

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

«ΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ
ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΥΔΑΤΩΝ -
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΟΜΒΡΟΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΠΟ ΞΕΡΟΛΙΘΙΑ»

ΚΕΧΑΓΙΑ ANNA

Επιβλέπουσα: Δρ. Σταυρουλάκη Μαρία, Λέκτορας

ΧΑΝΙΑ, 2012

Πρόλογος

-Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τομέα Μηχανικής, του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θέμα της διατριβής είναι η αποτίμηση των παραδοσιακών πρακτικών που σχετίζονται με τη συλλογή και διαχείριση όμβριων υδάτων και η παρουσίαση των προτάσεων αποκατάστασης τέτοιων παραδοσιακών κατασκευών στο πλαίσιο προστασίας ιστορικών μνημείων και στην εξέταση της δυνατότητας αξιοποίησης τους ως εναλλακτική μέθοδο για την αειφόρο διαχείριση υδάτινων πόρων.

Στην παρούσα διερεύνηση εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης των εξεταζόμενων κατασκευών υπό στατικές συνθήκες φόρτισης και τη διεξαγωγή σχετικής παραμετρικής ανάλυσης.

Η εκπόνηση της διατριβής έγινε υπό την εποπτεία των ακόλουθων μελών του Τομέα Μηχανικής, τους οποίους και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- **Σταυρουλάκη Μαρία.** Λέκτορα του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης και επιβλέπουσα της παρούσας εργασίας, για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε στην εκπόνηση της έρευνας.
- **Προβιδάκη Κωνσταντίνο.** Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.
- **Τσομπανάκης Ιωάννης.** Αναπληρωτή Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μπομπολάκη Γεώργιο, ο οποίος συμμετείχε στην έρευνα πεδίου και ήταν υπεύθυνος φωτογραφίας.

Και τέλος θέλω να ευχαριστήσω τη μητέρα μου, για την ώθηση που μου έδωσε και την υποστήριξη της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Χανιά, 20 Μαρτίου 2012

Κεχαγιά Άννα

Περίληψη

Θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η παρουσίαση και αποτίμηση των παραδοσιακών πρακτικών που σχετίζονται με τη συλλογή και διαχείριση όμβριων υδάτων και η παρουσίαση προτάσεων αποκατάστασης τέτοιων παραδοσιακών κατασκευών στο πλαίσιο της προστασίας ιστορικών μνημείων και στην εξέταση της δυνατότητας αξιοποίησης τους ως εναλλακτική μέθοδο για την αειφόρο διαχείριση υδάτινων πόρων.

Η Συλλογή Όμβριων Υδάτων (Rain Water Harvesting - RWH) είναι ένας όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει ποικίλες τεχνικές για την εκμετάλλευση των βροχοπτώσεων. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, όπου παρουσιαζόταν το πρόβλημα της ανεπάρκειας υδάτινων πόρων, αναπτύχθηκαν διαφορετικές τεχνικές και τοπικά συστήματα RWH. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τέτοιων συστημάτων είναι η αντοχή τους στο χρόνο, η προσαρμοστικότητα τους στις ξεχωριστές υδρογεωλογικές και κλιματικές συνθήκες της περιοχής, συνεπώς και η συμβατότητά τους με την αειφορία των υδάτων και την προστασία του τοπίου.

Στη λειτουργία των παραπάνω συστημάτων, η χρήση της πέτρας αποτέλεσε από την προϊστορία το βασικό δομικό υλικό. Στη σύγχρονη εποχή, οι περισσότερες παραδοσιακές κατασκευές λιθοδομής και ξερολιθικές κατασκευές που σχετίζονται με τη συλλογή και διαχείριση νερού και την προστασία του εδάφους τίθενται σε κίνδυνο κατάρρευσης λόγω της εγκατάλειψής τους. Μέσω έρευνας πεδίου που πραγματοποιήθηκε σε περιοχές του νομού Χανίων εντοπίστηκαν συστήματα τα οποία τυπικά παραμένουν λειτουργικά, αλλά από τη στιγμή που δεν είναι αξιοποιήσιμα και δεν εφαρμόζονται σε αυτά οι κατάλληλες καινοτόμες τεχνικές έτσι ώστε να προστατευθούν και να βελτιωθούν, οδηγούνται σε πλήρη αχρηστία. Κατά συνέπεια, με την απομάκρυνση του ανθρώπου από τις παραδοσιακές τεχνικές διαχείρισης υδάτων, διακόπτεται η διαδικασία διατήρησης, διάδοσης και εξέλιξης της

υφιστάμενης γνώσης. Παράλληλα, περιορίζεται και η τεχνογνωσία πάνω σε παραδοσιακές τεχνικές χτισίματος κατασκευών από πέτρα, που βασίζονταν στην εμπειρική γνώση των τεχνιτών, όπως είναι η τεχνική κατασκευής υδατοδεξαμενών από ξερολιθιά.

Για την αποτίμηση μιας σύνθετης κατασκευής, όπως οι προαναφερθείσες υδατοδεξαμενές, είναι απαραίτητη η χρήση προηγμένων υπολογιστικών μεθοδολογιών. Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) στις ιστορικές κατασκευές και συγκεκριμένα στους τοίχους αντιστήριξης ξερολιθιάς μπορεί να συμβάλλει στην κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας τους και να οδηγήσει σε αποτελεσματικές προτάσεις αποκατάστασης με σεβασμό στον ιστορικό χαρακτήρα τους.

Στην παρούσα διερεύνηση εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης τέτοιων φορέων υπό στατικές συνθήκες φόρτισης. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διάφορα προσομοιώματα και πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για διαφορετικές ιδιότητες του αντιστηριζόμενου εδάφους και χαρακτηριστικά του τοιχώματος της ομβροδεξαμενής.

Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη διεξαχθείσα έρευνα είναι ότι με τις κατάλληλες επεμβάσεις και την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας υπάρχει η δυνατότητα αποκατάστασης, βελτίωσης και επαναλειτουργίας παραδοσιακών έργων διαχείρισης νερού. Τέλος, με την κατάλληλη θεσμική υποστήριξη, η επιλογή παραδοσιακών συστημάτων ως εναλλακτική τεχνολογία διαχείρισης υδάτων και προστασίας του τοπίου, μπορεί να παρέχει κοινωνικοοικονομικά πλεονεκτήματα συντελώντας στην αειφόρο ανάπτυξη ενός τόπου.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	iii
Πίνακας Περιεχομένων.....	v
Κεφάλαιο 1 ^ο - Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 ^ο - Τεχνολογία Συλλογής Όμβριων Υδάτων.....	6
2.1 Εκτίμηση Υδατικών Αναγκών και Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.....	6
2.2 Συλλογή Όμβριων Υδάτων - RWH.....	8
2.3 Ταξινόμηση Συστημάτων RWH.....	10
2.3.1 Εδαφικές Επιφάνειες Απορροής.....	11
2.3.2 Συλλογή Νερού Από τη Στέγη.....	11
2.4 Συστήματα Αποθήκευσης Όμβριων και Κατακράτησης στο Έδαφος.....	13
2.4.1 Στεγανές Δεξαμενές και Στέρνες.....	14
2.4.2 Τεχνικές Εμπλουτισμού Υ.Ο.....	16
2.4.3 Τεχνικές Κατακράτησης Όμβριων στο Έδαφος – RFWH.....	18
2.4.4 Αναβαθμοί.....	22

