomosaic.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αναγνώριση του βυθίσματος άνωθεν της αίθουσας κατακρημνίσεων του Σπηλαίου, το οποίο φαίνεται να έχει δημιουργηθεί λόγω καθίζησης έπειτα από αυτή την μεγάλης κλίμακας **κατακρήμνιση**.

Τέλος, στην περιοχή αναγνωρίστηκαν δύο (2**) επικρεμάμενες κοιλάδες** (Εικ. 1.2.13), οι οποίες αποτελούν ιδιαίτερο χαρακτηριστικό και συνηγορούν στην κατηγοριοποίηση του **καρστικού** συστήματος του Πετρωτού.



Εικόνα 1.2.13: Καρστικός – Γεωμορφολογικός χάρτης όπου αναδεικνύονται οι επικρεμάμενες κοιλάδες (μαύρη εστιγμένη γραμμή). Figure 1.2.13: Karstic – Geomorhological map, where two hanging valleys (dotted black lines) of the survey

Figure 1.2.13: Karstic – Geomorhological map, where two hanging valleys (dotted black lines) of the survey area have been identified from the orthophotomosaic.

Οι παραπάνω επιφανειακές καρστικές γεωμορφές είναι ιδιαίτερα σημαντικές και κάνουν λόγω για έντονη ύπαρξη του επιφανειακού επιπέδου καρστικοποίησης με πιθανή παρουσία άγνωστων, μέχρι στιγμής, **εγκοίλων πολύ κοντά στην επιφάνεια**.

Από τη μελέτη της επιφανειακής γεωμορφολογίας και τον εντοπισμό του βυθίσματος άνωθεν της αίθουσας κατακρημνίσεων του σπηλαίου, πιθανή είναι και η πλευρική επέκταση του καρστικού αγωγού σε διεύθυνση Α-Δ. Είναι επιπλέον πιθανή η διασύνδεση των δύο συστημάτων καρστικοποίησης μέσω ζωνών διακλάσεων και *φρεατίων*.

2 Γεωφυσική διασκόπηση

Η εφαρμοσμένη γεωφυσική, ως κλάδος των γεωεπιστημών, διερευνά τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών αναδεικνύοντας τη δομή τους (τεκτονική, λιθοστρωματογραφία) σε βάθος ολίγων χιλιομέτρων. Ειδικότερα, η τεχνική γεωφυσική συμβάλλει στη διερεύνηση και στην επίλυση γεωτεχνικών, υδρογεωλογικών καθώς και αρχαιολογικών θεμάτων (εντοπισμός υδροφόρων οριζόντων, εγκοίλων και θαμμένων 'στόχων'). Για την επίλυση των παραπάνω ζητημάτων εφαρμόζεται μία πληθώρα γεωφυσικών μεθόδων (γεωηλεκτρική τομογραφία, τεχνική γεωραντάρ, μέθοδος VLF κ.ά.).

2.1. Γεωηλεκτρική τομογραφία (ERT)

Η μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, κατατάσσεται στην κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων που χρησιμοποιούν τεχνητή πηγή. Ειδικότερα, βασίζεται στη διέλευση ελεγχόμενου συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, χαμηλής συχνότητας (< 5*Hz*), μέσω δυο μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια ρεύματος) και την ταυτόχρονη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μέσω δύο άλλων μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια δυναμικού). Στηριζόμενοι στο γεγονός ότι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υπεδαφικών στρωμάτων που διαρρέει το ρεύμα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η ηλεκτρική ειδική αντίσταση (*ρ*), χρησιμοποιώντας την ωμική αντίσταση (*R*). Η αγωγιμότητα των υπεδαφικών σχηματισμών σε γενικές γραμμές καθορίζεται από το είδος του υλικού που διερευνάται.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διάταξης, δηλαδή τον τρόπο τοποθέτησης και τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, βάσει των οποίων καθορίζεται ο λεγόμενος γεωμετρικός παράγοντας *k*, μπορεί να υπολογιστεί η ηλεκτρική ειδική αντίσταση, *ρ*.

Αν πρόκειται για ένα μέσο ομοιογενές, ισότροπο και απείρου βάθους, η τιμή της μετρούμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, θα είναι σταθερή, ανεξάρτητα της τιμής του γεωμετρικού παράγοντα *k*. Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ένταση *I* του παρεχόμενου ρεύματος, αν μεταβληθεί η γεωμετρία της διάταξης θα πρέπει να μεταβληθεί ο λόγος *k*ΔV/I*, ώστε να παραμένει πάντα σταθερός και η τιμή *ρ* πάντα ίδια.

Στην περίπτωση όμως, πολλών στρωματοποιημένων, οριζοντίων και ομοιγενών μέσων, ο λόγος αυτός θα μεταβάλλεται με αποτέλεσμα τη λήψη διαφορετικών τιμών ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, **ρ**, σε κάθε θέση των τεσσάρων ηλεκτροδίων, λόγω της παραμόρφωσης των γραμμών ροής ρεύματος και των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιείται ο όρος φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση, **ρ**_α, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = k \frac{2\pi \Delta V}{I}$$

Στη διάταξη Wenner (Εικ. 2.1.1 a) χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή και σε ίσες καθορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους (απόσταση α). Τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ρεύματος (Α και Β) και τα δύο εσωτερικά ως ηλεκτρόδια δυναμικού (Μ και Ν). Το κέντρο της γραμμής ταυτίζεται με το κέντρο συμμετρίας της διάταξης. Τέλος, το βάθος διερεύνησης της συγκεκριμένης διάταξης αυξάνεται όσο αυξάνεται και η απόσταση μεταξύ

των ηλεκτροδίων. Η τιμή της μετρούμενης *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* καθορίζεται από την παρακάτω σχέση: $\rho_{\alpha} = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta V}{I}$

Η διάταξη Schlumberger (Εικ. 2.1.1 b) χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο ρεύματος (εξωτερικά) και δύο δυναμικού (εσωτερικά), τα οποία τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή και μετακινούνται κατά μήκος αυτής καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Το σημείο μέτρησης αντιστοιχεί στο μέσο της απόστασης των δύο ηλεκτροδίων δυναμικού. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση: $\rho_{\alpha} = \pi \cdot \frac{L^2 - a^2}{4a} \cdot \frac{\Delta V}{I}$

Η διάταξη dipole-dipole (Εικ. 2.1.1 c) χρησιμοποιεί δύο ζεύγη ηλεκτροδίων, από τα οποία είναι σύνηθες το ένα να αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και το άλλο από δύο ηλεκτρόδια δυναμικού. Για αυτήν την διάταξη η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζεται από τη σχέση: $\rho_{\alpha} = \pi \cdot \frac{\Delta V}{I} \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a$



Μεταθέτοντας τη θέση του κέντρου διάταξης κατά μήκος μιας τομής (δηλαδή όλη η διάταξη των 4 ηλεκτροδίων) και διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος (C1C2 ή AB), τότε το βάθος έρευνας παραμένει περίπου σταθερό και περίπου ίσο με την απόσταση των ηλεκτροδίων α (ψευδό-βάθος). Με τον τρόπο αυτό διερευνάται η μεταβολή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε οριζόντια διεύθυνση (πλευρικά, 2D), μέσα σε μια ζώνη σταθερού πάχους (βάθους). Αλλάζοντας την απόσταση α των ηλεκτροδίων, διαφοροποιούμαι το βάθος έρευνας. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία που περιεγράφηκε, αναπτύχθηκε η τεχνική της **γεωηλεκτρικής τομογραφικής διασκόπησης**.

Η ταχεία ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων αυτοματοποίησης και των Η/Υ σε υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα, έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή ανάπτυξη, βελτίωση και προσαρμογή τεχνικών αυτοματοποιημένης διαδικασίας λήψεως γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Η διαδικασία αυτή λήψεως των μετρήσεων αρχικά στηρίζεται στο γεγονός ότι με την προ-εγκατάσταση πληθώρας ηλεκτροδίων και με την αυτοματοποιημένη διαδικασία επιλογής ηλεκτροδίων», παρέχεται η δυνατότητα στη γεωηλεκτρική συσκευή, να διοχετεύσει ρεύμα έντασης *I* και να μετρήσει διαφορά δυναμικού *ΔV* (στα *P1 & P2*), σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που παρέχονται από το πλήθος των ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται μετρήσεις για όλες τις δυνατές αποστάσεις ηλεκτροδίων (κατακόρυφη διερεύνηση ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης) και κατά μήκος της προκαθορισμένης γραμμής μετρήσεων (πλευρική διερεύνηση ηλεκτρικής ειδικής ειδικής ειδικής αντίστασης), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.2.



A) Principle of geoelectric profiling / tomography

Εικόνα 2.1.2: Αυτοματοποιημένη διαδικασία λήψεως γεωηλεκτρικών μετρήσεων (Wellbrock et al., 2018). Figure 2.1.2: Electrical resistivity tomography automatic measurement process (Wellbrock et al., 2018).

Αυτό αποτελεί και το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Electrical Resistivity Tomography - ERT) στην αντιμετώπιση σύνθετων υπεδαφικών δομών. Στα γεωηλεκτρικά τομογράμματα που παράγονται, απεικονίζονται ταυτόχρονα, τόσο οι κατακόρυφες, όσο και οι πλευρικές κατανομές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο ημιεπίπεδο, σε συγκεκριμένο μεν βάθος, αλλά με πλήρη έλεγχο της πλευρικής ανομοιογένειας και ανομοιομορφίας.

<u>Εξοπλισμός γεωηλεκτρικής τομογραφίας</u>

Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι του οίκου IRIS Instruments και αποτελείται από:

- Τη γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro switch 48 (Εικ.2.1.3)
- Δύο (2) πολυκαναλικά καλώδια συνολικού μήκους 235 m, με μέγιστη δυνατή απόσταση αποδεκτών (take outs) 5 m και
- Σαράντα οκτώ (48) ηλεκτρόδια

Η γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro, υπολογίζει αυτόματα τη φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση, μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, αφού διοχετεύσει την επιθυμητή ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και μετρήσει τη διαφορά δυναμικού. Ο «επιλογέας ηλεκτροδίων» που εμπεριέχεται στη γεωηλεκτρική συσκευή, καθορίζει σε κάθε μέτρηση τα τέσσερα (4) ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν, παρέχοντας έτσι αυτοματοποιημένα όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τετράδων που απορρέουν από το σύνολο των 48 ηλεκτροδίων που έχουν εγκατασταθεί στο πεδίο. Η διοχέτευση του ρεύματος και η μέτρηση του δυναμικού από τη γεωηλεκτρική συσκευή γίνεται μέσω των πολυκαναλικών καλωδίων, στα οποία ενώνονται και τα 48 ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα πάνω στην γραμμή των μετρήσεων.



Εικόνα 2.1.3: Γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro του οίκου IRIS Instruments. Figure 2.1.3: Syscal Pro switch 48 geoelectrical system (IRIS Instruments).

Επεξεργασία δεδομένων

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων υπαίθρου παρέχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει όλες τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στην αυτοματοποιημένη διαδικασία των μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη την ακριβή θέση των ηλεκτροδίων *C1, C2, P1* και *P2* για κάθε μέτρηση (άρα και το αντίστοιχο Κέντρο Διάταξης), υπολογίζει για κάθε μέτρηση την τιμή της **ρ**_α.

Από τη διαδικασία της μαθηματικής αντιστροφής, αρχικά, ο ημιχώρος υποδιαιρείται (Εικ. 2.1.4) σε μικρότερες ορθογώνιες επιφάνειες – «κελιά», ανάλογα με το πλήθος και την κατανομή των ληφθέντων μετρήσεων (measured data). Κατόπιν, αρχίζει η διαδικασία αντιστροφής, κατά την οποία το λογισμικό με βάση ένα αρχικά αυθαίρετο μοντέλο (inverse model) ελέγχει (calculated apparent resistivity) την

απόκριση των πραγματικών δεδομένων με αυτό. Στη συνέχεια, διορθώνοντας συνέχεια τις παραμέτρους αυτού του μοντέλου, προσπαθεί να βελτιώσει (*iterations*) την απόκριση με τις μετρήσεις πεδίου (*measured apparent resistivity*), μέχρι να έχουμε την καλύτερη δυνατή ταύτιση – σφάλμα (*RMS error*).



Εικόνα 2.1.4: Διαίρεση του ημιεπιπέδου σε κελιά κατανομής της ειδικής αντίστασης βάση του συνόλου των μετρήσεων, λογισμικό Res2DInv (Geotomo Software). Figure 2.1.4: Devision of the subsurface in model blocks with different resistivity values (Res2DINV Software).

Στο συγκεκριμένο λογισμικό η διαδικασία της αντιστροφής βασίζεται στην μέθοδο της περιορισμένης εξομάλυνσης (smoothness-constrained) ελαχίστων τετραγώνων (deGroot-Hedlin & Constable; 1990; Sasaki 1992; Loke et al., 2003).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι ο παράγοντας απόσβεσης και τα φίλτρα μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Αρχικά, ξεκινώντας με την κατασκευή ενός αρχικού μοντέλου (συνήθως ενός ομογενούς μοντέλου εδάφους), το λογισμικό υπολογίζει την αλλαγή στις παραμέτρους του μοντέλου (**Δ***qk*) οι οποίες θα μειώσουν την διαφορά μεταξύ των τιμών της υπολογισθείσας και της μετρηθείσας φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Προσαρμόζει την ηλεκτρική ειδική αντίσταση των κελιών του μοντέλου υπό τους περιορισμούς εξομάλυνσης που χρησιμοποιούνται. Μία τιμή αυτής της διαφοράς δίνεται από το σφάλμα RMS (*root-mean-squared*). Ωστόσο, το μοντέλο με το χαμηλότερο δυνατό σφάλμα RMS πολλές φορές παρουσιάζει υψηλές και μη πραγματικές διακυμάνσεις στις τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του μοντέλου, καθιστώντας το μη ιδανικό από γεωλογικής άποψης. Γενικά, η πιο συνετή προσέγγιση είναι η επιλογής του κατάλληλου μοντέλου στην επανάληψη όπου σταθεροποιείται η τιμή του σφάλματος. Αυτό συνήθως συμβαίνει μεταξύ της τρίτης και έβδομης επανάληψης.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και της 2D αντιστροφής των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας εξάγονται σε αρχεία εικόνων, έπειτα από την επιλογή της επιθυμητής χρωματικής κλίμακας.

2.2 Ηλεκτρομαγνητική τεχνική γεωραντάρ (GPR)

Το **γεωραντάρ** (Ground Penetrating Radar - **GPR**) είναι μια γεωφυσική τεχνική η οποία χρησιμοποιεί την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης, για την απεικόνιση, σε υψηλή ανάλυση, των χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Η συγκεκριμένη εφαρμόστηκε αρχικά τη δεκαετία του 1960 και η εξέλιξή της σήμερα εφαρμόζεται σε πλήθος διαφορετικών περιπτώσεων, όπως τεχνικά έργα, αρχαιολογικές έρευνες, διερεύνηση ρηχών υπεδαφικών δομών κ.ά. (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013). Αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική και η πιο γρήγορη λήψη δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων σε σχέση με άλλες γεωφυσικές τεχνικές την καθιστά μία ευρέως διαδεδομένη και πρακτική τεχνική (Lorenzo, 2011).

