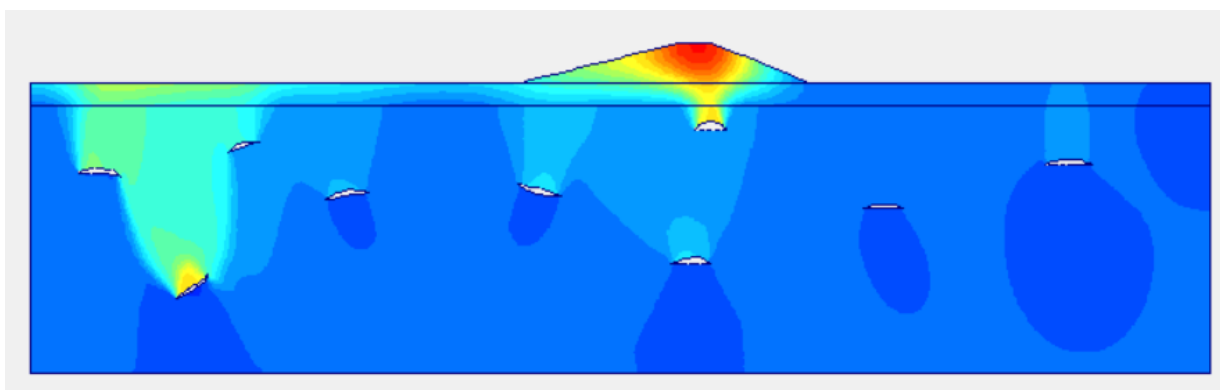




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

«Μεταπτυχιακό πρόγραμμα "Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον"»

*« Γεωτεχνική έρευνα για τον βέλτιστο σχεδιασμό
λιμνοδεξαμενής σε καρστικό περιβάλλον »*



Μαρία Ε. Κουτουλάκη

Εξεταστική επιτροπή:

Ε. Στειακάκης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Ε. Μανούτσογλου, Καθηγητής

Α. Βαφείδης, Καθηγητής

Χανιά
Μάρτιος 2025

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη εργασία εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον», του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και ανατέθηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Στειακάκη Εμμανουήλ.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Εμμ. Στειακάκη για την επιλογή του να ενταχθώ στην ομάδα του, την ευκαιρία που μου δόθηκε να παρακολουθήσω και να ολοκληρώσω το πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών καθώς και για την συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη του στην εκπόνηση της εργασίας.

Έπειτα δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον Επ. Καθηγητή Εμμ. Βαρουχάκη για την έμπρακτη συμβολή του στην παρακολούθηση των απαραίτητων μαθημάτων καθώς και τον Βαβαδάκη Διονύσιο για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε όσον αφορά τον χειρισμό του προγράμματος Plaxis.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω να πω στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους, την υπομονή και την ενθάρρυνση τους καθ' όλη την διάρκεια αυτής της διαδρομής με σκοπό την επιτυχή ολοκλήρωση και αυτού του κύκλου σπουδών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ανέκαθεν το νερό αποτελούσε τον πολυτιμότερο φυσικό πόρο για τον άνθρωπο προσφέροντάς του κατάλληλες συνθήκες και προϋποθέσεις για να ζήσει. Άλλωστε δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου είναι χτισμένες γύρω από κάποιο ποτάμι ή δίπλα στη θάλασσα.

Τον αιώνα που διανύουμε η ανάγκη για ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων κρίνεται επιτακτική καθώς τα αποθέματα νερού ολοένα και ελαττώνονται σε αντίθεση με την ζήτηση που αυξάνεται συνεχώς. Αυτός είναι και ο λόγος που οδηγούμαστε στην συνεχή έρευνα και μελέτη για την κατασκευή έργων συλλογής και αποθήκευσης υδάτων.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην κατασκευή λιμνοδεξαμενών ως ένας από τους πιο κατάλληλους τύπους ταμίευσης υδάτων στην χώρα μας λόγω και της ιδιαίτερης μορφολογίας της. Αναλύονται οι βασικές αρχές της κατασκευής τους, με ποια κριτήρια επιλέγεται η καταλληλότερη θέση και ποια τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Έντονος προβληματισμός αναπτύσσεται από τους μελετητές για τη βέλτιστη επιλογή της θέσης κατασκευής λιμνοδεξαμενών σε καρστικές περιοχές. Δεδομένου ότι ο ελλαδικός χώρος καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από ανθρακικά πετρώματα αναλύεται η γεωμορφολογία του καρστ, παρουσιάζονται κάποιες ιδιαίτερες καρστικές γεωμορφές από όλη την Ελλάδα, ενώ αναφέρονται οι μηχανισμοί αστοχίας που σχετίζονται με αυτό το φαινόμενο.

Μερικά παραδείγματα αποτυχημένων φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών που παρατίθενται μαρτυρούν τον βαθμό επικινδυνότητας του φαινομένου αλλά και την αναγκαιότητα αντιμετώπισής τους.

Στην εργασία τεκμηριώνεται η ανάγκη σχεδιασμού σωστής γεωτεχνικής έρευνας για μια λιμνοδεξαμενή σε καρστ ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια και οι εργασίες που πρέπει να λαμβάνουν χώρα κατά την σύνταξή της με σκοπό την βέλτιστη διαχείριση των δεδομένων που προκύπτουν, την καλύτερη δυνατή απόκριση της κατασκευής αλλά και τον απαραίτητο και διαρκές έλεγχο και παρακολούθηση του έργου και μετά το πέρας της κατασκευής.

Σημαντικό θέμα προς αναφορά είναι και τα συστήματα στεγάνωσης των λιμνοδεξαμενών. Οι γεωμεμβάνες χρησιμοποιούνται σε τέτοιες περιπτώσεις με σκοπό να ενισχύσουν την κατάσταση του εδάφους έναντι της διάβρωσης και να μειώσουν τον κίνδυνο από διαρροές. Εκτός από τις προδιαγραφές που απαιτούνται σε σχέση με τις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητές τους, αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες τοποθέτησης, συγκόλλησης και αγκύρωσης τους έχουν εξίσου σημασία τόσο για την εξασφάλιση της μέγιστης διάρκειας ζωής τους όσο και για την ευστάθεια της λιμνοδεξαμενής έναντι των διαρροών.

Για την ανάλυση της ευστάθειας μιας λιμνοδεξαμενής διερευνήθηκε με την αναλυτική μέθοδο η κατάσταση σε σχέση με την αστοχία της οροφής ενός κενού το οποίο εμφανίζεται κάτω από το επίχωμα της λιμνοδεξαμενής, θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά της οροφής του κενού και επιλύοντας με βάση την υπόθεση της υποστηριζόμενης δοκού.

Έπειτα, χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης με την αριθμητική μέθοδο που πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού Plaxis, θεωρώντας ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών ενώ γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων.

Στην συνέχεια, προσομοιώνεται ένα μοντέλο κατασκευής λιμνοδεξαμενής σε καρστ και γίνεται ανάλυση των παραμορφώσεων και της ευστάθειας της λιμνοδεξαμενής. Τα σενάρια που διερευνήθηκαν αφορούν την εμφάνιση παραμορφώσεων της λιμνοδεξαμενής σε συνάρτηση με την ποιότητα του υποβάθρου κατασκευής παρουσία διαφόρων διαστάσεων καρστικών εγκοίλων. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία ταξινόμησης της βραχώμαζας κατά RMR.

Τέλος, εξετάστηκαν σενάρια για την επίδραση του μήκους ενός εγκοίλου το οποίο εμφανίζεται κάτω από το επίχωμα και μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια της κατασκευής.

ABSTRACT

Water has always been the most valuable natural resource for humans, offering them suitable conditions and prerequisites to live. After all, it is no coincidence that the largest cities in the world are built around a river or next to the sea.

In the century we are living in, the need for proper management of water resources is considered imperative as water reserves are increasingly decreasing in contrast to the demand that is constantly increasing. This is the reason that we are led to continuous research and study for the construction of water collection and storage projects.

This paper refers to the construction of reservoirs as one of the most suitable types of water storage in our country due to its particular morphology. The basic principles of their construction are analyzed, with what criteria the most suitable location is selected and what their technical characteristics are.

Intense concern is being developed by researchers for the optimal choice of the location for the construction of reservoirs in karst areas. Given that the Greek area is largely covered by carbonate rocks, the geomorphology of karst is analyzed, some particular karst landforms from all over Greece are presented, while the failure mechanisms related to this phenomenon are mentioned.

Some examples of failed dams and reservoirs that are listed testify to the degree of danger of the phenomenon and the necessity of addressing them.

The work documents the need to design a proper geotechnical investigation for a karst reservoir, while the stages and tasks that must take place during its preparation are presented in detail with the aim of optimal management of the resulting data, the best possible response of the construction, as well as the necessary and continuous control and monitoring of the project even after the end of construction.

An important issue to mention is the waterproofing systems of the reservoirs. Geomembranes are used in such cases in order to strengthen the soil against erosion and reduce

the risk of leaks. In addition to the specifications required in relation to their physical, chemical and mechanical properties, it is worth noting that their installation, welding and anchoring procedures are equally important for ensuring their maximum lifespan and for the stability of the reservoir against leaks.

For the analysis of the stability of a reservoir, the situation in relation to the failure of the roof of a void that appears under the embankment of the reservoir was investigated using the analytical method, considering elastic behavior of the roof of the void and solving based on the assumption of a supported beam.

Then, using the same data, the results of the numerical method performed with the help of the Plaxis software are presented, considering elastoplastic behavior of the geomaterials, while a comparison is made between the results of the two methods.

Next, a model of a karst reservoir construction is simulated and an analysis of the deformations and stability of the reservoir is performed. The scenarios investigated concern the occurrence of deformations of the reservoir in function of the quality of the construction background in the presence of various dimensions of karst depressions. The investigation was carried out taking into account the theory of rock mass classification according to RMR.

Finally, scenarios were examined for the effect of the length of a depression that appears under the embankment and can affect the stability of the structure.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση εσωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Μόσιαλος, 2002)	4
Εικόνα 1.2: Σχηματική απεικόνιση εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Μόσιαλος, 2002)	5
Εικόνα 2.1: Έργα εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).	6
Εικόνα 2.2: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (https://www.elinyae.gr).....	11
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της δημιουργίας και εξέλιξης του καρστ (Τσακίρης, 2017).....	16
Εικόνα 3.2: Μηχανική ταξινόμηση των μορφολογικών συνθηκών του καρστ σε πέντε κατηγορίες (Waltham & Fookes, 2003)	18
Εικόνα 3.3: Δημιουργία και ανάπτυξη γλυφών (Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011)	21
Εικόνα 3.4: Α) Μικρογλυφές σε ασβεστόλιθο στην περιοχή Στύλος Αποκορώνου . Β)Γλυφές μεγάλου μήκους που εμφανίζονται κυρίως σε μεγάλα υψόμετρα με μεγάλες κλίσεις (Τσουκαλάς & Παπαδοπούλου-Βρυγιάννη, 2004). Γ) Πεδίο γλυφών στην πόλη Kunming της Κίνας. Δ)Πεδίο γλυφών στην πόλη Tsingy de Bemaraha στην Μαδαγασκάρη (https://education.nationalgeographic.org/resource/karst)	22
Εικόνα 3.5: Α) Δισκοειδής δολίνη, Β) Χοανοειδής δολίνη Γ) Εγκατακρημνισιγενής δολίνη (Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011)	24
Εικόνα 3.6: Σύμπλεγμα δολινών εξελισσόμενες σε μορφή ουβάλας (Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011).....	25
Εικόνα 3.7: Ανάπτυξη ουβάλας από την συνένωση δολινών (Waele, et al., 2011).	25
Εικόνα 3.8: Πόλη Dabarsko (Βοσνία-Ερζεγοβίνη) (Waele, et al., 2011)	26
Εικόνα 3.9: Σχηματική απεικόνιση πόλης ορίων (Ford & Williams, 2007).....	26
Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση δομικής πόλης (Ford & Williams, 2007).....	27
Εικόνα 3.11: Σχηματική απεικόνιση της πόλης Επίπεδο-βάσης (Ford & Williams, 2007).....	27
Εικόνα 3.12: : Κατανομή των ανθρακικών πετρωμάτων στον ελλαδικό χώρο (Παπαδοπούλου-Βρυγιάννη, 2007) 31	
Εικόνα 3.13: Η Λιμνοδολίνη του Κουρνά (www.earth.google.com)	32
Εικόνα 3.14: Η Πόλη του χωριού Διδύμων με τις Δολίνες Μικρή Σπηλιά (κόκκινο βέλος) και Μεγάλη Σπηλιά (κίτρινο βέλος) (https://www.travel.gr/)	33
Εικόνα 3.15: Η πόλη του Ομαλού (https://flashnews.gr).	34

Εικόνα 3.16: Το σπήλαιο Μααρά (Πηγών Αγγίτη) στην Δράμα. Φωτογραφίες από το εσωτερικό του σπηλαίου (https://www.travelstyle.gr/). Κάτω δεξιά η κάτοψη του σπηλαίου όπως φαίνεται από αεροφωτογραφία (Pennos, et al., 2016).	35
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των δυο κύριων τύπων ταξινόμησης δολινών (subsidence sinkholes και solution sinkholes) και των υποκατηγοριών των δολινών καθίζησης (Gutierrez, et al., 2014).....	39
Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση δολίνης καθίζησης (1 ^{ος} μηχανισμός) και δολίνης κατάρρευσης (2 ^{ος} μηχανισμός) (Steiakakis, et al., 2013).....	41
Εικόνα 4.3: Μηχανισμοί αστοχίας χωμάτινων αναχωμάτων (Μαυρούλια, 2021).....	42
Εικόνα 4.4: Κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει της στάθμης του ταμιευτήρα (Zhang, et al., 2020).	43
Εικόνα 4.5: Επίδραση της διαπερατότητας του υλικού του αναχώματος και της στάθμης του ταμιευτήρα στον ρυθμό διαρροής στον πόδα του αναχώματος (Zhang, et al., 2020)	43
Εικόνα 4.6: Το φράγμα της Μοσούλης στο Ιράκ (www.earth.google.com)	45
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση της αστοχίας του αναχώματος στον ταμιευτήρα Quail Creek της Γιούτα των ΗΠΑ (https://damfailures.org).	46
Εικόνα 4.8: Σημερινή μορφή του φράγματος Quail Creek (www.earth.google.com)	47
Εικόνα 4.9: Φράγμα Letaj στην λεκάνη απορροής του ποταμού Boljuncica της Κροατίας (www.earth.google.com)	48
Εικόνα 4.10: Η λιμνοδεξαμενή Vrutak στο Hutovo της Βοσνίας (www.earth.google.com).....	50
Εικόνα 4.11: Καταστροφή της γεωμεμβράνης μετά από φαινόμενα καθιζήσεων και δημιουργία ρωγμών στον πυθμένα της λιμνοδεξαμενής (Milanovic, 2014).....	51
Εικόνα 4.12: Σπάσιμο τοιμέntου στον πυθμένα της λιμνοδεξαμενής ως αποτέλεσμα της υποχώρησης του εδάφους (Milanovic, 2014)	51
Εικόνα 4.13: Τοποθέτηση σωλήνων ως μέτρο πρόληψης για την εκκένωση του εγκλωβισμένου αέρα (Milanovic, 2014).	51
Εικόνα 4.14: Λεπτομερής εικόνα αριστερού αντερείσματος με απεικόνιση των χαρακτηριστικών καρστικών θυθισμάτων (www.earth.google.com)	52
Εικόνα 4.15: Γενική άποψη του φράγματος Περδίκκα όπως καταγράφεται σήμερα από τον δορυφόρο (www.earth.google.com)	52

Εικόνα 4.16 : Οι λιμνοδεξαμενές Χρυσосκαλίτισσας (κάτω αριστερά) και Αγ. Θεοδώρων (πάνω δεξιά) όπως απεικονίζονται από τον δορυφόρο σήμερα (www.earth.google.com).....	53
Εικόνα 4.17: Αστοχία επιχώματος στη λιμνοδεξαμενή της Χρυσосκαλίτισσας (Στειακάκης, 2017).	54
Εικόνα 4.18: Εικόνα από τον πυθμένα της εγκαταλειμμένης λιμνοδεξαμενής των Αγ. Θεοδώρων με εμφανή τα βυθίσματα που δημιουργήθηκαν λόγω αστοχίας της μεμβράνης και της εσωτερικής διάβρωσης (Στειακάκης, 2011)	55
Εικόνα 5.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ δειγμάτων γεωμεμβρανών HDPE και PVC (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).	72
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της διαδικασίας συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων της γεωμεμβράνης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).	75
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση του βάθους και του μήκους αγκύρωσης της γεωμεμβράνης σε συνάρτηση με το μήκος του πρανού (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).	75
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση των γεωμετρικών όρων στην αναλυτική μέθοδο.	80
Εικόνα 6.2: Διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε Πεπερασμένα στοιχεία (Μπουκοβάλας, 2006).	82
Εικόνα 6.3: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Τομπουλίδου, 2022)	84
Εικόνα 6.4: Εισαγωγή γενικών χαρακτηριστικών καννάβου.	85
Εικόνα 6.6: Γεωμετρία και υλικά μοντέλου και επιχώματος.	86
Εικόνα 6.5: Εισαγωγή γεωμετρίας μοντέλου.....	86
Εικόνα 6.7: Εισαγωγή εδαφικών υλικών (επιχώμα, εδαφικό κάλυμμα, καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος)	87
Εικόνα 6.8: Απεικόνιση τελικού μοντέλου προς επίλυση.....	88
Εικόνα 6.9: Εμφάνιση των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων για μήκη οροφής κενού από 6m έως 12m ...	89
Εικόνα 6.10: Κατακόρυφες μετατοπίσεις στην βάση του επιχώματος για μήκη οροφής κενού από 6m έως 12m.90	
Εικόνα 6.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Με μηδενικές μετατοπίσεις παρουσιάζονται οι περιπτώσεις σε κατάσταση αστοχίας.	91
Εικόνα 6.12: Απεικόνιση μοντέλου προς επίλυση.	93
Εικόνα 6.13: Διάγραμμα απεικόνισης των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Για τιμή RMR 20 εμφανίζεται αστοχία.	95
Εικόνα 6.14: Απεικόνιση εγκοίλου κάτω από το επίχωμα.....	97

Εικόνα 6.15: Διάγραμμα απεικόνισης των κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Με μηδενική μετατόπιση εμφανίζεται το έγκοιλο που αστοχεί.....	98
Εικόνα 6.16 Διάγραμμα τάσης σε εφελκυσμό σε σχέση με τον λόγο h_r/L	101
Εικόνα 6.17: Διάγραμμα τάσης σε εφελκυσμό σε συνάρτηση με το πάχος οροφής του εγκοίλου.	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Μηχανική ταξινόμηση του καρστ και περιγραφή επιλεγμένων παραμέτρων που σχετίζονται με την μορφολογία του (Waltham & Fookes, 2003).....	20
Πίνακας 3.2: Κατανομή ανθρακικών πετρωμάτων / πιθανών καρστικών υδροφορέων παγκοσμίως (Goldscheider, et al., 2020).	30
Πίνακας 5.1: Ποιοτική ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση το R.Q.D. (Δημόπουλος, 2008)	64
Πίνακας 5.2: Πίνακας υπολογισμού της τιμής RMR με βάση τις παραμέτρους ταξινόμησης (Στειακάκης, 2019). 65	
Πίνακας 5.3: Ταξινόμηση βραχώμαζας με βάση την τιμή RMR (Στειακάκης, 2019).....	65
Πίνακας 5.4: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Hoek and Marinos, 2000).....	67
Πίνακας 5.5: Μηχανικές ιδιότητες Γεωμεμβρανών (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).....	73
Πίνακας 6.1: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν	79
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα αναλυτικής επίλυσης.....	80
Πίνακας 6.3: Γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών.	87
Πίνακας 6.4: Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με το μήκος της οροφής εγκοίλου (L). Με κόκκινο χρώμα και μηδενικές μετατοπίσεις εμφανίζονται οι περιπτώσεις που το μοντέλο αστοχεί.	91
Πίνακας 6.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής και αριθμητικής επίλυσης σε σχέση με την κατάσταση σε αστοχία.	92
Πίνακας 6.6: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφικών σχηματισμών.	94
Πίνακας 6.7 Σενάρια ως προς την ποιότητα του ασβεστόλιθου.....	94
Πίνακας 6.8: Πίνακας μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος σε σχέση την τιμή RMR του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου. Με κόκκινο παρουσιάζεται το σενάριο κατά το οποίο εμφανίζεται αστοχία στο υπέδαφος σύμφωνα την επίλυση στο λογισμικό Plaxis.	95
Πίνακας 6.9: Μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με το μέγεθος του εγκοίλου. Με κόκκινο εμφανίζεται το σενάριο που σύμφωνα με το Plaxis το μοντέλο αστοχεί.....	98

Πίνακας 6.11: Λόγος πάχους οροφής εγκοίλου προς μήκος οροφής. Με κίτρινο εμφανίζονται οι λόγοι που εμφανίζεται αστοχία.....	101
---	-----

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΟΙ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΩΣ ΕΡΓΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ	1
1.1. Σκοπιμότητα κατασκευής των λιμνοδεξαμενών	2
1.2. Εσωποτάμιες και εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές	4
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	6
2.1. Βασικές αρχές σχεδιασμού λιμνοδεξαμενής	6
2.2. Κριτήρια επιλογής της θέσης κατασκευής	8
2.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις κατασκευής λιμνοδεξαμενών	12
2.3.1. Τεχνικογεωλογική έρευνα σε λιμνοδεξαμενή με στεγανή λεκάνη και ανεπένδυτα πρανή. ..	12
2.3.2. Τεχνικογεωλογική έρευνα σε λιμνοδεξαμενή μη στεγανή με επένδυση γεωμεμβράνης	13
2.4. Βασικές αρχές κατασκευής των αναχωμάτων	14
3. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ	16
3.1. Η έννοια του καρστ	16
3.2. Η εξέλιξη του καρστ	17
3.3. Μηχανική ταξινόμηση του καρστ	18
3.4. Επιφανειακές και υπόγειες γεωμορφές	21
3.4.1. Επιφανειακές καρστικές μορφές	21
3.4.2. Υπόγειες καρστικές μορφές	28
3.5. Το καρστ σε Παγκόσμιο επίπεδο και στην Ελλάδα.	30
3.6. Διαχείριση κατασκευής τεχνικών έργων σε καρστικές περιοχές	36
4. ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	38
4.1. Εδαφική υποχώρηση ως συνέπεια επιβολής φορτίου σε καρστικοποιημένο υπόβαθρο	40
4.2. Εδαφική υποχώρηση λόγω διαρροών	40

4.3. Μετακινήσεις πρανών και προβλήματα ευστάθειας των αναχωμάτων.	42
4.4. Αστοχίες φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών σε καρστ.....	44
4.4.1. Η περίπτωση του φράγματος της Μοσούλης (Ιράκ)	44
4.4.2. Η περίπτωση αστοχίας του Quail Creek Dike (Γιούτα ΗΠΑ).	46
4.4.3. Φράγμα Letaj στον ποταμό Boljuncica της Κροατίας.....	48
4.4.4. Η λιμνοδεξαμενή Vrutak (Βοσνία-Ερζεγοβίνη).....	50
4.4.5. Το φράγμα Περδίκκα στην Πτολεμαΐδα	52
4.4.6. Οι λιμνοδεξαμενές Χρυσοσκαλίτισσας και Αγ. Θεοδώρων (Χανιά)	53
5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤ	56
5.1. Οργάνωση της γεωτεχνικής έρευνας σε στάδια	56
5.2. Ερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές που λαμβάνουν χώρα	58
5.2.1. Γεωλογική χαρτογράφηση - γεωλογικές τομές.....	58
5.2.2. Αεροφωτογραφίες.....	59
5.2.3. Γεωφυσική έρευνα.....	59
5.2.4. Γεωτρήσεις – Ορύγματα – δειγματοληψία.....	60
5.2.5. Επιτόπου δοκιμές	61
5.2.6. Εργαστηριακές δοκιμές.....	62
5.3. Τοποθέτηση οργάνων ελέγχου και παρακολούθησης.....	68
5.4. Διαχείριση και αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με το καρστ.....	69
5.4.1. Επιφανειακά μέτρα προστασίας και τεχνικές πρόληψης από διαρροές.	70
5.4.2. Υπόγειες τεχνικές αντιμετώπισης των διαρροών.....	71
5.5. Γεωμεμβράνες	72
5.5.1. Διαδικασίες τοποθέτησης – συγκόλλησης – αγκύρωσης.....	74
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤ	76
6.1. Αναλυτική Μέθοδος Επίλυσης - Υπόθεση υποστηριζόμενης δοκού	76

6.1.1. Επίδραση μήκους οροφής εγκοίλου στην ευστάθεια του επιχώματος	79
6.2. Αριθμητική Μέθοδος ανάλυσης - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	81
6.3. Παρουσίαση του Λογισμικού Plaxis	83
6.4. Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb	83
6.5. Προσομοίωση μοντέλου λιμνοδεξαμενής σε καρστ στο λογισμικό Plaxis 2D v8.2	85
6.6. Σενάρια που μελετήθηκαν στο λογισμικό Plaxis 2D.....	93
6.6.1. Σενάρια ως προς την ποιότητα του ασβεστόλιθου με βάση την ταξινόμηση κατά RMR (Rock Mass Rating).....	93
6.6.2. Σενάρια ως προς το μέγεθος του εγκοίλου	97
6.7. Επίδραση του λόγου πάχους οροφής προς μήκος εγκοίλου	100
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105

1. ΟΙ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΩΣ ΕΡΓΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί σήμερα περισσότερο ίσως από ποτέ μείζον θέμα για τον περισσότερο κόσμο. Η μείωση των υδατικών πόρων, εξαιτίας κυρίως της αλλαγής του κλίματος που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στον πλανήτη μας σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα αυξημένη ζήτηση και την μόλυνση του περιβάλλοντος καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για προστασία και ορθολογική διαχείριση σύμφωνα με τις αρχές της αειφορίας και της βιώσιμης ανάπτυξης (Παλάτος, 2015).

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αντλήθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Αρχή για τα έτη 2011-2020, η κατά μέσον όρο συνολική χρήση υδάτων (υπογείων και επιφανειακών) που καταναλώθηκαν ανήλθε σε 9228,04 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ενώ από αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 73-78 % απορροφήθηκε από την γεωργία, δασοκομία, αλιεία. Σε ποσοστό από 10.5 % έως 13.0 % υπολογίστηκε η κατανάλωση των νοικοκυριών σε νερό ύδρευσης ενώ το 10.8-14.8 % χρησιμοποιήθηκε σε άλλους κλάδους της οικονομίας όπως μεταποιητική βιομηχανία, κατασκευές, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ορυχεία και λατομεία (Ελληνική Στατιστική Αρχή).

Η συνεχής έρευνα, η διενέργεια μελετών αλλά και η θέσπιση νόμων και η κατασκευή έργων, είχαν ως στόχο την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, αναπόσπαστο μέλος του οποίου αποτελεί το νερό (Καλινδέρης, 2006).

Η βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής μπορεί να επιτευχθεί είτε με την απόληψη νερού από υδροφόρα συστήματα ή πηγές με την κατασκευή υδρομαστευτικών έργων (φρέατα, γεωτρήσεις, τάφροι συλλογής), είτε με την συλλογή και αξιοποίηση τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών νερών με υδροληπτικά έργα, όπως φράγματα και λιμνοδεξαμενές.

Στην χώρα μας, λόγω των κοινωνικών αλλά και οικονομικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά το παρελθόν, τα έργα αυτά περιορίζονταν στην αξιοποίηση των υπογείων υδάτων με φρέατα και γεωτρήσεις ενώ η κατασκευή έργων ταμίευσης επιφανειακών νερών

αποτελέσει μεταγενέστερη δραστηριότητα (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).

Σύμφωνα με το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, το ενδιαφέρον για την μελέτη κατασκευής φραγμάτων ξεκίνησε από τα μέσα της δεκαετίας του '60, ενώ αργότερα κατά την δεκαετία του '80 η αντιμετώπιση του υδατικού προβλήματος στράφηκε σε μικρότερα τεχνικά έργα συλλογής και αποθήκευσης των επιφανειακών νερών (λιμνοδεξαμενές) με λιγότερες απαιτήσεις, τόσο από πλευράς γεωλογίας, μορφολογίας όσο και από άποψη κόστους και χρόνου κατασκευής.

Έτσι, ο όρος «λιμνοδεξαμενή» περιγράφει τους μικρούς ταμιευτήρες επιφανειακών υδάτων που κατασκευάζονται είτε μέσα στις κοίτες χειμάρρων (εσωποτάμιες), είτε έξω από αυτές σε φυσικές ή τεχνητές λεκάνες κατάκλυσης (εξωποτάμιες). Στις μέρες μας έχει επικρατήσει ως «λιμνοδεξαμενή» να θεωρούνται μόνο οι εξωποτάμιοι ταμιευτήρες, δηλαδή οι λεκάνες κατάκλυσης που δημιουργούνται έπειτα από εκσκαφές και φράσσονται με αναχώματα, τα οποία κατασκευάζονται σε περιοχές με κατάλληλα μορφολογικά στοιχεία (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).

1.1. Σκοπιμότητα κατασκευής των λιμνοδεξαμενών

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι συλλογής και αποθήκευσης του υδατικού δυναμικού με σκοπό την ορθολογική του διαχείριση. Κάποιοι βέβαια παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, με την κατασκευή υπεράριθμων υδρογεωτρήσεων έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της αλόγιστης χρήσης και υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδροφορέων όπως επίσης το φαινόμενο υφαλμύρινσης των παράκτιων υδροφορέων. Επιπλέον, η κατασκευή ενός φράγματος προϋποθέτει την ύπαρξη ευνοϊκής θέσης από πλευράς μορφολογικού ανάγλυφου και καταλληλότητας γεωλογικού υποβάθρου ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα, ενώ το κόστος κατασκευής πολλές φορές αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα.

Από την άλλη, οι λιμνοδεξαμενές θεωρούνται υδραυλικά έργα χαμηλού κόστους, με μικρότερες απαιτήσεις όσον αφορά τις μορφολογικές και γεωλογικές συνθήκες σε σχέση με τα

μεγάλα φράγματα. Εναρμονίζονται πλήρως με τις ανάγκες της χώρας μας, καθώς είναι σε θέση να ταμιεύσουν το νερό που παρέχεται κατά τους μήνες με έντονη βροχόπτωση, ώστε να καλύψουν τις ανάγκες σε υδρευτικό και αρδευτικό νερό που παρατηρούνται λόγω της άνισης χωρικής και χρονικής κατανομής των βροχοπτώσεων στην Ελλάδα. Επιπλέον, λόγω της περιορισμένης ανάγκης εκχέρσωσης δανειοθαλάμων και της ασήμαντης επίδραση στα οικοσυστήματα κατά μήκος των ποταμών καθώς και στις κατάντη περιοχές που τυχόν τροφοδοτούνται από τις απορροές του χειμάρρου θεωρούνται ως αποδεκτές κατασκευές με μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Με βάση τα παραπάνω, η κατασκευή λιμνοδεξαμενών έρχεται να δώσει μία δυναμική λύση στο θέμα της ορθολογικής διαχείρισης των υδάτων και στην αύξηση του υδατικού δυναμικού της χώρας.

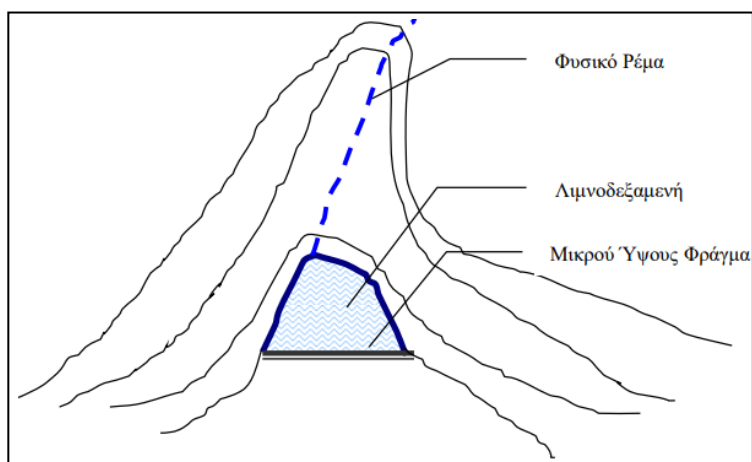
1.2. Εσωποτάμιες και εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές

➤ Εσωποτάμιες λιμνοδεξαμενές

Εσωποτάμια λιμνοδεξαμενή όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1., θεωρείται η διαμόρφωση και χρήση ως αποθηκευτικού χώρου της κοίτης ενός φυσικού ρέματος. Αποτελείται από τα εξής μέρη (Μόσιαλος, 2002):

- Έργο σύλληψης του νερού με την κατασκευή αναχώματος (μικρό φράγμα) στην κοίτη του φυσικού ρέματος.
- Φυσική ή τεχνητή διαμόρφωση του πυθμένα της κοίτης ανάντη του αναχώματος.
- Τεχνικά έργα υπερχείλισης και εκκένωσης.

Για την κατασκευή εσωποτάμιων λιμνοδεξαμενών τα τεχνικά έργα θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις πλημμυρικές παροχές αφού αυτές αποτελούν την τροφοδοσία του ταμιευτήρα τους. Επιπλέον, το ανάχωμα που κατασκευάζεται για την σύλληψη του νερού δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 m. Κατάλληλες θεωρούνται οι θέσεις όπου οι μορφολογικές κλίσεις είναι έντονες χωρίς όμως να είναι επιρρεπείς στις κατολισθήσεις.