2.5 Κοινωνικοοικονομικές και Περιβαλλοντικές Προεκτάσεις.....	24
Κεφάλαιο 3^ο - Ιστορική Αναδρομή της Τεχνολογίας RWH.....	28
3.1 Επισκόπηση των Κύριων Τεχνολογιών από την Μινωική μέχρι την Ρωμαϊκή Περίοδο.....	28
3.1.1 Μινωική Εποχή (3500 – 1200 π.Χ.).....	30
3.1.2 Μυκηναϊκή Εποχή (1600 – 1100 π.Χ.).....	36
3.1.3 Κλασσική Εποχή (500 – 336 π.Χ.) – Η Αστική Παροχή Ύδατος στην Αθήνα.....	37
3.1.4 Ρωμαϊκή Εποχή (146 π.Χ. – 323 μ.Χ.).....	38
3.1.4.1 Υδροδότηση στην Πολυρρήνια.....	40
3.1.4.2 Υδροδότηση στην Άπτερα.....	43
3.1.5 Πρωτοβυζαντινή Εποχή (4 ^{ος} – 5 ^{ος} μ.Χ.).....	44
3.2 Η Αξία της Παράδοσης – Αναφορά σε Παραδοσιακά Συστήματα του νομού Χανίων.....	46
3.2.1 Θέρισος.....	47
3.2.2 Δήμος Βάμου.....	50
3.2.3 Στέρνες.....	51
3.2.4 Αναβαθμοί.....	52
Κεφάλαιο 4^ο - Ξερολιθικοί Τοίχοι Αντιστήριξης.....	53
4.1 Γενική Περιγραφή.....	53
4.2 Μηχανική Συμπεριφορά Ξερολιθικού Τοίχου Αντιστήριξης.....	57
4.3 Ευστάθεια Τοιχωμάτων.....	58
4.3.1 Οριακές Καταστάσεις Αντοχής.....	59
4.3.2 Συνθήκες Στράγγισης Εδάφους και Υπολογισμός Ωθήσεων Γαιών.....	61

4.3.2.1	Ωθήσεις Rankine.....	62
4.3.2.2	Ωθήσεις Coulomb.....	66
Κεφάλαιο 5^ο - Μελέτη Ξερολιθικών Τοίχων Υδατοδεξαμενών με τη		
	Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	68
5.1	Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων σε Ξερολιθικούς	
	Τοίχους Αντιστήριξης.....	68
5.1.1	Διερεύνηση Επίδρασης Κλίσης Τοιχωμάτων.....	69
5.1.2	Διερεύνηση Επίδρασης Γωνίας Τριβής.....	69
5.1.3	Διερεύνηση Επίδρασης της Διαστρωμάτωσης Εδάφους σε σχέση	
	με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τοίχου.....	70
5.1.4	Προσομοίωση Παραδοσιακής Ομβροδεξαμενής.....	71
5.2	Προσομοίωση Εδάφους.....	74
5.2.1	Κριτήριο Αστοχίας Von Mises.....	74
5.2.2	Κριτήριο Αστοχίας Mohr - Coulomb.....	75
5.3	Προσομοίωση Δομικού Φορέα.....	76
5.4	Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών.....	78
5.5	Περιγραφή Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	80
Κεφάλαιο 6^ο - Αποτελέσματα Ανάλυσης.....		
6.1	Επίδραση της Κλίσης των Τοιχωμάτων για Αστράγγιστες Συνθήκες	
	Εδάφους.....	84
6.2	Επίδραση Γωνίας Τριβής για Αργιλώδες Έδαφος.....	89
6.3	Επίδραση της Διαστρωμάτωσης και των Μηχανικών χαρακτηριστικών	
	του Τοίχου.....	94
6.4	Προσομοίωση Παραδοσιακής Ομβροδεξαμενής.....	96

Κεφάλαιο 7^ο -	Συμπεράσματα, Συστάσεις και Μελλοντικές	
	Προτάσεις.....	98
7.1	Σημασία της Διατήρησης Παραδοσιακών Συστημάτων	
	Διαχείρισης Όμβριων.....	98
7.2	Μέθοδοι Αποκατάστασης Παραδοσιακών Κατασκευών	
	Ξερολιθιάς.....	103
Βιβλιογραφία.....		107

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Σήμερα η διαχείριση υδάτινων πόρων εστιάζεται κυρίως σε επιφανειακούς υδατοταμιευτήρες (λίμνες, ποτάμια) ή στους υπόγειους υδάτινους πόρους [1]. Η ταχεία αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με την εκβιομηχάνιση, την αστικοποίηση, την εντατικοποίηση της γεωργίας και τις υψηλές απαιτήσεις σε νερό του σημερινού τρόπου ζωής, έχει ως αποτέλεσμα μια παγκόσμια κρίση νερού. Επίσης εκτενής είναι η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία οδηγεί σε προβλήματα υφαλμύρινσης και έλλειψης νερού, ενώ κοινά προβλήματα σε όλο τον κόσμο είναι ακόμη η μόλυνση του πόσιμου νερού και η ρύπανση που παρουσιάζεται σε ποτάμια, λίμνες και ταμιευτήρες από νιτρικά άλατα και βαρέα μέταλλα. Η επάρκεια των υδάτινων πόρων αποτελεί πλέον σημαντική εθνική, τοπική και κοινωνική προτεραιότητα σε πολλές περιοχές του κόσμου [2].

Η Ελλάδα είναι ανάμεσα στις χώρες του πλανήτη οι οποίες υποφέρουν από ξηρασίες και τοποθετείται στη λίστα υψηλού κινδύνου των διεθνών οργανισμών [3]. Το πρόβλημα της έλλειψης ύδατος παρουσιάζεται σε ολόκληρη την ηπειρωτική Ελλάδα και ιδιαίτερα στα νησιά, ενώ έντονο είναι το πρόβλημα λειψυδρίας που αντιμετωπίζει και η Κρήτη, όπου οι διάφορες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις έχουν χειροτερέψει την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση του νερού στην περιοχή [4]. Καθώς η Ελλάδα δεν αποτελεί χώρα με έλλειψη γλυκού νερού, αλλά χώρα όπου γίνεται λανθασμένη διαχείριση του πολύτιμου αυτού αγαθού, πρέπει να δοθεί η δέουσα σημασία στην αειφόρο διαχείριση των υδάτων [5]. Αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, η αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής κλιμακώνει την ανάγκη αναζήτησης καινοτόμων λύσεων και εναλλακτικών

τεχνολογιών που να επιτρέπουν την ανάπτυξη και την ανθρώπινη ευημερία χωρίς την υπονόμευση των υδάτινων οικοσυστημάτων [1].

Οι εναλλακτικές τεχνολογίες αναφέρονται σε τεχνολογίες οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με τις αντίστοιχες σύγχρονες κυρίαρχες τεχνολογίες και στοχεύουν στην εκμετάλλευση των φυσικών πόρων με ελάχιστη επιβάρυνση στο περιβάλλον, με μειωμένο κόστος και με την δυνατότητα ελέγχου των διαδικασιών που προτείνονται [6]. Στις εναλλακτικές τεχνολογίες περιλαμβάνεται και η Συλλογή Όμβριων Υδάτων (Rain Water Harvesting - RWH).