Το σύστημα του γεωραντάρ αποτελείται από μία γεννήτρια σήματος, κεραίες εκπομπής - λήψης της ενέργειας και μία κεντρική μονάδα ελέγχου καταγραφής (Jol, 2009). Τα πλέον σύγχρονα συστήματα γεωραντάρ φέρουν συχνά και εξωτερικό δέκτη GNSS για την τοπογραφική αποτύπωση ταυτόχρονα με την καταγραφή (Εικ. 2.2.1).



Εικόνα 2.2.1: Σύστημα γεωραντάρ του οίκου Sensors & Software. Figure 2.2.1: Sensors & Softaware GPR system.

Οι κεραίες του συστήματος του γεωραντάρ μπορεί να είναι μονοστατικές, όταν πομπός και δέκτης ταυτίζονται σε μία κεραία, ή διστατικές, όπου μπορεί να υπάρχουν δύο ή περισσότερες κεραίες που λειτουργούν ξεχωριστά ως πομπός ή ως δέκτης.

Η κεραία-πομπός εκπέμπει ραδιοκύματα συχνοτήτων από 10 MHz έως 1 GHz, τα οποία διαχέονται στο έδαφος υπό μορφή κώνου (Conyers, 2016). Όσο αυτά διεισδύουν ανακλώνται και διαθλώνται σε διεπιφάνειες διαφορετικών μέσων. Η ενέργεια που ανακλάται ανέρχεται προς την επιφάνεια και εκεί καταγράφεται από τον δέκτη του συστήματος. Όση ενέργεια διαθλάται, ταξιδεύει ακόμα βαθύτερα (Εικ. 2.2.2), όπου μπορεί να ανακλαστεί σε βαθύτερες δομές και να καταγραφεί από το σύστημα, ή να διαθλαστεί περαιτέρω και τελικά να απορροφηθεί από το μέσο (Daniels, 2004).



Figure 2.2.2: Measurement process of the GPR system (Iftimie et al., 2021).

Η διεισδυτικότητα της ενέργειας του ραδιοκύματος που εκπέμπει το γεωραντάρ εξαρτάται από δύο (2) παράγοντες:

- Την αγωγιμότητα του μέσου. Υλικά με χαμηλή αγωγιμότητα επιτρέπουν στην ενέργεια του κύματος να διεισδύσει βαθύτερα, ενώ υλικά με υψηλή αγωγιμότητα απορροφούν την ενέργεια μειώνοντας το βάθος διείσδυσης.
- 2. Τη συχνότητα της κεραίας. Σε κεραίες με υψηλή συχνότητα το κύμα φτάνει σε μικρότερα βάθη αλλά η διακριτική ικανότητα είναι πολύ μεγαλύτερη, ενώ σε κεραίες με χαμηλή συχνότητα το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο, με την καταγραφή όμως να έχει μικρότερη διακριτική ικανότητα.

Τα συστήματα γεωραντάρ μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν λειτουργούν:

- [1] Στο πεδίο του χρόνου (time domain), όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μετάδοση διακριτών παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (nsec) από έναν πομπό, με μία δεδομένη συχνότητα επανάληψης και τη καταγραφή του ανακλώμενου σήματος από τον δέκτη συναρτήσει του χρόνου καθυστέρησης.
- [2] Στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain), όπου το σήμα μεταδίδεται ως ημιτονοειδές κύμα συνεχούς κυματομορφής. Η απόκριση στο πεδίο του χρόνου μπορεί να ληφθεί μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

Η τεχνική του γεωραντάρ βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία και θεμελιώνεται από τις εξισώσεις του *Maxwell*, που περιγράφουν τη συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, και από τις καταστατικές εξισώσεις, οι οποίες ποσοτικοποιούν τις ιδιότητες της ύλης.

Η **ηλεκτρική διαπερατότητα (ε)** εκφράζει την ικανότητα του μέσου να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια με την μορφή ηλεκτρικού φορτίου. Όταν όμως στο μέσο

υπάρχει υγρασία, η ηλεκτρική διαπερατότητα μεταβάλλεται σημαντικά. Η **διηλεκτρική σταθερά (k**) προσδιορίζεται από την εξίσωση: $\mathbf{k} = \varepsilon/\varepsilon_0$

όπου $\boldsymbol{\varepsilon}_{o}$ η ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό και ισούται με $\boldsymbol{\varepsilon}_{0} = 8,89 \cdot 10^{-12} F/m$.

Η μαγνητική διαπερατότητα (μ) περιγράφει την αντίδραση ενός μέσου σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ)** εκφράζει το πόσο εύκολα γίνεται η διέλευση ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων από ένα υλικό κατά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Όσο μεγαλύτερη αγωγιμότητα υπάρχει, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση του σήματος. Αυτό οδηγεί σε μείωση του βάθους διείσδυσης του κύματος.

Εάν, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου στο οποίο διαδίδεται το σήμα του γεωραντάρ είναι μηδέν, τότε το βάθος διείσδυσης του σήματος καθώς και η διακριτική ικανότητα αυξάνουν. Ωστόσο, στην πλειονότητα των μέσων, αυτό δεν συμβαίνει, διότι οι επικρατούσες συνθήκες είναι υψηλού επιπέδου απώλειας ενέργειας.

Τα γεωυλικά είναι σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούνται από κόκκους, συνδετικό υλικό και πορώδες, που είναι πληρωμένο ή μη με αέρα ή με νερό. Κάθε υλικό έχει μια επικρατούσα συμπεριφορά. Στα εδάφη, τη βραχομάζα και τα υλικά κατασκευών, τα οποία έχουν πορώδες και συνήθως αυτό είναι πληρωμένο από νερό, οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι της τάξης του 1-1000 mS/m, λόγω των ιόντων του νερού (Πίνακας 2.2.1)

	2χετικη	ιαχυτητα	Δνωνιμότητα	
Υλικό	διηλεκτρική	ηλεκτρομαγνητικού	(mS/m)	
	σταθερά	παλμού (m/nsec)		
Αέρας	1	0,3	0	
Αποσταγμένο νερό	81	0,033	0,01	
Θαλασσινό νερό	81	0,01	300.000	
Άμμος ξηρή	25	0,12-0,17	0,01	
Άμμος κορεσμένη	20-3	0,06	0,1-1	
Γρανίτης	4-6	0,106-0,130	0,01-1	
Ασβεστόλιθος	4-8	0,10-0,12	0,5-2,0	
Σχιστόλιθος	5-15	0,09	1-100	
Έδαφος	16	0,075		
Άργιλος	5-40	0,06	2-1.000	
Ιλύς	5-30	0,07	1-100	
Χαλαζίας	4	0,145		

Πίνακας 2.2.1: Προσεγγιστικές τιμές φυσικών ιδιοτήτων διαφόρων τύπων γεωυλικών

,

Οι καταγραφές των ανακλάσεων από το σύστημα υπολογίζουν τον χρόνο τον οποίο χρειάζεται το σήμα για να φτάσει στον ανακλαστήρα και τον απαιτούμενο χρόνο για την επιστροφή του στην κεραία του συστήματος (Εικ. 2.2.3)



Εικόνα 2.2.3: Τρόπος διάδοσης ραδιοκυμάτων στο υπέδαφος ανάκλαση τους σε υπεδαφικό στόχο (www.sensoft.ca).

Figure 2.2.3: The GPR electromagnetic wave propagation and its reflection on a subsurface target. (www.sensoft.ca).

Η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει το σήμα εντός του μέσου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \mu_r}{2} \cdot \left[(1 + P^2) + 1\right]}}$$

όπου:

c: η ταχύτητα του φωτός στο κενό,

μ_r: η σχετική μαγνητική διαπερατότητα,

 $\mathbf{\epsilon}_r$: η σχετική διηλεκτρική σταθερά του πετρώματος και

Ρ: ο συντελεστής απωλειών

Σε περιβάλλοντα χαμηλών απωλειών θεωρείται ότι **Ρ≈0** και συνεπώς η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Για μη μαγνητικά πετρώματα ισχύει **μ**,≈**1**, οπότε:

$$V=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Η **διηλεκτρική σταθερά** του κενού ισούται με τη μονάδα, ενώ στα πετρώματα λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, συνεπώς, η ταχύτητα διάδοσης των ραδιοκυμάτων είναι υψηλότερη στο κενό και μειώνεται όσο αυξάνει η τιμή της **διηλεκτρικής σταθεράς**.

Για τον υπολογισμό του βάθους του ανακλαστήρα ισχύει η σχέση:

$$d=\frac{t}{2}\cdot V$$

όπου V η ταχύτητα διάδοσης του σήματος και t ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα να φτάσει στον ανακλαστήρα και να επιστρέψει πίσω στην κεραία του συστήματος.

Γενικά, η απώλεια ενέργειας και η εξασθένιση σήματος, μπορεί να προκληθεί από πολλούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς αφορούν στα χαρακτηριστικά της συσκευής του γεωραντάρ, όπως είναι τα φαινόμενα σύζευξης με το έδαφος και οι απώλειες λόγω μετάδοσης, ενώ άλλοι αφορούν στα χαρακτηριστικά του μέσου στο οποίο διαδίδεται το σήμα. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η απώλεια ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα και η διάχυση που οφείλεται στα **διηλεκτρικά** χαρακτηριστικά του μέσου. Σημαντικό ρόλο στην εξασθένηση του σήματος κατέχει και η γεωμετρική εξάπλωση της ακτινοβολίας συναρτήσει της απόστασης από την πηγή (Huang et al., 2011).

Όταν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα διέρχεται από ένα μέσο, ο *συντελεστής απόσβεσης* του είναι ανάλογος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μέσου και εκφράζεται σε *dB/m*, ενώ υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{|A_Z|}{|A_0|} = e^{-dx}$$

όπου, A_z και A_0 το τελικό και αρχικό πλάτος του κύματος αντίστοιχα και d, ο συντελεστής απωλειών που ισούται με:

$$d=\sqrt{\frac{\omega\cdot\mu\cdot\sigma}{2}}$$

Το αντίστροφο του *συντελεστή απόσβεσης* είναι το *επιδερμικό βάθος δ* και ισούται με:

$$\delta = \frac{5,31 \cdot \sqrt{\kappa \cdot \omega}}{\sigma}$$

Το **επιδερμικό βάθος** αντιστοιχεί στο βάθος όπου η *ένταση της εξασθένισης* είναι ίση με 1/e και είναι πολύ μικρό σε αγώγιμα μέσα. Αντιθέτως, σε χαμηλής αγωγιμότητας μέσα, το *επιδερμικό βάθος* είναι πολύ μεγαλύτερο.

<u>Όταν η ειδική αγωγιμότητα ενός γεωυλικού είναι μεγαλύτερη από 10 mS/m,</u> <u>η τεχνική του γεωραντάρ δεν συνιστάται να χρησιμοποιείται</u>.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαχωρίζεται διανυσματικά σε δύο ανεξάρτητα μέλη: (α) το *εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο* και (β) το *εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο*. Η ανάκλαση και η διάθλαση των συγκεκριμένων κλάδων στη διεπιφάνεια δύο μέσων με διαφορετικό δείκτη διάθλασης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και ικανοποιεί τον Νόμο του Snell (Εικ. 2.2.4).

Ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την ανεύρεση ενός στόχου με την τεχνική του γεωραντάρ είναι να υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο μέσων στη *διηλεκτρική σταθερά*.



Η **υπέρθεση** (stacking) έχει ως στόχο την μείωση του τυχαίου θορύβου και την ανάδειξη των συχνοτήτων εκπομπής των στόχων. Στη διαδικασία, τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους (Εικ. 2.2.5).

Σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων επιτυγχάνεται με πολλαπλές καταγραφές, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο λόγος του σήματος ως προς το θόρυβο (S/N ratio).



Εικόνα 2.2.5: Υπέρθεση ηλεκτρομαγνητικών παλμών και βελτίωση του λόγου Signal/Noise. (www.sensoft.ca). Figure 2.2.5: Stacking of the electromagnetic pulce for the improvement of the Signal/Noise ratio (www.sensoft.ca).

Το **παράθυρο του χρόνου** καταγραφής W_t (*time window*) εξαρτάται άμεσα από το βάθος διείσδυσης **Δr** και αποτελεί το χρονικό διάστημα όπου ο δέκτης θα λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα.

Εκφράζεται από την εξίσωση : $W_t = rac{2,6 \cdot \Delta_{r_{max}}}{V}$

όπου, Δr_{max} το μέγιστο βάθος που απαιτεί η μελέτη και Vη ελάχιστη ταχύτητα που παρατηρείται στο μέσο όπου διαδίδεται ο παλμός.

Η επιλογή του παράθυρου του χρόνου καταγραφής θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς, εάν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι μικρός, δεν θα μπορέσουν να καταγραφούν τα ανακλώμενα κύματα

από τους πιθανούς στόχους, ενώ αντίθετα αν είναι πολύ μεγάλος, θα αυξήσει κατακόρυφα τον όγκο δεδομένων.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι του οίκου Sensors & Software και αποτελείται από:

- [1] Μία διστατικού τύπου κεραία συχνότητας 100 MHz (Εικ.2.2.6)
- [2] Έναν τροχό μεταφοράς στον οποίο προσαρτάται το οδόμετρο
- [3] Μία μονάδα ελέγχου καταγραφής (VDL unit)



Εικόνα 2.2.6: Σύστημα γεωραντάρ Noggin 100 του οίκου Sensors & Software, όπου διακρίνονται α) η διστατικού τύπου κεραία συχνότητας 100MHz και b) ο τροχός μεταφοράς με ενσωματωμένο οδόμετρο.

Figure 2.2.6: The Sensors & Software Noggin 100 GPR system with a) a 100MHz bistatic antenna and b) smart tow system with odometer.

Για την επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EKKO_Project v.6 του οίκου Sensors & Software Η βασική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια :

I. <u>Απομάκρυνση αρχικού χαμηλού συχνοτικού περιεχομένου (Dewow).</u>

Τα πεδία κοντά στον πομπό περιέχουν μία χαμηλής συχνότητας ενέργεια που σχετίζεται με ηλεκτροστατικά και επαγωγικά πεδία, τα οποία φθίνουν γρήγορα όσο αυξάνεται η απόσταση. Αυτή η χαμηλής συχνότητας ενέργεια προκαλεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω κύρτωση του σήματος και είναι γνωστή στο περιβάλλον του γεωραντάρ ως "wow".

Για την καταστολή του φαινομένου αυτού εφαρμόζεται στο σήμα ένα υψηλής απώλειας χρονικό φίλτρο. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως "*dewow*". Στα σύγχρονα συστήματα η εφαρμογή του φίλτρου γίνεται ψηφιακά κατά τη διάρκεια ή μετά την λήψη των δεδομένων, ενώ παλαιότερα η διαδικασία γινόταν αναλογικά (Jol, 2009).