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση εσωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Μόσιαλος, 2002)

➤ **Εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές**

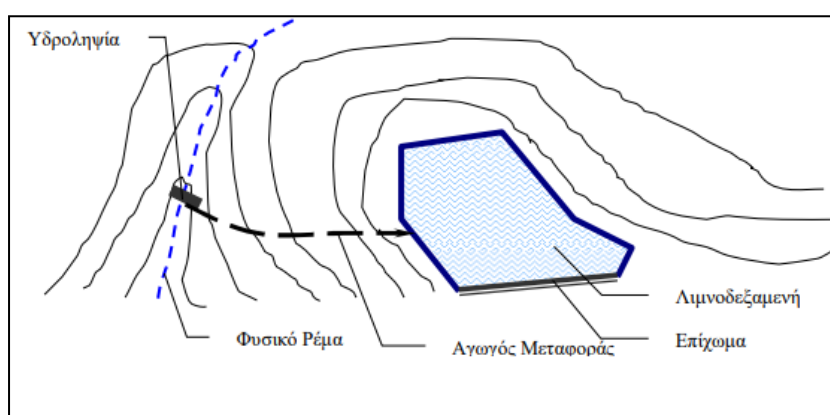
Εξωποτάμια λιμνοδεξαμενή χαρακτηρίζεται η λεκάνη αποθήκευσης ύδατος που τροφοδοτείται από παραπλήσιο φυσικό ρέμα με την βοήθεια αγωγού κλειστού ή ανοικτού τύπου, ο οποίος επιλέγεται ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής και τις ποσότητες φερτών υλικών που μεταφέρει η ροή του φυσικού ρέματος (Εικόνα 1.2) (Μόσιαλος, 2002). Αποτελείται από τα ακόλουθα τεχνικά έργα:

- Έργο σύλληψης του νερού δηλαδή την κατασκευή υπερχειλιστή στο άκρο της κοίτης του ρέματος.
- Αγωγός μεταφοράς του νερού (ανοικτός ή κλειστός)
- Κυρίως λιμνοδεξαμενή (ταμιευτήρας).

Όπως και στην περίπτωση των εσωποτάμιων λιμνοδεξαμενών, έτσι και η κατασκευή της εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής βασίζεται στην κατασκευή μικρού φράγματος (αναχώματος) το οποίο εμποδίζει τη ροή του φυσικού ρέματος.

Σε αντίθεση με τις εσωποτάμιες λιμνοδεξαμενές όπου χρησιμοποιείται η πλημμυρική παροχή, στις εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές η πλήρωση του ταμιευτήρα γίνεται από την βασική ροή του ρέματος. Συνήθως προτιμώνται μικρές κοιλάδες με ήπια πρηνή όπου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη χωρητικότητα με το μικρότερο όγκο αναχώματος.

Αυτός είναι ο τύπος κατασκευής λιμνοδεξαμενής που επικρατεί στον ελληνικό χώρο.

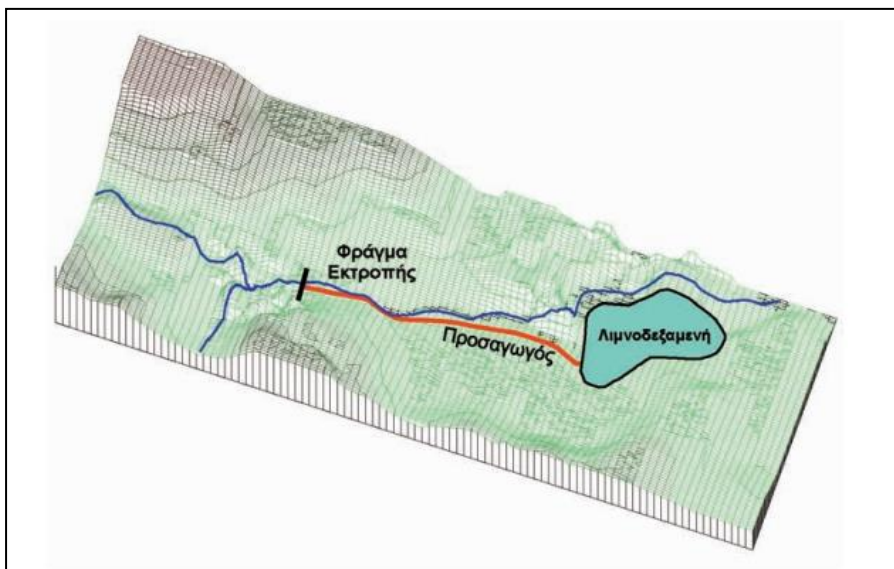


Εικόνα 1.2: Σχηματική απεικόνιση εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Μόσιαλος, 2002)

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

2.1. Βασικές αρχές σχεδιασμού λιμνοδεξαμενής

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού των λιμνοδεξαμενών, εκτός από την διαμόρφωση του χώρου του **ταμιευτήρα** (κυρίως λιμνοδεξαμενή), περιλαμβάνουν επίσης την κατασκευή του **φράγματος εκτροπής** και του **προσαγωγού** (αγωγός μεταφοράς) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Έργα εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).

- Το **φράγμα εκτροπής** είναι χαμηλού ύψους υπερπηδητός αναβαθμός και κατασκευάζεται στην κοίτη του χειμάρρου. Έχει τη δυνατότητα πλευρικής απαγωγής του νερού μέσω αύλακας. Ανάντη του φράγματος εκτροπής προσαρμόζονται έργα παγίδευσης φερτών υλικών, ειδικά όταν το ρέμα τροφοδοτείται από λεκάνη απορροής χωρίς βλάστηση ή/και με εκτεταμένο εδαφικό κάλυμμα ή ευδιάβρωτα πετρώματα. Σημαντικό είναι να θεμελιώνεται σε

βραχώδες υπόβαθρο ενώ η διαστασιολόγησή του εξαρτάται από τις συνθήκες απορροής. Έτσι, αν το ρέμα παρουσιάζει χειμαρρική συμπεριφορά τότε το έργο θα πρέπει να κατασκευάζεται με χαρακτηριστικά σχεδιασμού για μεγάλες παροχές. Αντίθετα, εάν το ρέμα έχει μια σταθερή παροχή σε καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τότε είναι αποδεκτή η διαστασιολόγησή του για μικρότερες παροχές (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).

- Ο **προσαγωγός** αναφέρεται στον αγωγό μεταφοράς του νερού από το φράγμα εκτροπής προς τον ταμιευτήρα. Πρόκειται για ένα απλό έργο κατασκευής, το οποίο δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες απαιτήσεις αλλά περιορίζεται στην εκσκαφή για την προστασία του σωλήνα ή της θεμελίωσης της διώρυγας και τυχόν τεχνικά στις διασταυρώσεις με ρέματα. Επίσης απαιτείται τεχνικογεωλογική διερεύνηση της διαδρομής για να αποφευχθούν περιοχές κατολισθήσεων ή καταπτώσεων και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Επιδιώκεται πάντα η εξεύρεση της πλέον οικονομικής και τεχνικά απλής διαδρομής του έργου προσαγωγής του νερού. Όταν η λιμνοδεξαμενή τροφοδοτείται από τη βασική ροή του χειμάρρου προτιμάται κλειστός αγωγός. Όταν υπάρχει ανάγκη εκμετάλλευσης τμήματος των πλημμυρικών παροχών προτιμάται η ανοικτή διώρυγα (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).
- Ο **ταμιευτήρας** αφορά τον κύριο χώρο της λιμνοδεξαμενής, δηλαδή τον χώρο αποθήκευσης του νερού που μεταφέρεται από το φράγμα εκτροπής μέσω του προσαγωγού. Κατασκευάζεται είτε σε φυσικές κοιλότητες του εδάφους με διαμόρφωση των πρανών, είτε τεχνητά φράζοντας τα τμήματα χαμηλού αναγλύφου με αναχώματα τα οποία κατασκευάζονται από τα υλικά των εκσκαφών της λεκάνης κατάκλυσης. Ο μέγιστος όγκος αποθήκευσης νερού και συνεπώς η διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα πρέπει να εξασφαλίζεται με τον μικρότερο όγκο αναχώματος. Σημαντική βοήθεια για τον εντοπισμό των κατάλληλων θέσεων παρέχεται από την μελέτη αεροφωτογραφιών. Τέλος, θεωρείται ως το πιο βασικό έργο από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω διότι πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες που απαιτούνται ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής κατασκευή του. (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006).

Σε παρακάτω κεφάλαιο θα δοθεί προσοχή και θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά σε αυτές τις γεωτεχνικές παραμέτρους.

Ακολουθώντας λοιπόν τις παραπάνω βασικές αρχές σχεδιασμού, έχοντας μελετήσει τις ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης καθώς και τις συνθήκες απορροής της εκάστοτε περιοχής, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί λιμνοδεξαμενή που θα εξυπηρετεί τις παραπάνω ανάγκες και θα έχει θετική επίδραση στο υδρολογικό πρόβλημα της περιοχής.

2.2. Κριτήρια επιλογής της θέσης κατασκευής

Αρχικά, ο εντοπισμός των πιθανών θέσεων κατασκευής μιας λιμνοδεξαμενής εξετάζεται βάσει γενικών κριτηρίων και εν συνεχεία αφού εντοπιστεί μια συγκεκριμένη θέση διερευνάται περαιτέρω η καταλληλότητά της ως προς συγκεκριμένα γεωλογικά κριτήρια που είναι απαραίτητο να πληρούνται στην θέση έδρασης του ταμιευτήρα.

Έτσι, σύμφωνα με τους Βαλασόπουλο και Δόλκα (1995), εξετάζονται οι περιοχές όπου:

- ✓ Διαπιστώνονται προβλήματα ύδρευσης και άρδευσης.
- ✓ Τα φυσικά ρέματα και οι πηγές της ευρύτερης περιοχής καθώς και οι υδρολογικές συνθήκες ευνοούν την κατασκευή λιμνοδεξαμενής.
- ✓ Δεν εντοπίζονται τυχόν προβλήματα με την αρχαιολογία.
- ✓ Το κόστος των απαλλοτριώσεων τόσο στην θέση της λιμνοδεξαμενής όσο και στην περιοχή των συνοδών έργων υδροληψίας δεν επηρεάζουν αρνητικά το έργο.
- ✓ Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι μηδαμινές και συμφωνούν πάντοτε με το ισχύον θεσμικό και νομικό πλαίσιο.
- ✓ Δεν διαπιστώνεται μόλυνση κατά την ροή του νερού από λύματα ελαιοτριβείων ή άλλων εγκαταστάσεων που πιθανόν να βρίσκονται στις ανάντη περιοχές.

Τα γεωλογικά κριτήρια καταλληλότητας μιας θέσης όπως διατυπώθηκαν στο άρθρο «Τεχνική Γεωλογία των λιμνοδεξαμενών» (Καπλανίδης, 1995) στα πλαίσια παρουσίασης του διημέρου Γεωτεχνική Μελέτη και Κατασκευή Λιμνοδεξαμενών περιγράφονται παρακάτω.

1. Οι **εργασίες των εκσκαφών** που απαιτούνται για την διαμόρφωση του πυθμένα του ταμιευτήρα και μπορούν να γίνουν μόνο με την χρήση απλών μηχανικών μέσων, όπως μπουλντόζες, γκρέιντερ, φορτωτές και τσάπες και όχι με την χρήση εκρηκτικών υλών που θα αυξήσουν το κόστος κατασκευής, θεωρείται ως βασικό κριτήριο για την επιλογή της θέσης. Για τον λόγο αυτό αναζητούνται χαλαροί γεωολογικοί σχηματισμοί, όπως Τεταρτογενή, Νεογενή και παχιές ζώνες αποσαθρωμένου μανδύα. Έτσι λοιπόν είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του βάθους που θα συναντηθεί το βραχώδες υπόβαθρο και μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί είτε με την βοήθεια της γεωφυσικής έρευνας από την ταχύτητα διάδοσης των επιμήκων σεισμικών κυμάτων είτε με τον προσδιορισμό άλλων μηχανικών παραμέτρων με εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές.
2. Η **αντοχή του εδάφους στην ζώνη θεμελίωσης** είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να διερευνηθεί και η οποία καθορίζεται από τις τάσεις που θα ασκηθούν από την κατασκευή. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να ληφθούν δείγματα προς εργαστηριακές δοκιμές έτσι ώστε να προσδιοριστεί η συνοχή (c) και η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και εν τέλει η επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να ασκηθεί.

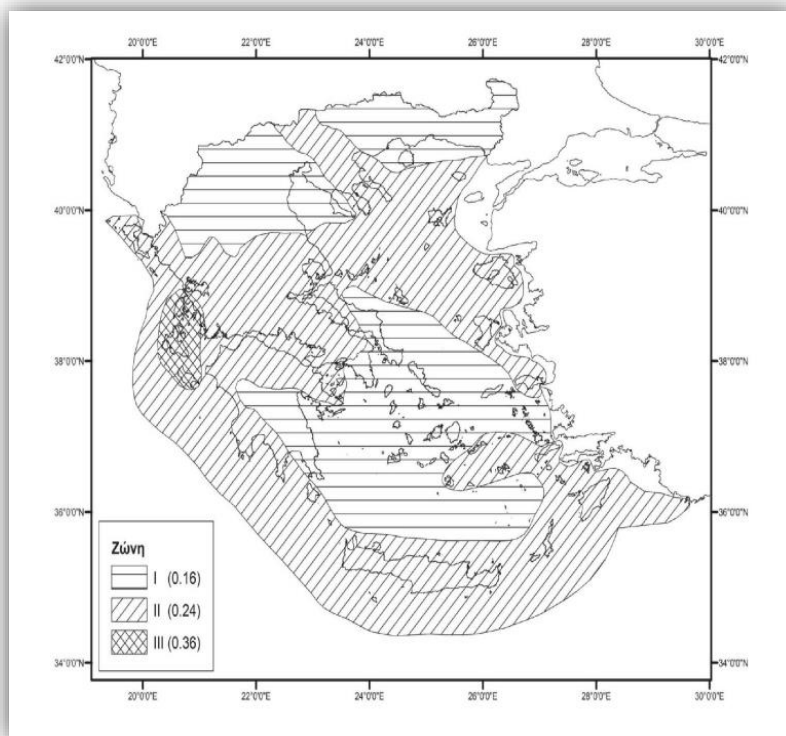
Επιπλέον πρέπει να γίνουν δοκιμές συμπίκνωσης, κοκκομετρική διαβάθμιση, να μετρηθούν τα όρια Atterberg, να βρεθεί η βέλτιστη υγρή πυκνότητα με σκοπό να εκτιμηθεί η καθίζηση του επιχώματος. Η γεωολογική έρευνα θα πρέπει να δίνει σαφή εικόνα για την παρουσία ή όχι στρώσεων αργίλου και των ορυκτών που τις απαρτίζουν (π.χ. ιλλίτης, καολινίτης, μοντοριλλονίτης), λόγω του φαινομένου της διόγκωσιμότητας που παρουσιάζουν καθώς και των πολύ μικρών αντοχών τους. Επιπλέον, θα πρέπει να διερευνάται η παρουσία σχηματισμών με ιδιαίτερη τεχνικογεωολογική συμπεριφορά, όπως στρώσεις αλατιού, πηλού και γύψου, στην περιοχή κατασκευής του έργου.

Τέλος, θα πρέπει να αναζητούνται καρστικές γεωμορφές (π.χ. δολίνες, εγκοίλα), να ερμηνεύεται ο τρόπος δημιουργίας τους, η εξέλιξή τους και οι δυνητικές δυσμενείς επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν στην κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής.

3. Η **στεγανότητα της λεκάνης κατάκλυσης**, αν και παλαιότερα αποτελούσε βασική παράμετρο προς διερεύνηση για την κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής, στις μέρες μας δεν αποτελεί πρόβλημα αφού η χρήση συνθετικών γεωμεμβρανών έχει δώσει μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα στεγανότητας, παρ' ότι αυξάνει κατά πολύ το κόστος κατασκευής του έργου.
4. Η **στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα** επηρεάζει την αντοχή του εδάφους λόγω της πίεσης που ασκεί το νερό με αποτέλεσμα να απομακρύνει τους εδαφικούς κόκκους και τελικά να μειώνει την διατμητική του αντοχή. Στις περιπτώσεις φυσικής στεγανότητας της λεκάνης κατάκλυσης δεν αποτελεί πρόβλημα η ύπαρξη υδροφορέα και ειδικότερα η υψηλή του στάθμη. Εξετάζεται όμως στις θέσεις θεμελίωσης. Σε άλλη περίπτωση όπου η στεγάνωση επιτυγχάνεται με τεχνικό τρόπο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι απαραίτητο να γίνει υδρογεωλογική μελέτη με σκοπό την σωστή τοποθέτηση κατάλληλων στραγγιστηρίων. Σε γενικές γραμμές, όταν εντοπίζεται υδροφόρος ορίζοντας όπου η στάθμη του βρίσκεται ψηλά, η θέση χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλη για την κατασκευή λιμνοδεξαμενής και πρέπει να αποφεύγεται.
5. Η **διαβρωσιμότητα** και κατ' επέκταση η ευστάθεια των πρανών. Οι κυριότερες ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν την διαβρωσιμότητα και οι οποίες πρέπει να εξετάζονται βάση εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια των πρανών είναι: η κοκκομετρική διαβάθμιση, η διατμητική αντοχή, η διαπερατότητα, η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και η ορυκτολογική τους σύσταση. Με βάση την κοκκομετρική τους σύνθεση, τα πλέον ευδιάβρωτα εδάφη είναι οι ιλείς, οι λεπτές άμμοι και όσα έχουν περιεκτικότητα σε ιλύ μεταξύ 40-60%. Με βάση την περιεκτικότητα σε άργιλο τα πλέον ευαίσθητα στην διάβρωση είναι αυτά που περιέχουν χαμηλά ποσοστά μεταξύ 9-30%. Εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε βασικά ορυκτά είναι γενικά περισσότερο σταθερά (Χουλιάρας, 2000).
6. Η **καταλληλότητα και η επάρκεια των γεωυλικών** είναι βασικό να διερευνηθεί για την κατασκευή των επιχωμάτων, των στραγγιστηρίων καθώς και των λοιπών συνοδών έργων. Συγκεκριμένα θα πρέπει να γίνουν εργαστηριακές δοκιμές που θα προσδιορίζουν τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες, ενώ σκόπιμο είναι να

υπολογιστεί το ισοζύγιο των χωματογενικών έτσι ώστε να απαιτηθούν οι λιγότερες δυνατές δανειοληψίες υλικών έως την ολοκλήρωση του έργου.

7. Η **σεισμικότητα μιας περιοχής** επηρεάζει τις διαστάσεις του επιχώματος και των άλλων έργων. Ο συνδυασμός της σεισμικής ιστορίας μιας περιοχής με τις γεωλογικές συνθήκες δίνει στοιχεία για την εκτίμηση της τρωτότητας της κατασκευής από σεισμό. Έτσι οι περιοχές που ανήκουν σε ζώνη υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας, όπως εμφανίζονται στον χάρτη (Εικ. 1.2.) σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ. 2003), σε συνδυασμό με δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες όπως παρουσία ενεργών ρηγμάτων και σαθρών εδαφών, θεωρούνται μη ασφαλείς για την κατασκευή λιμνοδεξαμενών.



Εικόνα 2.2: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (<https://www.elinyae.gr>)

2.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις κατασκευής λιμνοδεξαμενών

2.3.1. Τεχνικογεωλογική έρευνα σε λιμνοδεξαμενή με στεγανή λεκάνη και ανεπένδυτα πρανή.

Η ανεπένδυτη λιμνοδεξαμενή είναι σαν ένα μικρό χωμάτινο φράγμα, γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να διερευνώνται όλες οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες που θα εξετάζονταν σε ένα χωμάτινο φράγμα με την διαφορά ότι εφαρμόζονται σε μικρότερη έκταση. Η κατασκευή αυτή είναι χαρακτηριστική στις περιοχές όπου επικρατούν συνεκτικά εδαφικά υλικά συνήθως στο κάτω μέρος του ρου του χειμάρρου ή σε άλλες θέσεις όπου το υπόβαθρο αποτελείται από αδιαπέρατα πετρώματα (Παπασπύρου, 1995).

Η έρευνα επικεντρώνεται στην διασφάλιση της στεγανότητας του ταμιευτήρα, την ευστάθεια των πρανών, την ασφαλή έδραση των αναχωμάτων, την διερεύνηση ύπαρξης καρστικών εγκοίλων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε αστοχίες, την καταλληλότητα και την επάρκεια των προϊόντων εκσκαφής, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των αναχωμάτων, φίλτρων και στραγγιστηρίων και τέλος την διερεύνηση των υπόγειων υδάτων της περιοχής.

Ένα ερευνητικό πρόγραμμα που μπορεί να εξασφαλίσει την επιτυχή κατασκευή και λειτουργία μιας τέτοιας κατασκευής όπως αναφέρει ο Παπασπύρου (1995) περιλαμβάνει τα εξής:

- ✓ Γεωτρήσεις (6 έως 20) περιμετρικά και στο εσωτερικό της λεκάνης επαρκούς βάθους ώστε να υπάρξει πλήρης στρωματογραφική εικόνα της περιοχής.
- ✓ Δοκιμές διαπερατότητας (Maag, Lefranc, Lugeon) σε διάφορα βάθη.
- ✓ Πιεζόμετρα (6 έως 10) για τον έλεγχο της υπόγειας ροής.
- ✓ 10 έως 12 φρέατα για πύκνωση των σημείων ελέγχου, τη δειγματοληψία και το χαρακτηρισμό της εκσκαψιμότητας των υλικών.
- ✓ Γεωφυσικά (σεισμική και γεωηλεκτρική μέθοδος) για πύκνωση των σημείων ελέγχου.
- ✓ 10 έως 20 φρέατα βάθους έως 4 m για την αναζήτηση δανειοθαλάμων για υλικά αναχωμάτων, φίλτρων, στραγγιστηρίων κλπ.

- ✓ Εργαστηριακές δοκιμές των εδαφικών υλικών ως προς τρεις βασικές ιδιότητες: ικανότητα συμπίκνωσης, διατμητική αντοχή, έλεγχος καταλληλότητας των προϊόντων εκσκαφής ως υλικά φίλτρων, αναχωμάτων.

2.3.2. Τεχνικογεωλογική έρευνα σε λιμνοδεξαμενή μη στεγανή με επένδυση γεωμεμβράνης

Στην περίπτωση του μη στεγανού υποβάθρου, η χρήση της γεωμεμβράνης έρχεται να δώσει λύση στο πρόβλημα της στεγανότητας τόσο του πυθμένα του ταμιευτήρα όσο και των αναχωμάτων. Πλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν οτιδήποτε προϊόντα εκσκαφής, κοκκώδη εδάφη ή ακόμα και βραχώδη υλικά. Έτσι η έρευνα ναι μεν περιορίζεται αλλά πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον τα εξής (Παπασπύρου, 1995):

- ✓ 2 έως 3 γεωτρήσεις με βάθος διερεύνησης τουλάχιστον έως 30 m για την κατανόηση της γεωλογίας της περιοχής και την προσαρμογή της μελέτης στις κατασκευαστικές απαιτήσεις.
- ✓ 3 έως 4 πιεζόμετρα για την παρακολούθηση της υπόγειας ροής.
- ✓ 10 έως 15 ερευνητικές τάφρους για τον χαρακτηρισμό των υλικών εκσκαφής και του ελέγχου της έδρασης των αναχωμάτων.
- ✓ 0 έως 15 φρέατα για δάνεια υλικά, ανάλογα με το είδος και την ποσότητα που απαιτείται.
- ✓ Εργαστηριακές δοκιμές για έλεγχο της καταλληλότητας των υλικών των δανειοθαλάμων και των προϊόντων εκσκαφής.

2.4. Βασικές αρχές κατασκευής των αναχωμάτων

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού και κατασκευής των αναχωμάτων σύμφωνα με τον Ντουνιά (1995) πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- ✓ Ευσταθή πρανή.
- ✓ Ασφάλεια έναντι εσωτερικής διάβρωσης.
- ✓ Αποδεκτή διαρροή από το ανάχωμα και από τη θεμελίωση.
- ✓ Ευστάθεια ασυνεχειών στην συνολική μάζα.
- ✓ Αποδεκτές καθιζήσεις.
- ✓ Έλεγχος εκτειθέμενων επιφανειών έναντι εξωτερικής διάβρωσης των λεπτόκοκκων υλικών.

Για την επιλογή του τύπου του αναχώματος με ή χωρίς μεμβράνη διερευνώνται κρίσιμοι γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράμετροι, όπως είναι η υδροπερατότητα, η συμπιεστότητα, η αντίσταση στην διάβρωση, η γεωλογική δομή της περιοχής, ο τύπος των πετρωμάτων και ο βαθμός αποσάθρωσης τους.

- **Αναχώματα χωρίς μεμβράνη**

Τα διαβρεχόμενα αναχώματα (χωρίς μεμβράνη) απαιτούν υλικά μικρής διαπερατότητας ($k \leq 10^{-7}$ m/sec) για το εσωτερικό του αναχώματος και ανθεκτικά υλικά για τα πρανή των κελυφών. Βασικές απαιτήσεις είναι η ικανοποιητική στράγγιση του ανάντη κελύφους σε απότομη μείωση της στάθμης, η ικανοποιητική στράγγιση του κατόντη κελύφους σε συνθήκες μόνιμης ροής, η ασφάλεια έναντι διατμητικής αστοχίας της θεμελίωσης ή του αναχώματος και η μικρή και ασφαλής διήθηση μέσω της θεμελίωσης. (Ντουνιάς, 1995).

- **Αναχώματα με χρήση γεωμεμβράνης**

Η αναγκαιότητα στεγανοποίησης με μεμβράνη προκύπτει όταν δεν υπάρχουν υλικά κατάλληλα για την κατασκευή στεγανού αναχώματος. Ή ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν αλλά ο ταμιευτήρας δεν είναι υδατοστεγής, έτσι ώστε να αποφευχθεί ειδική κατασκευή προσαρμογής στον ανάντη πόδα του αναχώματος (Ντουνιάς, 1995). Πλέον όλα τα υλικά εκσκαφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των αναχωμάτων εκτός

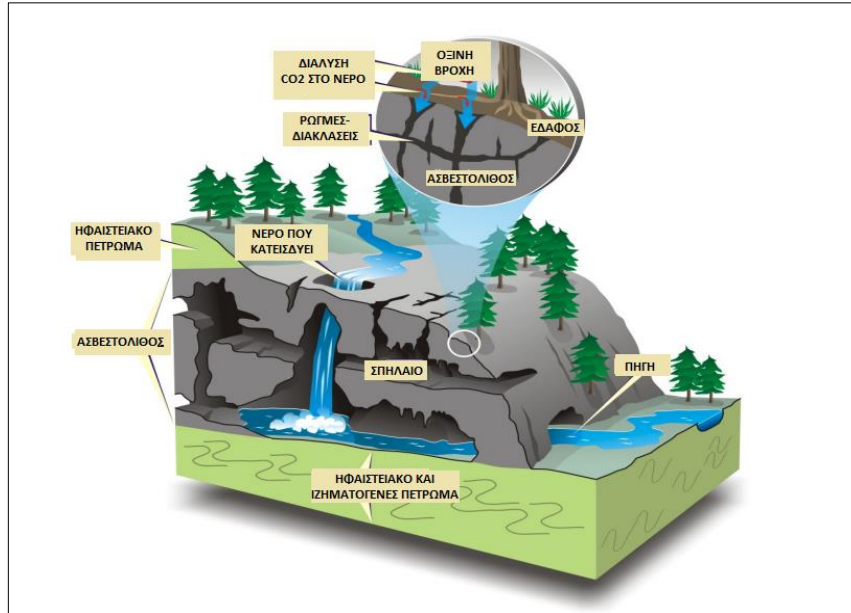
ελαχίστων εξαιρέσεων όπως υλικά με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανικά ή εξαιρετικά διαβρώσιμα υλικά (π.χ. ανυδρίτης).

Η κλίση των πρανών εξαρτάται από την διατμητική αντοχή των υλικών του κελύφους και από κατασκευαστικούς λόγους, έτσι γενικά είναι αποδεκτές κλίσεις 1:3.5 έως 1:4 για το ανάντη πρανές και 1:2 έως 1:2.5 για το κατόντη πρανές. Τα ύψη των αναχωμάτων είναι σχετικά μικρά (10-15m) και επομένως η ευστάθεια του αναχώματος έχει αυξημένο συντελεστή ασφάλειας.

3. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤ

3.1. Η έννοια του καρστ

Η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων, εξαιτίας της κίνησης νερού εμπλουτισμένου με CO_2 , έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφόρων γεωμορφών που ονομάζονται καρστ. Το καρστικό ανάγλυφο δημιουργείται συνήθως στους ανθρακικούς σχηματισμούς (ασβεστόλιθους, δολομίτες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ασβεστολιθικά κροκαλοπαγή) και στους εβαπορίτες (γύψους, ανυδρίτες). Το φαινόμενο αυτό αντιπροσωπεύεται από ένα σύμπλεγμα διαφορετικών επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών που εμφανίζουν ιδιαίτερα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των πετρωμάτων είναι η μεγάλη ικανότητα της διάλυσης και αποσάθρωσης τους καθώς και της δευτερογενούς περατότητας της μάζας τους σε σχέση με τα άλλα πετρώματα (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011).



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της δημιουργίας και εξέλιξης του καρστ (Τσακίρης, 2017)

3.2. Η εξέλιξη του κάρστ

Η καρστική ανάπτυξη, δηλαδή η εξέλιξη του καρστικού αναγλύφου, είναι αργή και συνεχόμενη που διαρκεί εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια, ενώ σε έκταση είτε επιφανειακή είτε υπόγεια μπορεί να φτάσει πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην εξέλιξη του κάρστ είναι η χημική διάλυση, η αποσάθρωση, η μεταφορά και η απόθεση (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011). Επίσης μερικοί σημαντικοί παράγοντες που ελέγχουν την εξέλιξη του κάρστ είναι (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011):

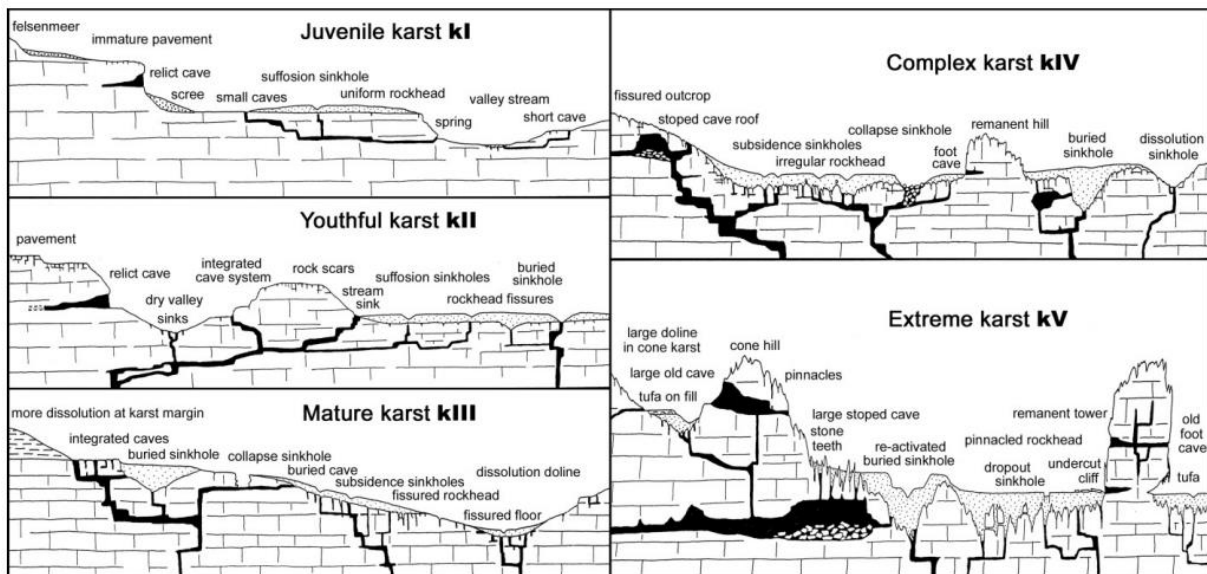
- ✓ Η θέση των διαλυτών πετρωμάτων σε σχέση με την επιφάνεια.
- ✓ Το πορώδες των πετρωμάτων (πετρώματα με μεγάλο πορώδες δεν ευνοούν την ανάπτυξη του κάρστ).
- ✓ Η υδρολογική κλίση. Όταν η ροή νερού είναι πιο γρήγορη (μεγάλη υδραυλική κλίση) η διάβρωση είναι πιο έντονη.
- ✓ Υψηλές βροχοπτώσεις ευνοούν την διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων.
- ✓ Η θερμοκρασία του νερού. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν την βιοχημική δραστηριότητα με αποτέλεσμα να δημιουργείται περισσότερο CO₂ και οργανικά οξέα.

3.3. Μηχανική ταξινόμηση του καρστ

Σύμφωνα με τους Waltham & Fookes (2003) οι συνθήκες του καρστ ταξινομούνται σε μια προοδευτική σειρά πέντε τάξεων, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2 σε τυπικές μορφολογικές συνθήκες και περιγράφονται στον Πίνακα 3.1.

Οι πέντε κατηγορίες παρέχουν τη βάση μηχανικής ταξινόμησης που χαρακτηρίζει το καρστ ως προς την πολυπλοκότητα και τη δυσκολία που θα συναντήσει ο μηχανικός.

Η ταξινόμηση αναφέρεται σε ασβεστόλιθο με οριζόντια κλίση. Οι πτυχωμένοι ασβεστόλιθοι μπορεί να έχουν πιο πολύπλοκα χαρακτηριστικά, αλλά επηρεάζουν οριακά την καρστική ταξινόμηση.



Εικόνα 3.2: Μηχανική ταξινόμηση των μορφολογικών συνθηκών του καρστ σε πέντε κατηγορίες (Waltham & Fookes, 2003)

Οι παράμετροι που αναφέρονται στον Πίνακα 3.1 δεν είναι αποκλειστικές. Ένα καρστ σε ερημικό περιβάλλον μπορεί να μην έχει σχεδόν καμία ανάπτυξη και επομένως φαίνεται να είναι κατηγορίας kI, ενώ μπορεί να περιέχει μεγάλες αόρατες σπηλιές που έχουν απομείνει από φάσεις σε πιο υγρά παλαιοκλίματα.

Σε κάθε καρστ, η διάλυση είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια όπου νερό εισέρχεται στο πέτρωμα. Αυτό δημιουργεί μια ρηχή ζώνη επικάρστ (Klimchouk 2000). Σε

οποιαδήποτε κατηγορία καρστ υπάρχει μια κατακόρυφη διαφοροποίηση με λιγότερο κατακερματισμένο βράχο στο βάθος. Το καρστ είναι γενικά πιο ώριμο και σπηλαιώδες στα όρια με μη ευδιάλυτα πετρώματα που παρέχουν εισροές αλλογενούς στράγγισης.

Το καρστ κάτω από ένα εδαφικό κάλυμμα αναπόφευκτα εγκυμονεί μεγαλύτερους γεωκινδύνους από ένα γυμνό καρστ επειδή τα χαρακτηριστικά διάλυσης αποκρύπτονται. Ένα τέτοιο καλυμμένο καρστ θα έχει μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης βυθισμάτων, γεγονός που υποδηλώνει υψηλότερη κατηγορία καρστ. Οι νέες καταβόθρες σε ένα εδαφικό κάλυμμα σχετίζονται επίσης με τη βραχυπρόθεσμη κίνηση του νερού στο βράχο και επομένως η συχνότητα εμφάνισης τους ποικίλλει σε μια περιοχή με ομοιόμορφη μορφολογία (και κατηγορία καρστ) ανάλογα με το δίκτυο αποστράγγισης (Waltham & Fookes, 2003).