Σε διαφορετικά μέρη του κόσμου αναπτύχθηκαν διαφορετικές τεχνικές RWH και εγχώρια συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ευελιξία τους και την αντοχή τους στο χρόνο. Η ευελιξία τους εκφράζεται από την εύκολη ενσωμάτωσή τους με άλλα συστήματα εκμετάλλευσης πόρων καθώς και με την εκτεταμένη υιοθέτησή τους από διαφορετικές ομάδες πολιτισμών σε ξεχωριστά μέρη του πλανήτη. Η αντοχή τους φαίνεται από τις ρίζες τους στην αρχαιότητα και την ικανότητά τους να αντέχουν μέσα σε απότομες κοινωνικές αλλαγές [7].

Η λεκάνη της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από περιοχές όπου οι άνθρωποι αντιμετώπιζαν την έλλειψη επαρκών υδάτινων πόρων για τις ανάγκες τους. Στα νησιά της Μεσογείου υπάρχει μεγάλη έλλειψη υπόγειου και επιφανειακού νερού και ακόμη και οι πιο βόρειες περιοχές υποβάλλονται σε ένα μεταβαλλόμενο και καταστροφικό περιβάλλον. Συνεπώς είναι διαδεδομένες οι περισσότερες από τις παραδοσιακές τεχνικές που σχετίζονται με την οργάνωση του νερού για τη συλλογή, διατήρηση και εκτροπή του καθώς και συστήματα για την προστασία των πλαγιών και του εδάφους, τα οποία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με το περιβάλλον όπου αναπτύχθηκαν. Ερείπια από δεξαμενές όμβριων στην Αρχαία Ελλάδα χρονολογούνται 4000 με 5000 χρόνια πίσω. Μερικές δεξαμενές αποτελούν άρτιες κατασκευές και λειτουργούσαν για αιώνες, ενώ οι περισσότερες φαίνεται να αποτελούσαν την κύρια πηγή υδάτινων πόρων [8]. Επίσης, το πιο διαδεδομένο σύστημα στη περιοχή της Μεσογείου είναι οι αναβαθμοί, με τους οποίους μέσα στα χρόνια έχει αντιμετωπιστεί η διάβρωση σε πλαγιές και λόφους συμβάλλοντας στη διαμόρφωση του τοπίου. Οι αναβαθμοί συναντώνται από την Μέση Ανατολή μέχρι την Ελλάδα και από την Ιταλία μέχρι την Πορτογαλία [9].

Καθώς στις περισσότερες ξηρές περιοχές του κόσμου οι διαθέσιμοι πόροι νερού που λαμβάνονται από τους χείμαρρους, τα ποτάμια και το υπόγειο νερό δεν θα είναι αρκετό για την κάλυψη των αναγκών των αγροτικών και αστικών περιοχών, είναι απαραίτητη η επανεκτίμηση της αξίας συγκεκριμένων παραδοσιακών μεθόδων συλλογής νερού και

άρδευσης προκειμένου να αμβλυνθεί η μελλοντική έλλειψη νερού. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς μεγάλες δαπάνες, προσφέρουν καλές προοπτικές για μελλοντική ανάπτυξη και η απόδοση τους έχει δοκιμαστεί θετικά μέσα στους αιώνες [10].

Οι ξερολιθικές κατασκευές αποτέλεσαν από την προϊστορία ένα εργαλείο για τον έλεγχο και τον εξανθρωπισμό του χώρου. Σημαντική κατηγορία ξερολιθικών κατασκευών, στην οποία επικεντρώνεται η παρούσα διατριβή, αποτελούν οι τοίχοι αντιστήριξης, για τη διαμόρφωση αναβαθμίδων και κατασκευή στερνών και πηγαδιών με σκοπό τη συγκράτηση του γόνιμου εδάφους ώστε να μη διαβρωθεί και παρασυρθεί καθώς και τη συγκράτηση και συλλογή όμβριων υδάτων, επιτρέποντας την ανάπτυξη της γεωργίας σε περιοχές με αφιλόξενα εδάφη και δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες [11].

Η εντατική χρήση της πέτρας οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρέχει ως υλικό δόμησης, ένα από τα οποία είναι η αντοχή [12]. Καθώς η τεχνολογική εξέλιξη και η εκμηχάνιση των καλλιεργειών, απομάκρυνε τους ανθρώπους από τη χρήση των προβιομηχανικών αυτών κατασκευών και φυσικά και από τη χρήση της τεχνικής αυτής, η τεχνική κατασκευής ξερολιθιάς λησμονιέται και οι ήδη υπάρχουσες κατασκευές απειλούνται από την κατάρρευση [13]. Επιπλέον, μέχρι σήμερα η πειραματική διερεύνηση πάνω στις ξερολιθικές κατασκευές είναι περιορισμένη, το οποίο συνεπάγεται και έλλειψη επαρκών πειραματικών δεδομένων, γεγονός το οποίο περιόρισε την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών αυτών με τη χρήση αριθμητικής ανάλυσης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά ξερολιθικών τοίχων αντιστήριξης, τους συντελεστές ασφαλείας έναντι κατάρρευσης και τα δεδομένα σχεδιασμού [14].

Μέσω έρευνας πεδίου που πραγματοποιήθηκε στο νομό Χανίων εντοπίστηκαν συστήματα τα οποία τυπικά παραμένουν λειτουργικά αλλά, από τη στιγμή που δεν είναι αξιοποιήσιμα, δεν εφαρμόζονται σε αυτά οι κατάλληλες καινοτομίες ώστε να εξελιχθούν και να βελτιωθούν, το οποίο οδηγεί στον αφανισμό τους. Είναι σημαντικό η διάσωση και διατήρηση τους να ακολουθεί μια σωστή και ολοκληρωμένη μεθοδολογία, η οποία να βασίζεται στη θεωρητική κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών των δομών, στη σωστή πληροφορία για την κατάσταση του προς εξέταση αντικειμένου και στα αυθεντικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών, ώστε οι επεμβάσεις για την ενίσχυση της αντοχής των ήδη υφιστάμενων έργων ή την αποκατάσταση των τμημάτων που κινδυνεύουν από κατάρρευση να πραγματοποιείται με σεβασμό στα υπάρχοντα υλικά, στον αρχικό τρόπο δόμησης και λειτουργίας, και αποφεύγοντας υλικά και τεχνικές που θα αλλοιώσουν την φύση των μνημειακών αυτών κατασκευών [11].

Η μηχανική συμπεριφορά των διαφορετικών τύπων τοιχοποιίας έχει γενικά ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα: μια πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή. Αυτή η ιδιότητα είναι τόσο σημαντική που έχει καθορίσει τη μορφή των αρχαίων κατασκευών. Η ευστάθεια των ξερολιθοδομών, εξαρτάται από παραμέτρους που δε λαμβάνονται υπόψη στις συμβατικές μεθόδους ανάλυσης, όπως για παράδειγμα στη μέθοδο οριακής ισορροπίας, εξαιτίας του γεγονότος ότι η συμπεριφορά παραμόρφωσης των ξερολιθιών περιλαμβάνουν, [15]:

- μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις,
- την αλληλεπίδραση ανάμεσα στον τοίχο, στον εδαφικό σχηματισμό και τη βάση,
- τη διαστρωμάτωση του εδαφικού σχηματισμού,
- τη συμπεριφορά των αρμών μέσα στον τοίχο.