Το φίλτρο *dewow* αφαιρεί την ανεπιθύμητη χαμηλή συχνότητα από το ίχνος του γεωραντάρ, διατηρώντας παράλληλα το υψηλής συχνότητας σήμα. Το χαμηλής συχνότητας σήμα που αφαιρείται προκύπτει λόγω της εγγύτητας πομπού-δέκτη καθώς και λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου. Το συγκεκριμένο φίλτρο συνήθως χρησιμοποιείται πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία επεξεργασίας. Το φίλτρο *dewow* είναι ένα μηδενικής φάσης φίλτρο το οποίο δημιουργεί τη διαφορά μεταξύ της τιμής του ίχνους με αυτή του μέσου ίχνους στο πλαίσιο του πλάτους που ορίζεται από τον χειριστή.

II. <u>Φίλτρο αφαίρεσης θορύβου (Background removal)</u>.

Το συγκεκριμένο φίλτρο επεξεργασίας επιλέγει ένα μέσο ίχνος που προκύπτει από τον λόγο του αθροίσματος των πλατών των ιχνών προς το συνολικό αριθμό τους. Με αυτόν τον τρόπο, αφαιρούνται πιθανές αντηχήσεις από την καταγραφή, οι οποίες προέρχονται από εξωτερικές εκπομπές, ή θόρυβο του συστήματος, που δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης πομπού-δέκτη και της άφιξης των πρώτων κυμάτων. Επειδή το συγκεκριμένο φίλτρο δρα κατά μήκος του άξονα της απόστασης και αφαιρεί την υπολογισθείσα μέση τιμή από όλα τα ίχνη, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, ώστε να μην αφαιρεθούν πραγματικές ανακλάσεις από την καταγραφή (Conyers, 2016).

III. Bandpass filtering

Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιεί κατακόρυφα φίλτρα τα οποία ονομάζονται φίλτρα ζώνης διέλευσης. Επειδή παράγονται χαμηλές συχνότητες από το σύστημα του γεωραντάρ και υψηλές από το εξωτερικό περιβάλλον, επιλέγεται ένα συγκεκριμένο παράθυρο καταγραφής συχνοτήτων. Το ίχνος που λαμβάνει, μετατρέπεται σε ένα φάσμα συχνοτήτων χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό *Fourier* (Goodman & Piro, 2013).

Το φίλτρο *DynaT* του λογισμικού EKKO_Project πρόκειται για μία αυτοματοποιημένη μορφή *BandPass filtering* που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της απόκρισης στόχων διαφορετικού μεγέθους, ανάλογα με την επιλογή του χειριστή.

IV. Ενίσχυση σήματος (Gain)

Το φίλτρο SEC2 (Spreading & Exponential Calibrated Compensation) χρησιμοποιείται για την ενίσχυση σήματος. Συγκεκριμένα, εφαρμόζει έναν συνδυασμό μίας γραμμικά και μίας εκθετικά αυξανόμενης ενίσχυσης, ως συνάρτηση του χρόνου. Αυτός ο τύπος ενίσχυσης αντισταθμίζει τη μείωση του πλάτους του ανακλώμενου σήματος που προκαλείται από την εξάπλωση του μετώπου του σφαιρικού κύματος και την εκθετική εξασθένηση που προκαλείται από τις απώλειες λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας με κατάλληλες παραμέτρους κάνει τα πλάτη των σημάτων που προέρχονται από παρόμοιους στόχους σε διαφορετικά βάθη να φαίνονται παρόμοια. Ο χρήστης ορίζει μία επιθυμητή αρχική τιμή ενίσχυσης, τον εκθετικό ρυθμό εξασθένησης και μία μέγιστη τιμή ενίσχυσης, ώστε να αποφευχθεί η υπερενίσχυση. Η αύξηση του ρυθμού εξασθένησης αυξάνει την ενίσχυση για σήματα από βαθύτερους στόχους.

V. <u>Migration</u>

Αποτελεί ένα είδος χωρικής **αποσυνέλιξης** (Fisher et al., 1992). Είναι μία διαδικασία απεικόνισης των δεδομένων στην αρχική τους θέση, η οποία παρέχει ακριβέστερη εικόνα των στόχων εντός του υπεδάφους (Lehmann & Green, 2000). Εστιάζει στη δέσμη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπεται από τον πομπό σε κωνική μορφή, με βάση την ταχύτητα που έχουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσα στο μέσο διάδοσης. Το υπερβολικό σχήμα υπαγορεύεται από την ταχύτητα του εδάφους, οπότε ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τη βέλτιστη ταχύτητα του μέσου για τη λειτουργία. Όσο πιο προσεκτικά επιλέγεται η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού μέσα στο μέσο, τόσο πιο ακριβής θα είναι η τοποθέτηση των στόχων σε σχέση με το βάθος. Είναι δυνατό μια λάθος επιλογή ταχύτητας να οδηγήσει σε θολά ή παραμορφωμένα ραδιογραφήματα. Το φίλτρο της μετανάστευσης (Migration) έχει σχεδιαστεί για τη μετατροπή των κλασικών υπερβολικών αποκρίσεων GPR, από σημειακούς στόχους σε ένα σημείο.

Έπειτα από την 2D επεξεργασία της κάθε τομής ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη επεξεργασία και η δημιουργία *ισοεπιφανειών βάθους* (*depth slices*) έντασης ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού εφαρμόζοντας τα παραπάνω φίλτρα επεξεργασίας για όλες τις τομές ταυτόχρονα στο ειδικό τμήμα (*SliceView*) του λογισμικού ΕΚΚΟ_Project. (Εικ. 2.2.7)

40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 managana ang kanang kanang B	Data Processing ×		70 175 180 185 190 195 200 205 2	200 205 210 215 220 225 230 235
	Data position limits (m) Data position limits (m) Outer Clipped Outer Data Outer Data Outer Ou	Dunts (m) Metric (m) Dimperial (tt) background (m)		
	Hyperbola Velocity Estimate Signa	al velocity (m/ns): 0.20 ?		
	Depth O Time	Thickness (m): 0.50		
	Slice Resolution (m)	Overlap (%): 0.00		
35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 million of an ordinancial monotonic data and an ordinancial monotonic data	0.100 ~	Depth limit (m): Max User 83.37		
	Samples: 2530 x 250	Interpolation limit Auto User 37.50	55 160 165 170 175 180 185 194 Incontrol of the second s) 195 200 205 210 215
	Line Processing (DME)	Amplitude Equalization Gair		
	C Envelope	O Level Start 8.00		
	Migration	1 (dB/m)		
	€ FK	User Max Gain: 1000.00 PCD Scale		
	Kirchhoff	Auto User 100		
	Target:			
	Width (m)			
	Auto User 83.12			
	Defaults Preview	OK Cancel		4 5
L	Always open this dialog when loadin	g un-processed data.	1000) CP.bone	4

Εικόνα 2.2.7: Στιγμιότυπο κατά την 3D επεξεργασία των δεδομένων GPR από το περιβάλλον του λογισμικού SliceView του οίκου Sensors & Software.

Figure 2.2.7: The 3D processing of the GPR data in the SliceView module of EKKO-Project Software.

2.3 Μέθοδος VLF (Very Low Frequency)

Η χρήση της μεθόδου είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω του χαμηλού κόστους των οργάνων αλλά και της ευχρηστίας τους και της ταχύτητας λήψης των μετρήσεων. Οι πιο συχνές εφαρμογές της αφορούν στον προσδιορισμό κατακόρυφων τεκτονικών υδροφόρων ή γεωθερμικών ζωνών, κοιτασμάτων μεταλλευτικού ενδιαφέροντος και γενικότερα αγώγιμων στόχων σε αντιστατικά περιβάλλοντα. Οι πρώτες προσπάθειες εφαρμογής της μεθόδου VLF καταγράφονται ήδη από το 1964 (Δίλαλος, 2009).

Η μέθοδος VLF ανήκει στις **ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ελεγχόμενης πηγής πεδίου συχνότητας**. Πιο συγκεκριμένα, διαχειρίζεται τη μέτρηση της γωνίας κλίσης (Εικ. 2.3.1), που σχηματίζει ο μέγιστος άξονας της έλλειψης πόλωσης του ολικού πεδίου, σε σχέση με την οριζόντια διεύθυνση, και της ελλειπτικότητας. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται με ζεύγος ίδιων αλλά κατακόρυφων μεταξύ τους πηνίων.



Εικόνα 2.3.1: Μεταβολή της γωνίας κλίσης ϑ, κατά μήκος τομής πάνω από στόχο (Τζάνης 2022). Figure 2.3.1: Variation of the angle of inclination, along a section above a target.

Η γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο της έλλειψης πόλωσης, με την οριζόντια διεύθυνση, ονομάζεται **κλίση (dip)** του ολικού πεδίου, ενώ η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας της έλλειψης με την αντίστοιχη οριζόντια διεύθυνση ονομάζεται **γωνία κλίσης (tilt)** του πεδίου. Οι τιμές τους είναι δυνατόν να υπολογισθούν με τη θεώρηση ενός κατακόρυφου πρωτεύοντος πεδίου. Ανεξάρτητα της γωνίας μεταξύ του δευτερεύοντος πεδίου και της οριζόντιας διεύθυνσης, το επίπεδο πόλωσης θα είναι κατακόρυφο (κλίση 90°). Η γωνία μεταξύ του μεγάλου άξονα της έλλειψης και της οριζόντιας διεύθυνσης δεν θα είναι 90°. **Αζιμούθιο** του πεδίου ονομάζουμε τη γωνία μεταξύ μιας καθορισμένης διεύθυνσης και της γραμμής διατομής του επιπέδου της έλλειψης με την οριζόντια διεύθυνση.

Η μέθοδος VLF κάνει χρήση χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών σημάτων (15-30 kHz), τα οποία εκπέμπονται από ισχυρούς στρατιωτικούς και ναυτιλιακούς πομπούς, οι οποίο βρίσκονται κατανεμημένοι σε όλο τον κόσμο, κατά τέτοιον τρόπο έτσι ώστε τουλάχιστον δύο από αυτούς να μπορούν να εντοπισθούν σε κάθε σημείο της γης (Εικ.2.3.2)



Εικόνα 2.3.2: Παγκόσμια κατανομή των σταθμών εκπομπής VLF σημάτων. Figure 2.3.2: Global distribution of VLF transmitting stations.

Οι ναυτιλιακοί και στρατιωτικοί VLF πομποί μεγάλης εμβέλειας κατασκευάζονται από κατακόρυφα καλώδια εκατοντάδων μέτρων ύψους. Οι πομποί αυτοί λειτουργούν ουσιαστικά ως πολωμένα ηλεκτρικά δίπολα και το πηγαίο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται είναι θεωρητικά οριζόντιο και διαδίδεται ακτινικά σχηματίζοντας ομόκεντρους κύκλους, με κέντρο τον πομπό. Το πηγαίο πεδίο που διαδίδεται από τον πομπό ταυτίζεται ουσιαστικά με την αζιμουθιακή συνιστώσα H_φ του επίπεδου κύματος που διαδίδεται παράλληλα στην επιφάνεια της Γης και η ηλεκτρική συνιστώσα του είναι η πολική E_θ (Εικ. 2.3.3). Σε τοπικό ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση, για τη συνιστώσα του πηγαίου μαγνητικού πεδίου του πομπού ισχύει H_γ=H_φ, η οποία διεισδύει κατακόρυφα στην επιφάνεια της Γης ανεξάρτητα με τη γωνία πρόσπτωσης (Τζάνης, 2022).



Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται σε ιδιαίτερα μεγάλες αποστάσεις (πολύ μεγαλύτερες από ένα μήκος κύματος) διαδίδονται ως συνδυασμός ενός κύματος εδάφους κι ενός κύματος αέρος. Το γεγονός αυτό παρατηρείται διότι το επιφανειακό κύμα εδάφους που διαδίδεται, ανακλάται και διαθλάται από την ιονόσφαιρα και συνεπώς, σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία VLF τα δύο κύματα καταγράφονται ως ένα και η εξασθένηση τους είναι πολύ μικρή.

Το VLF σύστημα είναι ειδικά σχεδιασμένο για μεγάλες αποστάσεις διάδοσης κυμάτων. Το σήμα των πομπών VLF καθίσταται δυνατό να ανιχνευτεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, που μπορεί να φτάσουν και το ήμισυ της Γης. Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή, η συνιστώσα *Er* θα είναι αμελητέα και το διάνυσμα *E* θα εμφανίζεται σχεδόν κατακόρυφο. Ωστόσο, υπάρχει οριζόντια συνιστώσα στην διεύθυνση διάδοσης και οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι οριζόντιοι ομόκεντροι κύκλοι σχετικά με την κεραία VLF (Εικ. 2.3.4)





Βασικό στοιχείο της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF είναι το **επιδερμικό βάθος** (skin depth) και το βάθος διείσδυσης, άρα και διερεύνησης, του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το επιδερμικό βάθος σχετίζεται με την εξασθένιση του πλάτους του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, κατά τη διάδοση του στο υπέδαφος, σε σχέση με την αρχική του τιμή.

Το **επιδερμικό βάθος** είναι σε τέτοιο βάθος από την επιφάνεια, όπου το πεδίο έχει μειωθεί στο **1/ε της αρχικής τιμής του.** Σε ομοιογενή περιβάλλοντα η εξασθένηση του κύματος είναι εκθετική. Σε βάθη μεγαλύτερα του επιδερμικού, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειας του, καθιστώντας το αδύνατο να δημιουργήσει επαγωγικά ρεύματα σε κάποιον αγωγό που βρίσκεται σε αυτά τα βάθη. Το επιδερμικό βάθος, *δ*, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu\sigma}\right)^{1/2}$$

Όπου μ η μ αγνητική διαπερατότητα (σε H/m), σ η αγωγιμότητα (σε S/m) και ω =2 π f (σε rad/sec) με f την συχνότητα (σε Hz). Συνήθως θεωρείται ότι μ = μ_0 =4 π 10⁻⁷ H/m, όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, οπότε η εξίσωση θα γραφτεί ως εξής:

$$\delta = 500 \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2}$$

Όπου *ρ* είναι η *ειδική ηλεκτρική αντίσταση* σε *Ohm.m*. Συνεπώς, παρατηρείται ότι το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του διερευνώμενου υπεδάφους και τη συχνότητα που χρησιμοποιείται. Το επιδερμικό βάθος, μειώνεται όταν μειώνεται η ειδική

αντίσταση του περιβάλλοντος μέσου και όταν αυξάνεται η συχνότητα. Η μέθοδος VLF χρησιμοποιείται για διερεύνηση σε μέτρια βάθη, συνήθως όχι πάνω από 100m.

Όπως προαναφέρθηκε, το επαγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από έναν αγωγό τείνει να διεισδύει κατακόρυφα προς την επιφάνεια του εδάφους. Συνεπώς, όταν υπάρχουν τοπογραφικές ανωμαλίες στην περιοχή των μετρήσεων VLF, η διείσδυση του πεδίου θα γίνεται κάθετα με την εκάστοτε μέση τοπική κλίση του εδάφους. Αντιθέτως, το πρωτεύον πεδίο παραμένει οριζόντιο.