Πίνακας 3.1: Μηχανική ταξινόμηση του καρστ και περιγραφή επιλεγμένων παραμέτρων που σχετίζονται με την μορφολογία του (Waltham & Fookes, 2003).

Κατηγορίες	Περιοχές	Βυθίσματα	Ανάγλυφο	Ρωγμές	Σπήλαια
<i>kI Νεαρό</i>	Σε ερημικές και περιπαγετωδεις ζώνες, ή μη καθαρά ανθρακικά άλατα	Σπάνια. NSH <0,001	Σχεδόν ομοιόμορφο. Μικρές ρωγμές	Ελάχιστες: Χαμηλή δευτερογενής διαπερατότητα	Σπάνια και μικρά: Μερικά μεμονωμένα χαρακτηριστικά υπολείμματα.
<i>kII Νεανικό</i>	Ελάχιστη στις εύκρατες περιοχές	Μικρές καταβόθρες ή βυθίσματα. NSH 0,001–0,05	Πολλές μικρές ρωγμές	Διαδεδομένες λίγα μέτρα στην πλησιέστερη επιφάνεια.	Πολλές μικρές σπηλιές. Οι περισσότερες <3 m σε μήκος.
<i>kIII Ώριμο</i>	Συχνά σε εύκρατες περιοχές. Σε μικρές εμφανίσεις στις υγρές τροπικές περιοχές.	Πολλές διασυνδεδεμένες καταβόθρες. Μεγάλα βυθίσματα διάλυσης. Μικρή υποχώρηση και θαμμένες καταβόθρες. NSH 0,05–1,0	Εκτεταμένες ρωγμές. Ανάγλυφο <5 m; χαλαρά τεμάχια στο εδαφικό κάλυμμα.	Εκτεταμένο δευτερεύον άνοιγμα των περισσότερων ρωγμών.	Πολλά <5 μέτρα σε μήκος σε πολλαπλά επίπεδα.
<i>kIV Περίπλοκο</i>	Εντοπίζεται σε εύκρατες περιοχές. Κανονικό σε τροπικές περιοχές	Πολλές μεγάλες καταβόθρες διάλυσης. Πολυάριθμες καταβόθρες καθίζησης. Διάσπαρτες υποχωρήσεις / κατάρρευση και θαμμένες καταβόθρες. NSH 0,5–2,0	Γεωμορφές με ανάγλυφο 5–20 m. Χαλαρές στήλες	Εκτεταμένα μεγάλα ανοίγματα διάλυσης, πάνω και μακριά από μεγάλες ρωγμές	Πολλά >5 m σε πολλαπλά επίπεδα.
<i>kV Υπερβολικής Ανάπτυξης</i>	Μόνο σε υγρές τροπικές περιοχές	Πολύ μεγάλες καταβόθρες όλων των τύπων. Υπολειμματικά τόξα συμπίεσης εδάφους σε θαμμένες καταβόθρες. NSH ≥ 1	Εντονες γεωμορφές - ανάγλυφο >20 m. Χαλαρές στήλες χαμηλώνουν ανάμεσα σε βαθιές ρωγμές εδάφους.	Άφθονες και πολύ περίπλοκες κοιλότητες διάλυσης.	Πολυάριθμα σύνθετα τρισδιάστατα συστήματα καρστικών εγκοίλων, με στοές και θαλάμους >15m.

NSH= ρυθμός εμφάνισης νέων καταβοθρών ανά km² ανά έτος.

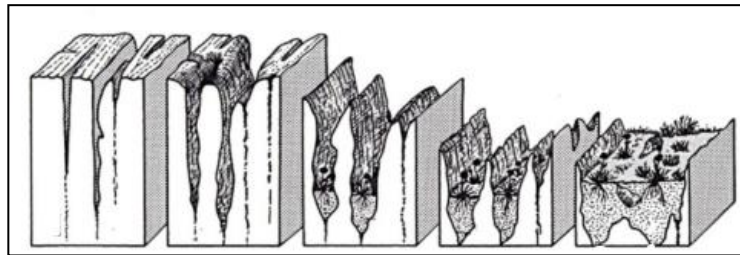
3.4. Επιφανειακές και υπόγειες γεωμορφές

Σύμφωνα με το επίπεδο δημιουργίας τους οι γεωμορφές αυτές διακρίνονται σε επιφανειακές και υπόγειες. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι πιο χαρακτηριστικές μορφές κάρστ ενώ δίνεται έμφαση στις δολίνες μιας και αποτελούν τις κύριες γεωμορφές που όπως θα δούμε παρακάτω παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια μιας κατασκευής.

3.4.1. Επιφανειακές καρστικές μορφές

Γλυφές (Karren)

Αποτελούν τις μικρότερες και πιο συνηθισμένες επιφανειακές καρστικές μορφές. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στην χρόνια διάλυση των γυμνών επιφανειών των ασβεστολίθων ή γύψων. Δημιουργούνται σε κεκλιμένα στρώματα από την ροή του νερού και εμφανίζονται με την μορφή αυλακώσεων στην επιφάνεια των διαλυτών πετρωμάτων. Ανάλογα με το βάθος των αυλακώσεων διακρίνονται σε μικρογλυφές (<1cm), γλυφές (από 1cm έως 10m) και πεδίο γλυφών (>10m) όταν ένα συγκρότημα γλυφών καλύπτει μια μεγάλη σε έκταση περιοχή. Μερικές χαρακτηριστικές εικόνες γλυφών παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.3: Δημιουργία και ανάπτυξη γλυφών (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011)



Εικόνα 3.4: Α) Μικρογλυφές σε ασβεστόλιθο στην περιοχή Στύλος Αποκορώνου . Β) Γλυφές μεγάλου μήκους που εμφανίζονται κυρίως σε μεγάλα υψόμετρα με μεγάλες κλίσεις (Τσουκαλάς & Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη, 2004). Γ) Πεδίο γλυφών στην πόλη Kunming της Κίνας. Δ) Πεδίο γλυφών στην πόλη Tsingy de Bemaraha στην Μαδαγασκάρη (<https://education.nationalgeographic.org/resource/karst>)

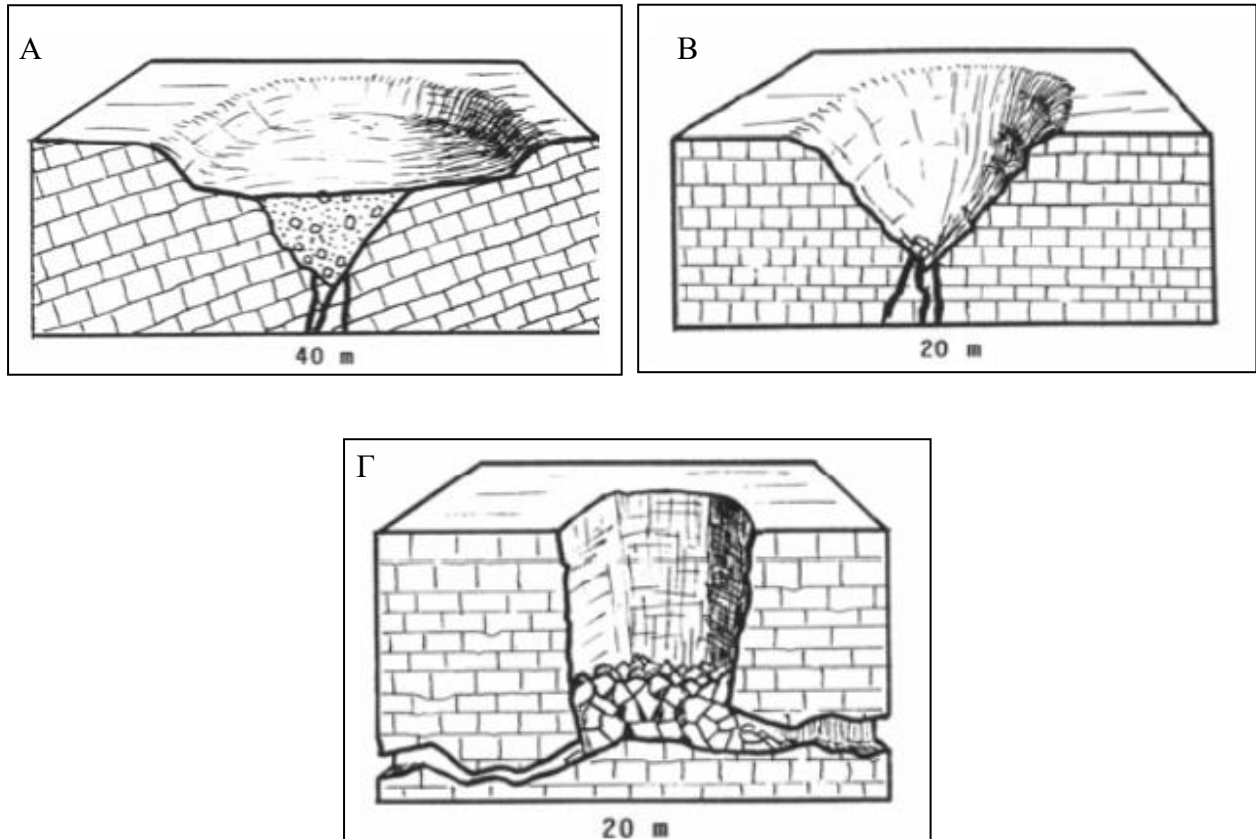
Δολίνες (Doline/Sinkholes)

Οι δολίνες είναι συνήθως κυκλικά - υποκυκλικά κοιλώματα στην επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν από την εμβάθυνση του ασβεστολιθικού εδάφους λόγω της διάλυσης, κατάρρευσης, περιφερειακής καθίζησης ή διεύρυνσης των ρωγμών του. Η διάμετρος των κοιλωμάτων των δολινών ποικίλει μεταξύ μερικών μέτρων έως 1000 m. Τα τοιχώματά τους κυμαίνονται από ήπιες κλίσεις έως κατακόρυφες και το βάθος μπορεί να φτάσει έως αρκετές εκατοντάδες μέτρα. Θεωρούνται μια από τις κύριες διαγνωστικές γεωμορφές του καρστ.

Ο όρος «*δολίνη*» έχει προέλθει από την σλαβική λέξη *dolina* που σημαίνει κοιλάδα και χρησιμοποιείται κυρίως από τους Ευρωπαίους γεωμορφολόγους ως μια περιγραφική έννοια καρστικών κοιλωμάτων αντίστοιχων διαστάσεων.

Ο J. Cvijic (1893), ένας από τους πρώτους γεωμορφολόγους, τις διέκρινε ανάλογα με το βάθος και τις κλίσεις των τοιχωμάτων τους σε:

- **Δισκοειδείς δολίνες:** Αναφέρονται στις αβαθείς λεκάνες με επίπεδο πυθμένα, ο οποίος είναι καλυμμένος με αδιάλυτα υλικά όπως κοκκινοχώματα (*terra rosa*), ιζήματα ψαμμίτη, αλλουβιακά κ.α. Αυτοί οι τύποι δολινών δημιουργούνται στους λιγότερο διαλυτούς ανθρακικούς σχηματισμούς (π.χ. δολομίτες, πυρόλιθοι).
- **Χοανοειδείς δολίνες:** Πρόκειται για κοιλώματα σε μορφή χοάνης με απότομα τοιχώματα όπου το βάθος του πυθμένα είναι περίπου ίσο με την ακτίνα του κοιλώματος. Ο πυθμένας καλύπτεται από χαλαρά υλικά ενώ δημιουργούνται σε πολύ καλά διαλυμένους και κατακερματισμένους ασβεστόλιθους.
- **Εγκατακρημνισιγενείς δολίνες:** Έχουν την μορφή φρέατος αφού έχουν προκύψει από την κατάρρευση της οροφής του ανθρακικού σχηματισμού. Το πλάτος των τοιχωμάτων είναι συνήθως μικρότερο από το βάθος τους με κατακόρυφη κλίση των τοιχωμάτων και επίπεδο πυθμένα. Συνήθως δημιουργούνται στις τομές δυο ή περισσοτέρων κάθετων – υποκάθετων ρηγμάτων.



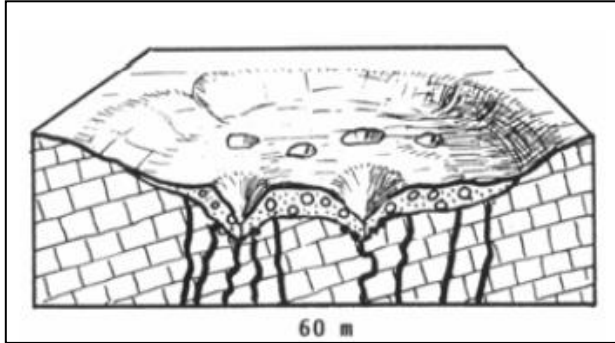
Εικόνα 3.5: Α) Δισκοειδής δολίνη, Β) Χοανοειδής δολίνη Γ) Εγκατακρημισιγενής δολίνη (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011)

Ουβάλες (Uvalas)

Οι ουβάλες θεωρούνται το εξελικτικό στάδιο μιας δολίνης καθώς ο σχηματισμός τους προκύπτει από την ένωση δύο ή παραπάνω δολινών. Πρόκειται λοιπόν για μεγάλες κοιλότητες με περίπλοκο σχήμα και περίγραμμα στην επιφάνεια του εδάφους, όπου οι μεγαλύτεροι άξονες τους είναι συνήθως παράλληλοι με τις κατευθύνσεις των στρώσεων τους. Η έκτασή τους κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα έως και μερικά τετραγωνικά χιλιόμετρα ενώ το βάθος τους ποικίλλει από μερικές δεκάδες μέτρα έως εκατό μέτρα. Ο πυθμένας τους έχει συχνά κυματοειδή σχήμα λόγω της συνένωσης πολλών δολινών ενώ λίγες είναι οι φορές που μπορεί να είναι και επίπεδος.

Αυτός ο τύπος κάρστ συναντάται συχνά στους πυθμένες των ξηρών κοιλάδων των ποταμών του κάρστ. Με την ροή του νερού στους πυθμένες των καρστικών κοιλάδων ξεκινά

η διάβρωση προς σχηματισμό δολινών και στην συνέχεια η διάβρωση αυτή εξαπλώνεται προς τα χωρίσματα ανάμεσα στις σχηματισμένες δολίνες. Επιπλέον, δημιουργία ουβαλών έχει παρατηρηθεί και στις τυφλές ποτάμιες κοιλάδες του κάρστ. Όταν η ροή η οποία έχει δημιουργήσει την τυφλή κοιλάδα αρχίσει πάλι τότε δημιουργείται ένα ξηρό κλειστό κοίλωμα που έχει τις διαστάσεις και το σχήμα της ουβάλας.



Εικόνα 3.6: Σύμπλεγμα δολινών εξελισσόμενες σε μορφή ουβάλας (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011)



Εικόνα 3.7: Ανάπτυξη ουβάλας από την συνένωση δολινών (Waele, et al., 2011).

Πόλγες (Polje)

Πρόκειται για την μεγαλύτερη σε έκταση επιφανειακή καρστική γεωμορφή. Σύμφωνα με τον Gams (1978), ως πόλγη αναφέρεται η μεγάλης έκτασης κλειστή λεκάνη με επίπεδο πυθμένα, με απότομες κλίσεις στις πλαγιές της και με αποστράγγιση των επιφανειακών νερών. Αρχικά η δημιουργία μιας πόλγης οφείλεται στην τεκτονική δράση με αποτέλεσμα την επιφανειακή ταπείνωση του σχηματισμού και στην συνέχεια λαμβάνει χώρα η καρστική διάβρωση ως αποτέλεσμα της τελικής διαμόρφωσης του πυθμένα. Επίσης, ο σχηματισμός μιας πόλγης μπορεί να οφείλεται στην προοδευτική αύξηση και συνένωση των δολινών προς ουβάλες και στην συνέχεια σε πόλγη. Ως ελάχιστο πλάτος του πυθμένα για να χαρακτηριστεί ένα κοίλωμα ως πόλγη ο Gams (1978) πρότεινε τα 400m, όμως η πρόταση αυτή αναιρείται από την θεωρία του Cnijić (1893), ο οποίος είχε ορίσει νωρίτερα ως ελάχιστο όριο τα 1000m. Πράγματι έχει διαπιστωθεί ότι το μέγεθος των πολγών ποικίλλει σημαντικά από $\sim 1\text{km}^2$ έως $>470\text{km}^2$.

Ο ομαλός πυθμένας των πολγών μπορεί να είναι σχηματισμένος από τους ασβεστόλιθους, το κλαστικό υλικό ή από διπλά στρώματα που έχουν ως βάση τον

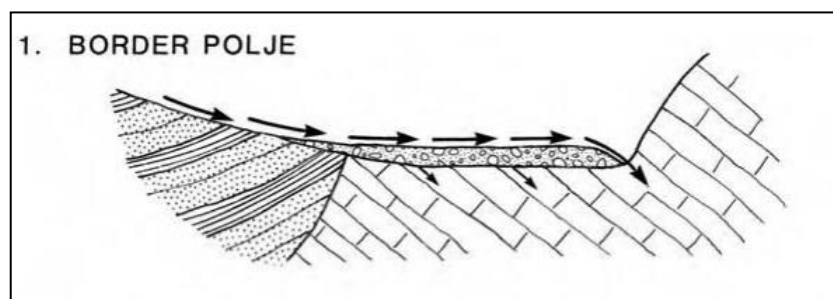
ασβεστόλιθο και ως υπερκείμενα στρώματα τα διαβρωμένα υλικά των πλαγιών τους και τα οποία προσδίδουν στον πυθμένα την επίπεδη εμφάνισή τους. Το πάχος του εδαφικού μανδύα του πυθμένα ποικίλει από μηδέν μέχρι εκατοντάδες μέτρα.



Εικόνα 3.8: Πόλγη Dabarsko (Βοσνία-Ερζεγοβίνη) (Waele, et al., 2011)

Οι πόλγες ταξινομήθηκαν από τους Ford και Williams (1989) σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τα γεωμορφολογικά και υδροδυναμικά τους χαρακτηριστικά. Οι κατηγορίες αυτές αναλύονται και απεικονίζονται σχηματικά ως εξής:

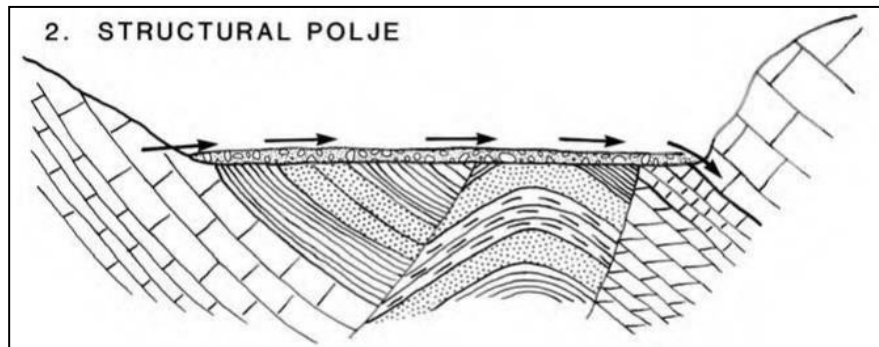
- **Πόλγες ορίων (border polje):** είναι οι πόλγες που βρίσκονται στις μεταβατικές περιοχές μεταξύ των καρστικών και μη καρστικών πετρωμάτων. Η επαναφόρτισή τους γίνεται μέσω του συστήματος των επιφανειακών απορροών και καταβοθρών.



Εικόνα 3.9: Σχηματική απεικόνιση πόλγης ορίων (Ford & Williams, 2007)

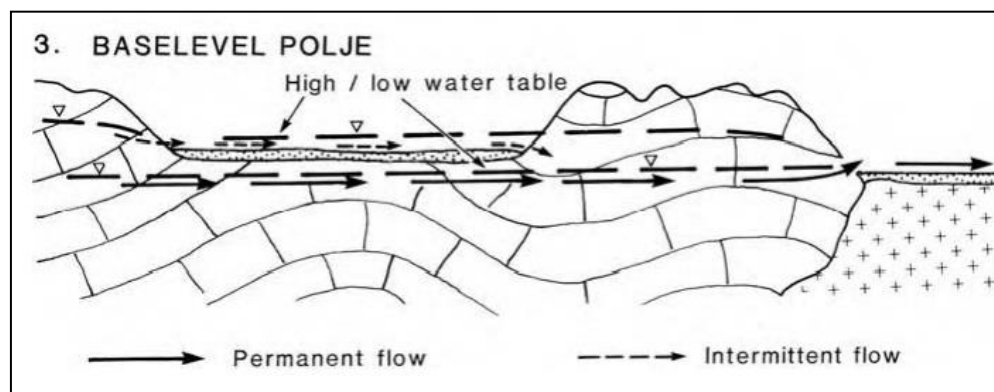
- **Δομικές πόλγες (structural polje)** διακρίνονται από τα αδιαπέρατα πετρώματα που συγκροτούν τον πυθμένα τους και τα οποία λειτουργούν ως φράγμα αναγκάζοντας τα επιφανειακά και υπόγεια νερά να ρέουν επιφανειακά προς τα σημεία με μικρότερη

υδραυλική κλίση συνήθως στην επαφή ενός ρήγματος με το καρστικοποιημένο πέτρωμα, όπου πολυάριθμες καταβόθρες συμβάλλουν στην κατείσδυση του νερού στα υποκείμενα στρώματα. Αυτός ο τύπος πόλγης αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τύπο στο Διναρικό κάρστ αλλά και σε περιοχές με έντονα τεκτονισμένα και διαρρηγμένα ανθρακικά πετρώματα.



Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση δομικής πόλγης (Ford & Williams, 2007)

➤ **Πόλγες επίπεδου βάσης (Baselevel polje):** Πρόκειται για τις πόλγες όπου ο πυθμένας τους βρίσκεται εξ' ολοκλήρου πάνω στα καρστικά πετρώματα και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα κατά την διάρκεια μεγάλων βροχοπτώσεων η στάθμη να ανεβαίνει και η επιφάνεια του πυθμένα να πλημμυρίζει. Στην Ελλάδα τέτοιο παράδειγμα είναι η πόλγη της Κωπαΐδας.



Εικόνα 3.11: Σχηματική απεικόνιση της πόλγης Επίπεδο-βάσης (Ford & Williams, 2007)

3.4.2. Υπόγειες καρστικές μορφές

Οι υπόγειες καρστικές μορφές διαχωρίζονται σε αυτές της διάβρωσης και σε αυτές της απόθεσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το 98% των περιπτώσεων των υπογείων καρστικών μορφών δεν σχετίζονται με κάποιο εμφανές άνοιγμα στην επιφάνεια του εδάφους (από Γκολούμποβιτς-Δεληγιάννη, 2011), γεγονός το οποίο κάνει το έργο μιας κατασκευής πιο περίπλοκο και θα πρέπει πραγματοποιείται ενδελεχής έρευνα για τον εντοπισμό τους και λεπτομερής διερεύνηση της ευστάθειάς τους υπό το βάρος μιας κατασκευής.

Οι διαστάσεις των καρστικών εγκοίλων ποικίλλουν. Σε εύκρατες περιοχές τα καρστικά έγκοιλα έχουν γενικά διάμετρο μικρότερη από 10 m ενώ σπήλαια διαμέτρου 30 m εμφανίζονται πιο συχνά σε υγρές τροπικές περιοχές (Waltham & Fookes, 2003).

Οι υπόγειες καρστικές μορφές διάβρωσης είναι οι εξής:

- **Καρστικά φρέατα (Jama)**
- **Σπήλαια**
- **Καρστικοί αγωγοί**

Οι υπόγειες καρστικές μορφές απόθεσης είναι οι εξής:

- **Σπηλαιοδιάκοσμος (σταλακτίτες, σταλαγμίτες, στήλες)**
- **Αποθέσεις τραβερτίνη (όνυξ σπηλαίων)**
- **Αποθέσεις των συσσωρευμένων κορημάτων**
- **Ερυθρά γη (terra rosa).**

➤ **Καρστικά φρέατα (Jama):** Είναι στενές μικρές ή μεγάλες κοιλότητες διαφόρων σχημάτων στην επιφάνεια του εδάφους, τα οποία λειτουργούν ως φρεάτια , δηλαδή αποστραγγίζουν το επιφανειακό νερό μέσω των καναλιών που δημιουργούνται στην τομή δύο ή περισσότερων διακλάσεων ή ρηγμάτων και συνήθως φτάνουν σε βάθος έως 100m, ενώ δεν αποκλείεται να εντοπιστούν και σε μεγαλύτερα βάθη. Σύμφωνα με τον Milanovic (1981), το βαθύτερο καρστικό φρέαρ (jama) βρίσκεται στο Pierre Saint Martin μεταξύ Γαλλίας και Ισπανίας και φτάνει έως 1971m. Συχνά συγχέονται με τις δολίνες κατάρρευσης αφού σχηματίζονται κάτω από αυτές ενώ θα μπορούσαμε να πούμε ότι αποτελούν τη μεταβατική ζώνη μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων γεωμορφών.

➤ **Σπήλαια:** Είναι υπόγεια έγκοιλα μεγάλων διαστάσεων με οριζόντια ή/και ήπια κλίση, τα οποία ξεκινούν από την επιφάνεια και επεκτείνονται στο εσωτερικό της Γης και συνήθως είναι προσβάσιμα. Τα μήκη των σπηλαίων φτάνουν αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Η ανάπτυξή τους εξαρτάται από τη γεωλογική – τεκτονική δομή της περιοχής όπου η διάταξη των καναλιών των σπηλαίων ακολουθεί τις κατευθύνσεις των κύριων ρηγμάτων του σχηματισμού. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξή τους επίσης παίζει η μηχανική διάβρωση και η κατολίσθηση ή η καθίζηση που προκαλείται από αυτή. Τα πιο εκτεταμένα σπήλαια εμφανίζονται σε παχείς ασβεστόλιθους και σχετικά καθαρούς (>90% ασβεστίτη).

➤ **Καρστικοί αγωγοί:** Είναι τα υπόγεια κανάλια που συνδέονται με τα σπήλαια και τα καρστικά φρέατα. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι το ακανόνιστο δίκτυο κυκλοφορίας των υπόγειων νερών καθώς και η μεταβαλλόμενη διάμετρος τους. Τα ψηλότερα τμήματα των αγωγών είναι ξηρά ενώ τα κατώτερα είναι πλήρη νερού. Όταν η κινητική ενέργεια του υπόγειου νερού είναι μεγάλη τότε η μηχανική διάβρωση επιδρά καθοριστικά προκαλώντας κατολισθήσεις, καταρρεύσεις οροφών και κατ' επέκταση διεύρυνση των καρστικών αγωγών μετατρέποντας τους σε καρστικά έγκοιλα (κενοί υπόγειοι χώροι) που η διάμετρός τους κυμαίνεται από δεκάδες έως και εκατοντάδες μέτρα.

3.5. Το κάρστ σε Παγκόσμιο επίπεδο και στην Ελλάδα.

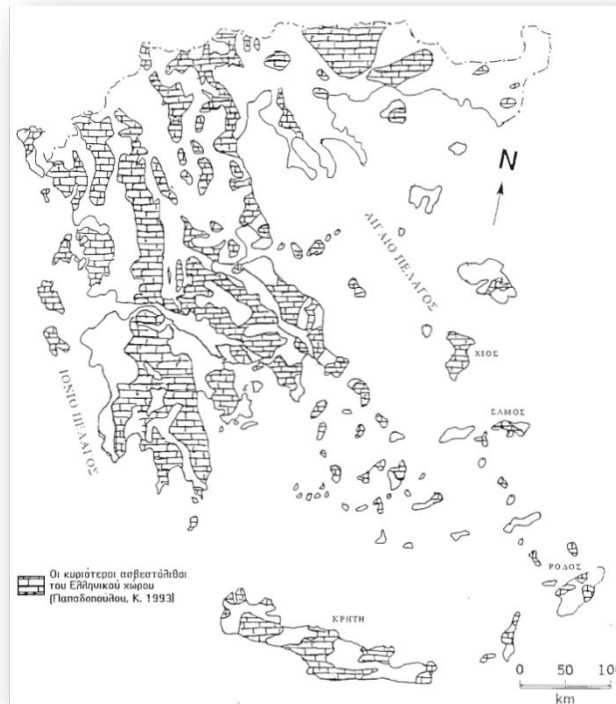
Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Χαρτογράφησης Καρστικών Υδροφορέων (WOKAM) το 15,2% ή 20.3 εκατομμύρια km² της παγκόσμιας ηπειρωτικής επιφάνειας χωρίς πάγο χαρακτηρίζεται από την παρουσία καρστικοποιημένων ανθρακικών πετρωμάτων. Το μεγαλύτερο ποσοστό εντοπίζεται στην Ευρώπη (21.8% ή 2.17 εκ. km²), ενώ στην Ασία καταλαμβάνει μεγαλύτερη περιοχή (απόλυτη έκταση 8.35 εκ. km²), (Goldscheider, et al., 2020).

Πίνακας 3.2: Κατανομή ανθρακικών πετρωμάτων / πιθανών καρστικών υδροφορέων παγκοσμίως (Goldscheider, et al., 2020).

ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ		
ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΚΤΑΣΗ ΣΕ 1000 km²	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
Ευρώπη	2.167	21.8
Αφρική	4.067	13.5
Ασία	8.348	18.6
Αυστραλία & Ωκεανία	0.503	6.2
Βόρεια Αμερική	4.435	19.6
Νότια Αμερική	0.767	4.3
ΣΥΝΟΛΟ:	20.274	15.2

Στην Ελλάδα τα ανθρακικά πετρώματα καλύπτουν το 35% του επιφανειακού της αναγλύφου (Εικ. 3.11) και τα νερά που φιλοξενούνται στους καρστικούς υδροφορείς που αναπτύσσονται σε αυτά αποτελούν σημαντικό υπόγειο υδατικό πόρο (Βουδούρης, 2017).

Το ελληνικό όπως και το διναρικό κάρστ ανήκει στο γεωσυγκλινές κάρστ, που αναπτύσσεται στα πτυχωμένα και έντονα τεκτονισμένα και διαρρηγμένα ανθρακικά πετρώματα, σε αντίθεση με το κάρστ της Ρωσίας, ΗΠΑ, Βόρειας Αφρικής που είναι κάρστ πλατφόρμας το οποίο εμφανίζεται σε σχεδόν οριζόντια στρώματα μη αμιγών ασβεστολίθων και η καρστικοποίησή τους είναι περιορισμένη (Βουδούρης, 2017).



Εικόνα 3.12: : Κατανομή των ανθρακικών πετρωμάτων στον ελλαδικό χώρο (Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη, 2007)

Η ανάπτυξη του ελληνικού κάρστ οφείλεται στην διάλυση των μικροκρυσταλλικών, λεπτοκρυσταλλικών έως παχυπλακωδών Τριαδικών, Ιουρασικών και Κρητιδικών σχηματισμών. Το καρστικό ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία γεωμορφών τόσο επιφανειακών όσο και υπόγειων. Ο συνδυασμός της λιθολογίας, των ενδογενών και εξωγενών παραγόντων δεν επέτρεπε την δημιουργία εκτεταμένων κοιλάδων, αντίθετα τύποι καρστικών γεωμορφών όπως δολίνες και πόλγες αφθονούν στον ελλαδικό χώρο.

Μερικά παραδείγματα χαρακτηριστικών καρστικών γεωμορφών ανά την Ελλάδα παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Η λιμνοδολίνη του Κουρνά (Εικ. 3.12)** βρίσκεται στην Κρήτη στα όρια μεταξύ των νομών Χανίων και Ρεθύμνου, στις βόρειες παρυφές των Λευκών Ορέων σε απόσταση 2,5 km από την θάλασσα. Αποτελεί την μοναδική λίμνη του νησιού με έκταση 0.567 km². Έχει σχήμα αχλαδιού με μέγιστο μήκος 1087 m και μέγιστο πλάτος 880 m. Το βάθος της ποικίλλει αναλόγως των διακυμάνσεων της επιφάνειας κατά τις διάφορες χρονικές περιόδους με το μέγιστο να φτάνει τα 22.5 m. Η δημιουργία της έχει προκύψει εξαιτίας των πολλών και διαφόρων διευθύνσεων διαρρήξεων ενώ δεν αποκλείεται να υπήρχε ένα ή περισσότερα έγκοιλα τα οποία κατέρρευσαν με αποτέλεσμα να κατατάσσεται στον τύπο εγκατακρημνισιγενών δολίνων (Παπαπέτρου-Ζαμάνη & Βερυκίου, 1977).



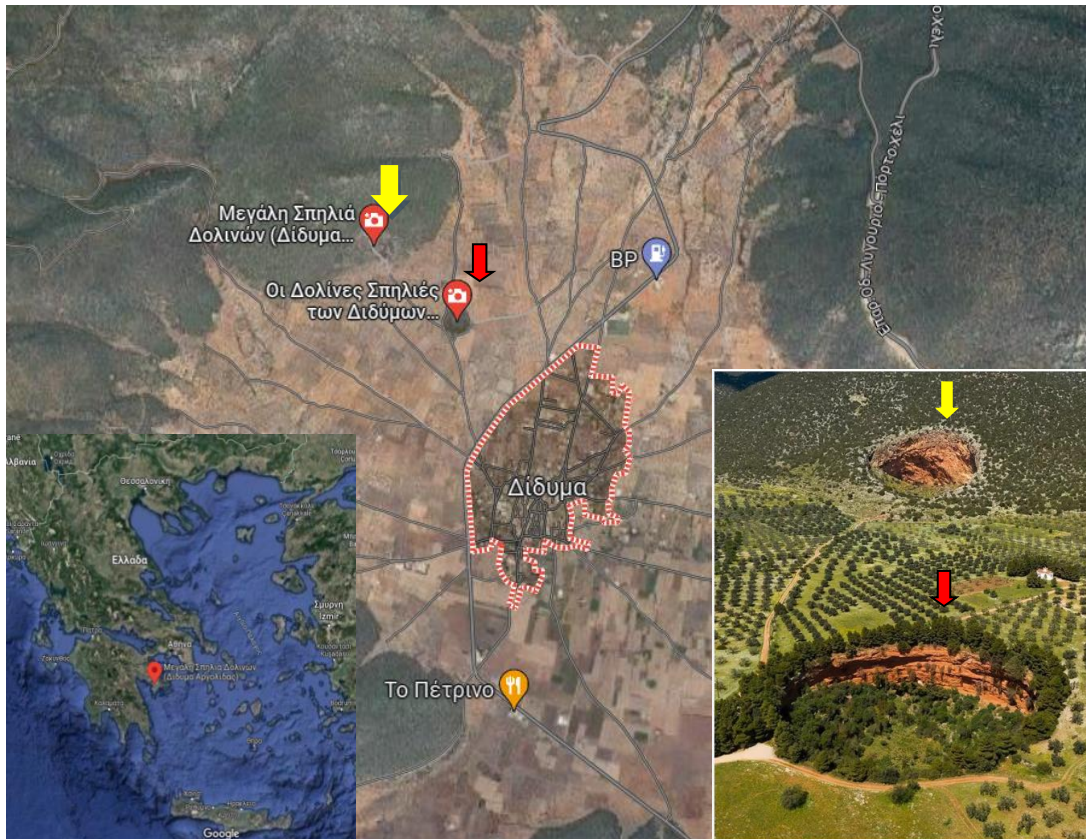
Εικόνα 3.13: Η Λιμνοδολίνη του Κουρνά (www.earth.google.com)

- **Οι δολίνες των Διδύμων (Μεγάλη & Μικρή Σπηλιά)** βρίσκονται στο ομώνυμο χωριό Δίδυμα του Νομού Αργολίδας. Οι δολίνες εντοπίζονται στο κέντρο της πόλγης των Διδύμων και όπως αναφέρει ο Μηλιαράκης (1882) όταν η περιοχή γινόταν λίμνη από τις βροχές οι δολίνες λειτουργούσαν σαν καταβόθρες αποστραγγίζοντας τα νερά που κατέκλυζαν την πόλγη (Ιωάννου, 1975-1976).