Επίσης η μοντελοποίηση τοίχου ξερολιθιάς είναι δύσκολη, καθώς πίσω από τη φαινομενική κανονικότητα που παρατηρείται στην πρόσοψη του τοιχώματος, κρύβονται πολλές μεταβολές. Αυτές συνδέονται με τη χρήση φυσικών υλικών που διατίθενται σε τοπικό επίπεδο, οδηγώντας σε κάποια ανομοιογένεια της γεωμετρίας, της διάταξης και της αντοχής των διάφορων πετρών του τοίχου. [16,17]. Η ανάπτυξη σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων, όπως είναι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην εξέλιξη της έρευνας στην ανάλυση ιστορικών κατασκευών [18, 19].

Η χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για την αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία και την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας και τον προσδιορισμό του βαθμού σταθερότητας απαιτεί εκτός από ένα ακριβές γεωμετρικό μοντέλο, την ορθή προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών (καταστατικοί νόμοι υλικού) και την σωστή επιλογή του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων και της μεθόδου ανάλυσης [20, 21]. Η μη γραμμική συμπεριφορά και των δύο συστατικών (εδάφους και τοίχου) πρέπει να ληφθεί υπόψη για να έχουμε μία ρεαλιστική προσομοίωση ικανή να περιγράψει τη ρηγμάτωση, την ολίσθηση, και τη συντριβή του υλικού [22, 23].

Συνεπώς αναπτύχθηκαν διαφορετικά μοντέλα για την διεξαγωγή παραμετρικής ανάλυσης της τοιχοποιίας και έγινε προσεκτική συλλογή των πειραματικών δεδομένων. Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία έχει την ακόλουθη δομή:

Στο 2^ο Κεφάλαιο αναλύεται η τεχνολογία RWH, όπως επίσης οι στόχοι και τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής και οι βασικές τεχνικές εφαρμογής της. Επίσης στο τέλος του κεφαλαίου αναλύονται οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, οι οποίοι θεωρούνται

βασικοί για την επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας, ιδιαίτερα στη γεωργία και οι περιβαλλοντικές προεκτάσεις.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή από την αρχαιότητα μέχρι τη νεώτερη εποχή σε συστήματα συλλογής και διαχείρισης υδάτων στον Ελλαδικό χώρο εστιάζοντας στην περιοχή της Κρήτης, με σκοπό να αναδειχτούν οι λύσεις που βρήκαν οι άνθρωποι στο παρελθόν για να καλύψουν τις ανάγκες τους σε νερό καθώς και να φανεί η αδιάκοπη εξέλιξη των συστημάτων αυτών μέσα στο χρόνο μέσα από την καινοτόμα δημιουργική δύναμη των ανθρώπων.

Το 4^ο κεφάλαιο εστιάζει στο θεωρητικό υπόβαθρο, όπου εξετάζεται αρχικά η παραδοσιακή τεχνική δόμησης τοίχων αντιστήριξης ξερολιθιάς, οι οποίοι σχετίζονται με την κατασκευή αναβαθμών και τοιχωμάτων ομβροδεξαμενών και αναλύεται η θεωρία σχετικά με τις μηχανικές τους ιδιότητες και τον έλεγχο ευστάθειας τους.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύεται η εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένης Ανάλυσης για την μοντελοποίηση των ξερολιθικών τοίχων αντιστήριξης και την προσομοίωση της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

Χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατα μοντέλα και μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην συμπεριφορά του τοίχου, όπως η κλίση του τοίχου ως προς τη κατακόρυφο για αστράγγιστες συνθήκες αργιλώδους εδάφους, η γωνία τριβής αργιλώδους εδαφικού σχηματισμού, η διαστρωμάτωση ανάμεσα σε τοιχώματα με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των λίθων (επαρκής σύνδεση μεταξύ των λίθων -συνεχές μέσο, δυνατότητα αποκόλλησης μεταξύ των λίθων - λίθοι σε επαφή)

Στην μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών συλλέχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία πληροφορίες και πειραματικά δεδομένα σχετικά με τις ξερολιθιές καθώς και με την χρήση τους ως τοίχοι δεξαμενών. Επιπλέον για τους λίθους των τοιχωμάτων του μοντέλου που προσομοιώνει παραδοσιακή ομβροδεξαμενή ελήφθησαν δοκίμια των λίθων από ομβροδεξαμενές που εξετάστηκαν στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος αποκατάστασης ομβροδεξαμενών στο Ν. Λασιθίου, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης με ταυτόχρονη μέτρηση του Μέρους Ελαστικότητα (E) και σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (Brazilian test), στο Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης [11].

Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Πεπερασμένης Ανάλυσης και, τέλος, το 7^ο Κεφάλαιο αφορά τα συμπεράσματα, τις συστάσεις και τις μελλοντικές προτάσεις που προκύπτουν συνολικά από την παραπάνω έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο

Τεχνολογία Συλλογής Όμβριων Υδάτων

2.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η κατανομή πληθυσμού και η πυκνότητα είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων. Η αύξηση της αστικοποίησης μεγαλώνει τη ζήτηση νερού και μπορεί να οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των τοπικών υδάτινων πόρων, ενώ το υψηλότερο βιοτικό επίπεδο αλλάζει συνεχώς τη ζήτηση του νερού. Αυτό αντικατοπτρίζεται κυρίως στην αύξηση της οικιακής χρήσης νερού, ιδιαίτερα για την προσωπική υγιεινή. Το περισσότερο από τη χρήση του νερού στα νοικοκυριά είναι : WC (33%), μπάνιο και ντους (20- 32 %) και για πλυντήρια ρούχων και για πλυντήρια πιάτων (15%). Το ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα και για πόσιμο είναι (3%), ελάχιστο σε σύγκριση με τις άλλες χρήσεις. Δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για την Ελλάδα, αλλά υπολογίζεται για το έτος 2006 ότι η ημερήσια κατανάλωση κυμαίνεται στα 200 lt/ημέρα/ κάτοικο, το οποίο αλλάζει ανάλογα με την περιοχή της Ελλάδος.

Η βιομηχανία των τουριστών, απαιτεί επίσης μεγάλες ποσότητες νερού, με τη μέγιστη κατανάλωση να γίνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου αιχμής. Ο νομός Χανίων είναι ένας από τους πρώτους προορισμούς για διακοπές, τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή περίοδο. Το 1999, ο συνολικός αριθμός τουριστών στην Κρήτη, ήταν μεγαλύτερος από 2

εκατομμύρια. Η τουριστική χρήση του νερού είναι γενικά υψηλότερη από ότι η χρήση νερού από τους μόνιμους κατοίκους. Ένας τουρίστας καταναλώνει περίπου 300 lt/day τη στιγμή που η κατανάλωση στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά είναι περίπου 150 – 200 lt/day. Επιπλέον ψυχαγωγικές δραστηριότητες όπως πισίνες, γκολφ, συμβάλλουν στην άσκηση πίεσης στους υδάτινους πόρους.

Οι αγροτικές καλλιέργειες αποτελούν τον κυριότερο καταναλωτή νερού, με συμμετοχή που ανέρχεται στο 70% σε παγκόσμιο επίπεδο, πάνω από 80% στις περισσότερες χώρες της Μεσογείου και κοντά στο 87% στην Ελλάδα, όπου η αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων υπήρξε ραγδαία κατά τα τελευταία 50 χρόνια. Εκτιμάται ότι κατά τη 10ετία του '40 οι αρδευόμενες εκτάσεις ήταν κάπου μεταξύ 2 και 2,5 εκατομμύριων στρεμμάτων, για να ξεπεράσει σήμερα τα 13 εκατομμύρια. Αυτό συντέλεσε στην αλματώδη αύξηση της γεωργικής παραγωγής [24].