Σημαντικό ρόλο, κατέχει και η σχέση μεταξύ διεύθυνσης όδευσης και διεύθυνσης της παράταξης της τοπογραφίας. Όταν η διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι παράλληλη με την παράταξη της τοπογραφίας (Εικ. 2.3.5 Α), το άνυσμα του ολικού μαγνητικού πεδίου τείνει να γίνει παράλληλο με την τοπογραφία και έτσι δεν παραμορφώνεται, καθώς και η γωνία κλίσης που τελικά μετρείται, εφόσον το επιδερμικό βάθος είναι μικρότερο από το μέγεθος της τοπογραφικής ανωμαλίας. Εάν ωστόσο, η παράταξη της τοπογραφίας είναι μετρήσεις της τον διεύθυνση διάδοσης του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε οι μετρήσεις της γωνίας κλίσης υφίστανται την επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου.



 δευσης Α) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF παράλληλη στην παράταξη της τοπογραφίας Β) Διεύθυνση διάδοσης του κύματος VLF κάθετη στην παράταξη της τοπογραφίας (Τζάνης, 2022).
 Figure 2.3 5: The effect of topographic anomalies depending on the direction of the section A) Direction of propagation of the VLF wave parallel to the topography B) Direction of propagation of the VLF wave perpendicular to the the topography.

Το τοπικό ανάγλυφο επιδρά κατά τέτοιον τρόπο στις μετρήσεις VLF έτσι ώστε θεωρείται ότι οι μετρούμενες τιμές στον δέκτη αυξάνονται, όταν η όδευση γίνεται προς τ' ανάντη μιας πλαγιάς, ενώ αντίστοιχα θα μειώνονται όταν η όδευση γίνεται προς τα κατάντη της πλαγιάς. Αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης του τοπογραφικού ανάγλυφου, είναι η εμφάνιση στην πραγματική συνιστώσα ενός σημείου καμπής στην κορυφή μιας κλιτύος ή στο βαθύτερο σημείο μιας κοιλάδας. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η επίδραση της τοπογραφίας στις μετρήσεις VLF, έχουν προταθεί κάποιες διαδικασίες φιλτραρίσματος των μετρήσεων υπαίθρου.

To 1969, ο *Fraser*, πρότεινε έναν απλό αριθμητικό διαφορικό φίλτρο για την ερμηνεία των καμπύλων VLF. Κατά την εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου, τα σημεία καμπής ή μηδενικά σημεία διάβασης,

που υποδεικνύουν πιθανούς υπεδαφικούς αγωγούς, σε μια καμπύλη VLF, μετατρέπονται σε κορυφές, διευκολύνοντας τον προσδιορισμό τους αλλά και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών. Επιπλέον, μέσω του συγκεκριμένου φίλτρου αφαιρούνται οι τοπογραφικές επιδράσεις με μήκη κύματος μεγαλύτερο των προσδιορισθέντων αγωγών, εάν αυτές υφίστανται. Το φίλτρο εφαρμόζεται σε 4 διαδοχικά διακριτά σημεία της καμπύλης VLF και ο τύπος που εφαρμόζεται είναι:

$$f_{2,3} = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)$$

όπου *Mi* η μέτρηση στο σταθμό *i*. Η υπολογισθείσα τιμή προβάλλεται στο ήμισυ της απόστασης μεταξύ *M2* και *M3*.

Προκειμένου οι θετικές ανωμαλίες να αντιστοιχούν και σε θετικές κορυφές – ακρότατα, το φίλτρο πρέπει να αντιστραφεί και να πάρει τη μορφή:

$$f_{2,3} = (M_1 + M_2) - (M_3 + M_4)$$

Τα χαρακτηριστικά του φίλτρου είναι τα παρακάτω:

- Προσθέτει στις μετρήσεις 90°
- Ο θόρυβος με μήκος κύματος ίσο με την ισο-απόσταση των σταθμών μέτρησης αφαιρείται πλήρως.
- Μέγιστα πλάτη παρατηρούνται για μήκη κύματος 75 μέτρων ή πενταπλάσια της ισοαπόστασης των σταθμών μέτρησης.

To 1983, οι Karous-Hjelt, πρότειναν ένα διακριτό γραμμικό φίλτρο για τα δεδομένα VLF, που ουσιαστικά πρόκειται για μια προέκταση του φίλτρου κατά Fraser, χρησιμοποιώντας έξι (6) διακριτά σημεία, με ακρίβεια 8%.

Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου φιλτραρίσματος εκφράζεται ως **η ισοδύναμη πυκνότητα ρεύματος σε συγκεκριμένο βάθος**, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει δευτερεύον μαγνητικό πεδίο ίσο με αυτό που μετρήθηκε. Παρόμοια με το φίλτρο Fraser μετατρέπει τα μηδενικά σημεία διάβασης, σε κορυφές. Οι ανωμαλίες θεωρείται ότι προέρχονται από επιμηκυμένους αγωγούς, κάθετους πάντα στη γραμμή όδευσης.

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων της μεθόδου VLF έγινε χρήση του συστήματος WADI του Οίκου ABEM (Εικ. 2.3.6)

Το σύστημα αποτελείται από τρείς (3) αλληλένδετες μονάδες:

- 1) Την μονάδα κεραίας, που αποτελείται από δύο κάθετα μεταξύ τους πηνία, μήκους 15 εκατοστών, όπου το ένα πηνίο ανιχνεύει την οριζόντια συνιστώσα και το άλλο την κατακόρυφη. Το κλισίμετρο που είναι ενσωματωμένο στην κεραία, βοηθάει στην αυτόματη διόρθωση των αποκλίσεων δημιουργούνται από τυχόν κλίση της κεραίας.
- **2)** Την μονάδα μετρήσεων, που περιέχει ένα δέκτη αναλογικών σημάτων, ενισχυτή και αναλογικά φίλτρα αλλά και τις μπαταρίες για την παροχή ενέργειας στο σύστημα.
- 3) Την μονάδα ελέγχου, από την οποία γίνεται η επιλογή του κατάλληλου πομπού αλλά και η πραγματοποίηση των μετρήσεων, μέσω ενός μικροεπεξεργαστή. Τέλος, στη μνήμη που περιέχεται εντός της μονάδας ελέγχου αποθηκεύονται ηλεκτρονικά όλες οι μετρήσεις.



Εικόνα 2.3.6: Σύστημα VLF WADI του οίκου ABEM. Figure 2.3.6: The ABEM WADI VLF system.

Για την επεξεργασία των δεδομένων VLF αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RAMAG. Το λογισμικό αυτό, μετά τη μεταφορά των δεδομένων υπαίθρου από το όργανο (ABEM WADI) στον υπολογιστή, βοηθάει στην αυτοματοποιημένη εφαρμογή του *φίλτρου κατά Karous-Hjelt*, πάνω στα δεδομένα υπαίθρου, αφού πρώτα εξομαλύνει την καμπύλη. Το φιλτράρισμα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και σε πολλά σετ δεδομένων (προφίλ) ταυτόχρονα.

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των δεδομένων πραγματοποιήθηκε η χρήση του λογισμικού KHFFILT (*Pirttijarvi, 2004*), όπου είναι εφικτή η εφαρμογή των *φίλτρων Frazer και Karous-Hjelt*, με ταυτόχρονη εφαρμογή εξασθένησης ανάλογα με το επιδερμικό βάθος για τις ψευδό-τομές κατανομής της ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος. Υπάρχει η επιπλέον η δυνατότητα αντιστροφής των φίλτρων, προκειμένου οι θετικές ανωμαλίες να αντιστοιχούν σε θετικά ακρότατα ή το αντίστροφο, ανάλογα πάντα με την επιλογή του χρήστη.

Τέλος, για την επεξεργασία των δεδομένων VLF πραγματοποιήθηκε η χρήση του λογισμικού *Inv2DVLF* (Monteiro Santos et al., 2006). Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ουσιαστικά ένας αλγόριθμος αντιστροφής κανονικοποιημένων δεδομένων VLF που αναπτύχθηκε πάνω στο απευθείας πρόβλημα (Sasaki, 1989; 2001) μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (finite element). Σκοπός της συγκεκριμένης αντιστροφής είναι να προσδιοριστεί η υπεδαφική κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, που θα ανταποκρίνεται κατάλληλα στα δεδομένων υμέσα στα όρια σφάλματος. Ως μέθοδος αντιστροφής χρησιμοποιείται η *εξομάλυνση ελαχίστων τετραγώνων (smoothness-constrained least squares)*, ευρέως διαδεδομένων (Sasaki, 1989; DeGroot-Hedlin & Constable 1990; Sasaki, 1994; Loke & Barker, 1996; Sasaki, 2001). Στην προκειμένη περίπτωση η μέθοδος στηρίζεται στο **βαθμωτό μέτρο B** (scalar tipper), που προκύπτει από τη σχέση κατακόρυφης (HZ) και οριζόντιας (HY) συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου, H_z=B*H_Y, που εξαρτάται μόνο από την υπεδαφική δομή. Ο συντελεστής αυτός προέρχεται από την διαφορά φάσης των ανωτέρω συνιστωσών, λόγω των επαγωγικών φαινομένων.

Με την εισαγωγή των δεδομένων (θέσεις μετρήσεων, τιμές μέτρησης πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας αλλά και τοπογραφία), στο βοηθητικό λογισμικό **PrepVLF**, κατασκευάζεται αυτόματα ο

κανονικοποιημένος κάναβος και τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό *Inv2DVLF* για την αντιστροφή. Μετά από τον προκαθορισμένο, από το χρήστη, αριθμό επαναλήψεων (*iterations*), προκύπτει ο κάναβος με το τελικό μοντέλο κατανομής της ειδικής αντίστασης, καθώς και η απόκριση του συγκεκριμένου μοντέλου, σε σύγκριση με τα δεδομένα υπαίθρου. Σε αυτό το λογισμικό είναι παράλληλα εφικτή και η εισαγωγή των δεδομένων της τοπογραφίας κάθε τομής.

2.4 Μετρήσεις πεδίου και επεξεργασία δεδομένων

Τον Ιούνιο του 2022 πραγματοποιήθηκε, στον εξωτερικό χώρο του σπηλαίου Αλιστράτης, από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, προκαταρκτική γεωφυσική έρευνα, με στόχο την εύρεση πιθανής επέκτασης του καρστικού αγωγού.

Αναλυτικότερα, για την συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα εκτελέστηκαν

- [1] Γεωφυσικές τομές υπεράνω του Σπηλαίου *τομές βαθμονόμησης* και
- [2] Γεωφυσικές τομές στην αναμενόμενη ανατολική διεύθυνση επέκτασης του σπηλαίου *διερευνητικές τομές.*

Οι πρώτες τομές σχεδιάστηκαν κάθετα στη διεύθυνση ανάπτυξης του σπηλαίου, όπως υπαγορεύουν οι τεχνικές προδιαγραφές των γεωφυσικών μεθόδων/τεχνικών που εφαρμόστηκαν, προκειμένου να 'αναγνωριστεί' και να 'βαθμονομηθεί' η ανωμαλία του υφιστάμενου «στόχου» (κενό).

Οι διερευνητικές τομές σχεδιάστηκαν σε διεύθυνση παράλληλη με τις προηγούμενες.

Συνολικά εκτελέστηκαν τρεις (3) διαφορετικές υπεδαφικές διασκοπικές τεχνικές:

- [1] Γεωηλεκτρικής τομογραφίας
- [2] *Γεωραντάρ* και
- [3] Πεδίου συχνότητας VLF.

Όλα τα σημεία/θέσεις δειγματοληψίας (μετρήσεων), αποτυπώθηκαν επίγεια με τη χρήση του δέκτη GNSS (Global Navigation Satellite System) Kolida K5 UFO, 965 channels. Εφαρμόστηκε **η τεχνική RTK-**NTRIP (Real Time Kinematics-Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), κατά την οποία ο δέκτης λαμβάνει δεδομένα από δορυφόρους (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo και SBAS) σε πραγματικό χρόνο και με ταυτόχρονη σύνδεση μέσω δικτύου (WiFi ή δίκτυο κινητής τηλεφωνίας) σε GNSS δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς, πραγματοποιεί υψηλής ποιότητας διορθώσεις για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του. Η οριζοντιογραφική και κατακόρυφη ακρίβεια των μετρήσεων είναι ±8mm+0.5ppm και ±15mm+0.5ppm, αντίστοιχα. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε και εναέρια αποτύπωση του τοπικού αναγλύφου και του συνόλου των εργασιών υπαίθρου, με την χρήση **RTK** *drone* (Εικ. 2.4.1).



Εικόνα 2.4.1: Στιγμιότυπα από την τοπογραφική αποτύπωση των σημείων/θέσεων μετρήσεων με τη χρήση δέκτη RTK-GNSS Figure 2.4.1: Images from the RTK-GNSS measurements of the geophysical survey lines.

Γεωηλεκτρική Τομογραφία (ERT)

Επίλυση ευθέος προβλήματος (forward modelling)

Αρχικά, πριν την λήψη των μετρήσεων έγινε προσπάθεια για την προσομοίωση του επιθυμητού στόχου διερεύνησης (καρστικού αγωγού) και την πιθανή απόκριση της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, με τη χρήση του λογισμικού Res2DMOD της Geotomo Software, για διαφορετικά σενάρια υπεδαφικής δομής, έχοντας ως γνώμονα πάντα την καρστική-γεωμορφολογική δομή της περιοχής και τις αναμενόμενες διαστάσεις και βάθος ταφής του στόχου (*Danielsen & Dahlin, 2010; Orlando, 2013;* Bermejo, 2017).

Για την επίλυση του *ευθέος προβλήματος* (forward modelling), έγινε <u>θεώρηση ενός αρχικού μοντέλου</u>, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το σπήλαιο αναπτύσσεται εντός ασβεστολιθικού περιβάλλοντος, το οποίο βιβλιογραφικά χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (>1.500 Ohm.m).
- Τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (διαστάσεις και βάθος ταφής), στο ήδη υπάρχον τμήμα του σπηλαίου, όπως περιεγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 1.2.2.

Με γνώμονα τα παραπάνω σχεδιάστηκαν μοντέλα τομών μήκους 235 m και ισοαπόστασης ηλεκτροδίων 5,0 m, για την διάταξη *Wenner*.

Σε πρώτο στάδιο, ο υπεδαφικός αντιστατικός (15.000 Ohm.m) στόχος (καρστικός αγωγός) τοποθετήθηκε στο κεντρικό τμήμα της τομής, σε απόσταση ~120m, και σε βάθος από 30m έως 45m, εντός ομοιογενούς, σχετικά αντιστατικού (2.000 Ohm.m) ημιχώρου.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η θεώρηση ότι περιμετρικά του κενού χώρου, λόγω της ύπαρξης μικρότερων κενών και διακλάσεων, η τιμή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του φέροντος σχηματισμού αυξάνεται σημαντικά (3.500-10.000 Ohm.m).

Στην εικόνα 2.4.2 παρουσιάζονται το αρχικό μοντέλο της πρώτης θεώρησης και η θεωρητική τομή κατανομής της μετρηθείσας φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ψευδοβάθους.