Η Μικρή Σπηλιά είναι επίπεδη κυκλικής μορφής και η διάμετρός της είναι 100 m ενώ έχει βάθος 30 m. **Η Μεγάλη Σπηλιά** είναι λίγο μεγαλύτερη από την Μικρή

Σπηλιά, είναι ελλειψοειδούς μορφής με τον μεγάλο άξονα να έχει μήκος 175m και τον μικρό 130m. Το βάθος της είναι 90m και η μεγάλη κλίση του βόρειου ανατολικού τμήματός της την κάνει ορατή από όλο το χωριό των Διδύμων.

(<https://www.showcaves.com/english/gr/karst/Didyma.html>)



Εικόνα 3.14: Η Πόλη του χωριού Διδύμων με τις Δολίνες Μικρή Σπηλιά (κόκκινο βέλος) και Μεγάλη Σπηλιά (κίτρινο βέλος).

- **Το οροπέδιο του Ομαλού** εντοπίζεται στα Λευκά Όρη της Κρήτης, 45km Νότια-νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων σε υψόμετρο περίπου 1050m, ενώ καταλαμβάνει έκταση περίπου 6 km² (Steiakakis, et al., 2013). Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η δημιουργία τέτοιων χαρακτηριστικών γεωμορφών στην βάση ορεινών όγκων είναι αποτέλεσμα αφενός της καρστικοποίησης των ανθρακικών πετρωμάτων και αφετέρου του κλίματος και της τεκτονικής της περιοχής. Ενώ όπως διατυπώθηκε παραπάνω η δημιουργία δομών με αυτές τις διαστάσεις χαρακτηρίζονται ως πόλγες αποτυπώνοντας την καρστική γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής (Μανούτσογλου, et al., 2014).



Εικόνα 3.15: Η πόλγη του Ομαλού.

- **Το Σπήλαιο Μααρά ή Σπήλαιο των πηγών Αγγίτη** βρίσκεται 23 km βορειοδυτικά της πόλης της Δράμας, σε υψόμετρο 127 m. Πρόκειται για ένα από τα λίγα σπήλαια στον κόσμο που ένας υπόγειος ποταμός διέρχεται από όλο του το μήκος. Η πρώτη συστηματική εξερεύνησή του έγινε το 1978 από μια ομάδα Ελλήνων και Γάλλων Σπηλαιολόγων, στη συνέχεια το 2000 τα πρώτα 500 m έγιναν προσβάσιμα στο κοινό. Μέχρι σήμερα, με βάση τα αποτελέσματα της Σπηλαιολογικής αποστολής που πραγματοποιήθηκε το 2010 από την Γαλλική Ομοσπονδία Σπηλαιολογίας, η γνωστή έκταση του υπόγειου ποταμού είναι 12 km (Pennos, et al., 2016).



Εικόνα 3.16: Το σπήλαιο Μααρά (Πηγών Αγγίτη) στην Δράμα. Φωτογραφίες από το εσωτερικό του σπηλαίου. Κάτω δεξιά η κάτοψη του σπηλαίου όπως φαίνεται από αεροφωτογραφία (Pennos, et al., 2016).

3.6. Διαχείριση κατασκευής τεχνικών έργων σε καρστικές περιοχές

Τα εδάφη που συχνά καλύπτουν σπηλαιώδη ανθρακικά ή/και εβαποριτικά πετρώματα μπορεί να επηρεάζονται από σοβαρά προβλήματα ευστάθειας του εδάφους. Οι επιπτώσεις και οι κίνδυνοι που συνδέονται με το κάρστ αυξάνονται ραγδαία καθώς η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού τους δυο τελευταίους αιώνες είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία αστική επέκταση και την αυξημένη κατοχή γης μαζί με την αυξανόμενη ζήτηση πρωτογενών πόρων (νερό, κτίρια, τρόφιμα, ηλεκτρική ενέργεια κ.α.), με συνακόλουθες αυξανόμενες ανθρωπογενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον (βιομηχανίες, απόβλητα, ρύπανση, κυκλοφορία κλπ) (Gutierrez, et al., 2014).

Είναι σαφές ότι λόγω της ευρείας εξάπλωσης των ανθρακικών σχηματισμών στον ελληνικό χώρο, είναι αναπόφευκτο να μην δημιουργείται η ανάγκη κατασκευών σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα. Αν και σε επίπεδο ακέραιου πετρώματος ο ασβεστόλιθος χαρακτηρίζεται ως καλής ή μεγάλης αντοχής σχηματισμός χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα σε θεμελιώσεις, πρηνή και υπόγεια έργα, από την άλλη η τελική του συμπεριφορά εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η γεωμετρία των ασυνεχειών σε σχέση με το σχεδιασμό του έργου και το βαθμό και τη μορφή της καρστικοποίησής του σε συνδυασμό με το βάθος και τον σχεδιασμό της κατασκευής (Στουρνάρας & Σταυροπούλου, 2011).

Η καρστικοποίηση μπορεί να επιφέρει σοβαρά προβλήματα με καταστροφικές συνέπειες όπως αστοχία του έργου ακόμα και να θέσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Σύμφωνα με τους Xeidakis, Torok, Skias, & Kleb (2004) το καρστικό έδαφος θεωρείται ένα από τα πιο δύσκολα και πολύπλοκα σε συνθήκες εδάφη που πρέπει να διερευνηθεί για την κατασκευή έργων πολιτικού μηχανικού.

Για την καλύτερη διαχείριση των περιοχών αυτών και αντιμετώπιση των αναμενόμενων προβλημάτων που ενδεχομένως να εμφανιστούν είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την γεωλογία της περιοχής, την γεωμορφολογία, την υδρογεωλογία καθώς επίσης και τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ώστε να υπάρξουν ευνοϊκές συνθήκες για την δημιουργία καρστικών γεωμορφών όπως δολίνες, καταβόθρες (sinkholes) , έγκοιλα, καρστικά φρέατα κ.α.

Επίσης, είναι απαραίτητη η λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση τόσο της ευρύτερης περιοχής αποτυπώνοντας όλα τα δομικά στοιχεία (είδη πετρωμάτων, τεκτονικά στοιχεία) όσο και η ανάλυση αεροφωτογραφιών από έμπειρους γεωλόγους της υπό μελέτη περιοχής για τον εντοπισμό των επιφανειακών καρστικών γεωμορφών (δολίνες/sinkholes), ενώ ο συνδυασμός της γεωτρητικής έρευνας με μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των καρστικών γεωμορφών.

4. ANAMENOMENA PROBLHMATA LIMNOΔEΞAMENΩN ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις και ο κίνδυνος αστοχίας μιας λιμνοδεξαμενής κρίνεται σκόπιμο να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν οι ιδιαιτερότητες του καρστικού περιβάλλοντος και να διερευνώνται τα πιθανά αίτια αστοχίας ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του έργου.

Παρακάτω γίνεται λόγος στις αιτίες που οφείλεται μια πιθανή εδαφική υποχώρηση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία και οριστική εγκατάλειψη μιας λιμνοδεξαμενής. Οι αιτίες αυτές παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από πλευράς μηχανικής και χρήζουν ανάλυσης προκειμένου να εντοπίζονται έγκαιρα και να μην δημιουργούν περαιτέρω προβλήματα κατά την κατασκευή και τη διάρκεια λειτουργίας του έργου.

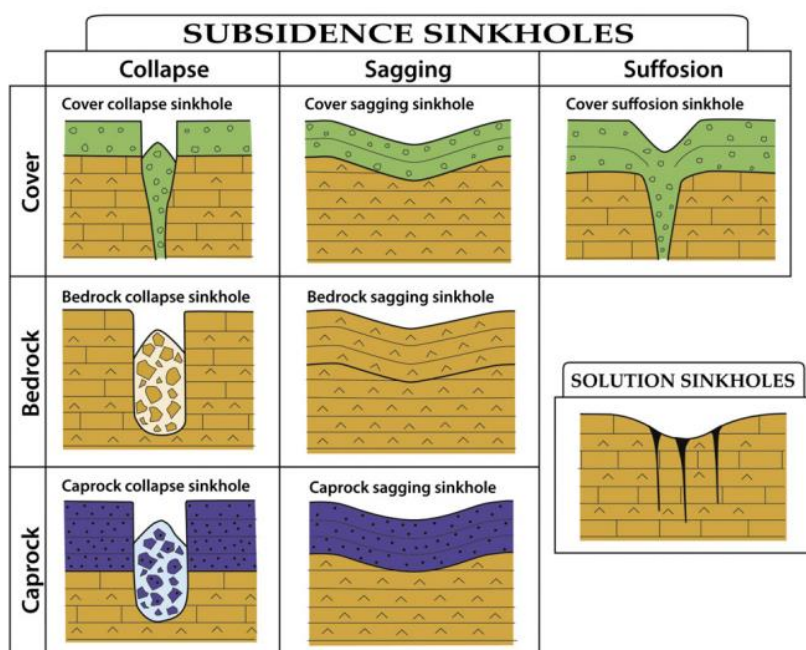
Στο πλαίσιο της έρευνας των μηχανισμών αστοχίας - εδαφικής υποχώρησης γίνεται αναφορά στους τύπους καθίζησης και τον τρόπο γένεσής τους.

Σύμφωνα με τους Gutierrez et al. διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες εδαφικών υποχωρήσεων οι οποίες αφορούν:

- Τις **Δολίνες διάλυσης (solution sinkholes)** που προκύπτουν από την διάλυση του εδάφους. Το νερό που συγκεντρώνεται στα βαθύτερα μέρη των δολινών επιταχύνει την διαδικασία διάλυσης στα σημεία αυτά με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη μάζα του πετρώματος να αφαιρείται στο κέντρο των δολινών απ' ότι περιφερειακά. Αυτού του είδους οι δολίνες, αν και είναι επιρρεπείς σε πλημμυρικά φαινόμενα δεν παρουσιάζουν προβλήματα ευστάθειας εκτός αν συνδέονται με καρστικά φρέατα σημαντικού μεγέθους.
- Τις **Δολίνες καθίζησης (subsidence sinkholes)** οι οποίες είναι αποτέλεσμα τόσο της υπο-επιφανειακής διάλυσης όσο και της καθοδικής βαρυτικής μετατόπισης του υπερκείμενου υλικού. Ανάλογα με το είδος του υλικού (εδαφικό κάλυμμα, καρστικό υπόβαθρο, μη καρστικό υπόβαθρο) που επηρεάζεται από την εσωτερική διάβρωση αλλά και το μηχανισμό της καθίζησης που λαμβάνει χώρα όπως κατάρρευση, καθίζηση, υποχώρηση,

(collapse, sagging, suffusion) διακρίνονται στις υποκατηγορίες όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1.

Οι δολίνες καθίζησης θεωρούνται πιο σημαντικές από άποψη κινδύνου.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση των δυο κύριων τύπων ταξινόμησης δολινών (subsidence sinkholes και solution sinkholes) και των υποκατηγοριών των δολινών καθίζησης (Gutierrez, et al., 2014)

4.1. Εδαφική υποχώρηση ως συνέπεια επιβολής φορτίου σε καρστικοποιημένο υπόβαθρο

Οι υπόγειες καρστικές γεωμορφές όπως καρστικά φρέατα, σπήλαια και διαφόρου μεγέθους καρστικά κενά είναι πιθανό να επηρεάζονται από την κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής λόγω της επιβολής φορτίου που εφαρμόζεται στους υπερκείμενους εδαφικούς σχηματισμούς. Αν και τα υπολειμματικά εδάφη που υπέρκεινται των διαφόρων υπο-επιφανειακών καρστικών δομών είναι αρκετά σταθερά και ικανά να υποστηρίξουν σημαντική επιφανειακή επιφόρτιση, η ανάγκη που δημιουργείται είτε για να αυξηθεί ο ωφέλιμος όγκος της λιμνοδεξαμενής είτε για την επιπέδωση του πυθμένα της ή και για τα δυο, απαιτείται εκσκαφή μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το πάχος του εδαφικού καλύμματος (Drumm, et al., 2009).

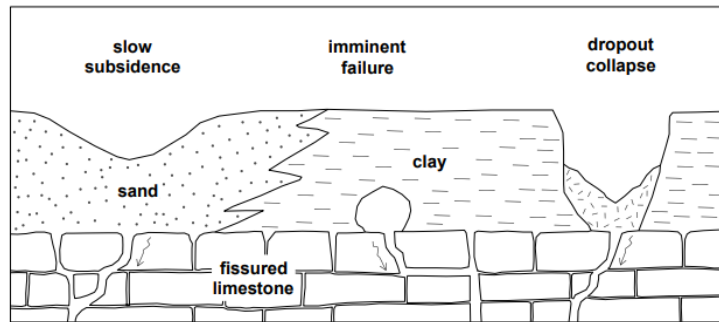
Έτσι όταν η επιβολή του φορτίου από την κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής υπερβεί την διατμητική αντοχή του εδάφους τότε αυτό αστοχεί.

4.2. Εδαφική υποχώρηση λόγω διαρροών.

Ως συνέπεια των υψηλών υδραυλικών κλίσεων είναι οι ταχείες τυρβώδεις ροές που αναπτύσσονται και ευνοούν την εσωτερική διάβρωση, την διάλυση και την δημιουργία υπο-επιφανειακών εγκοίλων.

Η εμφάνιση των επιφανειακών υποχωρήσεων οφείλεται σε δυο διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

Όταν το εδαφικό κάλυμμα αποτελείται από μη συνεκτικά υλικά όπως τα αμμώδη τότε το έδαφος υποχωρεί αργά με αποτέλεσμα να εμφανιστεί μια δολίνη καθίζησης. Όταν ο εδαφικός σχηματισμός είναι αργιλώδης και το έγκοιλο που αναπτύσσεται στην επαφή του ανθρακικού σχηματισμού μεγαλώσει αρκετά ώστε να μην μπορεί να αναπτυχθεί σταθερό τόξο συμπίεσης τότε η οροφή του θόλου αστοχεί και δημιουργείται μια δολίνη κατάρρευσης.



Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση δολίνης καθίζησης (1^{ος} μηχανισμός) και δολίνης κατάρρευσης (2^{ος} μηχανισμός) (Steiakakis, et al., 2013)

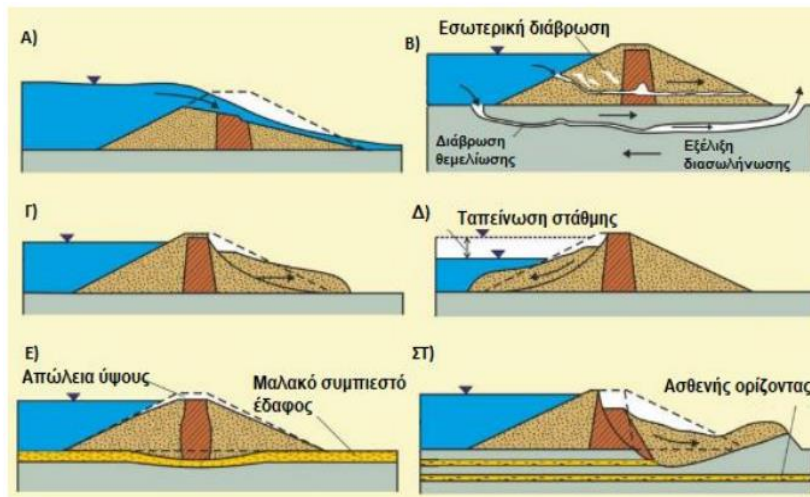
Στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευών φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών διαρροές εμφανίζονται κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα και πολλές φορές αποτελεί την αιτία αδυναμίας αποθήκευσης του μέγιστου όγκου νερού.

Η ποσότητα νερού που διαφεύγει από τον πυθμένα του ταμιευτήρα άλλοτε κρίνεται αποδεκτή και δεν δημιουργεί προβλήματα ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που μπορεί να οδηγήσει σε δαπανηρές διορθωτικές παρεμβάσεις οι οποίες μπορεί να προσεγγίσουν το 15-20% του συνολικού κόστους ή ακόμα και σε οριστική εγκατάλειψη του έργου. Όπως αναφέρουν οι Mohammadi, Raeisi, & Bakalowicz (2007) συχνά οι διαρροές είναι της τάξης του 5-10% της μέσης ετήσιας ροής ενός ποταμού ενώ σε ακραίες περιπτώσεις η διαρροή μέσω καρστικών αγωγών έχει φτάσει σε όγκο ίσο με τη μέση ετήσια ροή του ποταμού.

Συνεπώς οι διαρροές νερού αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την δημιουργία προβλημάτων ευστάθειας σε λιμνοδεξαμενές που κατασκευάζονται πάνω σε καρστικοποιημένους σχηματισμούς.

4.3. Μετακινήσεις πρανών και προβλήματα ευστάθειας των αναχωμάτων.

Αν και τα χωμάτινα φράγματα-αναχώματα χαρακτηρίζονται από αρκετά πλεονεκτήματα όπως αυτά του χαμηλού κόστους, της εύκολης κατασκευής και της καλής συμπεριφοράς σε σεισμικές φορτίσεις, παρόλα αυτά διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας (Εικόνα 4.3) όπως υπερχειλίση του νερού και απόπλυση υλικού στην στέψη του φράγματος, διαρροές, απότομες αυξομειώσεις στην στάθμη του ταμιευτήρα, εσωτερική διάβρωση, καθιζήσεις είναι μερικές από τις αιτίες που ευθύνονται για την καταστροφή των αναχωμάτων.

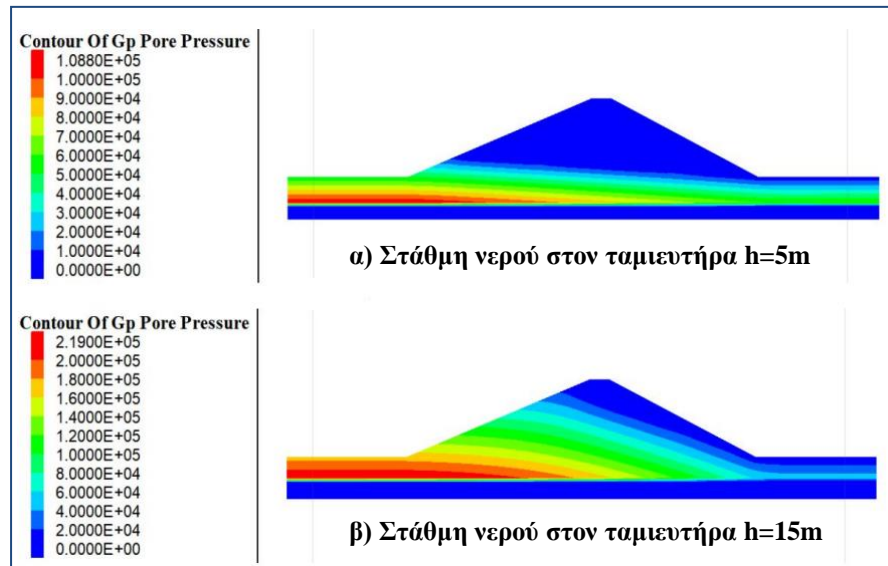


Εικόνα 4.3: Μηχανισμοί αστοχίας χωμάτινων αναχωμάτων (Μαυρούλια, 2021)

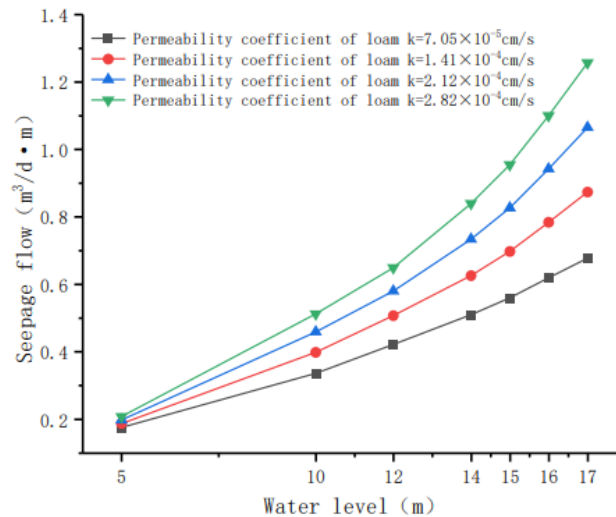
Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η μηχανική δράση του νερού και κατ' επέκταση οι αυξομειώσεις της πίεσης του νερού των πόρων των σχηματισμών είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των αναχωμάτων. Ακόμα ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών των αναχωμάτων (π.χ. διαπερατότητα, συμπίεστότητα) που είναι υπεύθυνες για την μηχανική αντοχή τους και οι οποίες θα πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά πριν και κατά την κατασκευή τους.

Στην συνέχεια σε μια ανάλυση ευστάθειας ενός χωμάτινου αναχώματος περιγράφεται πως η αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα και η διαπερατότητα του αναχώματος επιδρούν στην κινητική συμπεριφορά και αστοχία του αναχώματος.

Με την αύξηση της στάθμης του ταμιευτήρα όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.4 αυξάνεται η πίεση του νερού των πόρων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ροή διήθησης στον πόδα του αναχώματος και η επίδραση της διαρροής να είναι πιο εμφανής. Αντίστοιχα όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα του αναχώματος τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός ροής του νερού (Εικόνα 4.5). Ακόμα έχει παρατηρηθεί ότι καθώς αυξάνεται το επίπεδο στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα αυξάνεται σημαντικά η οριζόντια μετατόπιση του αναχώματος.



Εικόνα 4.4: Κατανομή της πίεσης του νερού των πόρων συναρτήσει της στάθμης του ταμιευτήρα (Zhang, et al., 2020).



Εικόνα 4.5: Επίδραση της διαπερατότητας του υλικού του αναχώματος και της στάθμης του ταμιευτήρα στον ρυθμό διαρροής στον πόδα του αναχώματος (Zhang, et al., 2020)

4.4. Αστοχίες φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών σε καρστ.

«Η κατασκευή φραγμάτων και ταμιευτήρων στο καρστ είναι ένα ευαίσθητο έργο και ο κίνδυνος δεν μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς ακόμα και αν ακολουθηθούν οι βέλτιστες μηχανικές πρακτικές» είναι η χαρακτηριστική φράση που αναφέρει ο Milanovic (2015). Οι Stevanovic & Milanovic (2015) αξιολογώντας τις συνθήκες που επικρατούν σε περισσότερα από 150 φράγματα που κατασκευάστηκαν σε καρστ και μετά από μηχανικές παρεμβάσεις βελτίωσης τα κατέταξαν ως εξής:

- Φράγματα και ταμιευτήρες σε διαλυτά πετρώματα (εβαπορίτες): **38**
- Πολύ υψηλή διαρροή ($2 - >50 \text{ m}^3/\text{s}$): **30**
- Επιτυχημένες εργασίες κατά της διήθησης: **29**
- Μέτρια και αποδεκτή διαρροή: **27**
- Μεγάλη και πολύ προβληματική διαρροή: **13**
- Παγωμένα έργα: **13**
- Ανεπιτυχείς έως μερικώς επιτυχημένες παρεμβάσεις κατά της διήθησης: **11**
- Εγκαταλελειμμένα φράγματα και ταμιευτήρες: **10**
- Μεγάλα σπήλαια κάτω από τα θεμέλια: **9**
- Επανασχεδιασμένα έργα: **9**
- Υπόγεια καρστικοποίηση και χαρακτηριστικές μορφές καρστ στην ευρύτερη περιοχή του φράγματος: **7**

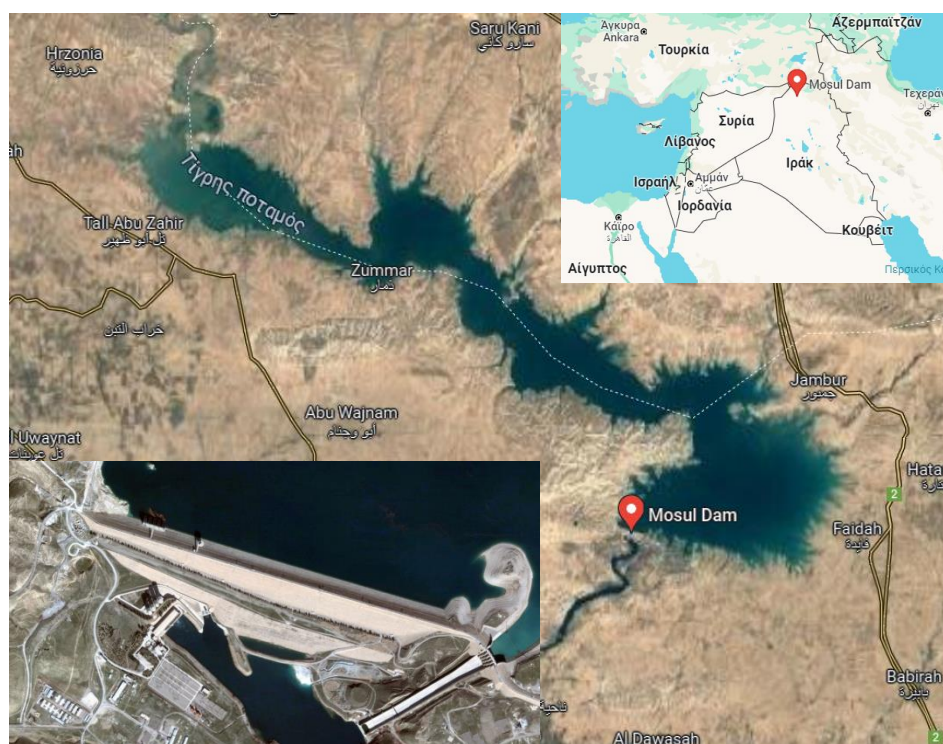
4.4.1. Η περίπτωση του φράγματος της Μοσούλης (Ιράκ)

Το φράγμα της Μοσούλης άρχισε να κατασκευάζεται το 1981 στον ποταμό Τίγρη στο Βορειοδυτικό μέρος του Ιράκ. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα με αργιλικό πυρήνα. Έχει ύψος 113 m, μήκος 3650 m και αποθηκευτική ικανότητα 11,1 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Η θεμελίωση του φράγματος πραγματοποιήθηκε σε υπόβαθρο αποτελούμενο από ενστρώσεις γύψου που εναλλάσσονται με μάργες και ασβεστόλιθους. Το πάχος των στρωμάτων της γύψου φτάνει τα 18 m, τα οποία είναι έντονα καρστικοποιημένα (Al-Ansari, et al., 2017).

Κατά την πρώτη πλήρωση του φράγματος το 1986 παρατηρήθηκαν διαρροές λόγω της διάλυσης της γύψου ενώ στη συνέχεια αναγνωρίστηκαν και νέες θέσεις διαρροών. Η διάλυση

της γύψου/ανυδρίτη κυμαινόταν από 42 έως 80 τόνους/ημέρα με αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας και των διαρροών μέσω της θεμελίωσης. Παρά τις εντατικές εργασίες συντήρησης που ακολουθήθηκαν με προγράμματα αρμολόγησης, τιμμεντενέσεων, διαφραγματικών κουρτινών και πλήρωσης του όγκου των διαλυμένων εβαποριτών με διάφορα μίγματα ενεμάτων το πρόβλημα παρέμενε υπαρκτό. Συνεχώς ανακαλύπτονταν νέες κοιλότητες ενώ οι εργασίες αρμολόγησης συνεχίζονταν ασταμάτητα από το 1986 έως τα μέσα του 2014 χρησιμοποιώντας περισσότερους από 95.000 τόνους υλικών πλήρωσης (Adamo & Al-Ansari, 2016).

Σήμερα αν και θεωρείται πλέον από όλους μια προσωρινή επανορθωτική λύση είναι σημαντικό να συνεχιστούν οι εργασίες συντήρησης έτσι ώστε να επιμηκυνθεί η διάρκεια ζωής του έργου και να αποφευχθεί μια ξαφνική αστοχία του φράγματος, η οποία θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα και θα θέσει σε κίνδυνο τις ζωές χιλιάδων ανθρώπων (Adamo & Al-Ansari, 2016).



Εικόνα 4.6: Το φράγμα της Μοσούλης στο Ιράκ (www.earth.google.com)

4.4.2. Η περίπτωση αστοχίας του Quail Creek Dike (Γιούτα ΗΠΑ).

Ο ταμιευτήρας Quail Creek βρίσκεται στην νοτιοδυτική Γιούτα των ΗΠΑ. Ο σχεδιασμός ενός έργου για την αποθήκευση νερού περίπου 49,5 εκατομμύρια κυβικών μέτρων ξεκίνησε το 1983 και περιλάμβανε ένα κύριο φράγμα ύψους περίπου 61 m και ενός αναχώματος περίπου 24 m. Το ανάχωμα κατασκευάστηκε πάνω σε μια ακολουθία λεπτών στρωμάτων δολομιτών, σχιστόλιθων, γύψων και ψαμμιτών, τα οποία επηρεάζονταν από έντονη διάλυση εξαιτίας της κυκλοφορίας του νερού μέσω των διακλάσεων (<https://damfailures.org>).

Στις αρχικές έρευνες δεν εντοπίστηκε το εκτεταμένο δίκτυο ρωγμών στους σχηματισμούς του υποβάθρου με αποτέλεσμα να μην προβλεφθεί το ενδεχόμενο προβλημάτων λόγω διαρροών. Έτσι, κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα οι διαρροές ήταν εμφανείς και το 1987 όταν η δεξαμενή γέμισε η διαρροή άρχισε να αυξάνεται ενώ μια οπή (sinkhole) διαμέτρου περίπου 0,60 m αποκαλύφθηκε στο κάτω μέρος του ποδιού του αναχώματος. Αν και εφαρμόστηκαν αρκετές εργασίες αρμολόγησης με σκοπό να περιοριστεί η διαρροή, το ανάχωμα αστόχησε τον Ιανουάριο του 1989 σημειώνοντας σημαντικές ζημιές σε δρόμους, γέφυρες, σπίτια και περιουσίες. Η εκτίμηση της καταστροφής υπολογίστηκε σε 12 εκατομμύρια δολάρια χωρίς όμως να υπάρξει καμία απώλεια ανθρώπινης ζωής.



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση της αστοχίας του αναχώματος στον ταμιευτήρα Quail Creek της Γιούτα των ΗΠΑ (<https://damfailures.org>).

Το ανάχωμα φτιάχτηκε εκ νέου τον Ιούλιο του 1990 ως μια κατασκευή από σκυρόδεμα με μια βαθιά τάφρο αποκοπής (cut-off trench) που σκάφτηκε στη ζώνη καρστ της γύψου. Η

τάφρος έχει μήκος 600 m και βάθος 25 m. Καθώς τα χρόνια περνάνε η διάλυση της γύψου συνεχίζεται και το 2002 η διαρροή που καταγράφηκε ήταν 0,34 m³/s. Έκτοτε προγράμματα αρμολόγησης δρομολογούνται συνεχώς ενώ η τοποθέτηση γεωμεμβράνης σε μέρος της λεκάνης απορροής αποτέλεσε ένα μέτρο προστασίας με σκοπό την επιβράδυνση της διαδικασίας της διάλυσης (Kenneth, 2008).



Εικόνα 4.8: Σημερινή μορφή του φράγματος Quail Creek (www.earth.google.com)

4.4.3. Φράγμα Letaj στον ποταμό Boljuncica της Κροατίας.

Το φράγμα Letaj κατασκευάστηκε στο βορειοδυτικό τμήμα του Δυναρικού καρστ στην χερσόνησο Ίστρια της Κροατίας. Ο ταμιευτήρας του φράγματος βρίσκεται στην ζώνη επαφής μεταξύ του αδιαπέρατου Ηωκαινικού φλύσχη και Ηωκαινικού-Κρητιδικού ασβεστόλιθου, ενώ ο πυθμένας καλύπτεται τόσο από φλύσχη όσο και από Τεταρτογενείς αποθέσεις. Κατασκευάστηκε το 1970 ώστε να συγκρατεί τα νερά του ποταμού Boljuncica για αδρευτικούς σκοπούς, να προστατεύει την κατάντη περιοχή της πόλης από πλημμύρες καθώς και να ελέγχει την μεταφορά ιζημάτων (Bonacci & Rubinic, 2008).



Εικόνα 4.9: Φράγμα Letaj στην λεκάνη απορροής του ποταμού Boljuncica της Κροατίας (www.earth.google.com)

Όμως η κατασκευή του τοξωτού φράγματος ύψους 35 m με αποθηκευτική ικανότητα 6,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, παρά την κατασκευή κουρτίνας τσιμεντενέσεων στον ασβεστόλιθο κάτω και γύρω από το φράγμα για προστασία από τις διαροές, δεν κατάφερε ποτέ να φτάσει στο μέγιστο του όγκου πλήρωσης εξαιτίας των απωλειών νερού από τον πυθμένα του ταμιευτήρα. Έτσι ο μέσος όγκος αποθηκευμένου νερού κατά την περίοδο 1977-

2005 ήταν 0,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, δηλαδή έφτασε μόλις το 8% του συνολικού όγκου του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά από κάθε κύκλο γεμίσματος και αδειάσματος του ταμιευτήρα εμφανίζονται νέα βυθίσματα (sinkholes), ενώ σύμφωνα με τους White and White (1989) και Waltham et al (2005) έχουν καταγραφεί περισσότερες από 50 βυθίσματα στην υπό μελέτη περιοχή (Bonacci & Rubinic, 2008).