Το επιφανειακό νερό από τα ποτάμια, τα ρυάκια και τις φυσικές λίμνες ή τεχνητές λίμνες συλλογής ύδατος είναι το ευκολότερα διαθέσιμο νερό και μεταφέρεται στους αγρούς και στις αστικές περιοχές με υπαίθρια κανάλια ή με σωλήνες, ενώ τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η χρήση των υπόγειων νερών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην Ελλάδα υπάρχουν 150000 καταγεγραμμένες ιδιωτικές γεωτρήσεις που ανεξέλεγκτα αντλούν νερό από τους υπόγειους υδροφορείς με όλα τα γνωστά αποτελέσματα και επιπτώσεις (θεσσαλικός κάμπος, Βοιωτία κτλ), οπότε είναι δύσκολη η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων [4].

Η αγροτική ανάπτυξη (γεωργία και κτηνοτροφία) με τον τουρισμό, τον τοπικό πολιτισμό και το περιβάλλον είναι συγκοινωνούντα δοχεία. Κατά τη διάρκεια της θερμής και ξηρής περιόδου η ταυτόχρονη αύξηση της ζήτησης τόσο από τη γεωργία όσο και το τουρισμό και την οικιακή χρήση δημιουργεί έντονες πιέσεις στη χρήση του νερού. Η έλλειψη σε ποσότητα θα πρέπει να συνδυασθεί και με την υποβάθμιση της ποιότητας λόγω της μόλυνσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Ο συνδυασμός και ο πλέον αδύναμος κρίκος των συγκοινωνούντων δοχείων είναι το έδαφος. Ο συνδυασμός της διάβρωσης και της κακής αγροτικής πρακτικής δημιουργεί έλλειμμα στο έδαφος σε άνθρακα και ιχνοστοιχεία που είναι απαραίτητα για τη γονιμότητα του εδάφους, άρα και την ποιότητα των προϊόντων και την υγεία μας. Μετρήσεις σε παραγωγικά εδάφη σ' όλη την Ελλάδα δείχνουν συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα πολύ κάτω από 2% και στις περισσότερες περιπτώσεις κάτω του 1% (στάδιο προ-ερημοποίησης) [6, 9]. Το 49,1% του Ν. Χανίων είναι περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές και απειλούνται από την ερημοποίηση κάτω από

σημαντική κλιματική αλλαγή, αν εφαρμοστεί κάποιος ειδικός συνδυασμός χρήσεων γης ή δε διαχειρίζεται σωστά [25].

Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής μέσα από την οποία [26]:

- Τα ακραία φαινόμενα έντονης βροχόπτωσης επιδεινώνονται.
- Οι μέσες βροχοπτώσεις μειώνονται.
- Η συχνότητα και η ένταση ανομβριών αυξάνεται.
- Η ερημοποίηση επιδεινώνεται.
- Η διάβρωση του εδάφους επιδεινώνονται.

Έχει κατά συνέπεια ιδιαίτερη βαρύτητα η διερεύνηση δυνατοτήτων εξοικονόμησης και ορθολογικής διαχείρισης νερού .

2.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ - RWH

Στην Ελλάδα οι βροχοπτώσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, και συγκεντρώνονται κυρίως τους χειμερινούς μήνες, ενώ η περίοδος ξηρασίας εκτείνεται περισσότερο από έξι μήνες. (Μάιος με Οκτώβριος). Υπολογίζεται ότι, από τη συνολική πτώση στις πεδιάδες το χρόνο, περίπου 65% χάνεται σαν εξατμισοδιαπνοή, 21% απορροή στη θάλασσα και μόνο το 14% πηγαίνει για επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων. Η εξατμισοδιαπνοή της θερινής περιόδου είναι ιδιαίτερα υψηλή (πλησιάζοντας το 1m) ενώ οι βροχοπτώσεις τείνουν να είναι μηδενικές [24]. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται η αξιοποίηση των όμβριων υδάτων ως εναλλακτικό τρόπο εξοικονόμησης νερού και αειφόρου διαχείρισης των υδάτινων πόρων.

Η Συλλογή Όμβριων Υδάτων είναι ένας συλλογικός όρος ο οποίος περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές τεχνικές για την εκμετάλλευση των βροχοπτώσεων [1]. Συγκεκριμένα ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία η απορροή των όμβριων συγκεντρώνεται από μία επιφάνεια απορροής σε μια περιοχή –στόχος, περιλαμβάνοντας τεχνικές κατακράτησης νερού στο υπέδαφος ή/και την αποθήκευσή του σε τεχνητούς υδατοταμιευτήρες (λιμνοδεξαμενές) και σε επιφανειακές ή υπόγειες στεγανές δεξαμενές και στέρνες.

Στην εκμετάλλευση των όμβριων υδάτων ως πηγή νερού σημαντική είναι η εφαρμογή κατάλληλης τεχνολογίας RWH, η οποία είναι ιδιαίτερη για κάθε περιοχή. Τα συστήματα συλλογής ποικίλουν από απλούς τύπους για οικιακή χρήση σε μεγαλύτερα συστήματα [2]. Σε όλες τις περιπτώσεις η συλλογή νερού βασίζεται στην εκμετάλλευση της επιφανειακής

απορροής, συνεπώς απαιτείται μια επιφάνεια απορροής (catchment area) με έναν επαρκώς υψηλό συντελεστή απορροής (βέλτιστο είναι η επιφάνεια να είναι αδιαπέρατη), και μια επιφάνεια λήψης, όπου το συγκεντρωμένο νερό αποθηκεύεται ή κατακρατείται στο έδαφος μέσω της διήθησης [27].

Στους στόχους της διαχείρισης και συγκομιδής των όμβριων περιλαμβάνονται οι εξής [5,27, 28]:

1. *Παροχή πόσιμου νερού και νερού για οικιακή χρήση.* Με ορθή χρήση ένα νοικοκυριό μπορεί να αντικαταστήσει περισσότερο από τη μισή κατανάλωση πόσιμου νερού με νερό της βροχής (Πίν. 1).
2. *Άρδευση κήπων.*
3. *Παροχή νερού στην κτηνοτροφία.*
4. *Άρδευση Γεωργικών Καλλιιεργειών.* Σε περιοχές με ετήσιο ύψος βροχόπτωσης που κυμαίνεται από 100 – 700 mm, έργα συλλογής νερού μικρού κόστους μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική όταν το νερό άρδευσης από άλλες πηγές είτε δεν είναι διαθέσιμο είτε είναι ιδιαίτερα δαπανηρό. Σε περιοχές με ετήσιο ύψος βροχόπτωσης που κυμαίνεται περισσότερο από 600 με 700 mm, οι τεχνικές συλλογής νερού μπορούν να παρατείνουν την εποχή καλλιέργειας. Συνεπώς με τη συγκεκριμένη μέθοδο η απόδοση και η αξιοπιστία της παραγωγής μιας καλλιέργειας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Γενικά η χρήση συστημάτων RWH στη γεωργία συμβάλλει στην:
 - Επαναφορά της παραγωγικότητας της γης η οποία πλήττεται από ανεπάρκεια βροχοπτώσεων.
 - Αύξηση απόδοσης ξηρικών καλλιιεργειών.
 - Ελαχιστοποίηση του κινδύνου αποτυχίας παραγωγής σε περιοχές επιρρεπείς στην ξηρότητα.
5. *Αντιμετώπιση της ερημοποίησης.*