Εικόνα 2.4.2: Αρχικό μοντέλο για τη θεώρηση ύπαρξης ενός υπεδαφικού στόχου (καρστικού αγωγού). Figure 2.4.2: Initial model for the existance of only one subsurface target (karstic conduit).

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του τελικού μοντέλου της κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, πραγματοποιήθηκε αντιστροφή των παραπάνω δεδομένων του ευθέος προβλήματος. Στην εικόνα 2.4.3 παρουσιάζεται το τελικό μοντέλο, όπου διαπιστώνεται ότι η ύπαρξη αυτού του πολύ αντιστατικού στόχου επηρεάζει ένα πολύ μεγαλύτερο τμήμα της τομής, σε σχέση με τις πραγματικές του διαστάσεις, τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια διάσταση. Συνεπώς, παρατηρείται ότι η εμφάνιση του αντιστατικού στόχου εντοπίζεται ρηχότερα (~13m) από το αναμενόμενο βάθος, και με μεγαλύτερη οριζόντια εξάπλωση (80m – 160m).



Εικόνα 2.4.3: Μοντέλο αντιστροφής των δεδομένων του ευθέος προβλήματος, για τη θεώρηση ύπαρξης ενός υπεδαφικού στόχου (καρστικού αγωγού). Σίστας 2.4.2 μουσίος στόχου (καρστικού αγωγού).

Στη συνέχεια της διαδικασίας της μοντελοποίησης, πέρα από τα υπεδαφικά χαρακτηριστικά που θεωρήθηκαν στο πρώτο μοντέλο, λήφθηκε υπόψη και η εμφάνιση ενός δεύτερου επιφανειακού επιπέδου καρστικοποίησης που συναντάται στην περιοχή, έπειτα από την λεπτομερή γεωμορφολογική αξιολόγηση που περιεγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 1.2.2.

Κατά αυτόν τον τρόπο, στο δεύτερο στάδιο επίλυσης του ευθέος προβλήματος, κατασκευάστηκε μοντέλο με πιο πολύπλοκη υπεδαφική δομή. Πέρα από την εμφάνιση του κυρίως καρστικού αγωγού (σπήλαιο Αλιστράτης), θεωρήθηκε η ύπαρξη ενός δεύτερου επιπέδου καρστικοποίησης, το οποίο διασυνδέεται με το βαθύτερο μέσω μίας ζώνης φρεατίων και διακλάσεων.

Στην εικόνα 2.4.4 παρουσιάζεται το αρχικό μοντέλο που ικανοποιεί τις θεωρήσεις του δεύτερου πιθανού σεναρίου. Στο κεντρικό του τμήμα, τοποθετήθηκε ο κύριος αγωγός με τα χαρακτηριστικά της πρώτης περίπτωσης. Επιπλέον, ακριβώς πάνω από τον κυρίως καρστικό αγωγό και σε απόσταση 175m με 180m, σε βάθη 4m έως 12m και προστέθηκαν δύο αντιστατικοί στόχοι (15.000 Ohm.m) μικρότερης κλίμακας που προσομοιώνουν το δεύτερο επίπεδο καρστ . Μεταξύ των αντιστατικών στόχων κατασκευάστηκε μία αντιστατική ζώνη (6.000 Ohm.m) που διασυνδέει τα δύο επίπεδα καρστικοποίησης και προσομοιώνει τη ζώνη φρεατίων και διακλάσεων.

Figure 2.4.3: Inversion model of the forward model data, for the existance of only one subsurface target (karstic conduit).



Εικόνα 2.4.4: Αρχικό μοντέλο για τη θεώρηση ύπαρξης τριών υπεδαφικών στόχων (δύο επίπεδα καρστ). Figure 2.4.4: Initial model for the existance of three possible subsurface targets (two karstification levels).

Τέλος, στην εικόνα 2.4.5 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα που προέκυψε έπειτα από την 2D αντιστροφή του παραπάνω θεωρητικού μοντέλου. Πράγματι, στις θέσεις που τοποθετήθηκαν οι καρστικοί αγωγοί, όπως επίσης και στην ενδιάμεσή τους ζώνη φαίνεται να συγκεντρώνονται οι υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (>5.000 Ohm.m). Καθίσταται εμφανές, ότι η διακριτική ικανότητα της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, για το επιθυμητό βάθος διασκόπησης, δεν είναι η κατάλληλη, προκειμένου να διαχωριστούν οι τρεις αντιστατικοί στόχοι. Ωστόσο, προκειμένου η διασκόπηση να φτάσει στο επιθυμητό βάθος (του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης) η επιλογή των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (μήκους τομής και απόστασης ηλεκτροδίων) αποτελεί την καλύτερη δυνατή λύση, με βάση τον διαθέσιμο εξοπλισμό.





Figure 2.4.5: Inversion model of the forward model data, for the existance of three possible subsurface targets (two karstification levels).

<u>Μετρήσεις πεδίου</u>

Οι μετρήσεις πεδίου αρχικά, περιλαμβάνουν την εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής διασκόπησης, με την εφαρμογή της υψηλής διακριτικής ικανότητας τεχνικής της **γεωηλεκτρικής τομογραφίας** (electrical resistivity tomography – ERT), για τον προσδιορισμό της 2D κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και τον έλεγχο της πλευρικής ανομοιογένειας και πιθανής ύπαρξης κενών χώρων (εγκοίλων) (Martínez-Moreno et al., 2013; Metwaly & AlFouzan, 2013; Xu et al., 2017; Amanatidou E et al., 2022), αλλά και της διερεύνησης άλλων πιθανών καρστικών γεωμορφών (Verdet et al., 2022; Boualla et al., 2021)

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής επιλέχθηκαν τέσσερις (4) θέσεις (Εικ. 2.4.6)

- [1] Δύο (2) υπεράνω του σπηλαίου και
- [2] Δύο (2) ανατολικά, κάθετα στην αναμενόμενη διεύθυνση ανάπτυξης του καρστικού αγωγού.



Εικόνα 2.4.6: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας. Figure 2.4.6: The ERT lines positions.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αναμενόμενο βάθος ταφής του στόχου είναι περίπου 30m και ότι οι αναμενόμενες διαστάσεις του είναι το μέγιστο 15x15m το συνολικό ανάπτυγμα κάθε τομής που επιλέχθηκε είχε μήκος 235m, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια με ισο-απόσταση 5,0m (Εικ 2.4.7).





Εικόνα 2.4.7: Στιγμιότυπα από την εφαρμογή της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στη θέση ERT2. Figure 2.4.7: Images from the application of the Electrical Resistivity Tomography technique in ERT2 line.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, για τη μέτρηση των ειδικών αντιστάσεων, είναι η γεωηλεκτρική συσκευή SyscalPro switch 48 του οίκου IRIS Instruments. Για την επεξεργασία των δεδομένων πεδίου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2DInv της Geotomo Software.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 2D επεξεργασίας των δεδομένων των τομών ERT. Συγκεκριμένα, στην πρώτη τομή κάθε εικόνας διακρίνεται η κατανομή της μετρηθείσας φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ψευδο-βάθους. Η ακριβώς από κάτω τομή αφορά την κατανομή της υπολογισθείσας από το λογισμικό κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους. Πρόκειται δηλαδή για την προσπάθεια της καλύτερης δυνατής ταύτισης των δεδομένων του μοντέλου που κατασκευάζει το λογισμικό με τα δεδομένα των μετρήσεων πεδίου. Τέλος, στην τρίτη τομή απεικονίζεται το τελικό μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, συναρτήσει του βάθους.

Στην εικόνα 2.4.8 στο τελικό μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους της τομής ERT1, διακρίνονται αρχικά έντονες διακυμάνσεις στις τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

Πιο συγκεκριμένα:

- Παρουσιάζεται ένας αντιστατικός στόχος (>5.000 Ohm.m)στα 40 με 80 μέτρα της τομής και σε βάθη μεγαλύτερα των 6,5m.
- Στο μέσον περίπου της τομής (~120m) παρατηρείται μία κατακόρυφη έντονη μετάβαση από χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (<5.000 Ohm.m) σε ιδιαίτερα υψηλές (>15.000 Ohm.m), οι οποίες συναντώνται σε όλο το υπόλοιπο μήκος της τομής και φτάνουν έως το μέγιστο βάθος διασκόπησης.
- Τέλος, ο περιβάλλον σχηματισμός των δύο αντιστατικών στόχων παρουσιάζει κυμαινόμενες τιμές μεταξύ των 1.000 και 3.000 Ohm.m.



Εικόνα 2.4.8: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομής ERT1.

Figure 2.4.8: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT1.

Παρόμοια κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης παρουσιάζεται και στην εικόνα 2.4.9 με την διαφοροποίηση ότι οι δύο αντιστατικοί στόχοι που περιεγράφηκαν παραπάνω παρουσιάζονται σαφώς οριοθετημένοι. Τα συμπεράσματα για αυτήν την τομή είναι:

- Ο πρώτος αντιστατικός στόχος παρουσιάζει μεγαλύτερη πλευρική εξάπλωση από ότι στην προηγούμενη τομή (20-100m), εμφανίζει υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (>70000 Ohm.m) και εντοπίζεται ακόμα πιο κοντά στην επιφάνεια (<6,5m).
- **ii.** Οι διαστάσεις και οι τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του δεύτερου ιδιαίτερα αντιστατικού στόχου είναι ταυτόσημες με αυτές της πρώτης τομής.
- Οι τιμές του περιβάλλοντος σχηματισμού εμφανίζονται σχετικά ομοιογενείς και μικρότερες των 1.000 Ohm.m.



Εικόνα 2.4.9: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομής ERT2.

Figure 2.4.9: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT2.

Στην εικόνα 2.4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας της τρίτης τομής γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ERT3). Σε αυτή παρατηρείται η συνέχιση της πλευρικής επέκτασης των αντιστατικών στόχων που περιεγράφηκαν στις δύο προηγούμενες τομές.
- Ο πρώτος αντιστατικός στόχος συναντάται από την αρχή της τομής μέχρι τα 90 μέτρα περίπου και σε βάθος μεγαλύτερο των 6,5 μέτρων. Παρουσιάζει υψηλές τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης που πλησιάζουν σε τιμές μεγαλύτερες των 15000 Ohm.m.
- Ο δεύτερος αντιστατικός στόχος εμφανίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 15 μέτρων από το μέσον της τομής μέχρι περίπου τα 200 μέτρα.



Εικόνα 2.4.10: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομής ERT3.

Figure 2.4.10: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT3.

Τέλος, στην εικόνα 2.4.11 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα επεξεργασίας της τέταρτης τομής ERT. Στο τελικό μοντέλο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης παρατηρείται η εμφάνιση:

- Ενός σαφώς καθορισμένου αντιστατικού στόχου (>13000 Ohm.m), σε απόσταση από 70m μέχρι 90m και σε βάθος από 6,5m έως 15m.
- Και ενός δεύτερου αντιστατικού στόχου (9000 Ohm.m) ο οποίος αναπτύσσεται σε απόσταση 130m με 200m και σε βάθος μεγαλύτερο των 28m.



Εικόνα 2.4.11: Μοντέλο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με τοπογραφία, έπειτα από την 2D αντιστροφή των δεδομένων της γεωηλεκτρικής τομής ERT4.

Figure 2.4.11: 2D inversion model of the subsurface resistivity destribution of the section ERT4.

Όπως διαπιστώνεται, και στις τέσσερις (4) τομές της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, παρατηρείται η εμφάνιση δύο κύριων αντιστατικών στόχων:

- i. Ενός στόχου στα αρχικά τμήματα της τομής και από βάθος μεγαλύτερο των 6,5m και
- Ενός δεύτερου, μεγαλύτερης κλίμακας, ο οποίος αναπτύσσεται από τα κεντρικά τμήματα των τομών μέχρι και το τέλος αυτών.

Για τον δεύτερο ιδιαίτερα αντιστατικό στόχο (>15.000 Ohm.m) παρατηρείται μία κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τομών βαθμονόμησης (ERT1 και ERT2) και των διερευνητικών τομών (ERT3 και ERT4). Αυτή η διαφοροποίηση αφορά στο βάθος ταφής του αντιστατικού στόχου, το οποίο είναι σαφώς μεγαλύτερο στις δύο διερευνητικές τομές.

Παρόλες τις διαφορές, στην εικόνα 2.4.12 της ψευδο-τρισδιάστατης απεικόνισης των τομών της γεωηλεκτρικής τομογραφίας διακρίνεται μία πλευρική επέκταση των δύο κύριων αντιστατικών στόχων προς βορειοανατολικά.



Εικόνα 2.4.12: Ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση των τομών της γεωηλεκτρικής τομογραφίας. Figure 2.4.12: Pseudo-3D presentation of the ERT sections.

Ηλεκτρομαγνητική Τεχνική Γεωραντάρ (GPR)

Η ηλεκτρομαγνητική τεχνική **γεωραντάρ** (**GPR** - Ground Penetrating Radar) εφαρμόστηκε για την εύρεση επιφανειών ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, απόρροια της ενδεχόμενης ύπαρξης καρστικών εγκοίλων και γεωμορφών (dos Reis Jr et al., 2014; Zajc et al., 2014; Čeru et al., 2018).

Για την εφαρμογή της τεχνικής επιλέχθηκαν έξι (6) θέσεις (Εικ. 2.4.13):

- i. Δύο (2) υπεράνω και κάθετα του υπάρχοντος καρστικού αγωγού, μήκους 250m (GPR1, GPR2)
- Τρεις (3) ανατολικά, κάθετα στην αναμενόμενη διεύθυνση ανάπτυξης του καρστικού αγωγού, μήκους 235m (GPR3, GPR4) και 150m (GPR5) και
- iii. Μία (1) που τέμνει τις πέντε (5) προηγούμενες, μήκους 215m (GPR6).



Εικόνα 2.4.13: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής γεωραντάρ. Figure 2.4.13: The GPR lines positions.

Για την συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα έγινε χρήση του συστήματος γεωραντάρ Noggin του Οίκου Sensors & Software με κεραία συχνότητας 100 MHz (Εικ. 2.4.14).

Αρχικά, πριν την έναρξη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε *βαθμονόμηση* του οδομέτρου του συστήματος και καθορίστηκε το βήμα εκπομπής του ηλεκτρομαγνητικού παλμού (*step size*) σε 0,1 m.

Το βάθος διασκόπησης ορίστηκε στα 50 m, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις και το βάθος ταφής του στόχου, ενώ η ταχύτητα του μέσου διασκόπησης ορίστηκε στα 0,12 m/ns, η οποία θεωρείται βιβλιογραφικά ως η μέση ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού παλμού στους ασβεστόλιθους.





Εικόνα 2.4.14: Στιγμιότυπα κατά την εφαρμογή της τεχνικής γεωραντάρ στην περιοχή μελέτης. Figure 2.4.14: Images from the application of the GPR technique in the survey area.

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ΕΚΚΟ-Project v.6 του Οίκου Sensors & Software.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας προέκυψαν, έπειτα από τη διαδοχική εφαρμογή των φίλτρων Dewow, Background Substraction, DynaT, SEC2 Gain (Εικ. 2.4.15) και Migration. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του αναγλύφου για κάθε όδευση γεωραντάρ.