4.4.4. Η λιμνοδεξαμενή Vrutak (Βοσνία-Ερζεγοβίνη)

Η λιμνοδεξαμενή Vrutak βρίσκεται στο Hutovo της Βοσνίας, στο χαμηλότερο τμήμα (βορειοδυτικό) της πόλης Ρορνο και κατασκευάστηκε το 1979 με σκοπό να συμβάλει στην λειτουργία του Υδροηλεκτρικού σταθμού Čapljina συγκεντρώνοντας το νερό του ποταμού Trebišnjica, το οποίο μεταφέρεται μέσω αγωγού στην λιμνοδεξαμενή.

Η χωρητικότητα της λιμνοδεξαμενής είναι 7.200.000 m³. Το δάπεδο της δεξαμενής καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες αυξάνουν σε πάχος φτάνοντας τα 30 m στο κέντρο της λεκάνης ενώ το υπόβαθρο αποτελείται από έντονα καρστικοποιημένο Κρητιδικό ασβεστόλιθο.



Εικόνα 4.10: Η λιμνοδεξαμενή Vrutak στο Hutovo της Βοσνίας (www.earth.google.com)

Κατά τα δυο πρώτα χρόνια λειτουργίας της δεξαμενής εντοπίστηκαν 74 νεοδημιουργηθείσες καθιζήσεις, ρωγμές 1.300 m σε μήκος (πλάτους 2-15m), καταστροφή της γεωμεμβράνης και σπάσιμο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε ορισμένα μέρη, με αποτέλεσμα οι απώλειες νερού να φτάσουν σε μη αποδεκτές τιμές 3-5 m³/s.

Στην συνέχεια διάφορα προγράμματα αποκατάστασης εφαρμόστηκαν ώστε η ζώνη καθίζησης να καταστεί αδιαπέρατη. Έτσι εργασίες όπως τσιμεντενέσεις και πλήρωση των καρστικών εγκοίλων και αγωγών με μίγμα ενέματος καθώς και η τοποθέτηση σωλήνων εξαερισμού για την έγκαιρη απελευθέρωση του εγκλωβισμένου αέρα, είναι τα μέτρα αντιμετώπισης που ελήφθησαν με αποτέλεσμα η διαρροή να μειωθεί από 3-5 σε 1 m³/s.



Εικόνα 4.11: Καταστροφή της γεωμεμβράνης μετά από φαινόμενα καθιζήσεων και δημιουργία ρωγμών στον πυθμένα της λιμνοδεξαμενής (Milanovic, 2014)



Εικόνα 4.12: Σπάσιμο τσιμέντου στον πυθμένα της λιμνοδεξαμενής ως αποτέλεσμα της υποχώρησης του εδάφους (Milanovic, 2014)



Εικόνα 4.13: Τοποθέτηση σωλήνων ως μέτρο πρόληψης για την εκκένωση του εγκλωβισμένου αέρα (Milanovic, 2014).

4.4.5. Το φράγμα Περδίκκα στην Πτολεμαΐδα

Το φράγμα Περδίκκα βρίσκεται στο ομώνυμο χωριό Περδίκκας του Δήμου Πτολεμαΐδας και κατασκευάστηκε το 1962 με σκοπό την εξασφάλιση της υδροδότησης του βιομηχανικού κέντρου Πτολεμαΐδας. Το φράγμα είναι χωμάτινο με κεντρικό πυρήνα ύψους 27.5 m, χωρητικότητας 10 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων. Η λεκάνη κατάκλυσης και η θεμελίωση του φράγματος διαμορφώθηκε μέσα σε αργιλομαργαϊκούς σχηματισμούς σχετικά χαμηλής διαπερατότητας ενώ κάτω από τον σχηματισμό αυτό απαντώνται κρητιδικοί ασβεστόλιθοι με έντονα φαινόμενα καρστικοποίησης (Pantzartzis, et al., 1993).



Εικόνα 4.15: Γενική άποψη του φράγματος Περδίκκα όπως καταγράφεται σήμερα από τον δορυφόρο (www.earth.google.com)



Εικόνα 4.14: Λεπτομερής εικόνα αριστερού αντερείσματος με απεικόνιση των χαρακτηριστικών καρστικών βυθισμάτων (www.earth.google.com)

Κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα όταν η στάθμη ανήλθε στα 2/3 του ύψους του φράγματος αναπτύχθηκαν έντονες διαρροές έως και 5 m³/s, με αποτέλεσμα την πλήρη εκκένωση του ταμιευτήρα σε μικρό χρονικό διάστημα. Η διαρροή πραγματοποιήθηκε με διασωλήνωση και απόπλυση του στεγανού αργιλομαργαϊκού σχηματισμού μέσα στις διόδους των υποκείμενων ασβεστόλιθων. Μετά την αποστράγγιση εμφανίστηκαν στον πυθμένα του ταμιευτήρα οπές, ρωγμές και ζώνες καθίζησης (Κανταρτζής, 2012).

Το 1964 έγινε προσπάθεια πλήρωσης των καταβόθρων με σκυρόδεμα η οποία φάνηκε αρχικά να αποδίδει αφού οι απώλειες νερού μειώθηκαν κατά 80% όμως μετά από σύντομο χρονικό διάστημα οι καταβόθρες επαναδραστηριοποιήθηκαν και έκτοτε διατηρείται χαμηλή στάθμη νερού στον ταμιευτήρα (έως 7 m). Έτσι, εξαιτίας της αδυναμίας του ταμιευτήρα να

συγκρατήσει το νερό και ως εκ τούτου να λειτουργήσει για τον σκοπό που σχεδιάστηκε, το έργο θεωρείται ότι αστόχησε.

4.4.6. Οι λιμνοδεξαμενές Χρυσοσκαλίτισσας και Αγ. Θεοδώρων (Χανιά)

Οι λιμνοδεξαμενές Χρυσοσκαλίτισσας και Αγ. Θεοδώρων βρίσκονται στο Νότιο-Δυτικό άκρο του Ν. Χανίων σε απόσταση τριών χιλιομέτρων η μία από την άλλη. Πρόκειται για δύο εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές με μεμβράνη των οποίων η κατασκευή ξεκίνησε το 1993 για αδρευτικούς σκοπούς και ολοκληρώθηκε το 2000.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής αποτελείται από γύψους του Αν. Τριαδικού οι οποίες υπέρκεινται των πλακωδών ασβεστόλιθων γεγονός που υποδηλώνει εξ' αρχής την επικινδυνότητα της κατασκευής λόγω της έντονης καρστικοποίησης των σχηματισμών αυτών (Παλάτος, 2015).



Εικόνα 4.16 : Οι λιμνοδεξαμενές Χρυσοσκαλίτισσας (κάτω αριστερά) και Αγ. Θεοδώρων (πάνω δεξιά) όπως απεικονίζονται από τον δορυφόρο σήμερα (www.earth.google.com).

Η λιμνοδεξαμενή της Χρυσοσκαλίτισσας προέβλεπε ωφέλιμο όγκο 560.000 m³ και ύψος αναχωμάτων 11 m εξαιτίας αλλαγής της αρχικής θέσης προέκυψαν αναχώματα έως και 22 m. Κατά την διάρκεια της κατασκευής (30/10/1994), εντοπίστηκε εκτός των ορίων του ταμιευτήρα αλλά κοντά στον πόδα του αναχώματος βύθισμα 10 m και βάθους 9-10 m που υποδείκνυε την παρουσία εγκοίλων. Παρά τις γεωφυσικές και γεωτεχνικές έρευνες που έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή για τον εντοπισμό και την διαχείριση παρόμοιων δομών, η εδαφική υποχώρηση σύντομα οδήγησε σε αστοχία του αναχώματος με αποτέλεσμα η λιμνοδεξαμενή της Χρυσοσκαλίτισσας να μην λειτουργήσει ποτέ. Έκτοτε διάφορες ενέργειες έχουν γίνει με σκοπό την αποκατάσταση της λιμνοδεξαμενής όμως ακόμα και σήμερα η λιμνοδεξαμενή παραμένει σε αχρηστία (Παλάτος, 2015).



Εικόνα 4.17: Αστοχία επιχώματος στη λιμνοδεξαμενή της Χρυσοσκαλίτισσας (Στειακάκης, 2017).

Η λιμνοδεξαμενή των Αγ. Θεοδώρων κατασκευάστηκε πάνω στο ίδιο υπόβαθρο με την εξίσου επικίνδυνη γεωλογική δομή. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται σε τοπικό τύπο ενημέρωσης «Από το 2000 η λιμνοδεξαμενή χωρητικότητας περίπου 650.000 m³ κάλυπτε τις ανάγκες σε νερό σε μια αναπτυσσόμενη περιοχή με πολλές δυνατότητες, ώσπου στις αρχές του καλοκαιριού του 2011 η λιμνοδεξαμενή "άδειασε"».

Σύμφωνα με τους μηχανισμούς αστοχίας που προαναφέρθηκαν είναι αντιληπτό ότι οι καθιζήσεις με την μορφή τοπικών βυθισμάτων σε όλη την έκταση της λιμνοδεξαμενής προέκυψαν εξαιτίας της καταστροφής της γεωμεμβράνης και κατ' επέκταση την εσωτερική διάβρωση του εδαφικού σχηματισμού (Εικόνα 4.18).

Πρόσφατα, παρά τις διαφωνίες ετών για το αν είναι συμφέρουσα ή όχι η επισκευή της λιμνοδεξαμενής, τον Μάρτιο του 2023 υπεγράφη η σύμβαση για την σύνταξη οριστικής μελέτης αποκατάστασης των αστοχιών ώστε να καταστεί και πάλι λειτουργική και επωφελής για την ανάπτυξη της τοπικής κοινωνίας.



Εικόνα 4.18: Εικόνα από τον πυθμένα της εγκαταλειμμένης λιμνοδεξαμενής των Αγ. Θεοδώρων με εμφανή τα βυθίσματα που δημιουργήθηκαν λόγω αστοχίας της μεμβράνης και της εσωτερικής διάβρωσης (Στειακάκης, 2011) .

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤ

Όπως σε όλες τις κατασκευές τεχνικών έργων, έτσι και στην περίπτωση της λιμνοδεξαμενής είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση γεωτεχνικής έρευνας η οποία θα εκτιμήσει όλες τις αναγκαίες πληροφορίες - δεδομένα για τις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, με σκοπό να εξασφαλιστεί ο οικονομικότερος σχεδιασμός σε συνδυασμό με την ασφαλέστερη κατασκευή και λειτουργία του έργου.

Έχει αναγνωριστεί ότι μια γεωτεχνική έρευνα είναι καλύτερα οργανωμένη και επιτυγχάνεται το βέλτιστο όφελος όταν οργανώνεται σε στάδια. Τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν τη φάση σχεδιασμού, την προκαταρκτική φάση, την κύρια φάση, τη φάση κατασκευής και τέλος τη φάση λειτουργίας και συντήρησης του έργου (International Association of Engineering Geology, 1981).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια καθώς και οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου όπως αυτά αποτυπώθηκαν στο International Association of Engineering Geology (1981).

5.1. Οργάνωση της γεωτεχνικής έρευνας σε στάδια

➤ Φάση σχεδιασμού

Σε αυτό το στάδιο διερευνώνται οι προϋποθέσεις και η σκοπιμότητα κατασκευής της λιμνοδεξαμενής στην προτεινόμενη περιοχή ή αναζητείται η επιλογή της καταλληλότερης θέσης, η οποία βασίζεται στην αξιολόγηση κριτηρίων όπως είναι οι μορφολογικές συνθήκες, το γεωλογικό υπόβαθρο, οι υδρολογικές συνθήκες, η ευστάθεια των πρανών, σεισμικότητα της περιοχής, οι διαθέσιμες πηγές υλικών κατασκευής κ.α.

Οι απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες συλλέγονται κατά τη φάση σχεδιασμού από προγενέστερη βιβλιογραφία, χάρτες, αεροφωτογραφίες επαληθεύονται, ταξινομούνται

και συμπληρώνονται με επί τόπου επισκέψεις και αναγνωρίζονται τα κυριότερα προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν.

➤ **Προκαταρκτική φάση**

Στην προκαταρκτική φάση αξιολογούνται όλες οι πληροφορίες και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την φάση σχεδιασμού, ενώ εξετάζονται πιο εντατικά με την βοήθεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από γεωερευνητικά προγράμματα (γεωτρήσεις, εκσκαφές, γεωφυσικές μεθόδους) και από εργαστηριακές δοκιμές ή/και επί τόπου δοκιμές. Τελικός σκοπός σε αυτή τη φάση είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που θα οδηγήσει στην επιβεβαίωση ή την διαφοροποίηση του αρχικού σχεδιασμού για την κατασκευή της λιμνοδεξαμενής.

➤ **Κύρια φάση**

Στο στάδιο της κύριας φάσης αφού έχουν αποκτηθεί πλήρως τα δεδομένα που χρειάζονται και έχουν εκτιμηθεί όλες οι παράμετροι συντάσσεται η τελική έκθεση για την κατασκευή της λιμνοδεξαμενής.

➤ **Φάση κατασκευής**

Κατά την διάρκεια της κατασκευής καταγράφονται και παρακολουθούνται οι γεωτεχνικές συνθήκες του πεδίου έτσι ώστε να επιβεβαιώνονται σε σχέση με αυτές στις οποίες βασίστηκε ο αρχικός σχεδιασμός του έργου ή εάν οι συνθήκες δεν συμφωνούν με τις προβλεπόμενες κρίνεται η ανάγκη τροποποίησης του σχεδίου.

➤ **Φάση λειτουργίας-συντήρησης**

Η γεωτεχνική έρευνα δεν σταματά με την αποπεράτωση του έργου αλλά συνεχίζεται η παρακολούθηση της κατασκευής και επιβεβαιώνεται ότι συμπεριφέρεται με τον αναμενόμενο τρόπο. Η παρακολούθηση γίνεται με όργανα ελέγχου όπως είναι τα πιεζόμετρα ανοικτού ή κλειστού τύπου. Επίσης, παρακολουθείται η στάθμη του ταμιευτήρα και οι μετρήσεις των βροχοπτώσεων στην περιοχή της λεκάνης απορροής. Σε περίπτωση μη ασφαλούς συμπεριφοράς εξετάζονται πρόσθετες έρευνες συντήρησης και βελτίωσης για την αποφυγή αστοχίας της κατασκευής.

5.2. Ερευνητικές εργασίες και εργαστηριακές δοκιμές που λαμβάνουν χώρα

Περνώντας από το στάδιο σχεδιασμού στο προκαταρκτικό στάδιο και αφού έχει εντοπιστεί η κατάλληλη θέση κατασκευής της λιμνοδεξαμενής με βάση τα γεωλογικά κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.2., οι εργασίες που λαμβάνουν χώρα για την διερεύνηση και την αξιολόγηση των γεωτεχνικών παραμέτρων των σχηματισμών διαχωρίζονται σε δύο φάσεις, την επιφανειακή και την υπόγεια.

Η επιφανειακή εργασία περιλαμβάνει την γεωλογική χαρτογράφηση κατάλληλης κλίμακας σε συνδυασμό με την ερμηνεία αεροφωτογραφιών και άλλων δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης ενώ η υπόγεια έρευνα πραγματοποιείται με την βοήθεια γεωτρητικής έρευνας, γεωφυσικών διασκοπήσεων και εργαστηριακών δοκιμών στα δείγματα εδάφους και πετρώματος ώστε να μελετηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες.

Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς οι εργασίες που είναι απαραίτητο να λαμβάνουν μέρος σε κάθε γεωτεχνική έρευνα και δεν θα πρέπει να παραλείπονται με σκοπό την μείωση της οικονομικής επιβάρυνσης του έργου.

5.2.1. Γεωλογική χαρτογράφηση - γεωλογικές τομές

Η γεωλογική χαρτογράφηση και αποτύπωση της περιοχής λαμβάνει χώρα κατά το προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης με σκοπό την κατανόηση της γεωλογικής δομής της περιοχής ως προς την λιθοστρωματογραφία αλλά και την τεκτονική. Έτσι, αποτυπώνονται οι λιθοστρωματογραφικές ενότητες και ο τρόπος με τον οποίο έρχονται σε επαφή αλλά και τα τεκτονικά στοιχεία όπως είναι τα ρήγματα, οι διακλάσεις και οι πτυχές που πιθανόν να δομούν την περιοχή.

Επίσης, σε πρώτη φάση με την γεωλογική χαρτογράφηση εξετάζεται αν τα εδαφικά υλικά χαρακτηρίζονται κατάλληλα ως προς την μηχανική τους συμπεριφορά και αν επαρκεί η ποσότητα των υλικών που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του επιχώματος.

Η κλίμακα η οποία επιλέγεται για να γίνει η χαρτογράφηση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την έκταση της λεκάνης απορροής (Ε). Έτσι αν η έκταση είναι μεγαλύτερη από 250 km² προτείνεται η κλίμακα της χαρτογράφησης να είναι 1:50.000, εάν (Ε) κυμαίνεται μεταξύ 10

$\text{km}^2 - 250 \text{ km}^2$ τότε η κλίμακα είναι της τάξης 1:20.000 ενώ αν $E < 10 \text{ km}^2$ θα πρέπει η κλίμακα της γεωλογικής χαρτογράφησης να είναι ίση με 1:5.000. Επιπλέον πιο λεπτομερής γεωλογική χαρτογράφηση με κλίμακα 1:5.000 συντάσσεται για τις περιοχές του ταμιευτήρα και των συνοδών έργων (Καπλανίδης, 1995).

5.2.2. Αεροφωτογραφίες

Η συλλογή και η ερμηνεία αεροφωτογραφιών και άλλων δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης αποτελούν σημαντικό βοηθητικό εργαλείο για την απεικόνιση της γεωμορφολογίας της εξεταζόμενης περιοχής. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να εντοπιστούν τεκτονικά στοιχεία όπως ρήγματα και συστήματα ρωγμών που δύσκολα μπορούν να αναγνωριστούν κατά τις εργασίες υπαίθρου και έπειτα αφού επιβεβαιωθούν και από επιτόπου παρατήρηση να τοποθετηθούν στον γεωλογικό χάρτη και να αξιολογηθούν.

Ένας ακόμη λόγος που θεωρούνται απαραίτητο στοιχείο της γεωτεχνικής έρευνας μιας λιμνοδεξαμενής σε καρστ είναι διότι χρησιμεύουν στον εντοπισμό των καρστικών γεωμορφών όπως δολίνες, καταβόθρες, περιοχές καθίζησης.

Μάλιστα, η λεπτομερής ερμηνεία των αεροφωτογραφιών που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές επιτρέπει την κατανόηση των σταδίων δημιουργίας και ανάπτυξης μιας τέτοιας δομής και στοχεύει στον περιορισμό της, καθώς επίσης μπορεί να συνεισφέρει στην εκτίμηση εμφάνισης πιθανών νέων φαινομένων καθίζησης (Gutierrez, et al., 2008).

5.2.3. Γεωφυσική έρευνα

Οι γεωφυσικές έρευνες έχουν ως στόχο την ανίχνευση και τον εντοπισμό υποεπιφανειακών δομών (ρήγματα, καρστικά έγκοιλα, σπηλαιώσεις) καθώς και την εκτίμηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των στρωματογραφικών μονάδων.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας αποσκοπεί στον υπολογισμό του πάχους των διαφόρων στρωμάτων του υπεδάφους καθώς και στην ανίχνευση πιθανών καρστικών γεωμορφών. Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης μετρά την ταχύτητα των κυμάτων συμπίεσης. Η μείωση της ταχύτητας του κύματος υποδηλώνει κατακερματισμό και σπηλαιώδη δομή και μπορεί να αποτελέσει δείκτη ταξινόμησης της βραχώμαζας. Ο

συνδυασμός των μεθόδων σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας επιτρέπει την τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωλογικής δομής.

Η συμβολή λοιπόν της γεωφυσικής διασκόπησης σε συνδυασμό πάντα με την γεωλογική χαρτογράφηση και την επαλήθευση των στοιχείων από την πυρηνοληψία των γεωτρήσεων συνεισφέρει καθοριστικά στην γεωτεχνική έρευνα κατασκευής μιας λιμνοδεξαμενής σε καρστ.

5.2.4. Γεωτρήσεις - Ορύγματα - δειγματοληψία

Τα δεδομένα που συλλέγονται από το γεωτρητικό πρόγραμμα αποτελούν βασικά στοιχεία για τον σχεδιασμό του έργου. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να προσδιοριστεί η θέση, το βάθος, ο αριθμός των απαιτούμενων γεωτρήσεων και από ποιο σημείο θα ληφθούν τα δείγματα ώστε τα τελικά συμπεράσματα προσδιορισμού των γεωτεχνικών παραμέτρων να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του έργου και η έρευνα να θεωρηθεί επιτυχής.

Το βάθος διερεύνησης πρέπει να φτάνει έως το βάθος εκείνο που επηρεάζεται από τις τασικές συνθήκες (επιβαλλόμενα φορτία) της κατασκευής. Για τα χωμάτινα φράγματα συνιστάται το βάθος έρευνας να ισούται με το μισό του πλάτους της βάσης του επιχώματος.

Οι θέσεις που επιλέγονται συνήθως προκύπτουν από την αναγνώριση του πεδίου και την βιβλιογραφία.

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ποικίλει όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 2.3. Έτσι, για στεγανή λεκάνη με ανεπένδυτα πρανή ο αριθμός των γεωτρήσεων μπορεί να είναι από 6 έως 20 ενώ στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας και τα πρανή χαρακτηρίζονται μη στεγανά και χρήζουν τοποθέτηση γεωμεμβράνης, η γεωτρητική έρευνα περιορίζεται σε 2 έως 3 γεωτρήσεις.

Να σημειωθεί επίσης ότι η ακρίβεια των γεωτεχνικών παραμέτρων που αποκτώνται έχει να κάνει με την αντιπροσωπευτικότητα και την ποιότητα του δείγματος που λαμβάνεται. Ένα διαταραγμένο δείγμα μπορεί να δώσει απλά περιγραφή για το είδος του υλικού ενώ ένα αδιατάρακτο δείγμα είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες για τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους ή/και του πετρώματος. Η ποιότητα του δείγματος εξαρτάται από την μέθοδο δειγματοληψίας γι' αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό τα δείγματα που λαμβάνονται

για εργαστηριακές δοκιμές να είναι αδιατάρακτα (International Association of Engineering Geology, 1981).

Συνοψίζοντας, ο αριθμός, η θέση, το βάθος των γεωτρήσεων ακόμα και το είδος των δειγμάτων που λαμβάνονται παίζουν σημαντικό ρόλο στην γεωτεχνική έρευνα, όμως σε κάθε περίπτωση το γεωτρητικό πρόγραμμα που σχεδιάζεται εξαρτάται από την φύση και το μέγεθος του έργου, τη διαφοροποίηση των συνθηκών του υπεδάφους και το κόστος του έργου.

5.2.5. Επιτόπου δοκιμές

Ως επιτόπου ή δοκιμές πεδίου χαρακτηρίζονται οι δοκιμές που διενεργούνται σε δείγματα που βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον και κατά συνέπεια δεν έχουν διαταραχθεί με κανένα τρόπο. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των επιτόπου δοκιμών είναι τα εξής (Χρηστάρας, et al., 2006):

- Μείωση του αριθμού των απαιτούμενων ερευνητικών γεωτρήσεων
- Άμεση παροχή πληροφοριών για τις γεωτεχνικές παραμέτρους των σχηματισμών
- Μείωση του κόστους των ερευνητικών προγραμμάτων ως αποτέλεσμα των δυο παραπάνω πλεονεκτημάτων
- Αποφεύγεται η διαταραχή του δείγματος
- Δεν μεταβάλλεται το φυσικό πεδίο των τάσεων

Από τις επιτόπου δοκιμές καθορίζονται οι τρεις κυριότερες γεωτεχνικές ιδιότητες: **Αντοχή, Παραμορφωσιμότητα, Υδροπερατότητα**. Ανάλογα με τον τύπο του σχηματισμού (κατηγορία εδάφους – πετρώματος) επιλέγονται οι καταλληλότερες επιτόπιες μεθόδους για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν.

Αντοχή- Παραμορφωσιμότητα

- Πρότυπη Δοκιμή Διείσδυσης (Standard Penetration Test)
- Δοκιμή Στατικής Πενетроμέτρησης (Cone Penetration Test)
- Δοκιμή Πτερυγίου (Vane Test)
- Πρεσιομετρική Δοκιμή (Pressuremeter Test)
- Δοκιμή Φόρτισης Πλάκας (Plate Load Test)

Υδροπερατότητα

- Δοκιμή υδροπερατότητας σταθερού φορτίου (Lefranc)
- Δοκιμή υδροπερατότητας μεταβλητού φορτίου (Maag)
- Δοκιμή εισπίεσης νερού (Lugeon)

Παρά τα πλεονεκτήματα όσον αφορά τις δοκιμές πεδίου πρέπει να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση των γεωφυσικών διασκοπήσεων, δεν μπορούν από μόνες τους να δώσουν λύσεις σε όλα τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν και πρέπει να αλληλοσυμπληρώνονται και από τις απαραίτητες δοκιμές εργαστηρίων.

5.2.6. Εργαστηριακές δοκιμές

➤ Κοκκομετρική διαβάθμιση - ταξινόμηση εδαφών

Αποσκοπεί στην διερεύνηση ιδιοτήτων των υλικών εκσκαφής οι οποίες θα πρέπει να προσεγγίζουν τις προδιαγραφές έτσι ώστε να κριθούν ως κατάλληλα για την χρήση τους τόσο στα κύρια όσο και στα συνοδά έργα κατασκευής της λιμνοδεξαμενής.

➤ Πρότυπη/Τροποποιημένη μέθοδος Proctor

Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης, με σκοπό την επιτυχή συμπίκνωση και στερεοποίηση των εδαφών, την μείωση της υδροπερατότητάς τους και την αύξηση της αντίστασης τους στην αποσάθρωση (Χρηστάρας, et al., 2006). Αυτή η εργαστηριακή δοκιμή θεωρείται απαραίτητη ώστε να αποφευχθούν σημαντικές καθιζήσεις και κατ' επέκταση σοβαρές παραμορφώσεις στα επιχώματα της λιμνοδεξαμενής.

Για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους:

➤ **Τριαξονική δοκιμή**

Πρόκειται για την πιο αξιόπιστη δοκιμή προσδιορισμού των γεωτεχνικών παραμέτρων c (συνοχή) και ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) και ως εκ τούτου και της διατμητικής αντοχής ενός εδαφικού υλικού η γνώση της οποίας είναι απαραίτητη σε όλες τις γεωτεχνικές έρευνες. Χαρακτηρίζεται και ως η πιο ευέλικτη μέθοδος γιατί μπορεί να προσομοιώσει στο εργαστήριο όλες τις πιθανές συνθήκες που μπορούν να παρουσιαστούν στο πεδίο. Οι κυριότεροι τύποι είναι:

- Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (CUPP)
- Δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (CD)

Για την εκτίμηση της αντοχής – παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας:

Με σκοπό να εκτιμηθεί η αντοχή και η παραμορφωσιμότητα του βραχώδους σχηματισμού πάνω στον οποίο κατασκευάζεται η λιμνοδεξαμενή είναι απαραίτητος ο καθορισμός της ποιότητας της βραχόμαζας.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας. Παρακάτω παρουσιάζονται τρία από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ενώ έμφαση θα δοθεί στο σύστημα ταξινόμησης κατά RMR βάσει του οποίου θα εκτιμηθεί η αντοχή του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου στα σενάρια που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

➤ **Ταξινόμηση κατά RQD - Rock Quality Designation**

Ο δείκτης ποιότητας RQD διατυπώθηκε από τους Deere et al το 1967 και αποτελεί κριτήριο ταξινόμησης για την ποιότητα της βραχόμαζας αφού ανάλογα με το ποσοστό του βαθμού ρωγμάτωσης η βραχόμαζα μπορεί να χαρακτηριστεί από άριστη έως πολύ κακή. (Πίνακας 5.1). Σύμφωνα με τον τύπο, το RQD υπολογίζεται από το άθροισμα του μήκους των τεμαχίων με μήκος > 10 cm προς το συνολικό μήκος της πυρηνοληψίας (Δημόπουλος, 2008).

Πίνακας 5.1: Ποιοτική ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση το R.Q.D. (Δημόπουλος, 2008)

R.Q.D. (%)	Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχώμαζας
100-90	Άριστη
90-75	Καλή
75-50	Μέτρια
50-25	Κακή
25-0	Πολύ κακή

Αν και αυτός ο τρόπος ταξινόμησης δεν εξετάζει λεπτομερώς άλλα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά όπως τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, την κατάστασή τους και την παρουσία υπόγειου νερού παρόλα αυτά δίνει μια πολύ καλή εικόνα για την κατάσταση του πετρώματος και σε τι βαθμό θα επηρεαστεί από την καρστικοποίηση.

➤ **Σύστημα γεωτεχνικής ταξινόμησης RMR – Rock Mass Rating (Bieniawski 1973)**

Αφού αρχικά η περιοχή μελέτης έχει χωριστεί σε ζώνες με παρόμοια μακροσκοπικά χαρακτηριστικά που αφορούν την λιθολογική σύσταση, τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, την μεταξύ τους απόσταση καθώς και την φυσική κατάσταση του γεωλογικού σχηματισμού, στην συνέχεια για κάθε ζώνη προσδιορίζονται ποσοτικά τα παρακάτω μεγέθη (Στειακάκης, 2019):

- *Αντοχή σε μοναξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος*
- *Δείκτης ποιότητας RQD*
- *Συντελεστής ρωγμάτωσης (απόσταση ασυνεχειών)*
- *Κατάσταση ασυνεχειών (μήκος, απόσταση, άνοιγμα, βαθμός αποσάθρωσης, υλικό πλήρωσης)*
- *Υδρολογικές συνθήκες (ύπαρξη υπόγειου νερού ή όχι)*
- *Προσανατολισμός ασυνεχειών σε σχέση με την γεωμετρία του έργου*

Με βάση τις παραπάνω περαμέτρους και σε συνδυασμό με την βαθμονόμηση τους όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2, εκτιμάται η τιμή RMR η οποία συνδέεται άμεσα με την ποιοτική ταξινόμηση της βραχώμαζας (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.2: Πίνακας υπολογισμού της τιμής RMR με βάση τις παραμέτρους ταξινόμησης (Στειακάκης, 2019).

Ενότητα Α. Παράμετροι – κριτήρια ταξινόμησης και βαθμονόμησή τους

Παράμετροι ταξινόμησης			Εύρος τιμών						
1	Αντοχή βραχώ- δους υλικού	$I_{s(50)}$ (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Προτιμάται η δοκιμή μοναξονικής θλίψης		
		σ_c (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
2	Βαθμός		15	12	7	4	2	1	0
	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
3	Βαθμός		20	17	13	8	3		
	Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών (m)		>2	0.6 - 2	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	< 60 mm		
4	Βαθμός		20	15	10	8	5		
	Κατάσταση ασυνεχειών		Πολύ τραχείες επιφάνειες. Ασυνεχείς. Χωρίς διαχωρισμό. Σκληρά τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Ελαφρά αποσασθρωμένα τοιχώματα	Ελαφρά τραχείες επιφάνειες. Διαχωρισμός < 1mm. Πολύ αποσασθρωμένα τοιχώματα	Ολισθηρές επιφάνειες ή υλικό πλήρωσης <5 mm ή διακλάσεις ανοιχτές 1-5 mm. Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό πλήρωσης πάχους > 5mm ή διακλάσεις ανοιχτές > 5mm Συνεχείς διακλάσεις		
5	Βαθμός		30	25	20	10	0		
	Υπόγειο νερό	Εισροή για 10 m μήκους σήραγγας (l/m)	Καμία	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Τιμές λόγου (πίεση νερού διακλάσεων / μέγιστη κύρια τάση)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Γενικές συνθήκες	Εντελώς στεγνό	Μέτρια υγρό	Υγρό μόνο	Νερό σε μέτρια πίεση	Ροή νερού		
	Βαθμός		15	10	7	4	0		
Συνολική βαθμολογία παραμέτρων ταξινόμησης από 1 μέχρι 5 : RMR_{bas}									

Ενότητα Β. Προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

Διεύθυνση και κλίση ασυνεχειών		Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμοί	Σήραγγες και μεταλλεία	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Θεμελιώσεις	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Πρανή	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Τελική Βαθμολογία : RMR_{bas} - βαθμός από προσαρμογή με βάση τον προσανατολισμό των ασυνεχειών

Πίνακας 5.3: Ταξινόμηση βραχομάζας με βάση την τιμή RMR (Στειακάκης, 2019)

Ενότητα C. Κατηγορίες βραχομάζας με βάση την τελική βαθμολογία					
Βαθμολογία	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Χαρακτηρισμός	Πολύ καλή	Καλή	Μέτρια	Πτωχή	Πολύ πτωχή

Στο πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς τη βραχομάζας για την εκτίμηση της αντοχής της έχουν προταθεί από τους Trunk and Honisch (1990) σχέσεις που συνδέουν την τιμή RMR

με τις γεωτεχνικές παράμετρους: συνοχή (c) και γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) (Στειακάκης, 2019).

Οι σχέσεις αυτές είναι:

$$c(kPa) = 5 \cdot RMR$$

$$\phi(^{\circ}) = 0,5 \cdot RMR + 5$$

Για την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας ο Bieniawski (1978) πρότεινε την σχέση $E_M(GPa) = 2 \cdot RMR - 100$ που συνδέει το μέτρο παραμορφωσιμότητας (E_M) με την τιμή RMR και ισχύει για τιμές $RMR > 50$.

Αργότερα, οι Serafim and Pereira (1983) μετά από αξιολόγηση και σύγκριση σημαντικού αριθμού εκτιμήσεων του μέτρου παραμορφωσιμότητας που προέκυψαν έμμεσα από επιτόπου δοκιμές σε τεχνικά έργα πρότειναν την σχέση $E_M(GPa) = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$ για εφαρμογή σε μεγαλύτερο εύρος τιμών RMR.

➤ Σύστημα GSI – Geological Strength Index

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI μετά από μια σειρά τροποποιήσεων και βελτιώσεων έλαβε την σημερινή μορφή που προτείνουν οι Hoek and Marinos (2000). Πρόκειται για έναν δείκτη του οποίου οι τιμές κυμαίνονται από 5 (εξαιρετικά φτωχή βραχώμαζα) έως 100 (άρρηκτος βράχος).

Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος έναντι του συστήματος RMR είναι ότι δίνει έμφαση σε πολύ φτωχής ποιότητας βραχώμαζες.