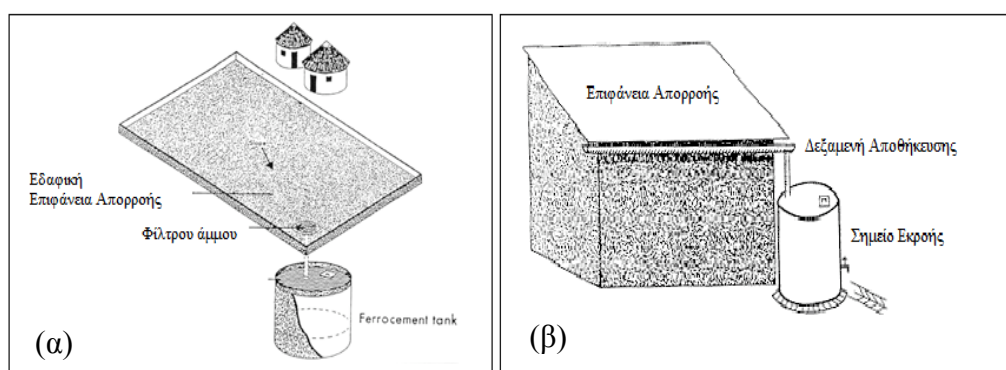
Είδος χρήσης	Εξοικονόμηση νερού [lt]	Αναφορά ανά
WC	8.000	χρόνο και άτομο
Πλύσιμο ρούχων	6.000	χρόνο και άτομο
Πότισμα	6.000	χρόνο και 100 m ²
Νερό για καθαριότητα	2.000	χρόνο και άτομο

Πίνακας 1: Δυνατότητες οικιακών χρήσεων βρόχινου νερού με αντίστοιχη εξοικονόμηση πόσιμου νερού.

2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ RWH

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τεχνικών RWH για πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Η ονομαστική τους κατηγοριοποίηση είναι δύσκολη καθώς στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διαφορετικά ονόματα ανάμεσα στους συγγραφείς, ακόμη και διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις.

Γενικά, η ταξινόμηση των συστημάτων RWH εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος της επιφάνειας απορροής. Η επιφάνεια απορροής μπορεί να είναι στέγη κτιρίου ή έδαφος (Εικ. 1) και προσδιορίζει την ποσότητα και έως ένα βαθμό και την ποιότητα του νερού που εισρέει στην εγκατάσταση αποθήκευσης. Οι περισσότερες απώλειες οφείλονται στη διήθηση και συνήθως αντιπροσωπεύονται από ένα “συντελεστή απορροής” (“runoff coefficient”) CR, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ του 0 και 1, [29].



Εικόνα 1: Παραδείγματα συστημάτων RWH με επιφάνεια απορροής: α) Έδαφος και β) Στέγη.

2.3.1 ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Οι τεχνικές όπου η επιφάνεια απορροής είναι το έδαφος, σε σύγκριση με τις στέγες, παρέχουν περισσότερες δυνατότητες για τη συλλογή νερού, εκμεταλλευόμενες μια μεγαλύτερη επιφάνεια. Με τη συγκράτηση των ροών από μικρά ρεύματα (συμπεριλαμβανομένων και των ροών από τις πλημμύρες) σε επιφανειακές ή υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, αυτή η τεχνολογία μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του νερού κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων [2]. Το συλλεγόμενο νερό από το έδαφος μπορεί να αποθηκευτεί για την κατανάλωση του από ζώα, το πότισμα κήπων και την καλλιέργεια.

Μια εδαφική επιφάνεια συλλογής έχει πολύ χαμηλότερο συντελεστή απορροής από μία οροφή (με τιμές από 0.1 έως 0.3, παρόλα αυτά λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους μπορεί να αποφέρει μια υψηλή συνολική απορροή,[29], ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για να αυξηθεί η ικανότητα απορροής [2]:

- i. Εκκαθάριση ή τροποποίηση της φυτοκάλυψης.
- ii. Αυξάνοντας την κλίση της γης με τεχνητή κάλυψη του εδάφους.
- iii. Μείωση της διαπερατότητας του εδάφους με συμπίεση εδάφους.

2.3.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΕΓΗ

Το συλλεγόμενο νερό από τις στέγες των κτιρίων είναι ένας πολύτιμος φυσικός πόρος σε πολλές περιοχές και χρησιμοποιείται κυρίως για πόσιμο νερό και για οικιακή χρήση (Domestic Rain Water Harvesting - DRWH) [27]. Η τεχνολογία αυτή επίσης χρησιμοποιείται για συλλογή νερού από τις επιφάνειες θερμοκηπίων ή ακόμη και από μεγαλύτερα κτίρια (Εικ. 2), όπως εκπαιδευτικά ιδρύματα, στάδια ή αεροδρόμια και προϋποθέτει περισσότερο περίπλοκα συστήματα για την αποθήκευση και την επεξεργασία των όμβριων. Η ποιότητα του νερού που συλλέγεται από τη στέγη επηρεάζεται από τυχόν φύλλα κοντινών δέντρων, απορρίμματα από ζώα και πτηνά, σκόνη και άλλες φερτές ύλες, ιδίως αν η οροφή είναι κοντά σε αυτοκινητόδρομο. Για να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα νερού είναι σημαντικό να προστεθούν φίλτρα και διαχωριστές τα οποία τοποθετούνται είτε στην είσοδο του συστήματος υδρορροής, στην έξοδο ή και στα δύο σημεία [29].



Εικόνα 2: Παραδείγματα RWH α) WH από οροφή σταδίου Sumo επιφάνειας 8400 m² για μη πόσιμους σκοπούς, Ιαπωνία β) Παράδειγμα WH από οροφή θερμοκηπίου.

Για το υλικό της οροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί γαλβανισμένη μεταλλική λαμαρίνα, κεραμικά πλακίδια με επίστρωση ή η οροφή μπορεί να είναι φτιαγμένη από οργανικά υλικά (Πιν. 2). Μία αδιαπέρατη οροφή θα αποδώσει υψηλές απορροές καλής ποιότητας νερού, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλες τις οικιακές χρήσεις. Η μικρή απόδοση των οροφών από οργανικά υλικά δεν τις αποκλείει για συλλογή νερού. Το νερό συνήθως χρησιμοποιείται για δευτερεύουσες χρήσεις και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις για πόσιμο. Στην περίπτωση οργανικών υλικών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές επεξεργασίας όπως στρώσεις από πολυαιθάνη, παρόλα αυτά οι στρώσεις υποβαθμίζονται γρήγορα από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τύπος	Συντελεστής απορροής	Σημειώσεις
Γαλβανισμένη Μεταλλική Λαμαρίνα (GI Sheets)	>0,9	Νερό άριστης ποιότητας. Η επιφάνεια είναι λεία και οι υψηλές θερμοκρασίες συνεισφέρουν στην αποστείρωση από τα βακτήρια
Κεραμικά πλακίδια με επίστρωση	0.6 – 0.9	1. Νερό καλής ποιότητας 2. Χωρίς επίστρωση τα πλακίδια πιάνουν μούχλα 3. Στις ενώσεις είναι δυνατό να υπάρχουν μολύνσεις
Οργανική οροφή	0.2	a) Νερό χαμηλής ποιότητας b) Ελάχιστα αποτελέσματα από την πρώτη έκπλυση c) Υψηλή θολότητα λόγω των διαλυμένων οργανικών υλικών τα οποία δεν κατακάθονται

Πίνακας 2: Τύπος Στέγης και Χαρακτηριστικά Απορροής.