Dewow				4
DynaT	All	•	-	E .
Background Sub	I			
Filter Width(m)	Full Length	-		-
Gain Type	SEC2 Gain	-		Ł
Level	User	-		ŧ
Attenuation	2.00	-		1
Start Gain	8.00	-		ŧ
Maximum Gain	500	-		1
	1005U			ŧ
Recommended Gain/Filter Disable Tips	Rav Ga Processe	w (0.020) in(500.00) d (-0.567)	0	+

Substraction, DynaT και SEC2 Gain. Figure 2.4.15: GPR data processing in LineView module of the EKKO_Project Software,

with the application of Dewow, Background Subtraction, DynaT and SEC2 Gain filters.

Στην εικόνα 2.4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας για την τομή γεωραντάρ 1 (GPR line 1),



κόνα 2.4.16: Τομή GPR1 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Proje Figure 2.4.16: Processed GPR section for GPR1 line.

Στη συγκεκριμένη τομή παρατηρούνται επιφάνειες έντονης ανάκλασης (κίτρινες εστιγμένες γραμμές) του ηλεκτρομαγνητικού παλμού κατά μήκος της όδευσης. Πιο συγκεκριμένα:

- μία επιφάνεια έντονης ανάκλασης εμφανίζεται από τα 50 μέχρι τα 120 μέτρα απόσταση και σε βάθος 15 μέτρων.
- μία δεύτερη επιφάνεια ανάκλασης, σε απόσταση 100 με 210 μέτρα περίπου και σε βάθη 5 με 10 μέτρων
- και τέλος, μία μικρότερη επιφάνεια ανάκλασης σε απόσταση 200 με 220 μέτρων και σε βάθος
 20 μέτρων .

Στην τομή GPR2 (Εικ. 2.4.17) παρατηρείται η ανάπτυξη ζευγών παράλληλων επιφανειών ανάκλασης (κίτρινες εστιγμένες γραμμές) σε τρία σημεία της τομής:

- Το πρώτο ζεύγος συναντάται από την αρχή της τομής μέχρι τα 40 μέτρα απόσταση και σε βάθος από τα 10 έως τα 20 μέτρα.
- Το δεύτερο ζεύγος συναντάται από τα 100 μέχρι τα 160 μέτρα απόσταση και από τα 10 έως τα 30 μέτρα βάθος.
- Το τρίτο ζεύγος εμφανίζεται στα 200 με 230 μέτρα απόσταση και στα 30 μέτρα βάθος

Τέλος, ιδιαίτερης επισήμανσης χρίζει η δομή με πολλαπλές επιφάνειες ανάκλασης που συναντάται στα 180m απόσταση και στα 135m απόλυτο υψόμετρο (πράσινο πλαίσιο)



Εικόνα 2.4.17: Τομή GPR2 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό EKKO_Project. Figure 2.4.17: Processed GPR section for GPR2 line.

Στην τομή GPR3 (Εικ. 2.4.18) εμφανίζονται:

- ένα ζεύγος παράλληλων επιφανειών ανάκλασης το οποίο περιορίζεται στα αρχικά τμήματα της τομής και σε βάθος >25m.
- Σε απόσταση 60 με 90 μέτρων και σε βάθος 10 μέτρων μία ιδιαίτερη δομή με διάφορες επιφάνειες ανάκλασης.



Εικόνα 2.4.18: Τομή GPR3 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project. Figure 2.4.18: Processed GPR section for GPR3 line.

και στην τομή GPR 4 έχουν διερευνηθεί παρόμοιες δομές (Εικ. 2.4.19) Συγκεκριμένα παρατηρούνται:

- Η ανάπτυξη ενός ζεύγους παράλληλων επιφανειών ανάκλασης, από την αρχή της τομής μέχρι τα 70m απόσταση και από 135m μέχρι τα 125m απόλυτο υψόμετρο.
- Μία δομή με πολλαπλές ανακλάσεις (πράσινο πλαίσιο) από απόσταση 70m μέχρι 110m και από τα 140m μέχρι τα 128m απόλυτο υψόμετρο



Εικόνα 2.4.19: Τομή GPR4 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό EKKO_Project. Figure 2.4.19: Processed GPR section for GPR4 line.

Στην τομή GPR5 (Εικ. 2.4.20) αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση ενός ζεύγους παράλληλων και επίπεδων σχετικά επιφανειών ανάκλασης, που αναπτύσσεται από την αρχή της τομής, μέχρι τα 50 μέτρα απόσταση και σε βάθη από 20 μέχρι 30 μέτρα.



Εικόνα 2.4.20: Τομή GPR5 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό EKKO_Project. Figure 2.4.20: Processed GPR section for GPR5 line.

Τέλος, στην εικόνα 2.4.21 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων της τομής GPR6 στο οποίο αναδεικνύονται:

- ένα ζεύγος παράλληλων επιπέδων ανάκλασης από την αρχή της τομής μέχρι τα 60 μέτρα και σε βάθος από 10 έως 20 μέτρα.
- μία δομή συσσωρευμένων πολλαπλών ανακλάσεων που περιβάλλεται από πράσινου χρώματος πλαίσιο, στα 110 με 130 μέτρα απόσταση και στα 5m με 15m βάθος.



Εικόνα 2.4.21: Τομή GPR6 έπειτα από την επεξεργασία στο λογισμικό ΕΚΚΟ_Project. Figure 2.4.21: Processed GPR section for GPR6 line.

Στην εικόνα 2.4.22 παρουσιάζεται η ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση των τεσσάρων βασικών τομών της τεχνικής γεωραντάρ (GPR1, GPR2, GPR3 και GPR4) Στις δύο τομές βαθμονόμησης (GPR1 και GPR2) είναι εμφανής η ανάπτυξη παρόμοιων επιφανειών ανάκλασης, σε αντίστοιχα βάθη, κυρίως στα κεντρικά τμήματα και στο τέλος των τομών Επιπλέον, στις δύο τομές διερεύνησης (GPR3 και GPR4) εμφανίζεται στα αρχικά τμήματα και σε βάθος 20 m με 30 m ένα ζεύγος παράλληλων επιφανειών ανάκλασης, ενώ είναι επίσης εμφανής η παρουσία του στόχου υψηλής έντασης ανάκλασης μετά τα 60m απόσταση (πράσινο πλαίσιο).

Είναι γεγονός, ότι στις δύο τελευταίες τομές δεν παρατηρείται η εμφάνιση επιφανειών ανάκλασης έπειτα από τα κεντρικά τμήματα τους. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι στις συγκεκριμένες τομές και έπειτα από αυτά τα μέτρα, πιθανώς να υπήρξε μεγαλύτερη απορρόφηση του σήματος και συνεπώς μικρότερο βάθος διείσδυσης.



Εικόνα 2.4.22: Ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση των τομών γεωραντάρ (GPR1, GPR2, GPR3, GPR4). Figure 2.4.22: Pseudo-3D presentation of the GPR sections (GPR1, GPR2, GPR3, GPR4).

Έπειτα από την 2D επεξεργασία της κάθε τομής γεωραντάρ ξεχωριστά, πραγματοποιήθηκε η 3D επεξεργασία των τομών και η δημιουργία δύο συστημάτων *ισοεπιφανειών βάθους* (*depth slices*).

Στην εικόνα 2.4.23 παρουσιάζονται τα δύο συστήματα ισοεπιφανειών βάθους τα οποία προέκυψαν από τη συνδυαστική επεξεργασία των τομών GPR1, GPR2 και GPR3, GPR4, GPR5 αντίστοιχα.

Οι συγκεκριμένες ισοεπιφάνειες έντασης ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού βρίσκονται στα 12m βάθος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης επεξεργασίας των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι στο συγκεκριμένο βάθος παρατηρούνται, και στις δύο ισοεπιφάνειες, συστηματικά, στόχοι υψηλής έντασης ανάκλασης, που πιθανώς παρουσιάζουν πλευρική επέκταση.



Εικόνα 2.4.23: Ισοεπιφάνειες έντασης ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, στα 12m βάθος. Figure 2.4.23: Isosurfaces of the GPR reflection intensities, in 12m depth.

Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος 'πεδίου-συχνότητας' VLF

Τέλος, εφαρμόστηκε η **ηλεκτρομαγνητική μέθοδος 'πεδίου-συχνότητας' VLF** (Very Low Frequency), για τη διερεύνηση πιθανών ανωμαλιών που ενδεχομένως να προκαλέσουν ιδιαίτερα αντιστατικοί «στόχοι» (πιθανοί κενοί χώροι) σε λιγότερο αντιστατικό περιβάλλον (κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι) (Munk & Sheets, 1997; Bosch & Müller, 2001; Bosch et al., 2010).

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής επιλέχθηκαν τρεις (3) θέσεις (Εικ. 2.4.24):

- [1] Μία (1) υπεράνω του σπηλαίου και
- [2] Δύο (2) ανατολικά, κάθετα στην αναμενόμενη διεύθυνση ανάπτυξης του καρστικού αγωγού.

Το συνολικό μήκος κάθε τομής είχε μήκος 235m.



Εικόνα 2.4.24: Θέσεις εφαρμογής της τεχνικής VLF. Figure 2.4.24: The VLF lines positions.

Για την παρούσα γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα VLF Wadi του Οίκου Abem (Εικ. 2.4.25).

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκε η **συχνότητα 23,3 kHz**, η οποία αντιστοιχεί στον σταθμό εκπομπής DHO38 στη Γερμανία.



Εικόνα 2.4.25: Στιγμιότυπο κατά την εφαρμογή της μεθόδου VLF στην περιοχή μελέτης. Figure 2.4.25:Image of the application of the VLF technique in the survey area.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας με το λογισμικό KHFFILT, έπειτα από την εφαρμογή του *φίλτρου Karous-Hjelt* παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

Στην εικόνα 2.4.26 παρουσιάζεται η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους διασκόπησης της τομής 1 (VLF Line 1).

- Στα 20 m, μέχρι το βάθος των 10 m περίπου εμφανίζεται μία ζώνη υψηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος (αγώγιμη ζώνη).
- Στα 120 m και σε βάθη 10-25 m παρατηρείται μία ζώνη χαμηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος (αντιστατική ζώνη).
- Τέλος, εντοπίζεται η εμφάνιση δύο ακόμα ζωνών χαμηλής πυκνότητας ρεύματος στην απόσταση 170-200 m αντίστοιχα, οι οποίες αναπτύσσονται μέχρι και το βάθος των 20 m περίπου.



Εικόνα 2.4.26: Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό KHFFILT, στη θέση VLF1.

Figure 2.4.26: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF1 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software.

Στην εικόνα 2.4.27 εντοπίζονται:

- Στην απόσταση 70-90 m και μέχρι τα 30 m βάθος περίπου, η ύπαρξη αντιστατικής ζώνης
- στα 120 m μία ακόμη ζώνη μικρότερης έντασης.



Εικόνα 2.4.27: Τομή κατανομής ισοδύναμης πυκνότητας ρεύματος συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό KHFFILT, στη θέση VLF3.

Figure 2.4.27: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF3 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software.

Παρόμοια κατανομή της πυκνότητας ρεύματος παρουσιάζεται και στην τομή VLF4 (Εικ. 2.4.28), όπου

- στην απόσταση 70-120 m και μέχρι τα 30 m βάθος, εμφανίζεται μία ζώνη ιδιαίτερα χαμηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος
- στα 130 m περίπου παρατηρείται η ύπαρξη μίας δεύτερης ζώνης χαμηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος.

VLF Line 4





Figure 2.4.28: 2D section of the subsurface distribution of the current density, of the VLF4 line, after Karous-Hjelt filtering in KHFFILT software.

Για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων VLF πραγματοποιήθηκε η χρήση του λογισμικού *Inv2DVLF*, με σκοπό να προσδιοριστεί η υπεδαφική κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και την ανάδειξη καρστικών μορφών (*Abbas et al., 2012*).

Στην εικόνα 2.4.29 παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, ως αποτέλεσμα της 2D επεξεργασίας και αντιστροφής των δεδομένων VLF της τομής VLF1. Σε αυτή είναι εμφανής η ύπαρξη δύο ιδιαίτερα αντιστατικών ζωνών (>2.500 Ohm.m).

• Η 1^{η} αναπτύσσεται σε απόσταση 40-140m περίπου μέχρι το βάθος των 30 m.

 Η 2^η αντιστατική ζώνη παρατηρείται πιο περιορισμένη και εμφανίζεται σε απόσταση 140-210 m και μέχρι τα 25 m βάθος.



Εικόνα 2.4.29: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF1.

Figure 2.4.29: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF1 line, after processing in INV2DVLF software.

Στην εικόνα 2.4.30 παρουσιάζεται η τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους της τομής VLF3. Σε αυτή είναι ευδιάκριτη η ανάπτυξη:

 μίας κύριας ζώνης υψηλών ειδικών αντιστάσεων (>2.500 Ohm.m), σε απόσταση 50-130 m και έως τα 30 m βάθος.



Εικόνα 2.4.30: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF3.

Figure 2.4.30: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF3 line, after processing in INV2DVLF software.

Τέλος, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας με το λογισμικό *INV2DVLF* της τομής VLF4 παρουσιάζονται στην εικόνα 2.4.31. Σε αυτήν, διαπιστώνεται η ανάπτυξη δύο κύριων ζωνών υψηλών ειδικών αντιστάσεων:

- μίας επιφανειακής που αναπτύσσεται από 60-110 m απόσταση και έως το βάθος των 10 m και
- μίας βαθύτερης, που αναπτύσσεται από 110-140 m περίπου και από το βάθος των 20m έως το μέγιστο βάθος διασκόπησης.



Εικόνα 2.4.31: Τομή κατανομής της ειδικής αντίστασης, έπειτα από την αντιστροφή των δεδομένων VLF, με τη χρήση του λογισμικού INV2DVLF, για τη θέση VLF4.

Figure 2.4.31: 2D inversion model of the VLF data, for the distribution of the subsurface resistivity, of the VLF4 line, after processing in INV2DVLF software.

3. Αξιολόγηση – Συμπεράσματα

3.1 Συνδυαστική Αξιολόγηση Γεωφυσικών Μεθόδων

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, το καρστικό σύστημα της περιοχής του Πετρωτού είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο και δαιδαλώδες. Έπειτα από:

- τη λεπτομερή καρστική-γεωμορφολογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με την συμβολή των μοντέλων από τη φωτογραμμετρική ανάλυση μέσω ΣμηΕΑ (Εικ. 1.2.7 – 1.2.12).
- II. τις επιτόπου αναγνώρισης καρστικών γεωμορφών (υπόγειων και επιφανειακών)

διαπιστώθηκε η ύπαρξη δύο κύριων συστημάτων καρστικοποίησης, ενός επιφανειακού και ενός βαθύτερου (μέρος του οποίου αποτελεί και το σπήλαιο Αλιστράτης). Οι γεωφυσικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης φαίνεται επηρεάζονται από την ύπαρξη

- του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης,
- του επιφανειακού επιπέδου καρστικοποίησης και
- των δομών που συνδέουν τα δύο αυτά καρστικά συστήματα.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε κατάλληλη η υπέρθεση των τομών της γεωηλεκτρικής τομογραφίας σε αυτές της τεχνικής γεωραντάρ (Εικ. 3.1.1, 3.1.2)

Στην εικόνα 3.1.1 παρουσιάζονται οι υπέρθεση των τομών γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ, για τις θέσεις 1 και 2 (Εικ 2.4.6, 2.4.13). Στη συνδυαστική αυτή απεικόνιση, όπως έχει προαναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται η εμφάνιση δύο κύριων αντιστατικών στόχων (>7.000 Ohm.m) όπως και δύο κύριες επιφάνειες ανάκλασης.