Η εκτίμηση του δείκτη GSI γίνεται με οπτική παρατήρηση της βραχώμαζας και σύγκρισή της με την ταξινόμηση κατά Hoek and Marinos όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.4. Οι δυο παράγοντες που καθορίζουν την τιμή GSI είναι η δομή της βραχώμαζας και η κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών (τραχύτητα και αποσάθρωση των τοιχωμάτων τους) (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2022).

Πίνακας 5.4: Εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) με βάση τη γεωλογική περιγραφή και παρατήρηση (Hoek and Marinos, 2000)

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών πχ από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή πχ GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ιστροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνεχείες έχουν εμμονή στην ανάπτυξη τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών παρουσία νερού πρέπει να οδηγεί σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις.		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες μη αποσπασθωμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και αερίωμένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Ομαλές, μέτρια αποσπασθωμένες και εξαλλωμένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες με συμπαγείς υμένες ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης
ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
	ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE) - Άρρηκτο πέτρωμα ή άσπρωτος, συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνεχείες	ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓	90			N/A	N/A
	ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY) - Αδιάταρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.		80				
	ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) - Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.		70				
	ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) - Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας.		60				
	ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγγυλωμένων τεμαχίων.		50				
	ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINATED/SHEARED) - Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενούς βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διατμησης		40				
			30				
			20				
			10				
			N/A	N/A			

5.3. Τοποθέτηση οργάνων ελέγχου και παρακολούθησης

Πάρα το γεγονός ότι οι λιμνοδεξαμενές κατατάσσονται στα πιο απλά υδραυλικά έργα δεν πρέπει να αποτελούν εξαίρεση στην συνεχή παρακολούθηση και τον έγκαιρο εντοπισμό ξαφνικών μεταβολών που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την κατασκευή. Δεδομένου ότι τα στοιχεία που συλλέγονται από τις εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές ενδέχεται να αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του εδάφους κατά την φάση της κατασκευής του έργου, προτείνεται η εγκατάσταση οργάνων ελέγχου τα οποία μαζί με τακτικές οπτικές επιθεωρήσεις συμβάλλουν θετικά στον ολοκληρωμένο έλεγχο της ασφαλούς λειτουργίας της λιμνοδεξαμενής και μετά το πέρας της κατασκευής.

Για τον έλεγχο και την παρακολούθηση πιθανών διαρροών αλλά και την παρακολούθηση της μεταβολής την στάθμης των υπόγειων υδάτων είναι απαραίτητο να καταγράφεται η μέτρηση της πίεσης των πόρων. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται ονομάζονται πιεζόμετρα και διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού τύπου (Τομπουλίδου, 2013). Γενικά, εκτός της εγκατάστασης των οργάνων ελέγχου θα πρέπει να παρακολουθούνται και άλλα υδραυλικά στοιχεία όπως είναι οι βροχοπτώσεις στην περιοχή της λεκάνης απορροής και οι διακυμάνσεις της στάθμης της λιμνοδεξαμενής.

Για την μέτρηση των επιφανειακών μετακινήσεων γίνεται χρήση τοπογραφικών οργάνων όπως θεοδόλιχοι, χωροβάτες, γεωδαιτικοί σταθμοί ενώ για τις παραμορφώσεις στο υπέδαφος τοποθετούνται μέσα σε γεωτρήσεις επιμηκυνσιόμετρα για την καταγραφή των κατακόρυφων μετακινήσεων όπως καθιζήσεις και κλισιόμετρα για την καταγραφή των οριζόντιων μετατοπίσεων (Τομπουλίδου, 2013).

Οι επιταχυνσιογράφοι είναι όργανα που εγκαθίστανται επιφανειακά για την καταγραφή της απόκρισης της κατασκευής στις δυναμικές φορτίσεις.

Το κόστος της κατασκευής είναι αυτό που ελέγχει στις περισσότερες περιπτώσεις το είδος και την ποσότητα των οργάνων που θα εγκατασταθούν για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας της λιμνοδεξαμενής. Όμως πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ότι η κατασκευή σε καρστικό περιβάλλον είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση που είναι αναγκαίο να παρακολουθείται με απόλυτη συνέπεια και ακρίβεια ειδικά όσον αφορά τις

διαφυγές νερού διότι οι επιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν είτε σε οικονομικά ασύμφορες διορθωτικές παρεμβάσεις είτε ακόμα και σε αστοχία της κατασκευής.

5.4. Διαχείριση και αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με το καρστ

Οι διαφυγές νερού μέσω των επιχωμάτων ή/και του πυθμένα του ταμιευτήρα αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο αστοχίας μιας λιμνοδεξαμενής σε καρστ ενώ ευθύνονται και για την διεύρυνση ή ακόμα και την δημιουργία καταβοθρών οι οποίες αποτελούν μια επιπλέον αιτία αστοχίας. Για τον λόγο αυτό η μείωση των απωλειών νερού αποτελεί κύριο μέλημα για την ασφαλή λειτουργία της λιμνοδεξαμενής.

Όπως είναι γνωστό από την διεθνή βιβλιογραφία αλλά και σύμφωνα με τις περιπτώσεις αστοχιών που προαναφέρθηκαν, οι απώλειες νερού μπορεί να εκδηλωθούν με τις ακόλουθες μορφές (Milanovic, 2011):

- **Συγκεντρωμένη διαρροή κατά την πρώτη πλήρωση του ταμιευτήρα** (π.χ. Φράγμα Περδίκκα). Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή διαρροών αφού αντιπροσωπεύει το 50% των προβλημάτων των ταμιευτήρων σε καρστ.
- **Αργή αλλά σταθερή διάβρωση του πληρωτικού υλικού των ρωγμών, των σπηλαίων ακόμα και υποβάθμιση της κουρτίνας ενέματος με συνεχή αυξανόμενη διαρροή** (π.χ. Φράγμα της Μοσούλης).
- **Απότομη αστοχία μετά από αρκετά χρόνια επιτυχημένης λειτουργίας** (π.χ. λιμνοδεξαμενή Αγ. Θεοδώρων Ν. Χανίων).

Μερικά από τα κύρια προληπτικά μέτρα και τεχνικές που μπορούν να συμπεριληφθούν σε μια γεωτεχνική έρευνα με σκοπό τον μετριασμό των απωλειών νερού και κατά συνέπεια την μείωση της πιθανότητας μελλοντικής αστοχίας λόγω των διαρροών περιγράφονται παρακάτω. Οι παρεμβάσεις αυτές διαχωρίζονται σε αυτές που είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν εξ' αρχής επιφανειακά ώστε να ενεργήσουν ως μέτρα πρόληψης και σε αυτές οι οποίες γίνονται υπόγεια και συνήθως λειτουργούν ως πρόσθετα επανορθωτικά μέτρα

προκειμένου να ενισχυθεί το υπόβαθρο και να εξαλειφθεί ο κίνδυνος αστοχίας λόγω των αυξημένων υπόγειων ροών.

5.4.1. Επιφανειακά μέτρα προστασίας και τεχνικές πρόληψης από διαρροές.

Συνοψίζοντας όσα αναφέρει ο Milanovic (2014) για τα μέτρα προστασίας και τις τεχνικές που εφαρμόζονται επιφανειακά για την μείωση των διαρροών προτείνονται τα εξής:

- Χρήση γεωμεμβρανών.
- Χρήση αδιαπέραστων αργιλικών επιστρώσεων, ασφαλικών καλυμμάτων ή επικαλύψεις με τσιμέντο.
- Επικάλυψη του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Στεγανοποίηση της βραχώμαζας με διοχέτευση ενεματικού υλικού με πίεση μέσα στις ανοιχτές ασυνέχειες με σκοπό την αύξηση της μηχανικής αντοχής της (π.χ. τσιμεντενέσεις).

Η επιλογή της ή/και των εργασιών που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να κρίνεται όχι μόνο από τον προϋπολογισμό του έργου αλλά κατά βάση από την επικινδυνότητα ως προς τα φαινόμενα διαρροών και τις συνέπειες που πιθανών αυτά να επιφέρουν στο ίδιο το έργο.

5.4.2. Υπόγειες τεχνικές αντιμετώπισης των διαρροών.

Οι τεχνικές που προτείνεται να εφαρμόζονται υπόγεια για την αποφυγή απωλειών νερού συνήθως αφορούν μεγαλύτερης οικονομικής σημασίας έργα όπως αυτά των φραγμάτων και όχι κατασκευές λιμνοδεξαμενών παρ' όλα αυτά είναι σημαντικό να τις αναφέρουμε. Πρόκειται για εκτεταμένες εργασίες στεγανοποίησης του καρστικοποιημένου υποβάθρου ακόμα και φραγίσματος (plugging) των υπόγειων σπηλαίων. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Τσιμεντενέσεις τύπου κουρτίνας (Grout Curtain):** Κατασκευάζονται κατά μήκος του άξονα του φράγματος και περιλαμβάνουν όλη τη μορφολογική τομή της θέσης θεμελίωσης ενώ μπορεί να επεκτείνονται εκατέρωθεν έως μεγάλο βάθος μέσα στο καρστικοποιημένο πέτρωμα. Το βάθος επέκτασης της κουρτίνας τσιμεντενέσεων καθορίζεται από τον βαθμό κατακερματισμού της βραχώμαζας, την παρουσία υπόγειων ροών αλλά και τις πιθανές διαδρομές απωλειών νερού (Δημόπουλος, 2007).
- **Τοίχοι αποκοπής/Διαφράγματα (Cut-off Walls):** Εφαρμόζονται σε σπήλαια και σπηλαιώδεις ζώνες με όγκο από δεκάδες έως και εκατοντάδες κυβικά μέτρα, είτε αυτά είναι κενά είτε είναι γεμάτα με ιζήματα. Σε αυτή την περίπτωση αποτελεί τη πιο αποτελεσματική μέθοδο δημιουργίας υδατοστεγής δομής σε σύγκριση με την μέθοδο "τσιμεντενέσεων τύπου κουρτίνας" (Milanovic, 2011).
- **Φράγιση/Πλήρωση σπηλαίων (Cavern Plugging):** Επιλέγεται όταν διαπιστώνεται η ύπαρξη σπηλαίου κατά μήκος της διαδρομής της κουρτίνας τσιμεντενέσεων. Με την τεχνική αυτή γίνεται πλήρωση του σπηλαίου με σκοπό την μείωση της συγκεντρωμένης διαρροής στον ταμιευτήρα πάνω από μια καταβόθρα ή και την μείωση της κυκλοφορίας των υπόγειων υδάτων κατά μήκος οποιαδήποτε καρστικής δομής (Milanovic, 2011).

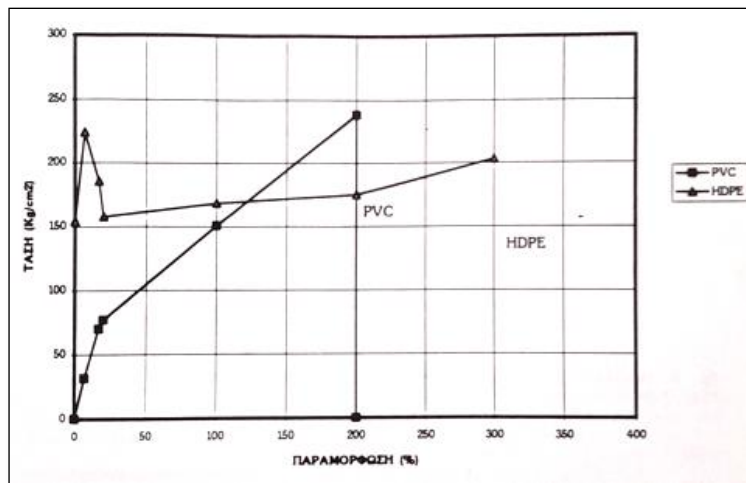
5.5. Γεωμεμβράνες

Οι γεωμεμβράνες θεωρούνται υλικά αδιαπέρατα αφού οι συντελεστές διαπερατότητάς τους κυμαίνονται από 10^{-11} έως 10^{-13} cm/sec. Η τοποθέτησή τους είναι αναγκαία σε λιμνοδεξαμενές που κατασκευάζονται σε καρστικά περιβάλλοντα αφού λειτουργούν ως στεγανωτικά υλικά παρεμποδίζοντας την κίνηση και την διήθηση του νερού (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2022).

Πρόκειται για λεπτά πλαστικά φύλλα κατασκευαζόμενα από συνθετικές ίνες που προέρχονται από διάφορα πολυμερή (πολυπροπυλένιο, πολυεστέρας, πολυαμίδιο, πολυαιθυλένιο). Ανάλογα με την χημική σύσταση του πολυμερούς οι γεωμεμβράνες ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001):

- Θερμοπλαστικές μεμβράνες από χλωριούχο πολυβινίλιο (PVC)
- Κρυσταλλικές θερμοπλαστικές από υψηλής ή χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE ή LDPE)
- Θερμοπλαστικές ελαστομερείς από τροποποιημένα αιθυλενικά ισοπολυμερή με πρόσμιξη ασφαλτικής κόνεως (ECB)

Τα πλεονεκτήματα των γεωμεμβρανών HDPE/LDPE και ECB σε σχέση με τις γεωμεμβράνες PVC είναι ότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κατά την έκθεσή τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες (Εικόνα 5.1) (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).



Εικόνα 5.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ δειγμάτων γεωμεμβρανών HDPE και PVC (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).

Οι ιδιότητες των γεωμεμβρανών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην στεγανοποίηση των λιμνοδεξαμενών. Αυτές διαχωρίζονται σε φυσικές, χημικές και μηχανικές (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).

Συγκεκριμένα:

- Φυσικές ιδιότητες είναι η πυκνότητα, το πάχος, η διαπερατότητα, η απορροφητικότητα νερού, η μορφή επιφάνειας.
- Χημικές ιδιότητες είναι η αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία και το όζον.
- Μηχανικές ιδιότητες είναι η εφελκυστική αντοχή, η αντοχή σε σχίσσιμο, η αντοχή σε διάτρηση και αντοχή των ραφών, η αναπτυσσόμενη συνάφεια λόγω τριβής.

Σύμφωνα με την Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή οι γεωμεμβράνες HDPE που εφαρμόζονται σε λιμνοδεξαμενές και ΧΥΤΑ θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.5 όπως αυτές εκδόθηκαν από τον ΕΛΟΤ και καθορίζουν τα όρια των αντοχών τους.

Πίνακας 5.5: Μηχανικές ιδιότητες Γεωμεμβρανών (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).

Ιδιότητες	Μέθοδος ελέγχου	Απαιτήσεις
Εφελκυστική αντοχή θραύσης	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>26 (N/mm ²)
Εφελκυστική αντοχή διαρροής	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>15 (N/mm ²)
Επιμήκυνση σε θραύση	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>700 %
Επιμήκυνση σε διαρροή	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>9 %
Αντοχή σε σκίσιμο	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>130 (N/mm ²)
Αντοχή σε διάτρηση	ΕΛΟΤ EN ISO 12236	>300 (N/mm ²)
Όριο σκισίματος	ΕΛΟΤ EN ISO 12236	>5000 (N)
Πολυαξονική επιμήκυνση σε θραύση	ΕΛΟΤ EN ISO 527-1	>15 %

5.5.1. Διαδικασίες τοποθέτησης - συγκόλλησης - αγκύρωσης.

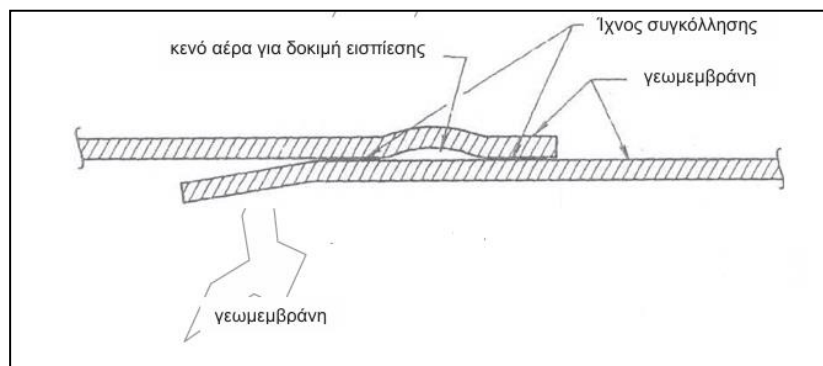
Εκτός από τις απαιτήσεις για τις μηχανικές ιδιότητες των γεωμεμβρανών αξίζει να σημειωθεί ότι και οι διαδικασίες τοποθέτησης, συγκόλλησης και αγκύρωσης έχουν σημαντικό ρόλο στην κατασκευή άρτιων λιμνοδεξαμενών που θα μπορούν να ανταποκριθούν για τον σκοπό που σχεδιάστηκαν.

Για την αποτελεσματικότερη προστασία των γεωμεμβρανών έναντι των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (υπεριώδης ακτινοβολία, όζον, ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετός, επίδραση ανέμων κ.α.) και την μέγιστη διάρκειας ζωής τους, προτείνεται η κάλυψη τους με εδαφική επίστρωση. Συνιστάται ακόμα η κατασκευή εδαφικού υποστρώματος ή τοποθέτηση γεωφάσματος κάτω από την μεμβράνη με σκοπό την αύξηση της αντοχής κατά της διάτρησης και του σχισίματος και την αύξηση της τριβής έναντι ολίσθησης (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του υποστρώματος και του επιστρώματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην δημιουργεί προβλήματα (σχισίματα, εκδορές) στην μεμβράνη κατά την συμπίκνωση του υποστρώματος αλλά συνάμα να επιτρέπει την μέγιστη γωνία τριβής στην διεπιφάνεια της επίστρωσης (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).

Εκτός από την διαδικασία τοποθέτησης της γεωμεμβράνης η οποία θα πρέπει να γίνεται αμέσως μετά την κατασκευή του υποστρώματος ώστε να μην υπάρξουν πιθανές ζημιές από βροχοπτώσεις και κατά προτίμηση σε συνθήκες άπνοιας εξίσου σημαντική είναι και η διαδικασία της συγκόλλησης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).

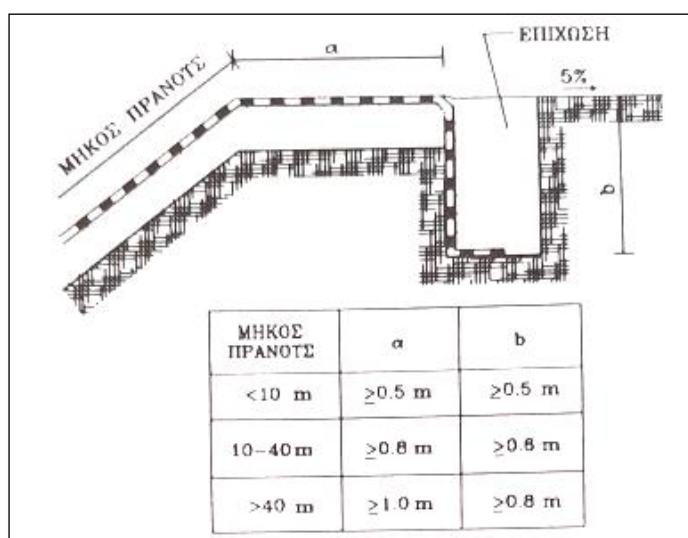
Η σύνδεση των φύλλων της γεωμεμβράνης γίνεται με την μέθοδο της θερμοκόλλησης διπλής ραφής, τα φύλλα της μεμβράνης τήκονται σημειακά στις ζώνες σύνδεσης και συγχρόνως συμπιέζονται μεταξύ τους. Στην ζώνη σύνδεσης και ενδιάμεσα των ραφών θα δημιουργείται διάκενο πάτους 5 mm για την δυνατότητα διεξαγωγής ελέγχων εφελκυστικής αντοχής και αποκόλλησης(Εικόνα 5.2) (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της διαδικασίας συγκόλλησης μεταξύ των φύλλων της γεωμεμβράνης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).

Η αγκύρωση της στεγανοποιητικής μεμβράνης γίνεται σε περιμετρική τάφρο στην στέψη του επιχώματος η οποία μετά την αγκύρωση της γεωμεμβράνης φράζεται με κοκκώδη προϊόντα εκσκαφών (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-0503-04:2009).

Το βάθος της τάφρου και το οριζόντιο μήκος αγκύρωσης εξαρτάται από το μήκος του πρανούς όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Απεικόνιση του βάθους και του μήκους αγκύρωσης της γεωμεμβράνης σε συνάρτηση με το μήκος του πρανούς (Κολλιός & Παρισόπουλος, 2001).

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορες επιλύσεις ευστάθειας της κατασκευής μιας λιμνοδεξαμενής η οποία έχει κατασκευαστεί πάνω σε καρστικοποιημένο υπόβαθρο.

Αρχικά η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιείται με την αναλυτική μέθοδο και στην συνέχεια με την αριθμητική.

Στην συνέχεια τα σενάρια που εξετάζονται και αξιολογούνται είναι ως προς:

- Την ποιότητα της βραχόμαζας με βάση την γεωτεχνική ταξινόμηση RMR (Rock Mass Rating).
- Το μέγεθος πιθανών εγκοίλων.

6.1. Αναλυτική Μέθοδος Επίλυσης - Υπόθεση υποστηριζόμενης δοκού

Η μέθοδος εκτίμησης της κάμψης που βασίζεται στην υπόθεση μιας απλά υποστηριζόμενης δοκού είναι μια προτεινόμενη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί η ευστάθεια υπόγειου εγκοίλου με διαφορετικά μεγέθη αντοχής βράχου και μέγεθος επιβαλλόμενου φορτίου (Zhang & Chen, 2019).

Η προσέγγιση προϋποθέτει ότι η οροφή ενός σπηλαίου συμπεριφέρεται σαν μια απλά υποστηριζόμενη δοκός. Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μια σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της ευστάθειας της οροφής του σπηλαίου (Zhang & Chen, 2019) .

Λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών (αρμών και ρωγμών), η αντοχή εφελκυσμού της βραχόμαζας στη μηχανική πρακτική είναι συνήθως μικρότερη από τη μετρούμενη αντοχή εφελκυσμού του άρρηκτου βράχου στο εργαστήριο (Zhang & Chen, 2019).

Σύμφωνα με την σχέση (1), η αντοχή σε εφελκυσμό του άρρηκτου βράχου είναι το 1/33 έως το 1/4 της θλιπτικής αντοχής του (Zhang & Chen, 2019).

$$\sigma_{ti} \approx \frac{1}{m_i} \sigma_{ci} \quad (1)$$

Όπου σ_{ci} : αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη

m_i :σταθερά του άρρηκτου πετρώματος

Για την εκτίμηση της αντοχής σε εφελκυσμό σε διαφορετικής ποιότητας βραχώμαζα η εξίσωση (1) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\sigma_{ti} \approx \frac{1}{\psi m_i} \sigma_{ci} \quad (2)$$

Όπου η τιμή του ψ καθορίζεται από την εμπειρική συνάρτηση (3) που έχει προταθεί από τους Aydan και Kawamoto, Tokashiki και Aydan.

$$\psi = \frac{120 - \text{RMR}}{0.2\text{RMR}} \quad , \quad (3)$$

όπου RMR η βαθμολογία της βραχώμαζας.

Υποθέτοντας ότι το μήκος του σπηλαίου είναι (L) και η οροφή του οποίου δέχεται ομοιόμορφη φόρτιση είναι (q), η μέγιστη ροπή M_M της οροφής του ανοίγματος εκφράζεται από την σχέση:

$$M_M = \frac{qL^2}{8} \quad (4)$$

Για να αποφευχθεί αστοχία, η αντοχή σε εφελκυσμό σ_{ti} θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση εφελκυσμού σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{ti} \geq \frac{6M_M}{Lh_r^2} \quad (5)$$

όπου h_r το πάχος της οροφής του σπηλαίου και L το μήκος ανοίγματος της οροφής του σπηλαίου.

Τέλος, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι στην υπόθεση της απλά υποστηριζόμενης δοκού η εκτίμηση είναι συντηρητική επειδή αγνοεί το γεγονός ότι στα περιθώρια του εγκοίλου ο βράχος μπορεί να παρέχει ισχυρούς περιορισμούς στη ροπή κάμψης.

6.1.1. Επίδραση μήκους οροφής εγκοίλου στην ευστάθεια του επιχώματος.

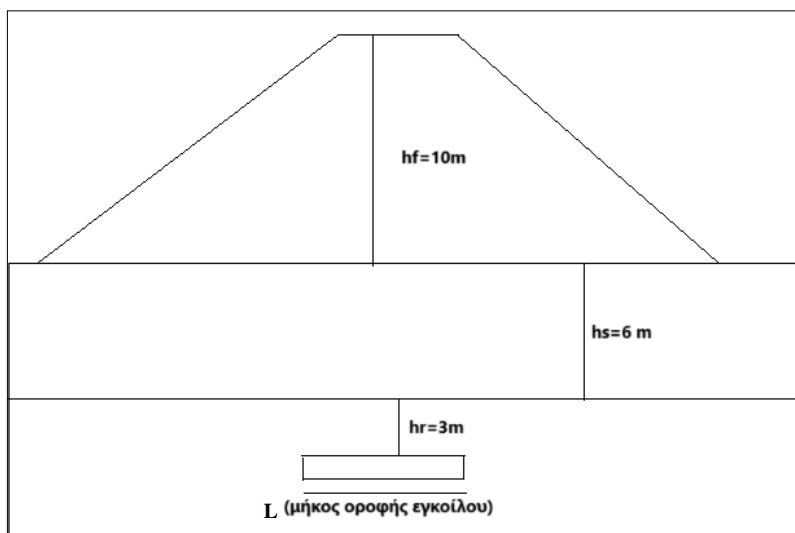
Για την διερεύνηση της επίδρασης του μήκους οροφής του εγκοίλου στην ευστάθεια του επιχώματος με την αναλυτική μέθοδο έγινε η υπόθεση ότι η οροφή του εγκοίλου συμπεριφέρεται ελαστικά σαν μια υποστηριζόμενη δοκό με τα άκρα της ελεύθερα σύμφωνα με την θεωρία που αναφέρεται παραπάνω.

Μελετήθηκε η ευστάθεια επιχώματος $h_f=10$ m πάνω από έγκοιλο διαφορετικού μήκους του οποίου η οροφή έχει πάχος $h_r = 3$ m και το εδαφικό κάλυμμα που υπέρκειται του ασβεστόλιθου έχει πάχος $h_s = 6$ m. Ο καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος θεωρήθηκε φτωχής ποιότητας με τιμή $RMR=30$.

Στον Πίνακα 6.1 εμφανίζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αναλυτική επίλυση και στην Εικόνα 6.1 απεικονίζονται οι γεωμετρικοί όροι.

Πίνακας 6.1: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Ύψος επιχώματος h_f (m)	10
Πάχος εδαφικού καλύμματος h_s (m)	6
Πάχος οροφής εγκοίλου h_r (m)	3
Ακόρεστο μοναδιαίο βάρος βράχου (kN/m^3)	21
Αντοχή βράχου σε ανεμπόδιση θλίψη (MPa)	75
Σταθερά άρρηκτου πετρώματος m_i	10
Μοναδιαίο βάρος εδάφους (kN/m^3)	20
Ποιότητα Βραχώμαζας RMR	30
Συντελεστής σε συνάρτηση με τιμή RMR ψ	15
Αντοχή βράχου σε εφελκυσμό σ_{ti} (kPa)	500



Εικόνα 6.1: Απεικόνιση των γεωμετρικών όρων στην αναλυτική μεθοδο.

Στον Πίνακα 6.2 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα από την αναλυτική επίλυση και από τα οποία προκύπτει ότι για έγκοιλα με μήκος οροφής έως και 14 m δεν απειλείται η ευστάθεια επιχώματος ύψους 10 m ενώ για έγκοιλα με μήκος οροφής 16 m και πάνω η κατασκευή είναι επιρρεπείς σε κατάρρευση αφού η τάση που αναπτύσσεται είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα αναλυτικής επίλυσης.

Μήκος οροφής L (m)	6	8	10	12	14	16	18
Μέγιστη Ροπή M_M (KPa*m)	1724	3064	4788	6894	9384	12256	15512
Τάση σε εφελκυσμό σ_{ti} (KPa)	192	255	319	383	447	511	575
Αντοχή σε εφελκυσμό σ_{ti} (KPa)	500	500	500	500	500	500	500
Κατάσταση σε σχέση με την αστοχία	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

6.2. Αριθμητική Μέθοδος ανάλυσης - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

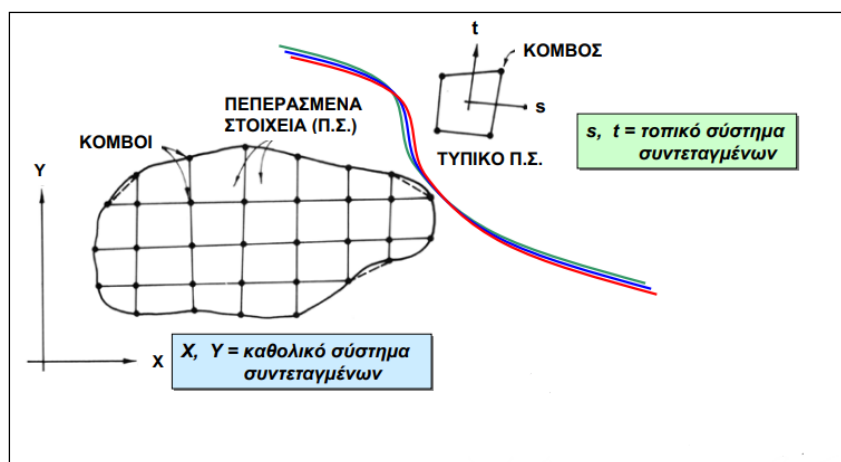
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) αποτελεί σήμερα μια από τις πιο συνηθισμένες χρησιμοποιούμενες αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων όπως ευστάθεια πρανών, θεμελιώσεις, υπόγεια έργα, σεισμική απόκριση γεωτεχνικών κατασκευών κ.α. Στην ουσία πρόκειται για προσεγγιστικούς αλγορίθμους επίλυσης διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας, ροής, κίνησης (Μπουκοβάλας, 2006).

Η βασική αρχή που διέπει την μέθοδο αυτή είναι η "διακριτοποίηση" του χώρου σε μικρότερους υπο-χώρους, δηλαδή στην υπο-διαίρεση ενός εκτενούς προβλήματος σε μικρότερων διαστάσεων ισοδύναμες μονάδες, τα λεγόμενα *στοιχεία (elements)* τα οποία συνδέονται σε συγκεκριμένα σημεία μεταξύ τους, γνωστά ως *κόμβους* (Εικ. 6.2). Με τον τρόπο αυτό ένα συνεχές μέσο οποιασδήποτε διάστασης όπου η μεταβλητή που εξετάζεται (π.χ. παραμόρφωση) έχει άπειρες τιμές εξαιτίας του ότι είναι συναρτήση κάθε γενικού στοιχείου του σώματος ή της περιοχής λύσης και κατά συνέπεια το πρόβλημα είναι με άπειρο αριθμό αγνώστων, μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα με πεπερασμένο αριθμό αγνώστων εκφράζοντας τη μεταβλητή αγνώστου πεδίου με όρους υποθετικών προσεγγιστικών συναρτήσεων σε κάθε στοιχείο (Huebner, et al., 2001).

Οι εξισώσεις που συνδέουν τις μετατοπίσεις με τις δυνάμεις στους κόμβους του στοιχείου, μπορούν να αποδοθούν με την μορφή ενός πίνακα που ονομάζεται μητρώο ακαμψίας (δυστροπίας) του στοιχείου. Από τους πίνακες ακαμψίας των επιμέρους στοιχείων προκύπτει ο πίνακας ακαμψίας όλης της εξεταζόμενης περιοχής. Παράλληλα, έχοντας προσδιορίσει τις οριακές συνθήκες του προβλήματος και τις εφαρμοζόμενες φορτίσεις, προκύπτει ένας αριθμός από ταυτόχρονα ισχύουσες εξισώσεις που συσχετίζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων, τις παραμέτρους δυστροπίας και τα εφαρμοζόμενα φορτία. Έτσι επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις σε κάθε στοιχείο.

Το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί ένα πλέγμα. Ανάλογα με την πυκνότητά του καθορίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και ο χρόνος επίλυσης. Έτσι

με ένα πυκνότερο πλέγμα σαφώς επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά ο χρόνος επίλυσης που απαιτείται είναι μεγαλύτερος.



Εικόνα 6.2: Διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε Πεπερασμένα στοιχεία (Μπουκοβάλας, 2006).

6.3. Παρουσίαση του Λογισμικού Plaxis

Το λογισμικό πρόγραμμα Plaxis το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ένα λογισμικό που βασίζεται στην χρήση των πεπερασμένων στοιχείων με στόχο την ανάλυση παραμορφώσεων, ευστάθειας και ροής υπογείων υδάτων σε γεωτεχνικά έργα. Τα προβλήματα μπορούν να προσομοιωθούν σε δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) περιβάλλον ανάλυσης ενώ οι συνθήκες επίλυσης μπορεί να είναι είτε επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) είτε αξονοσυμμετρίας (axisymmetry) (Τομπουλίδου, 2022).

Συγκεκριμένα το πρόγραμμα Plaxis 2D v8.2 που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα επίλυσης και ανάλυσης των παραμορφώσεων και διερεύνησης των συνθηκών ευστάθειας του εδάφους. Το πακέτο αποτελείται από 4 διαδοχικά υποπρογράμματα τα οποία είναι (Γούλα, 2017):

1. **Plaxis Input:** Στο υποπρόγραμμα εισαγωγής δεδομένων γίνεται εισαγωγή των δεδομένων που σχετίζονται με την γεωμετρία του υπό εξέταση μοντέλου καθώς και των ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελείται. Επιπλέον, ορίζονται οι αρχικές συνθήκες της κατανομής των τάσεων όπως επίσης και οι υδραυλικές συνθήκες.
2. **Plaxis Calculations:** Στο υποπρόγραμμα των υπολογισμών ορίζονται οι διαδοχικές φάσεις φόρτισης και εξέλιξης της κατασκευής.
3. **Plaxis Output:** Πρόκειται για το υποπρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων, δηλαδή την εμφάνιση των παραμορφώσεων και των τάσεων όπως αυτές παρουσιάζονται στην τομή του μοντέλου προσομοίωσης.
4. **Plaxis Curves:** Στο υποπρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων εμφανίζονται με την μορφή γραφημάτων και καμπυλών.