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η αποθήκευση νερού κατά τη διάρκεια βροχερών εποχών και η ανάκτηση του αργότερα κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας παρέχει μια οικονομική λύση. Η αποθήκευση των όμβριων μπορεί να γίνει πάνω από το έδαφος σε:

- Επιφανειακές στεγανές δεξαμενές (tanks).
- Τεχνητές λίμνες (reservoirs).

Και κάτω από το έδαφος:

- Σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους υπόγειες στεγανές δεξαμενές και στέρνες (cisterns).
- Μέσα στο ίδιο το έδαφος το οποίο δύναται να λειτουργήσει ως ταμιευτήρας για μια συγκεκριμένη περίοδο.
- Μέσω τεχνικών εμπλουτισμού υδροφόρου ορίζοντα.

Γενικά τα μειονεκτήματα χρήσης αποθηκευτικών μέσων πάνω από το έδαφος είναι τα εξής:

- Μεγάλες απώλειες λόγω εξάτμισης.
- Απώλεια αποθηκευτικού όγκου λόγω απόθεσης φερτών υλών.
- Προβλήματα μόλυνσης.
- Απώλειες αγροτικής γης.

Τα περισσότερα προβλήματα που συνδέονται με την αποθήκευση νερού πάνω από το έδαφος μπορούν να αποφευχθούν με την υπόγεια αποθήκευση. Αν μεγάλοι όγκοι νερού αποθηκευτούν υπόγεια, μειώνεται ακόμη και ελαχιστοποιείται η ανάγκη της κατασκευής μεγάλων και ακριβών επιφανειακών υδροταμιευτήρων, [10].

Για τη βέλτιστη εφαρμογή των τεχνικών RWH οι πιο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι [27]:

1. Κατανομή βροχόπτωσης.
2. Ένταση βροχόπτωσης.
3. Χαρακτηριστικά της επιφάνειας απορροής.
4. Απαιτούμενος όγκος νερού για συλλογή.
5. Εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

Επιπροσθέτως για χρήση σε καλλιέργειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

6. Η Ικανότητα αποθήκευσης νερού του εδάφους και το βάθος εδάφους (>1m).
7. Τα Χαρακτηριστικά Καλλιέργειας.
8. Οι Κοινωνικοοικονομικές συνθήκες.

2.4.1 ΣΤΕΓΑΝΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΣΤΕΡΝΕΣ

Η συνήθης μορφή αποθήκευσης για DRWH ή για κατανάλωση νερού από τα ζώα είναι μία δεξαμενή ή μία στέρνα. Η χρήση δεξαμενών και στερνών έχει αρκετά πλεονεκτήματα, γιατί συμβάλλει [10]:

- ως σύστημα ελέγχου πλημμυρών,
- στην αποτροπή διάβρωσης του εδάφους στην περίπτωση της στέρνας,
- στην μείωση των απωλειών νερού από τις επιφανειακές απορροές κατά τη διάρκεια των βροχερών εποχών,
- και έμμεσα, στον εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα.

Οι δεξαμενές πρέπει να είναι σχετικά υδατοστεγές (απώλειες μικρότερες του 5% της ημερήσιας απορρόφησης), ενώ άλλες απαιτήσεις κυρίως για DRWH περιλαμβάνουν, [29]:

- α) Την ικανότητα υπερχειλίσης στην περίπτωση υπερβολικών εισροών, χωρίς να προκαλείται βλάβη στην δεξαμενή ή στις θεμελιώσεις της.
- β) Αποκλεισμός των ζωυφίων και κουνουπιών.
- γ) Αποκλεισμός της ηλιακής ακτινοβολίας έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται άλγη.
- δ) Εξαερισμός για να αποτραπεί η αναερόβια αποικοδόμηση οποιουδήποτε υλικού.
- ε) Εύκολη πρόσβαση για καθαρισμό.
- στ) Επαρκής δομική αντοχή.

Υλικά για κατασκευή στεγανών δεξαμενών περιλαμβάνουν [29,30,31]:

1. Μέταλλο.
2. Πλαστικό HDPE (High Density Polyethylene) ή GRP (Glass Reinforced Plastic).
3. Τούβλο.
4. Σύμπλεξη μπλοκ διαφόρων ποιοτήτων.
5. Συμπιεσμένο χώμα ή πέτρινους λίθους.
6. Οπλισμένο Σκυρόδεμα.
7. Προκατασκευασμένο Σκυρόδεμα.
8. Φουσκωτή Κατασκευή.

Οι στέρνες είναι λαξευμένες σπηλιές σε βράχο ή υπόγειες κατασκευές παραδοσιακά φτιαγμένες συνήθως από πέτρα για αποθήκευση νερού. Συχνά τα τοιχεία των στερνών είναι επιστρωμένα με τσιμεντοκονίαμα για να στεγανοποιούνται τα εσωτερικά τοιχώματα. Οι απώλειες νερού από διήθηση ή εξάτμιση είναι ελάχιστες. Η κατασκευή στερνών εφαρμόστηκε πριν από αρκετά χιλιάδες χρόνια και παραδοσιακά όλα τα σπίτια στη

Μεσόγειο, αλλά και σε άλλες περιοχές που χαρακτηρίζονται ημιάνυδρες ή ξηρές προόριζαν ένα χώρο στο υπόγειο του σπιτιού για αποθήκευση νερού. Οι περισσότερες χωρούσαν περίπου 25m³. Τη σημερινή εποχή οι στέρνες συχνά κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα [10, 26].

Η μελέτη της επιφάνειας της περιοχής ως προς τον όγκο που θα καταλαμβάνει ο χώρος αποθήκευσης, μπορεί να συνεισφέρει στην οικονομία ως προς το υλικό των δεξαμενών. Η αναλογία διαστάσεων (aspect ratio) επηρεάζει επίσης το κόστος της δεξαμενής. Έχει αποδειχτεί ότι οι χαμηλές με μεγάλο πλάτος δεξαμενές προσδίδουν μικρότερη οικονομία στο υλικό σε σχέση με τις λεπτότερες με μεγάλο μήκος δεξαμενές. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των διαφόρων σχημάτων των δεξαμενών [29].