Πιο συγκεκριμένα, στην τομή αυτή διαπιστώνεται αρχικά, μία πολύ καλή ταύτιση μεταξύ της δεύτερης επιφάνειας ανάκλασης του GPR και της οροφής του δεύτερου, αντιστατικού στόχου της ERT. Είναι επομένως πιθανό το σενάριο η επιφάνεια ανάκλασης να σχετίζεται με την οροφή του πρώτου, ρηχότερου, επιπέδου καρστικοποίησης της περιοχής, που εντοπίζεται περίπου στα 140m απόλυτο υψόμετρο. Προς αυτήν την κατεύθυνση συνηγορεί και η ανάπτυξη μίας δομής μεταξύ 50m και 65m της τομής, στα 6,5m βάθος. Τόσο στην τομή ERT, όσο και στην τομή GPR διαπιστώνεται η εμφάνιση μίας κοίλης μορφής με πλάτος 15m και πάχος 10m, η οποία λόγω της γεωμετρίας συνάδει με δολίνη χοανοειδούς μορφής (Billi, et al., 2016).

Στην εικόνα 3.1.1, στη θέση δύο παρατηρείται ότι:

- η ταύτιση των δεδομένων GPR και ERT περιορίζεται στα αρχικά τμήματα μεταξύ του πρώτου
 ζεύγους επιφανειών ανάκλασης και της οροφής του πρώτου αντιστατικού σχηματισμού.
- σε απόσταση 180m και στα 135m απόλυτο υψόμετρο διερευνάται μία δομή με πολλαπλές ανακλάσεις (εντός του αντιστατικού σχηματισμού), η οποία παρουσιάζει υψηλή ταχύτητα (>0,2 m/ns) και αποτελεί χαρακτηριστική δομή εμφάνισης καρστικού εγκοίλου. (Bermejo et al., 2020).



Εικόνα 3.1.1: Συνδυαστική τομή γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ για τις θέσεις 1 (επάνω) και 2 (κάτω). Figure 3.1.1: Combined presentation and interpretation of the ERT and GPR results for line 1 (up) and line 2 (down).

Στην εικόνα 3.1.2 παρουσιάζονται οι υπερθέσεις των τομών γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ, για τις θέσεις 3 και 4 (Εικ 2.4.6, 2.4.13). Στη συνδυαστική αυτή απεικόνιση, παρατηρείται η πλευρική επέκταση των δύο αντιστατικών στόχων (>7000 Ohm.m) που διερευνήθηκαν και στις δύο προηγούμενες θέσεις. Ωστόσο η ανάπτυξη του δεύτερου ιδιαίτερα αντιστατικού στόχου φαίνεται να περιορίζεται σε μεγαλύτερα βάθη (>25m).

Όσον αφορά τα δεδομένα GPR, και στις δύο τομές, διαπιστώνεται η ταύτιση του πρώτου αντιστατικού στόχου (ERT) με δομές πολλαπλών ανακλάσεων (GPR), οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστικές δομές καρστικών εγκοίλων (Ronen et al., 2019). Επιπλέον, η ανάπτυξη των εκτεταμένων επιφανειών ανάκλασης, ενδεχομένως να σχετίζεται με τη στρωμάτωση του γεωλογικού σχηματισμού των κρυσταλλικών ασβεστολίθων (Gómez-Ortiz & Martín-Crespo, 2012).



Εικόνα 3.1.2: Συνδυαστική τομή γεωηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ για τις θέσεις 3 (επάνω) και 4 (κάτω). Figure 3.1.2: Combined presentation and interpretation of the ERT and GPR results for line 3 (up) and line 4 (down).

3.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση γεωφυσικών αποτελεσμάτων - Αξιολόγηση

Οι τρισδιάστατες απεικονίσεις όγκων υψηλής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (>10000 Ohm.m), προέκυψαν έπειτα από την τρισδιάστατη επεξεργασία των δεδομένων ERT, με τη χρήση του λογισμικού Rockworks v16. Η τελική απεικόνισή τους πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGISPro (Local scene), όπου τοποθετήθηκε και το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (Εικ. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3).

Έπειτα από την συνδυαστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όλων των γεωφυσικών δεδομένων, σκιαγραφείται η ύπαρξη των δύο συστημάτων καρστ, η οποία έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τη λεπτομερή καρστική-γεωμορφολογική έρευνα (§ 1.2.2). Στην τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων της ERT διαπιστώνεται η ύπαρξη ενός επιφανειακού συστήματος (<15m βάθος) καθώς και ενός βαθύτερου (>20m βάθος) (Εικ.3.2.1). Γενικά:

- το επιφανειακό αυτό καρστικό σύστημα φαίνεται να εμφανίζεται στην περιοχή, με έγκοιλα και δολίνες μικρότερης ανάπτυξης, ενώ,
- το βαθύτερο, αποτελείται από καρστικούς αγωγούς μεγαλύτερης κλίμακας, όπως το σπήλαιο Αλιστράτης, το σπήλαιο του Ορφέα και το σπήλαιο Αγ. Γεωργίου.

Θεωρείται ότι ο δεύτερος, ιδιαίτερα αντιστατικός στόχος, που συναντάται στις τομές ERT1 και ERT2 (Εικ. 3.2.2), δεν οφείλεται μόνο στην ύπαρξη ενός καρστικού εγκοίλου, αλλά δύο ή και περισσότερων και απεικονίζεται ως ένας λόγω της διακριτικής ικανότητας της τεχνικής. (Εικ. 3.2.3). Τα έγκοιλα αυτά εκτιμάται ότι είναι απόρροια των δύο επιπέδων καρστικοποίησης και των δομών που τα συνδέουν (Varnavina et al., 2018), ενώ το βαθύτερο σύστημα είναι το σπήλαιο Αλιστράτης. Τα δύο επίπεδα καρστικοποίησης διαπιστώνεται ότι σχετίζονται άμεσα με τις επιφανειακές καρστικές μορφές (Εικ. 3.2.2).

Το παραπάνω συμπέρασμα θεμελιώνεται από:

- τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που περιεγράφηκαν παραπάνω,
- τα δεδομένα που προέκυψαν από την επίλυση του ευθέος προβλήματος (forward modelling) (§2.4)
- τις αξιολογήσεις των τρισδιάστατων απεικονίσεων των αποτελεσμάτων της ERT

Είναι γεγονός ότι ο βαθύτερος αντιστατικός σχηματισμός εντοπίζεται και στις τομές ERT3 και ERT4, σε απόλυτο υψόμετρο μικρότερο των 120 m, ακριβώς στο επίπεδο όπου αναπτύσσεται και ο καρστικός αγωγός του Σπηλαίου Αλιστράτης (Εικ. 3.2.1).Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως ενδεχομένως στις τομές ERT1 και ERT2 δεν εμφανίζεται το επιφανειακό σύστημα καρστ πάνω από το αντίστοιχο βαθύτερο σύστημα. Ο βαθύτερος καρστικός αγωγός εικάζεται ότι είναι η πλευρική επέκταση του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης προς βορειοανατολικά.



Εικόνα 3.2.1:Τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10000 Ohm.m) της ERT, όπου αναδεικνύεται η ύπαρξη δύο επιπέδων καρστικοποίησης. Άποψη προς Δύση. Figure 3.2.1: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, which highlights the existance of the two first karstification levels. View to the West.





Figure 3.2.2: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, where the surface and subsurface karstic geomorphs are also presented on the 3D orthomosaic.



Εικόνα 3.2.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση των αντιστατικών όγκων (>10000 Ohm.m) της ERT, όπου αναδεικνύεται η ύπαρξη δύο επιπέδων καρστικοποίησης, άποψη προς Ανατολή. Figure 3.2.3: 3D presentation of resistive volumes (>10000 Ohm.m) derived from the ERT results, which highlights the existance of the two first karstification levels. View to the East.

3.3 Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντικές επιστημονικές δράσεις

Η παρούσα έρευνα, όπως έχει προαναφερθεί έχει ως στόχο την ανάδειξη πιθανής πλευρικής επέκτασης του καρστικού αγωγού του Αλιστράτης, σε συνέχεια της αίθουσας κατακρημνίσεων που συναντάται εντός του σπηλαίου. Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις στον εξωτερικό χώρο του σπηλαίου, σε συνδυασμό με την λεπτομερή καρστική-γεωμορφολογική μελέτη μέσω σύγχρονων τεχνικών (χρήση ΣμηΕΑ), ανέδειξε την ύπαρξη δύο (2) επιπέδων καρστικοποίησης και σε πρώτο στάδιο την πιθανή επέκταση του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης βορειοανατολικά.

Έπειτα από την καρστική – γεωμορφολογική μελέτη της περιοχής και από την πρώτη αυτή προσέγγιση διερεύνησης του υπεδάφους με τη χρήση γεωφυσικών τεχνικών τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Κατέστη δυνατός ο χαρακτηρισμός του καρστικού συστήματος από τη λεπτομερή αναγνώριση των επιφανειακών καρστικών γεωμορφών (γλυφές, δολίνες, επικρεμάμενες κοιλάδες).
- Προέκυψε η ανάδειξη υπο-επιφανειακών καρστικών δομών (σπήλαια), από τη συσχέτιση των επιφανειακών γεωμορφολογικών δεδομένων.
- Εντοπίστηκε το 1° (επιφανειακό) καρστικό σύστημα, μέχρι το βάθος των 10-12m, σε όλες τις γεωφυσικές τομές (ERT, GPR, VLF).
- Εντοπίστηκε το 2° (μεσαίο) καρστικό σύστημα στις 2 τομές "διερεύνησης" σε βάθος >30m από τα αποτελέσματα των τεχνικών ERT και VLF.
- Με βάση τις γεωμετρικές παραμέτρους εφαρμογής της τεχνικής ERT, δεν κατέστη δυνατή η αναμενόμενη διακριτοποίηση των 2 επιπέδων καρστικοποίησης στις τομές "βαθμονόμησης".
- Από τον συνδυασμό όλων των γεωφυσικών τεχνικών, προέκυψαν ισχυρές ενδείξεις της επέκτασης του 2ου καρστικού επιπέδου (σπήλαιο Αλιστράτης) προς ΒΑ.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και για την περαιτέρω διερεύνηση της επέκτασης του καρστικού αγωγού και του συστήματος του Πετρωτού γενικότερα, προτείνονται:

- ✓ Η εκτέλεση περισσότερων τεχνικών φωτογραμμετρίας (LiDAR) εντός και εκτός του καρστικού αγωγού της Αλιστράτης.
- ✓ Η εκτέλεση περισσότερων γεωφυσικών τομών (2D − 3D), με διαφορετικές παραμέτρους εφαρμογής για τη λεπτομερέστερη υπεδαφική αποτύπωση.
- Η πραγματοποίηση διαχρονικών μετρήσεων (time lapse technique) των γεωφυσικών τεχνικών,
 για την επιλογή της βέλτιστης εποχικής περιόδου εφαρμογής της εκάστοτε τεχνικής.
- Η εκτέλεση επιπρόσθετων γεωφυσικών τεχνικών, όπως της σεισμικής τομογραφίας διάθλασης και της μικροβαρυτομετρίας, που προτείνονται και εφαρμόζονται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, σε αντίστοιχα περιβάλλοντα. (Cardarelli et al., 2010; Riddle et al., 2010; Martínez-Moreno et al., 2015; Kaufmann & Romanov, 2017; Carollo et al., 2020, Klanica et al., 2020).

Σκοπός των προτεινόμενων δράσεων είναι η σαφέστερη ανάδειξη όλων των υποεπιφανειακών γεωμορφών και των επιπέδων του πολύπλοκου καρστικού συστήματος της περιοχής. Αρχικά, προτείνεται η επέκταση της καρστικής γεωμορφολογικής μελέτης της περιοχής, μέσω σύγχρονων τεχνικών φωτογραμμετρίας (UAV, LiDAR), (Verdet et al. 2020; Robinson et al., 2021), προκειμένου να αναδειχθεί με μεγάλη ακρίβεια η χωρική ανάπτυξη των καρστικών δομών και κυρίως του καρστικού

αγωγού της Αλιστράτης. Επιπροσθέτως, η γεωμετρική αυτή αποτύπωση, θα συμβάλει στη βαθμονόμηση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Ταυτόχρονα, προτείνεται η ανάπτυξη ενός πυκνότερου δικτύου τομών (κάνναβος) των επιφανειακών γεωφυσικών τεχνικών που εφαρμόστηκαν προς βορειοανατολικά. Με την λήψη περισσότερων γεωφυσικών και με τη χρήση διαφορετικών γεωμετρικών παραμέτρων εφαρμογής, θα καταστεί δυνατή η κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων με υψηλή ανάλυση (Xu et al., 2016) και η καλύτερη διακριτοποίηση των επιπέδων καρστικοποίησης.

Τέλος, προτείνεται η διεύρυνση της παρούσας έρευνας με τη διεξαγωγή και άλλων γεωφυσικών τεχνικών όπως αυτών της σεισμικής τομογραφίας διάθλασης (seismic refraction tomography) και μικρο-βαρυτομετρίας (microgravity), οι οποίες ενδεχομένως να αποκαλύψουν νέα στοιχεία για την υπεδαφική δομή. Στην προοπτική αυτή και εξαιτίας του ήπιου μορφολογικού αναγλύφου, επιστημονική καινοτομία θα αποτελέσει η διεξαγωγή πειράματος σεισμικής τομογραφίας διάθλασης μεταξύ του υφιστάμενου καρστικού αγωγού της Αλιστράτης και της επιφάνειας.

Βιβλιογραφία

Σύνδεσμοι

https://www.sensoft.ca/

https://earth.google.com

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γιαννόπουλος Β., 2000. Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλαιών περιβαλλόντων των πλέον σημαντικών ελληνικών σπηλαίων. Διδακτορική Διατριβή. ΕΚΠΑ, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

Γκολούμποβιτς – Δεληγιάννη Μ., 2019. Περιβαλλοντική Καρστική Γεωμορφολογία. Εκδοτικός όμιλος Ίων.

Γκολούμποβιτς – Δεληγιάννη Μ., 2011. Καρστική γεωμορφολογική εξέλιξη στη Δυτική Ελλάδα: Η περίπτωση της περιοχής του Ξηρόμερου. Διδακτορική Διατριβή. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας.

Δίλαλος Σ., 2009. Διερεύνηση υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών με γεωφυσικές μεθόδους σε επιλεγμένες θέσεις της Νήσου Χίου. Διπλωματική εργασία ειδίκευσης.