6.4. Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

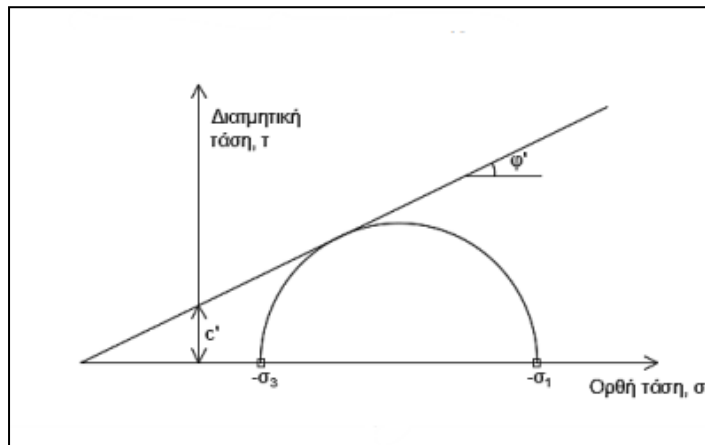
Η προσομοίωση του εδάφους στο λογισμικό Plaxis, δηλαδή η συμπεριφορά του εδαφικού σχηματισμού κατά την επίλυση ενός προβλήματος παρέχεται με την βοήθεια καταστατικών νόμων (μοντέλα συμπεριφοράς εδαφών) όπως: μοντέλο Mohr-Coulomb,

Hardening soil model, Soft soil model, κ.α. Τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που ορίζουν μια σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mohr-Coulomb (Εικ. 6.3). Πρόκειται για ένα γραμμικά ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο το οποίο στηρίζεται στο νόμο ελαστικότητας του Hooke για το ελαστικό μέρος και στο κριτήριο διατμητικής αστοχίας του Mohr-Coulomb για το τέλεια πλαστικό μέρος του μοντέλου (Τομπουλίδου, 2022).

Οι 5 γεωτεχνικές παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου Mohr-Coulomb, οι οποίες προσδιορίζονται εύκολα από τις συνήθεις δοκιμές Εδαφομηχανικής είναι:

- Το μέτρο παραμορφωσιμότητας ή μέτρο του Young (E)
- Ο λόγος Poisson (ν)
- Η συνοχή (c)
- Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)
- Η γωνία διασταλτικότητας (ψ)

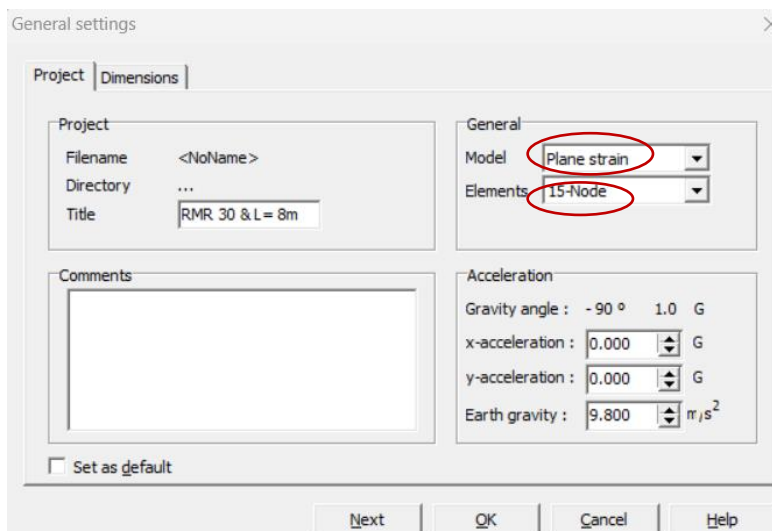


Εικόνα 6.3: Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Τομπουλίδου, 2022)

6.5. Προσομοίωση μοντέλου λιμνοδεξαμενής σε καρστ στο λογισμικό Plaxis 2D v8.2

Σύμφωνα με τα στάδια λειτουργίας του προγράμματος Plaxis για την ανάλυση ευστάθειας της λιμνοδεξαμενής πάνω σε καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο, αρχικά εισάγονται: η γεωμετρία του μοντέλου προσομοίωσης, τα εδαφικά υλικά που δομούν το μοντέλο, το φορτίο του επιχώματος, το φορτίο του νερού ανάλογα με το ύψος της στάθμης του, ενώ οριοθετούνται και τα υπόγεια καρστικά έγκοιλα που θα οριστούν ως κενά κατά τις επιλύσεις.

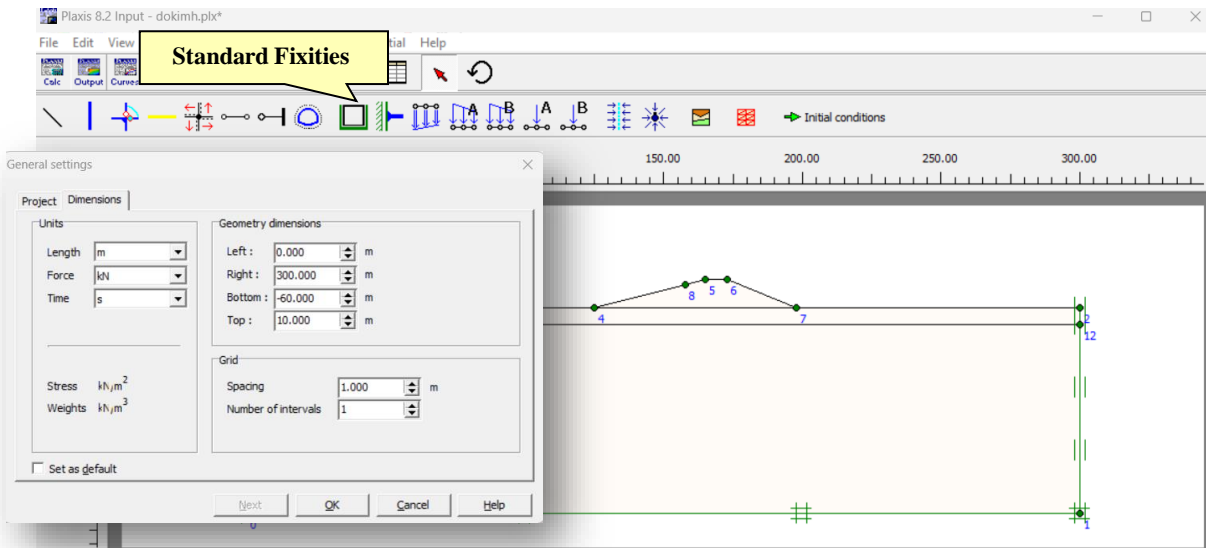
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.4 έχει επιλεγεί το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται σε γεωμετρίες όπως φράγματα, αναχώματα και γενικά σε επιμήκεις κατασκευές, κατά τις οποίες οι συνιστώσες των τάσεων δεν μεταβάλλονται κατά την διεύθυνση ενός άξονα, με αποτέλεσμα οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις σε αυτόν τον άξονα να θεωρούνται μηδενικές. Επίσης έχει επιλεγεί η κατασκευή καννάβου σε τριγωνικά στοιχεία 15 κόμβων για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



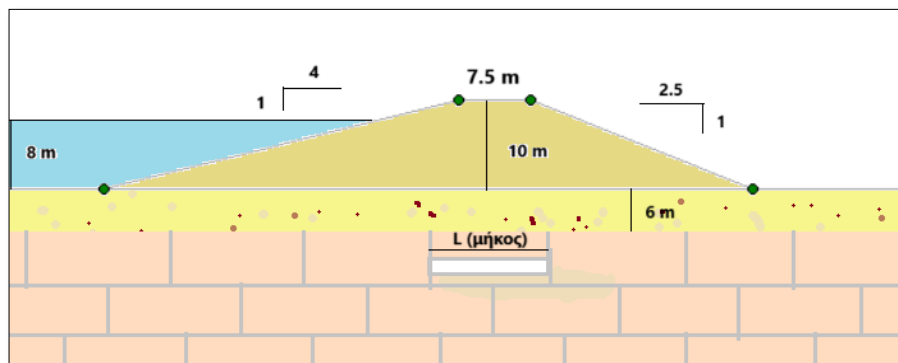
Εικόνα 6.4: Εισαγωγή γενικών χαρακτηριστικών καννάβου.

Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στις εικόνες 6.5 και 6.6. Το ύψος του επιχώματος ορίζεται στα 10 m με κλίσεις ανάντη και κατόντη πρανούς 1:4 και 1:2.5 αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη στάθμη του νερού ορίζεται στα 8 m από τον πυθμένα της λιμνοδεξαμενής.

Το μοντέλο αποτελείται από 3 γεωλογικά υλικά: το υλικό του επιχώματος, το εδαφικό κάλυμμα που έχει πάχος 6 m (βάθος από την επιφάνεια) και ο σχηματισμός του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου που εντοπίζεται κάτω από τα 6 m βάθος (Εικόνα 6.6).



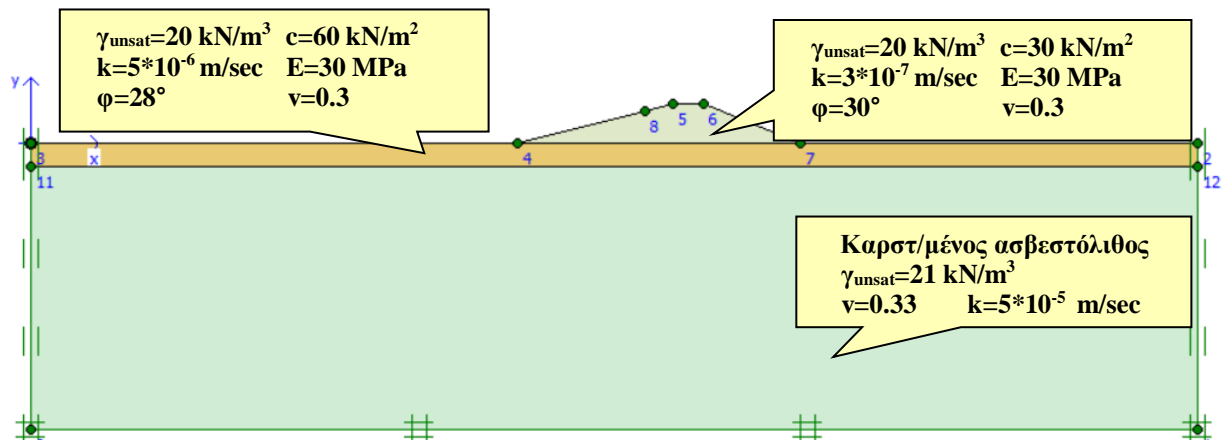
Εικόνα 6.5: Εισαγωγή γεωμετρίας μοντέλου.



Εικόνα 6.6: Γεωμετρία και υλικά μοντέλου και επιχώματος.

Μετά τον ορισμό της γεωμετρίας καθορίστηκαν οι οριακές συνθήκες με την εντολή Standard Fixities (Εικ. 6.5). Με την συνθήκη αυτή ορίζονται μηδενικές οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες εκφράζονται με ολίσθηση στα πλευρικά όρια και με πάκτωση στα κάτω όρια.

Στην συνέχεια επιλέχθηκε το καταστατικό μοντέλο συμπεριφοράς των σχηματισμών (Εικ. 6.7). Το μοντέλο βάσει του οποίου έγινε η προσομοίωση συμπεριφοράς του εδάφους είναι το μοντέλο Mohr-Coulomb όπου οι συνθήκες θεωρήθηκαν στραγγιζόμενες (drained).



Εικόνα 6.7: Εισαγωγή εδαφικών υλικών (επίχωμα, εδαφικό κάλυμμα, καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος)

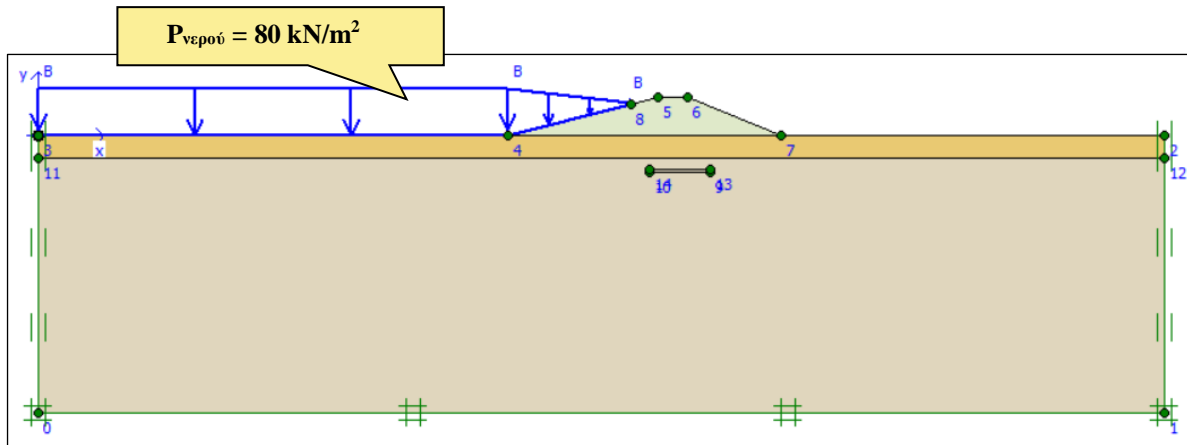
Στον Πίνακα 6.3. παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών. Ο καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος θεωρήθηκε φτωχής ποιότητας με τιμή RMR= 30.

Πίνακας 6.3: Γεωτεχνικές ιδιότητες των σχηματισμών.

Σχηματισμός	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m^3)	Διαπερατότητα k (m/sec)	Συνοχή c (kN/m^2)	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ ($^\circ$)	Μέτρο παραμορφωσιμότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν
Επίχωμα	20	$3 \cdot 10^{-7}$	30	30	30	0.3
Εδαφικό κάλυμμα	20	$5 \cdot 10^{-6}$	60	28	30	0.3
Καρστ/μένος Ασβεστόλιθος RMR=30	21	$5 \cdot 10^{-5}$	1938	26	2981	0.33

Έπειτα ορίζεται το φορτίο του νερού ($P_{\text{νερού}}$) που προκύπτει από την πλήρωση της λιμνοδεξαμενής θεωρώντας μέγιστο ύψος στάθμης τα 8 m από τον πυθμένα. Επίσης ορίζεται

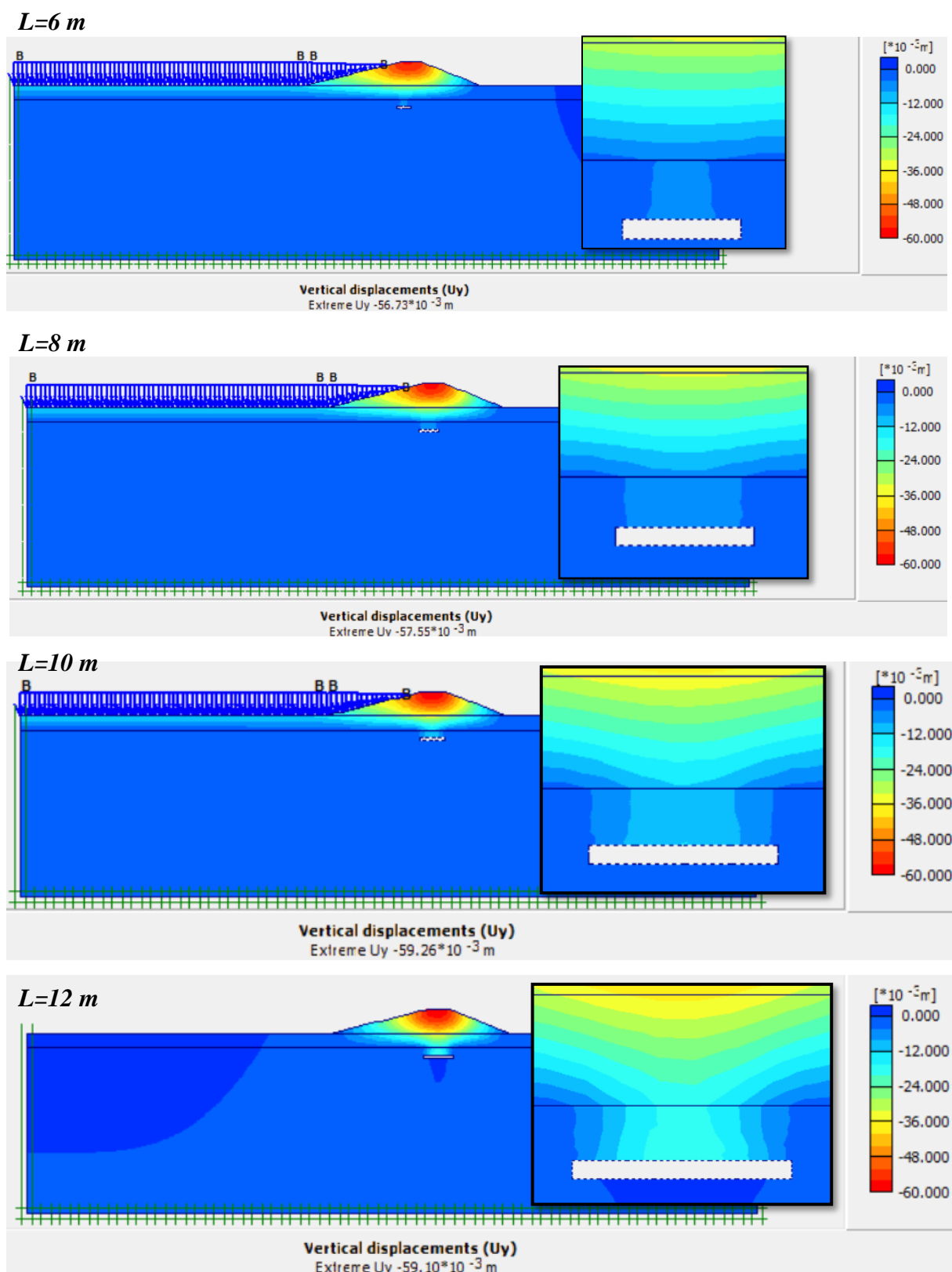
και η γεωμετρία του κενού χώρου που απεικονίζει το καρστικό έγκοιλο το οποίο και ενεργοποιείται κατά την φάση των υπολογισμών (Εικ 6.8).



Εικόνα 6.8: Απεικόνιση τελικού μοντέλου προς επίλυση.

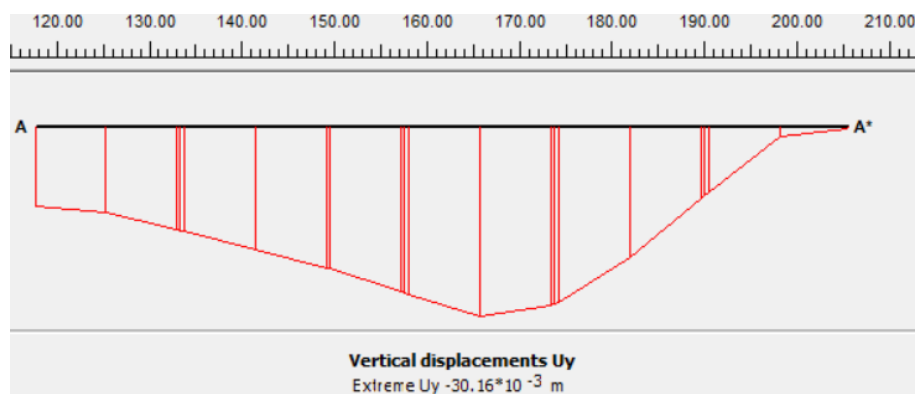
Αφότου έχει σχεδιαστεί το μοντέλο που προσομοιάζει το πρόβλημα προς επίλυση είναι απαραίτητο να οριστεί η θέση του υδροφόρου ορίζοντα και η εκτίμηση των υδροστατικών πιέσεων του εδάφους. Στην περίπτωση μελέτης η επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα τοποθετήθηκε στην βάση του μοντέλου και οι πιέσεις πόρων στο υπέδαφος μηδενικές.

Στην Εικόνα 6.9 εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις για μήκη οροφής του κενού από $L=6\text{m}$ έως $L=12\text{m}$ ενώ στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στην βάση του επιχώματος για μήκη από $L=4\text{ m}$ έως $L=22\text{ m}$.

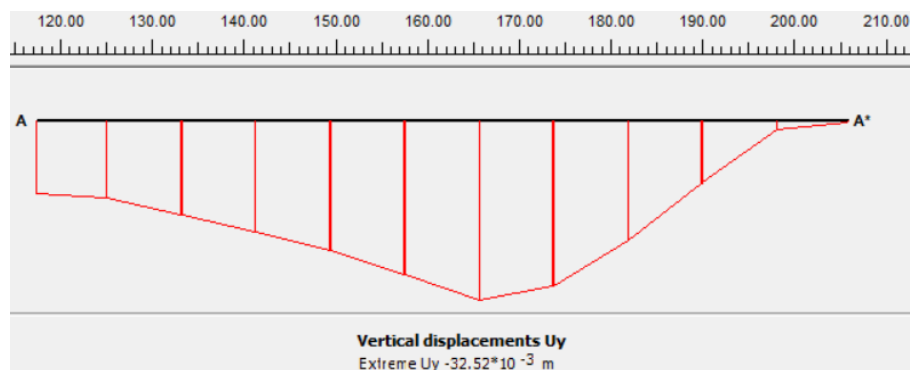


Εικόνα 6.9: Εμφάνιση των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων για μήκη οροφής κενού από 6m έως 12m. Λεπτομερής απεικόνιση των παραμορφώσεων πάνω από την οροφή του εγκοίλου.

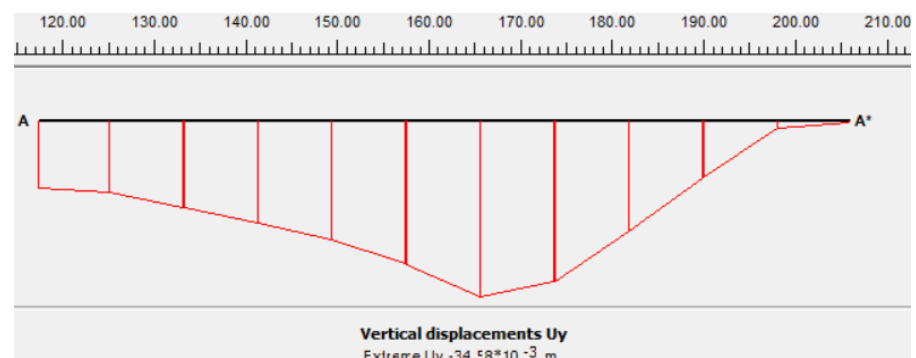
$L=6m$



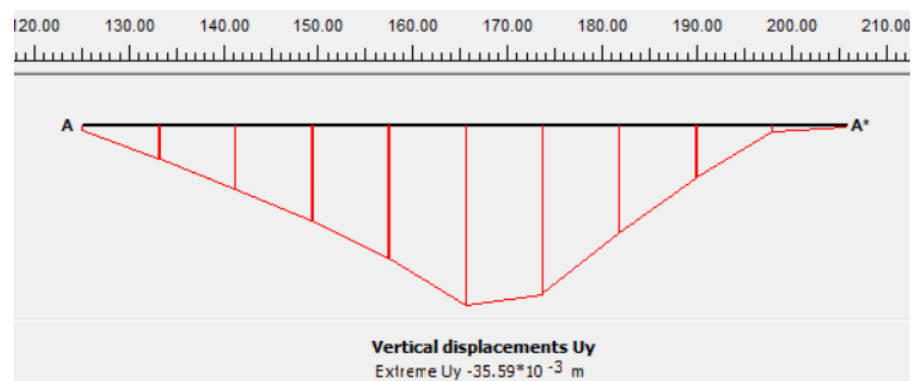
$L=8m$



$L=10m$



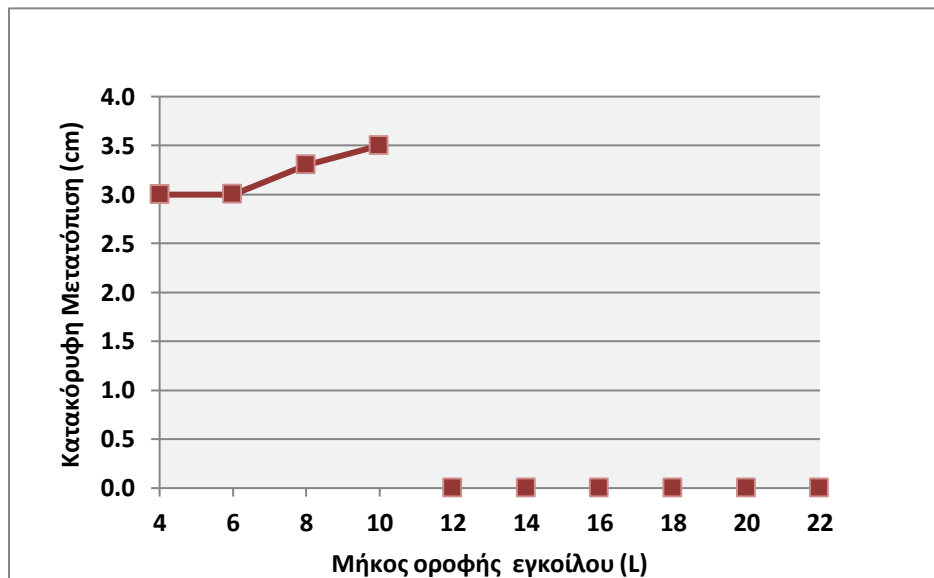
$L=12m$



Εικόνα 6.10: Κατακόρυφες μετατοπίσεις στην βάση του επιχώματος για μήκη οροφής κενού από 6m έως 12m.

Πίνακας 6.4: Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με το μήκος της οροφής εγκοίλου (L). Με κόκκινο χρώμα και μηδενικές μετατοπίσεις εμφανίζονται οι περιπτώσεις που το μοντέλο αστοχεί.

Μήκος οροφής εγκοίλου L (m)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Κατακόρυφη μετατόπιση στην βάση του επιχώματος (cm)	3.0	3.0	3.3	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Εικόνα 6.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Με μηδενικές μετατοπίσεις παρουσιάζονται οι περιπτώσεις σε κατάσταση αστοχίας.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 6.11 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με το μήκος της οροφής του εγκοίλου. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αυξάνουν με την αύξηση του μήκους της οροφής του εγκοίλου έως ότου εμφανιστεί αστοχία. Η αστοχία εμφανίζεται στο διάγραμμα με μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις με την μορφή κουκκίδων για κάθε μήκος εγκοίλου από 12 m έως 22 m.

Από την επίλυση με την αριθμητική μέθοδο για την περίπτωση λιμνοδεξαμενής που μελετήθηκε με την γεωμετρία και τις γεωτεχνικές παραμέτρους των σχηματισμών όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω προκύπτει ότι για έγκοιλα με μήκος οροφής έως και 10 m δεν

απειλείται η ευστάθεια επιχώματος ύψους 10 m ενώ για έγκοιλα με μήκος οροφής 12 m και πάνω το μοντέλο αστοχεί.

Από την σύγκριση των δυο μεθόδων όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5. προκύπτει ότι με την αναλυτική επίλυση ευστάθεια διασφαλίζεται για έγκοιλο μήκους έως 14 m ενώ με την αριθμητική επίλυση η κατασκευή της λιμνοδεξαμενής είναι ασφαλής για έγκοιλο με μήκος έως 10 m.

Παρατηρείται ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων με μια αναμενόμενη απόκλιση.

Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο διαφορετικό καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην κάθε μέθοδο. Στην αναλυτική μέθοδο η οροφή του εγκοίλου συμπεριφέρεται ελαστικά με τα άκρα να είναι ελεύθερα στην κίνηση ενώ στην αριθμητική επίλυση το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά ακολουθώντας το μοντέλο Mohr – Coulomb και στα περιθώρια του εγκοίλου ο βράχος παρέχει ισχυρούς περιορισμούς στην ροπή κάμψης.

Πίνακας 6.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής και αριθμητικής επίλυσης σε σχέση με την κατάσταση σε αστοχία.

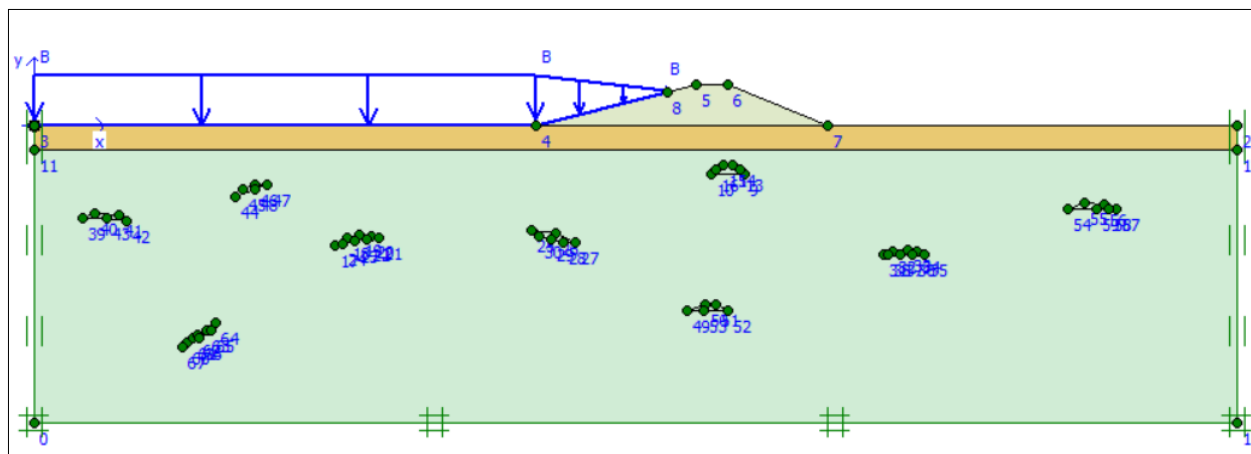
Μήκος εγκοίλου L (m)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Αναλυτική Επίλυση	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Αριθμητική Επίλυση	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗

6.6. Σενάρια που μελετήθηκαν στο λογισμικό Plaxis 2D

6.6.1. Σενάρια ως προς την ποιότητα του ασβεστόλιθου με βάση την ταξινόμηση κατά RMR (Rock Mass Rating).

Η γεωμετρία του μοντέλου παραμένει ίδια με αυτή της προηγούμενης ενότητας δηλαδή ύψος αναχώματος 10 m, μέγιστη στάθμη νερού 8 m, πάχος εδαφικού καλύμματος 6 m.

Η γεωμετρία και η διάταξη των καρστικών εγκοίλων (Εικόνα 6.12) επιλέχθηκε με βάση την μηχανική ταξινόμηση των Waltham και Fookes (2003) για την κατηγορία καρστ *kIV* (περίπλοκο καρστ) όπου υπάρχουν πολυάριθμα καρστικά έγκοιλα σε πολλά επίπεδα με μήκος μεγαλύτερο από 5 m. Οι διαστάσεις των εγκοίλων που μελετήθηκαν κυμαίνονται σε μήκος (L) από 8 m έως 12 m και έχουν μέγιστο ύψος (H) από 1 m έως 2 m. Επιπλέον τα βάθη εμφάνισης τους ποικίλουν από τα 10 m έως τα 55 m.



Εικόνα 6.12: Απεικόνιση μοντέλου προς επίλυση.

Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών ενώ για τον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας διαφοροποιούνται για κάθε σενάριο ξεχωριστά όπως φαίνονται στον Πίνακας 6.7.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία ταξινόμησης της βραχώμαζας κατά RMR, με την ποιότητα του ασβεστόλιθου να κυμαίνεται από πολύ καλή (RMR=90) έως πολύ φτωχή (RMR=20). Επιπλέον οι παράμετροι που προσδιορίζουν την

αντοχή και την παραμορφωσιμότητα υπολογίστηκαν από τις σχέσεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.2.6.

Πίνακας 6.6: Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφικών σχηματισμών.

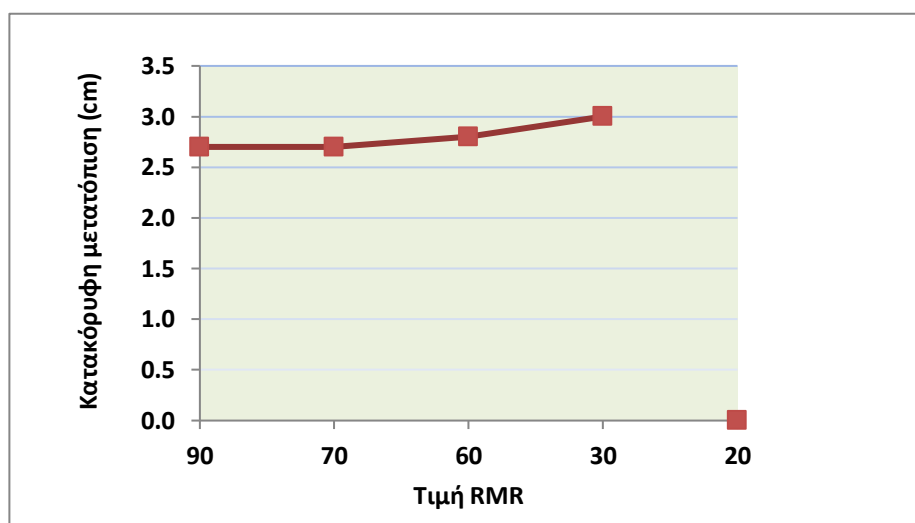
Σχηματισμός	Μοναδιαίο βάρος γ (kN/m ³)	Διαπερατότητα k (m/sec)	Συνοχή c (kN/m ²)	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (°)	Μέτρο παραμορφωσιμότητας E (MPa)	Λόγος Poisson ν
Επίχωμα	20	$3 \cdot 10^{-7}$	30	30	30	0.3
Εδαφικό κάλυμμα	20	$5 \cdot 10^{-6}$	60	28	30	0.3
Καρστ/μένος Ασβεστόλιθος	21	$5 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	0.33

Πίνακας 6.7 Σενάρια ως προς την ποιότητα του ασβεστόλιθου.

	Κατηγορία βραχώμαζας	Τιμή RMR	Συνοχή (c) $c=5 \cdot \text{RMR}$ (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) $\phi=0.5 \cdot \text{RMR}+5$	Μέτρο ελαστικότητας (E) $E=2 \cdot \text{RMR}-100$ (RMR>50) $E=10^{(\text{RMR}-10)/40}$ (RMR<50) (GPa)
Σενάριο 1°	Πολύ καλή (I)	90	450	50°	80
Σενάριο 2°	Καλή (II)	70	350	40°	40
Σενάριο 3°	Μέτρια (III)	60	300	35°	20
Σενάριο 4°	Φτωχή (IV)	30	150	20°	3.16
Σενάριο 5°	Πολύ φτωχή (V)	20	100	15°	1.78

Πίνακας 6.8: Πίνακας μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος σε σχέση την τιμή RMR του καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου. Με κόκκινο παρουσιάζεται το σενάριο κατά το οποίο εμφανίζεται αστοχία στο υπέδαφος σύμφωνα την επίλυση στο λογισμικό Plaxis.

	Τιμή RMR	Μέγιστη Κατακόρυφη μετατόπιση στην βάση του επιχώματος (cm)
Σενάριο 1 ^ο	90	- 2.7
Σενάριο 2 ^ο	70	- 2.7
Σενάριο 3 ^ο	60	- 2.8
Σενάριο 4 ^ο	30	- 3.0
Σενάριο 5 ^ο	20	Αστοχία



Εικόνα 6.13: Διάγραμμα απεικόνισης των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Για τιμή RMR 20 εμφανίζεται αστοχία.

Με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού Plaxis για τα σενάρια που εξετάστηκαν αλλά και όπως αυτά απεικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 6.13, συμπεραίνεται ότι για την ποιότητα του ασβεστόλιθου από πολύ καλή έως φτωχή, δηλαδή **για τα σενάρια 1 έως 4 οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις στην βάση του επιχώματος κυμαίνονται από 2.7 cm έως 3.0 cm.**

Στο **Σενάριο 5** όπου η ποιότητα του ασβεστόλιθου είναι πολύ φτωχή, δηλαδή με τιμή $RMR=20$ **το μοντέλο αστοχεί.**

Συγκεκριμένα από τις επιλύσεις των 5 σεναρίων προκύπτει ότι:

- Η ποιότητα του ασβεστολιθικού σχηματισμού επηρεάζει την ευστάθεια της λιμνοδεξαμενής πάνω από καρστικά έγκοιλα.
- Με τιμή $RMR \geq 30$ δεν παρατηρούνται παραμορφώσεις που να οφείλονται στην παρουσία των καρστικών εγκοίλων.

Στο υπέδαφος εμφανίζονται οι αναμενόμενες κατακόρυφες μετατοπίσεις από το φορτίο του νερού και του επιχώματος.

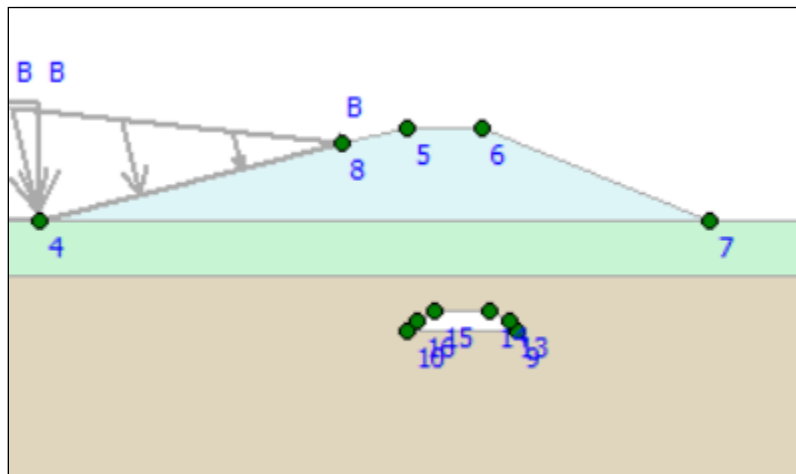
- Γίνεται αντιληπτό ότι σε πολύ φτωχή ποιότητα βραχώμαζας δηλαδή για $RMR \leq 20$ τα καρστικά έγκοιλα που εμφανίζονται στο υπέδαφος είναι επιρρεπή σε κατάρρευση της οροφής τους υπό το καθεστώς φορτίσεων και εν τέλει μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία της κατασκευής.

6.6.2. Σενάρια ως προς το μέγεθος του εγκοίλου

Για την διερεύνηση σεναρίων σε σχέση με το μέγεθος εγκοίλου στο μοντέλο προσομοίωσης εξετάστηκε η επίδραση του μήκους του εγκοίλου ενώ το ύψος του παραμένει σταθερό στα 2 m.

Η επιλογή της θέσης του εγκοίλου ορίστηκε κάτω από το επίχωμα ώστε να μελετηθεί το δυσμενέστερο σενάριο.

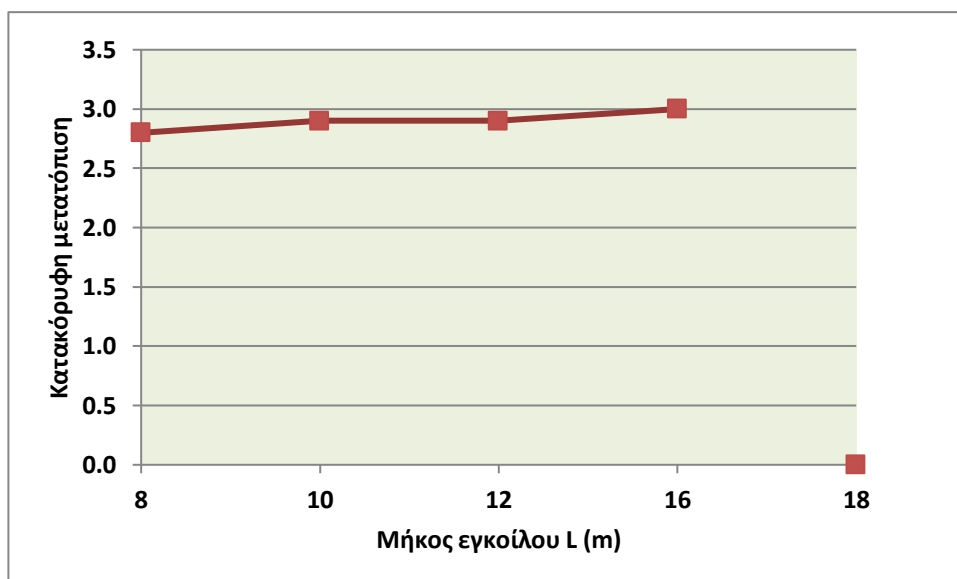
Ο καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος θεωρήθηκε μέτριας ποιότητας με τιμή $RMR=60$ και η οροφή του εγκοίλου βρίσκεται σε βάθος 4 m από την διεπιφάνεια εδαφικού καλύμματος - καρστικοποιημένου υποβάθρου.



Εικόνα 6.14: Απεικόνιση εγκοίλου κάτω από το επίχωμα.

Πίνακας 6.9: Μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις σε σχέση με το μέγεθος του εγκοίλου. Με κόκκινο εμφανίζεται το σενάριο που σύμφωνα με το Plaxis το μοντέλο αστοχεί.

	Μέγιστο μήκος εγκοίλου L (m)	Κατακόρυφη μετατόπιση στην βάση του επιχώματος (cm)
Σενάριο 1 ^ο	8	- 2.8
Σενάριο 2 ^ο	10	- 2.9
Σενάριο 3 ^ο	12	- 2.9
Σενάριο 4 ^ο	16	- 3.0
Σενάριο 5 ^ο	18	Αστοχία



Εικόνα 6.15: Διάγραμμα απεικόνισης των κατακόρυφων μετατοπίσεων στην βάση του επιχώματος. Με μηδενική μετατόπιση εμφανίζεται το έγκοιλο που αστοχεί.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του λογισμικού Plaxis και αφού διερευνήθηκαν 5 διαφορετικές περιπτώσεις με το μήκος εγκοίλου να αυξάνεται σταδιακά από 8 m σε 18 m συμπεραίνεται ότι:

- Στα σενάρια 1 έως 4 οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που εμφανίζονται στην βάση του επιχώματος είναι έως 3 cm.
- Η ευστάθεια ενός εγκοίλου με μέγιστο μήκος έως 16 m και μέγιστου ανοίγματος 2 m δεν επηρεάζεται από το φορτίο (νερό και επίχωμα) της λιμνοδεξαμενής με αποτέλεσμα να μην θεωρείται επικίνδυνο για την ασφάλειά της.
- Σε αντίθεση, ένα έγκοιλο με διαστάσεις μέγιστου μήκους 18 m και μέγιστου ανοίγματος 2 m είναι ικανό να προκαλέσει προβλήματα στην λιμνοδεξαμενή αφού σύμφωνα με την επίλυση στο λογισμικού Plaxis εμφανίζεται κατάρρευση της οροφής του εγκοίλου.

6.7. Επίδραση του λόγου πάχους οροφής προς μήκος εγκοίλου

Τα περισσότερα σπήλαια μέσα στον ασβεστόλιθο βρίσκονται σε βάθη όπου μπορούν να αναπτύξουν σταθερά τόξα συμπίεσης στην βραχώδη οροφή τους και δεν επηρεάζουν την κατασκευή οποιουδήποτε έργου στην επιφάνεια. Κίνδυνος όμως παρουσιάζεται όταν ένα μεγάλο σπήλαιο βρίσκεται σε μικρό βάθος και μπορεί να απειλήσει την ευστάθεια θεμελίωσης του έργου. Μια άτυπη οδηγία για την ευστάθεια της οροφής μιας σπηλιάς είναι ότι το έγκοιλο είναι ευσταθές εάν το πάχος του βράχου είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το άνοιγμά του, δηλαδή λόγος πάχους προς άνοιγμα ≥ 1 (Waltham & Fookes, 2003).

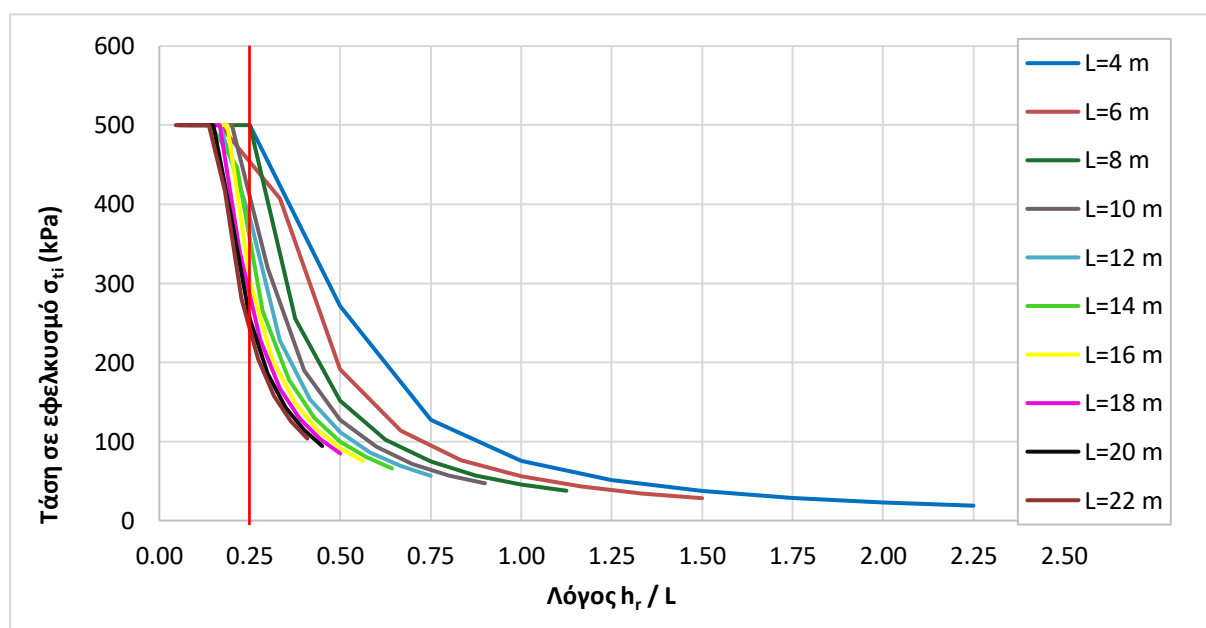
Ωστόσο πολλές είναι οι κατασκευές που ανταποκρίνονται πάνω σε σπήλαια με μικρότερο πάχος οροφής. Οι Waltham και Swift (2004) μετά από δοκιμές φόρτισης πλήρους κλίμακας στο Nottingham και δοκιμές φυσικής μοντελοποίησης στο εργαστήριο πρότείνουν ότι υπόγειο σπήλαιο με λόγο πάχους προς άνοιγμα μεγαλύτερο από 0.7 είναι ικανό να υποστηρίξει τα περισσότερα έργα στην επιφάνεια.

Στην περίπτωση της κατασκευής λιμνοδεξαμενής που μελετήθηκε παραπάνω με ύψος επιχώματος 10 m ο λόγος πάχους οροφής εγκοίλου (h_r) προς μήκος εγκοίλου (L) διαφοροποιείται. Από τις παραμετρικές αναλύσεις όπως αυτές εμφανίζονται στον Πίνακα 6.9 προκύπτει ότι όταν ο λόγος $h_r/L > 0.25$ το επίχωμα θεωρείται ευσταθές ενώ όταν ο λόγος $h_r/L < 0.25$ υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης.

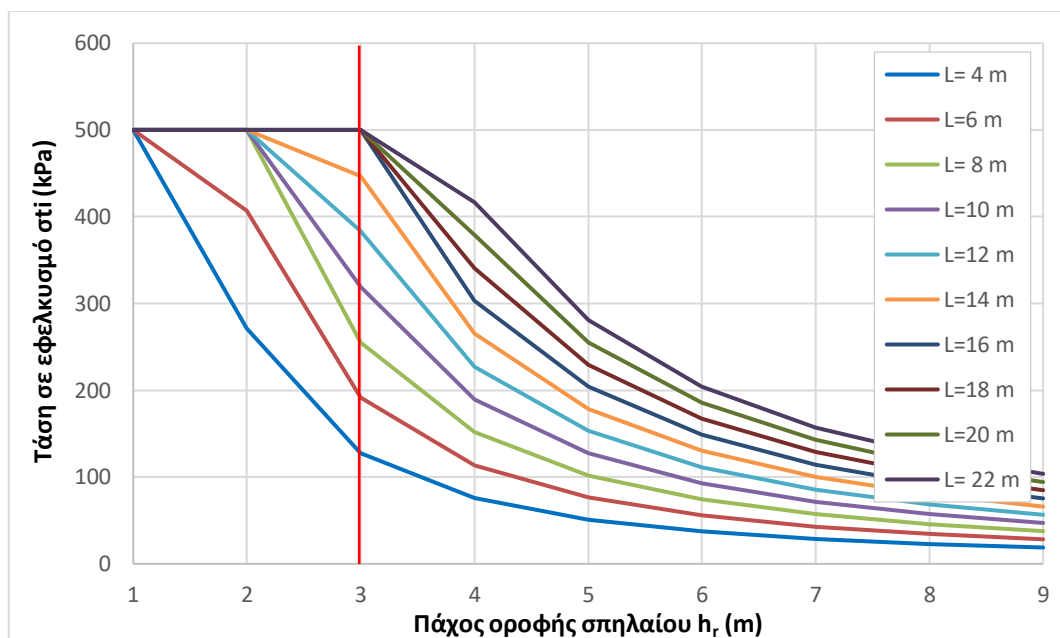
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 6.17 για πάχη οροφής μεγαλύτερα από 4 m ο λόγος $h_r/L \leq 0.25$ δεν επηρεάζει αρνητικά την ευστάθεια της κατασκευής αφού όσο αυξάνεται το πάχος οροφής τόσο μειώνεται η τάση σε εφελκυσμό με αποτέλεσμα να μην φτάνει την αντοχή σε εφελκυσμό, δηλαδή τα 500 kPa.

Πίνακας 6.10: Λόγος πάχους οροφής εγκοίλου προς μήκος οροφής. Με κίτρινο εμφανίζονται οι λόγοι που εμφανίζεται αστοχία.

Πάχος οροφής σπηλαιίου h_r (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μήκος οροφής L(m)	Λόγος h_r/L								
4	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
6	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	1.17	1.33	1.50
8	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.13
10	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
12	0.08	0.17	0.25	0.33	0.42	0.50	0.58	0.67	0.75
14	0.07	0.14	0.21	0.29	0.36	0.43	0.50	0.57	0.64
16	0.06	0.13	0.19	0.25	0.31	0.38	0.44	0.50	0.56
18	0.06	0.11	0.17	0.22	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50
20	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
22	0.05	0.09	0.14	0.18	0.23	0.27	0.32	0.36	0.41



Εικόνα 6.16 Διάγραμμα τάσης σε εφελκυσμό σε σχέση με τον λόγο h_r/L .



Εικόνα 6.17: Διάγραμμα τάσης σε εφελκυσμό σε συνάρτηση με το πάχος οροφής του εγκοίλου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που συγκεντρώνονται παρακάτω είναι απόρροια των όσων πραγματεύεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία και για τα οποία είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή με σκοπό την βέλτιστη αξιοποίηση των υδατικών πόρων της χώρας μας, την ορθή διαχείριση υδρολογικών έργων κατασκευής σε καρστ και προπάντων την συνεχή παρακολούθηση και τον έλεγχο των έργων και μετά το πέρας της κατασκευής.

- Τα πιο διαδεδομένα προβλήματα που συναντώνται σε κατασκευές πάνω σε καρστ και πολλές φορές έχουν οδηγήσει σε αστοχίες κατασκευών είναι η εδαφική υποχώρηση εξαιτίας της επιβολής φορτίου και οι αστοχίες λόγω εσωτερικής διάβρωσης και διεύρυνσης των καρστικών αγωγών. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις φραγμάτων αλλά και μικρότερων ταμιευτήρων ανά τον κόσμο όπου φαινόμενα έντονων διαρροών και ξαφνικών υποχωρήσεων είναι ο λόγος που οδηγούν σε οριστική εγκατάλειψη του έργου ή ακόμα και σε απρόσμενη αστοχία.
- Η διαχείριση και αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με το καρστ μπορούν να ελαχιστοποιηθούν είτε με επιφανειακά μέτρα προστασίας όπως: τοποθέτηση γεωμεμβρανών, είτε με υπόγειες τεχνικές αντιμετώπισης των διαρροών όπως: προγράμματα τσιμεντενέσεων τύπου κουρτίνας, κατασκευή διαφραγματικών τοίχων ακόμα και σφράγιση σπηλαίων.
- Στην μελέτη περίπτωσης κατασκευής λιμνοδεξαμενής πάνω σε καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο με τιμή $RMR=30$ και ύψος επιχώματος 10m, πάχος εδαφικού καλύμματος 6 m, πάχος οροφής εγκοίλου 3 m πραγματοποιήθηκε επίλυση της ευστάθειας, με αναλυτική και αριθμητική μέθοδο, για μεταβαλλόμενο μήκος οροφής εγκοίλου από $L=4$ m έως $L=22$ m.
- Με την αναλυτική μέθοδο προκύπτει ότι αστοχία εμφανίζεται για έγκοιλο με μήκος $L=16$ m.
- Με την αριθμητική επίλυση αστοχία εμφανίζεται για έγκοιλο μήκους $L=12$ m. Για καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο με τιμή $RMR=30$ η ευστάθεια του επιχώματος περιορίζεται σε έγκοιλα με μήκος έως 10 m.

- Από την σύγκριση των μεθόδων αναλυτικής και αριθμητικής προκύπτει ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων με μικρή απόκλιση που οφείλεται στο διαφορετικό καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην κάθε μέθοδο. Στην αναλυτική μέθοδο η οροφή του εγκοίλου συμπεριφέρεται ελαστικά με τα άκρα να είναι ελεύθερα στην κίνηση ενώ στην αριθμητική επίλυση το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά ακολουθώντας το μοντέλο Mohr – Coulomb και στα περιθώρια του εγκοίλου ο βράχος παρέχει ισχυρούς περιορισμούς στην ροπή κάμψης.
- Μετά από μια σειρά επιλύσεων στο λογισμικό Plaxis όσον αφορά την κατασκευή λιμνοδεξαμενής πάνω σε καρστικοποιημένο υποβάθρο προκύπτει ότι η ευστάθεια της κατασκευής επηρεάζεται από την ποιότητα του καρστικοποιημένου υποβάθρου ή αλλιώς το βαθμό καρστικοποίησης στο σύνολο του σχηματισμού, το μέγεθος των εγκοίλων και το βάθος εμφάνισής τους από την διεπιφάνεια εδαφικού καλύμματος – καρστικοποιημένου σχηματισμού.
- Διαπιστώθηκε ότι η παρουσία εγκοίλων με διαστάσεις μέσου μήκους 11 m και μέσου ανοίγματος (ύψος) 1.5 m σε βάθος εμφάνισης μεγαλύτερο ή ίσο από 5.5 m από την διεπιφάνεια εδάφους και καρστικοποιημένου υποβάθρου δεν επηρεάζει την κατασκευή όταν η ποιότητα της συνολικής μάζας του σχηματισμού είναι έως και φτωχή, δηλαδή η τιμή RMR είναι έως 30.
- Αντίθετα, όταν η βραχώμαζα θεωρείται έντονα κατακερματισμένη με $RMR \leq 20$ η παρουσία εγκοίλων σύμφωνα με την επίλυση του λογισμικού Plaxis μπορεί να προκαλέσει αστοχία της λιμνοδεξαμενής.
- Όταν στον καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο με τιμή $RMR=60$ και πάχος εδαφικού καλύμματος 6 m διερευνήθηκε η ευστάθεια πάνω σε έγκοιλα διαφόρων διαστάσεων διαπιστώθηκε ότι η κατασκευή είναι ασφαλής για έγκοιλα έως 16 m σε μήκος και ανοίγματος 2 m ενώ έγκοιλα με μήκος 18 m και άνοιγμα 2 m είναι ικανά να προκαλέσουν σοβαρές καθιζήσεις στο επίχωμα της λιμνοδεξαμενής.
- Το μήκος του εγκοίλου σε συνδυασμό με το πάχος της οροφής του εγκοίλου και την τάση εφελκυσμού επηρεάζει την ευστάθεια της λιμνοδεξαμενής.
- Για πάχη οροφής έως 3 m με υπερκείμενο εδαφικό κάλυμμα 6 m η εμφάνιση εγκοίλου δεν απειλεί την ευστάθεια του επιχώματος όταν ο λόγος h_r/L είναι μεγαλύτερος από 0.25.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**Ξενογλώσση βιβλιογραφία**

- ❖ Adamo, N. & Al-Ansari, N., 2016. Mosul Dam the Full Story: Engineering Problems. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 6(3), pp. 213-244.
- ❖ Al-Ansari, N. et al., 2017. Is the Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World? Review of previous Work and Possible Solutions. *Engineering*, 30 September, 9(10), pp. 801-823.
- ❖ Bonacci, O. & Rubinic, J., 2008. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljuncica reservoir (Istria,Croatia). *Environmental Geology*, July, pp. 339-345.
- ❖ Cooper, A. & Gutierrez, F., 2013. Dealing with gypsum karst problems:Hazards,environmental issues and planning. In: J. Shroder & A. Frumkin, eds. *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Academic Press, pp. 451-462.
- ❖ Drumm, E. C., Akturk, O., Akguk, H. & Tutluoglu, L., 2009. Stability Charts for the Collapse of Recidual Soil in Karst. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engeeniring*, 1 July, 135(7), pp. 925-931.
- ❖ Ford, D. & Williams, P., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- ❖ Goldscheider, N. et al., 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*, 21 April, Issue 28, pp. 1661-1677.
- ❖ Google Earth, n.d. *Google Earth*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://earth.google.com>
- ❖ Gutierrez, F., Cooper, A. & Johnson, K., 2008. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. *Environmental Geology*, April, 53(5), pp. 1007-1022.

-
- ❖ Gutierrez, F., Parise, M., De Waele, J. & Jourde, H., 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Elsevier*, November, Volume 138, pp. 61-88.
 - ❖ Huebner, K. H., Dewhirst, D. L., Smith, D. E. & Byrom, T. G., 2001. *The finite element method for engineers*. 4th ed. Canada: John Wiley & Sons Inc.
 - ❖ International Association of Engineering Geology, 1981. *Report of the IAEG commition on site investigations*. Aachen, s.n., pp. 185-226.
 - ❖ Kenneth, J., 2008. Gypsum-karst problems in constructing dams in the USA. *Environmental Geology*, April, pp. 945-950.
 - ❖ Milanovic, P., 2002. Subsidence hazards as a consequence of dam, reservoir and tunnel construction. *International Journal of Speleology*, January, 31(1-2), pp. 169-180.
 - ❖ Milanovic, P., 2011. Dams and Reservoirs in karst. In: P. E. van Beynen, ed. *Karst Management*. New York: Springer, pp. 47-73.
 - ❖ Milanovic, P., 2014. Hydraulic Properties of karst Groundwater and Its Impacts on Large Structures. Στο: J. Mudry, F. Zwahlen, C. Bertrand & J. LaMoreaux, επιμ. *H2Karst Research in Limestone Hydrogeology*. Switzerland: Springer International Publishing, pp. 19-48.
 - ❖ Milton, S., 2024. *National Geographic Society*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://education.nationalgeographic.org/resource/karst/>
 - ❖ Mohammadi, Z., Raeisi, E. & Bakalowicz, M., 2007. Method of leakage study at the karst dam site. A case study: Khersan 3 Dam, Iran. *Environmental geology*, June, 52(6), pp. 1053-1065.
 - ❖ Pantzartzis, P., Emmanuelidis, G., Krapp, L. & Milanovic, P., 1993. *Karst phenomena and dam construction in Greece*. Antalya, International Association of Hydrological Sciences, pp. 65-74.
-

- ❖ Pennos, C., Lauritzen, S., Pechlivanidou, S. & Sotiridis, Y., 2016. *Geomorphic constrains on the evolution of Aggitis river basin northern Greece (A preliminary report)*. Thessaloniki, Geological Society of Greece, pp. 365-373.
- ❖ Pyayt, A. L. et al., 2015. Combining Data-driven Methods with Finite Element Analysis for Flood Early Warning Systems. *ELSEVIER*, May, Volume 51, pp. 2347-2356.
- ❖ Steiakakis, E., Vafidis, A., Manoutsoglou, E. & Vavadakis, D., 2013. *Influence of geological and geotechnical conditions to design a water reservoir in karst area*. Proceedings of the 13th International Congress, XLVII (4), Chania, 5-8 September 2013, Geological Society of Greece.
- ❖ Stevanovic, Z. & Milanovic, P., 2015. Engineering challenges in karst. *ACTA Carsologica*, 44(3), pp. 381-399.
- ❖ Waele, J. D., Gutierrez, F., Parise, M. & Plan, L., 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: A review. *Geomorphology*, November, 134(1-2), pp. 1-8.
- ❖ Waltham, A. C. & Swift, G. M., 2004. Bearing capacity of rock over mined cavities in Nottingham. *Engineering Geology*, 75(1), pp. 15-31.
- ❖ Waltham, A. & Fookes, P., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, May, 36(2), pp. 101-118.
- ❖ Xeidakis, G., Torok, A., Skias, S. & Kleb, B., 2004. *Engineering Geological problems associated with karst terrains: Their investigation, monitoring and mitigation and design of engineering structures on karst terrains*. Proceedings of the 10th International Congress, XXXVI (4), Thessaloniki, 15-17 April 2004, pp. 1932-1941. Geological Society of Greece.
- ❖ Zhang, Y., Zhang, X., Wang, Z. & Zhu, W., 2020. Study on the reservoir dam slope stability considering the effect of seepage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 560(1).

- ❖ Zhang, Z. & Chen, Z., 2019. Constraint Embankment Construction to Prevent the Collapse of Underground Caves. *Advances in Civil Engineering*, February, Volume 1, pp. 1-18.
- ❖ Zhiqiang Yang, M. & Drumm, E. C., 2002. Stability evaluation for the siting of municipal landfills in karst. *Elsevier, Engineering Geology* (65), pp. 185-195.

Ελληνική βιβλιογραφία

- ❖ Βαλασόπουλος, Δ. & Δόλκας, Θ., 2001. Γενικές αρχές σχεδιασμού και μελέτης λιμνοδεξαμενών. Στο: *Γεωτεχνική μελέτη και κατασκευή λιμνοδεξαμενών*, σελ. 19-21. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- ❖ Βουδούρης, Κ., 2017. *Τεχνική Υδρογεωλογία-Υπόγεια νερά*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- ❖ Γκολούμποβιτς-Δελιγιάννη, Μ., 2011. *Καρστική γεωμορφολογική εξέλιξη στη Δυτική Ελλάδα: Η περίπτωση της περιοχής του Ξηρόμερου*. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- ❖ Γούλα, Ε., 2017. *Τεχνικογεωλογική διερεύνηση των συνθηκών αστοχίας πρανούς ιερού κελιού Ευαγγελισμού της Θεοτόκου στο Άγιο Όρος και προτάσεις μέτρων στήριξης και προστασίας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- ❖ Δ.Γκίνα-Β.Δημοπούλου, 2008. *Μη γραμμική ανάλυση βαθιών εκσκαφών με πεπερασμένα στοιχεία*. Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- ❖ Δημόπουλος, Γ., 2007. *Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων-Υδρογεωλογικές μελέτες*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη.
- ❖ Δημόπουλος, Γ., 2008. *Τεχνική Γεωλογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη.
- ❖ Ιωάννου, Ι., 1975-1976. Δολίνη "Μικρή Σπηλιά" Διδύμων Αργολίδας. *Δελτίον Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας*, 13(4-5), pp. 143-146.

-
- ❖ Καλινδέρης, Ι., 2006. *Η υδρονομία της Ελλάδας στα πλαίσια της κοινοτικής οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την διαχείριση των υδατικών πόρων*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Κανταρτζής, Θ., 2012. *Εκτίμηση κινδύνων απο φράγματα: Η περίπτωση του φράγματος Ταυρωπού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Καπλανίδης, Α., 1995. *Τεχνική Γεωλογία των λιμνοδεξαμενών*. Στο: *Γεωτεχνική μελέτη και κατασκευή λιμνοδεξαμενών*, σελ 25-32. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
 - ❖ Κολλιός, Α. & Παρισόπουλος, Γ., 2001. *Συστήματα στεγάνωσης με γεωμεμβράνες: Σχεδιασμός-Κατασκευή-Έλεγχος*. Στο: *Γεωτεχνική μελέτη και κατασκευή λιμνοδεξαμενών*, σελ 59-69. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
 - ❖ Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2022. *Γεωλογία Τεχνικών Έργων*. 2η επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
 - ❖ Λουπασάκης, Κ., 2002. *Μελέτη της συμπεριφοράς του σώματος του φράγματος χωμάτων φραγμάτων με την χρήση μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Μανούτσογλου, Ε. και συν., 2014. *Τα αλλουβιακά ριπίδια της πόλης του Ομαλού, Δυτική Κρήτη*. 10^ο Διεθνές Γεωγραφικό Συνέδριο, Θεσσαλονίκη, 22-24 Οκτωβρίου 2014, σελ 845-855.
 - ❖ Μαυρούλια, Π., 2021. *Δημιουργία μοντέλων δικτύων ροής για το χωμάτινο φράγμα Πηνειού Ηλείας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
 - ❖ Μόσιαλος, Γ., 2002. *Οικονομοτεχνική ανάλυση λιμνοδεξαμενής με αναλυτική ιεραρχική διαδικασία*. Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
 - ❖ Μπουκοβάλας, Γ., 2006. *Σημειώσεις Υπολογιστικής Γεωτεχνικής*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
 - ❖ Ντουνιάς, Γ., 1995. *Σχεδιασμός και κατασκευή αναχωμάτων λιμνοδεξαμενών*. Στο: *Γεωτεχνική μελέτη και κατασκευή λιμνοδεξαμενών*, σελ 51-58. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
-

-
- ❖ Παλάτος, Ε., 2015. *Υδρογεωλογικά και περιβαλλοντικά θέματα σχεδιασμού λιμνοδεξαμενών*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη, Κ., 2007. *Καρστικά φαινόμενα & γένεση σπηλαίων*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://ese.edu.gr/wp-content/uploads/media/seminars/sem_notes/first_degree/spileogenesis.pdf
 - ❖ Παπαπέτρου-Ζαμάνη, Α. & Βερυκίου, Ε., 1977. Καρστικά φαινόμενα της Ελλάδος: Η λιμνοδολίνη Κουρνά (Κορησία) Κρήτης. *Δελτίο Ελληνικής Σπηλαιολογικής Εταιρείας*, 14 (1), σελ 93-99. Αθήνα.
 - ❖ Παπασπύρου, Σ., 1995. *Εδαφοτεχνικές έρευνες σε λιμνοδεξαμενές*. Στο: *Γεωτεχνική μελέτη και κατασκευή λιμνοδεξαμενών*, σελ 33-40. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
 - ❖ Στειακάκης, Ε., 2019. *Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας - Εδαφομηχανικής*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
 - ❖ Στειακάκης, Ε. Κ., 2003. *Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους: Έρευνα γεωτεχνικών παραμέτρων και κινητικότητας εδαφών στο λιγνιτικό πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου*. Διδακτορική Διατριβή. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
 - ❖ Στουρνάρας, Γ. & Σταυροπούλου, Μ., 2011. *Τεχνική Γεωλογία*. σ.λ.: Εκδόσεις Τζιόλα.
 - ❖ Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος, 2001. *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000*. Αθήνα: Εκτυπωτική Αττικής Α.Ε.
 - ❖ Τομπουλίδου, Σ., 2013. *Έλεγχος της διακινδύνευσης έργων αντιστήριξης με ενόργανες καταγραφές*, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Τομπουλίδου, Σ., 2022. *Μετακινήσεις σε έδαφος και κτίρια απο την κατασκευή διαφραγματικών τοίχων*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
 - ❖ Τσακίρης, Δ. Χ., 2017. *Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης παράκτιων υφάλμυρων πηγών*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
-

- ❖ Τσουκαλάς, Ν. & Παπαδοπούλου-Βρυνιώτη, Κ., 2004. *Το κάρστ στην Άνω Βλασία Αχαΐας και η ενότητα Ωλονού-Πίνδου ως παράγοντας διαμόρφωσης αυτού*. Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, XXXVI(2), Θεσσαλονίκη 15-17 Απριλίου 2004, σελ. 1068-1076. Ελληνική Γεωλογική Εταιρεία.
- ❖ Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, 2006. *Τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές*. 2η Έκδοση. Διαθέσιμο στο: https://www.ekke.gr/projects/estia/gr_pages/F_synerg/mikra%20fragmata_yp.georgias/mikra%20fragmata.pdf
- ❖ Χουλιάρης, Ι., 2000. *Υδραυλική διάβρωση: Μελέτη της διαβρωσιμότητας των συνεκτικών γεωολικών*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.
- ❖ Χρηστάρας, Β., Δημητρίου, Α., Λεμονή, Ε. & Λουπασάκης, Κ., 2006. *Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές Εδαφομηχανικής*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Ηλεκτρονικές πηγές

- ❖ <https://damfailures.org/case-study/quail-creek-dike-utah-1989>
- ❖ <https://earth.google.com>
- ❖ <https://www.elinyae.gr>
- ❖ <https://www.statistics.gr>