ΙΓΜΕ, 1978. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Δράμα, κλίμακα 1:50000. ΙΓΜΕ

ΙΓΜΕ, 1988. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Προσοτσάνη, κλίμακα 1:50000.

Τζάνης Α., 2022. Στοιχεία γενικής και εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Εκδόσεις Νέον.

Τσελέντης, Α., Παρασκευόπουλος, Π., 2013. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Αθήνα, εκδόσεις Liberal Books.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abbas A. M., Khalil M. A., Massoud U., Santos F. M., Mesbah H. A., Lethy A., Ragab E. S. A., 2012. The implementation of multi-task geophysical survey to locate Cleopatra tomb at tap-Osiris Magna, Borg El-Arab, Alexandria, Egypt "phase II". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 1(1), 1-11. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2012.11.001</u>.

Akingboye A. S., Ogunyele A. C., 2019. Insight into seismic refraction and electrical resistivity tomography techniques in subsurface investigations. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin)*, 34(1), No. 45. DOI: <u>https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.9</u>.

Alexopoulos J. D., Dilalos S., Vassilakis E., 2011. Adumbration of Amvrakia's spring water pathways, based on detailed geophysical data (Kastraki-Meteora). In *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Springer, 105-112. DOI 10.1007/978-3-642-24076-8.

Amanatidou E., Vargemezis G., Tsourlos P., 2022. Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece. *Journal of Applied Geophysics*, *196*, 104499. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104499</u>.

Atkinson G. A., Hancock E. R., 2006. Recovery of surface orientation from diffuse polarization. *IEEE transactions on image processing*, *15*(6), 1653-1664. DOI: <u>10.1109/TIP.2006.871114</u>

Bermejo L., Ortega A. I., Guérin R., Benito-Calvo A., Pérez-González A., Parés J. M., Carbonell E., 2017. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International, 433,* 393-401. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.031.

Bermejo L., Ortega A. I., Parés J. M., Campaña I., de Castro J. M. B., Carbonell E., Conyers L. B., 2020. Karst features interpretation using ground-penetrating radar: A case study from the Sierra de Atapuerca, Spain. *Geomorphology*, *367*, 107311. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107311</u>.

Billi A., De Filippis L., Poncia P. P., Sella P., Faccenna C., 2016. Hidden sinkholes and karst cavities in the travertine plateau of a highly-populated geothermal seismic territory (Tivoli, central Italy). *Geomorphology*, *255*, 63-80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.011.

Bosch F. P., Müller I., 2001. Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures. First Break, 19(6). DOI: <u>https://doi.org/10.1046/j.1365-2397.2001.00173.x</u>.

Bosch F. P., Gurk M., Jeannin P. Y., Müller I., 2010. Geophysical cave detection with a portable Very Low Frequency (VLF) radio transmitter. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 10537.

Boualla O., Fadili A., Najib S., Mehdi K., Makan A., Zourarah B., 2021. Assessment of collapse dolines occurrence using electrical resistivity tomography: Case study of Moul El Bergui area, Western Morocco. *Journal of Applied Geophysics*, *191*, 104366. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104366</u>.

Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A., Di Filippo G., 2010. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical prospecting*, *58*(4), 685-695. DOI: <u>https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x</u>.

Carollo A., Capizzi P., Martorana R., 2020. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities. *Journal of applied geophysics*, *178*, 104069. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069</u>.

Čeru T., Šegina E., Knez M., Benac Č., Gosar A., 2018. Detecting and characterizing unroofed caves by ground penetrating radar. *Geomorphology*, *303*, 524-539. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.004</u>.

Conyers L. B., 2016. Ground-penetrating radar for geoarchaeology. John Wiley & Sons.

Daniels D. (ed.), 2004. Ground Penetrating Radar. IEE Series 15, London.

Danielsen B. E., Dahlin T., 2010. Numerical modelling of resolution and sensitivity of ERT in horizontal boreholes. *Journal of Applied Geophysics*, *70*(3), 245-254. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.01.005</u>

Degroot-hedlin C., Constable S.C., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, *55*, 1613-1624. DOI: <u>https://doi.org/10.1190/1.1442813</u>.

dos Reis Jr J. A., de Castro D. L., de Jesus T. E. S., Lima Filho F. P., 2014. Characterization of collapsed paleocave systems using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, *103*, 43-56. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.007</u>.

Ercoli M., Pauselli C., Forte E., Di Matteo L., Mazzocca M., Frigeri A., Federico C., 2012. A multidisciplinary geological and geophysical approach to define structural and hydrogeological implications of the Molinaccio spring (Spello, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 77, 72-82. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.11.011.

Fahlstrom P., Gleason T., 2012. Introduction to UAV Systems. Wiley.

Fernandes Jr A. L., Medeiros W. E., Bezerra F. H., Oliveira Jr J. G., Cazarin C. L., 2015. GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery. *Journal of Applied Geophysics*, *112*, 268-278. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.017</u>.

Fisher E., McMechan G.A., Annan A.P., 1992, Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. Geophysics, Vol. 57, 495. DOI: <u>https://doi.org/10.1190/1.1443265</u>.

Ford D. C., Williams P. W., 1989. Karst geomorphology and hydrology (Vol. 601). London: Unwin Hyman.

Fraser D.C., 1969. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics, Vol. 34, No. 6,* 958-967. DOI: <u>https://doi.org/10.1190/1.1440065</u>.

Furtado C. P., Borges S. V., Bezerra F. H., de Castro D. L., Maia R. P., Teixeira W. L., Lima-Filho F. P., 2022. The fracture-controlled carbonate Brejões Karst System mapped with UAV, LiDAR, and electroresistivity in the Irecê Basin-Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, *119*, 103986. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103986.

Gams X., 2001. Notion and forms of contact Karst, Acta Carstologica, 33-46.

Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., 2012. Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, *149*, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.022.

Goodman D., Piro S., 2013. GPR Remote Sensing in Archaeology, Geotechnologies and the Environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Huang C., Lu M., Zhu S., 2011. Novel integrated system calibration method for impulse ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics 75, 566-572.* Elsevier. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.08.011</u>.

Hussain Y., Uagoda R., Borges W., Prado R., Hamza O., Cárdenas-Soto M., Dou J., 2020. Detection of cover collapse doline and other Epikarst features by multiple geophysical techniques, case study of Tarimba cave, Brazil. *Water*, *12*(10), 2835. DOI: <u>https://doi.org/10.3390/w12102835</u>.

Hussain Y., Schlögel R., Innocenti A., Hamza O., Iannucci R., Martino S., Havenith H. B.,2022. Review on the Geophysical and UAV-Based Methods Applied to Landslides. *Remote Sensing*, *14*(18), 4564. DOI: <u>https://doi.org/10.3390/rs14184564</u>.

Iftimie N., Savin A., Steigmann R.; Dobrescu G.S., 2021. Underground Pipeline Identification into a Non-Destructive Case Study Based on Ground-Penetrating Radar Imaging. Remote Sens., 13, 3494. DOI: <u>https://doi.org/10.3390/rs13173494</u>.

Jol, H. M. (Ed.), 2009. Ground penetrating radar theory and applications. Elsevier.

Karous M., Hjelt S.E., 1983. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, *31*, 782-794. DOI: <u>https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x</u>.

Kaufmann G., Romanov D., 2017. The Jettencave, Southern Harz Mountains, Germany: Geophysical observations and a structural model of a shallow cave in gypsum/anhydrite-bearing rocks. *Geomorphology, 298,* 20-30. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.027.

Klanica R., Kadlec J., Tábořík P., Mrlina J., Valenta J., Kováčiková S., Hill G. J., 2020. Hypogenic versus epigenic origin of deep underwater caves illustrated by the Hranice Abyss (Czech Republic)—The world's deepest freshwater cave. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *125*(9). DOI: <u>https://doi.org/10.1029/2020JF005663</u>.

Klimchouk A., Ford D. C., 2000. Lithologic and structural controls of dissolutional cave development. *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers. National Speleological Society, Huntsville*, p. 54-64.

Konsolaki A., Vassilakis E., Giannopoulos V., Kontostavlos G., Psaltakis G., 2019. 3D rock thickness extraction by combining Point Clouds of different origin. Case Study: The roof of Koutouki Cave Peania, Greece. 15th International Congress of the Geological Society of Greece.

Konsolaki A., 2020. Merging Unmanned Aerial System and Laser Scanning techniques for high resolution 3D modelling of Koutouki Cave, Attica. MSc Thesis.

Konsolaki A., Vassilakis E., Kotsi E., Kontostavlos G., Lekkas E., Stavropoulou M., Giannopoulos I., 2022. Introducing Interdisciplinary Innovative Techniques for Mapping Karstic Caves. *16th International Congress of the Geological Society of Greece.*

Kruger A., Randolph-Quinney P., Elliott M., 2016. Multimodal spatial mapping and visualisation of Dinaledi Chamber and Rising Star Cave. *South African journal of science*, *112*(5-6), 1-11. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2016/20160032</u>.

Lehmann F., Green, A. G., 2000. Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing. Geophysics, Vol. 65, No. 3, 836–848. DOI: <u>https://doi.org/10.1190/1.1444781</u>.

Loke M. H., Barker R. D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. *Geophysical prospecting*, *44*(1), 131-152. DOI: <u>https://doi.org/10.1111/j.1365-</u> <u>2478.1996.tb00142.x</u>.

Loke M. H., Acworth I., Dahlin T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration geophysics*, *34*(3), 182-187.

Lorenzo H., Rial F.I., Pereira M., Solla M., 2011. A full non-metallic trailer for GPR road surveys. *Journal of Applied Geophysics* 75(2011), 490-497. Elsevier. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.021</u>

Martel R., Castellazzi P., Gloaguen E., Trépanier L., Garfias J., 2018. ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology*, *310*, 45-56. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003.

Martínez-Moreno F. J., Pedrera A., Ruano P., Galindo-Zaldívar J., Martos-Rosillo S., González-Castillo L., Marín-Lechado C., 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, *162*, 67-78. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.008</u>.

Martínez-Moreno F. J., Galindo-Zaldívar J., Pedrera A., Teixido T., Ruano P., Peña J. A., Martín-Rosales W., 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, *107*, 149-162. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021</u>.

Martínez-Moreno F. J., Galindo-Zaldívar J., Pedrera A., González-Castillo L., Ruano P., Calaforra J. M., Guirado E., 2015. Detecting gypsum caves with microgravity and ERT under soil water content variations (Sorbas, SE Spain). *Engineering Geology*, *193*, 38-48. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.011</u>.

Metwaly M., AlFouzan F., 2013. Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, *4*(4), 469-476. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.12.005.

Mihevc A., Mihevc R., 2021. Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. *Acta Carsologica*, *50*(1), 11-36. DOI: 10.3986/ac.v50i1.9462

Monteiro Santos F.A., Almeida E.P., Gomes M., Pina A., 2006. Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. *Journal of African Earth Sciences, 45,* 421-430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.03.012.

Munk J., Sheets R. A., 1997. *Detection of underground voids in Ohio by use of geophysical methods* (Vol. 97, No. 4221). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Orlando L., 2013. GPR to constrain ERT data inversion in cavity searching: Theoretical and practical applications in archaeology. *Journal of Applied Geophysics*, *89*, 35-47. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.006</u>.

Pirttijarvi M., 2004. Manual of the KHFFILT program; Karous-Hjelt and Fraser filtering of VLF measurements, Version 1.1a. *University of Oulu*, 6p., Finland. DOI: <u>https://doi.org/10.5897/IJWREE2019.0906</u>.

Riddle G. I., Riddle C. J., Schmitt D. R., 2010. ERT and Seismic Tomography in Identifying Subsurface Cavities. *Geo. Can. Work Earth*, *1*, 1-4. DOI: <u>https://doi.org/10.2478/congeo-2018-0001</u>.

Robinson T., Rodgers B., Oliver-Cabrera T., Downs C., Kruse S., Wdowinski S., Kiflu, H., 2021. Complex relationships between surface topography, ground motion, and cover sediments in covered karst, west-central Florida, USA. *Geomorphology*, *392*, 107927. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107927</u>.

Ronen A., Ezersky M., Beck A., Gatenio B., Simhayov R. B., 2019. Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*, *328*, 28-43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.030.

Sasaki Y., 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics, 54*, 254-262. DOI: <u>https://doi.org/10.1190/1.1442649</u>.

Sasaki Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation1. *Geophysical prospecting*, 40(4), 453-463. DOI: <u>https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x</u>.

Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics*, *59*,*11*, 1839-1848. DOI: https://doi.org/10.1190/1.1443571.

Sasaki Y., 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. *Journal of Applied Geophysics, 46,* 45-54. DOI: https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00038-0.

Silva O. L., Bezerra F. H., Maia R. P., Cazarin C. L., 2017. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. *Geomorphology*, *295*, 611-630. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.025</u>.

Varnavina A. V., Khamzin A. K., Kidanu S. T., Anderson N. L., 2019. Geophysical site assessment in karst terrain: A case study from southwestern Missouri. Journal of Applied Geophysics, 170, 103838. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103838</u>.

Vassilakis E., Foumelis M., Erkeki A., Kotsi E., Lekkas E., 2021. Post-event surface deformation of Amyntaio slide (Greece) by complementary analysis of Remotely Piloted Airborne System imagery and SAR interferometry. *Applied Geomatics*, *13*, 65-75. DOI: <u>https://doi.org/10.1007/s12518-020-00347-y</u>.

Vassilakis E., Stavropoulou A., Konsolaki A., Giannopoulos I. K., Petrakis S., Kotsi E., Lekkas E., Kokkoromytis A., 2022. Introducing an innovative methodology for mapping rock-discontinuities, based on the interpretation of 3D photogrammetry products. The case of Akronafplia castle. *16th International Congress of the Geological Society of Greece.*

Verdet C., Sirieix C., Marache A., Riss J., Portais J. C., 2020. Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill. *Geomorphology*, *360*, 107177. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107177</u>.

Wellbrock K., Voß P., Heemeier B., Kelholz P., Patzelt A., Grottker M., 2018. The Water Management of Taymā' and other Ancient Oasis Settlements in the North-Western Arabian Peninsula – A Preliminary Synthesis. *Taymā' I. Archaeological Exploration, Palaeoenvironment, Cultural Contacts. Taymā'. Multidisciplinary Series on the Results of the Saudi-German Archaeological Project, 1*, 145-198.

Xu S., Sirieix C., Marache A., Riss J., Malaurent P., 2016. 3D geostatistical modeling of Lascaux hill from ERT data. *Engineering Geology*, *213*, 169-178. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.009</u>.

Xu S., Sirieix C., Riss J., Malaurent P., 2017. A clustering approach applied to time-lapse ERT interpretation—Case study of Lascaux cave. *Journal of Applied Geophysics*, 144, 115-124. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.006</u>.

Zajc M., Pogačnik Ž., Gosar A., 2014. Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for exploitation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *67*, 78-87. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.011</u>.

Zhu J., Taylor T. P., Currens J. C., Crawford M. M., 2014. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using Lidar techniques: a pilot study in floyds fork watershed. *Journal of Cave & Karst Studies*, *76*(3). DOI: 10.4311/2013ES0135.