Σχήμα	Ιδιότητες
Σφαιρικό	1. Τέλεια σφαιρικό σχήμα είναι δυνατό για υπόγειες δεξαμενές ή εν μέρει υπόγειες. 2. Το σφαιρικό μπορεί να επιτευχθεί με κατασκευές διπλής καμπύλης 3. Αναπτύσσονται καμπτικές τάσεις 4. Όλες οι κατασκευές διπλής κύρτωσης χρειάζονται μεγάλη επιδεξιότητα και εξειδικευμένα εργαλεία για να κατασκευαστούν 5. Κατάλληλο μόνο για χυτά υλικά όπως σκυρόδεμα και πηλό ή εύκαμπτα υλικά όπως πλαστικό
Κυλινδρικό	➤ Το πιο διαδεδομένο σχήμα για δεξαμενές νερού ➤ Αναπτύσσονται περιμετρικές τάσεις οι οποίες συμβάλλουν στην αντοχή της δεξαμενής, ➤ Στην ένωση του τοιχώματος της δεξαμενής με την βάση αναπτύσσονται καμπτικές και διατμητικές τάσεις. ➤ Κατάλληλες για χρήση είτε χυτών υλικών ή υλικών που μπορούν να κάμψουν προς μία διεύθυνση (μεταλλικά ελάσματα) και πέτρα
Ημισφαιρικό	• Διαδεδομένο σχήμα για υπόγειες δεξαμενές, καθώς είναι εύκολη η εκσκαφή του λάκκου και πιστεύεται ότι συνεισφέρει στην οικονομία του υλικού. • Είναι εύκολο να κατασκευαστούν υπόγειες δεξαμενές χρησιμοποιώντας χυτά υλικά
Κυβικό	• Οι καμπτικές τάσεις είναι υψηλές στις γωνίες της δεξαμενής • Εύκολο να κατασκευαστούν • Κατάλληλες για όλα τα υλικά συμπεριλαμβάνοντας τούβλο και πέτρα.

Πίνακας 3: Γεωμετρία δεξαμενών και περιγραφή των ιδιοτήτων τους.

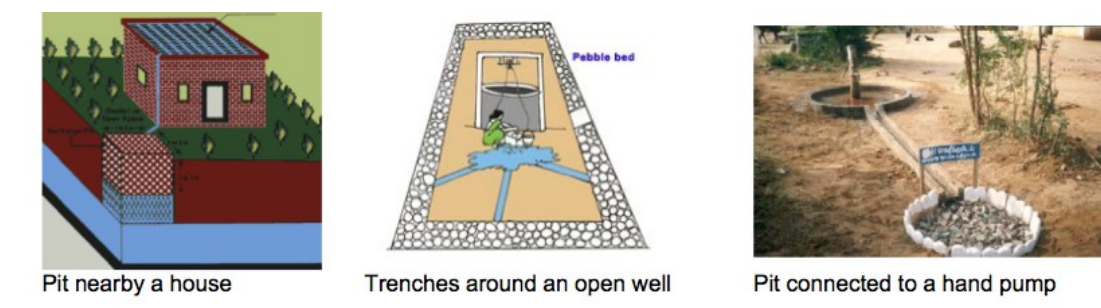
2.4.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ Υ.Ο.

Α. Λάκκοι / Τάφροι Εμπλουτισμού

Οι λάκκοι και τάφροι εμπλουτισμού (Εικ. 3) είναι εδαφικά συστήματα πληρωμένα με χαλίκια και χοντρή άμμο, που ευνοούν την αυξημένη διείσδυση των όμβριων στα ρηχά στρώματα του υδροφόρου ορίζοντα. Με τη συγκεκριμένη τεχνική η απώλεια νερού λόγω εξάτμισης είναι ελάχιστη. Οι λάκκοι είναι 1 έως 2 m πλάτους και 2 έως 3m βάθους και οι τάφροι είναι γενικά 0.5 έως 1 m πλάτος, 1 έως 1.5 m βάθος και 10 έως 20m μήκους, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα σε νερό. Η κατασκευή των συστημάτων αυτών συνιστάται:

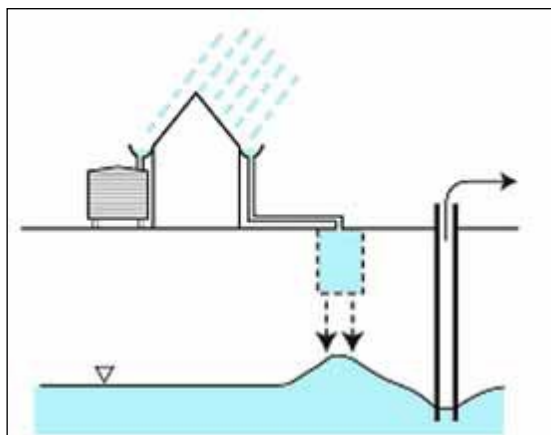
- Σε κήπο δίπλα σε σπίτι για τη συλλογή όμβριων από την οροφή, όπου μέσω υδρορροής το νερό μεταφέρεται απευθείας στην τάφρο.
- Σε κοντινή απόσταση από ένα πηγάδι για να ανακτήσει την έλλειψη νερού μέσω της ταχείας διείσδυσής του.

Οι συγκεκριμένες τεχνικές εμπλουτισμού έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς αποτελούν ιδανική λύση όπου υπάρχει ανεπάρκεια υπόγειων ή επιφανειακών υδάτινων πόρων. Επίσης συμβάλλουν στη μείωση κινδύνων πλημμύρας και βελτιώνουν την ποιότητα των υπογείων υδάτων μέσω της αραίωσης, από τη στιγμή που τα όμβρια ύδατα είναι βακτηριολογικά ασφαλή και ελεύθερα από οργανικά συστατικά [32].



Εικόνα 3: Συστήματα με Τάφρο ή Λάκκο Εμπλουτισμού α) Λάκκος Κοντά σε σπίτι
β) Τάφρος γύρω από πηγάδι γ) Λάκκος που συνδέεται με αντλία.

Η χρήση της στέρνας μπορεί να συνδυαστεί παράλληλα με τη χρήση απορροφητικού/εμπλουτιστικού λάκκου ή τάφρου (Εικ. 4). Εάν η αποθήκευση γίνεται σε στέρνα ή στεγανή δεξαμενή τότε η τυχόν υπερχειλίση του νερού από τη στέρνα γίνεται σε απορροφητικό λάκκο. Όταν η στέρνα είναι πλήρης και ο απορροφητικός λάκκος είναι επίσης πλήρης μόνο τότε ρέει νερό στο δρόμο. Σε κάθε περίπτωση εγκαθίσταται βαλβίδα αντεπιστροφής για αποφυγή μεταφοράς νερού από τον απορροφητικό λάκκο στη στέρνα [26].



Εικόνα 4: Στέρνα & Εμπλουτισμός Υπεδάφους

Β. Διαπερατές Επιφάνειες

Τα αστικά όμβρια ύδατα σχετίζονται με τον κίνδυνο πρόκλησης καταστροφών από πλημμύρες. Τα δάπεδα των ανοικτών υπαίθριων χώρων ενδείκνυται να είναι διαπερατά (Εικ. 5), επιτρέποντας τα όμβρια να διεισδύσουν στο υπέδαφος, συμβάλλοντας στη διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών, στην απορροή των επιφανειακών όμβριων απορροών εντός επιτρεπτών επιπέδων ασφάλειας και στον εμπλουτισμό του Υ.Ο.



Εικόνα 5: Κυβόλιθοι – Υπαίθρια Διαπερατά Δάπεδα.

Για τον εμπλουτισμό του Υ.Ο. ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, συνίσταται η διατήρηση καθαρών επιφανειών (σκούπισμα, μη απόρριψη ρυπογόνων ουσιών σε αδιαπέρατες επιφάνειες, όπως κουβάς από πλύσιμο αυτοκινήτων, σφουγγαρίσματος κ.τ.λ.) [26].

2.4.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ – RFWH

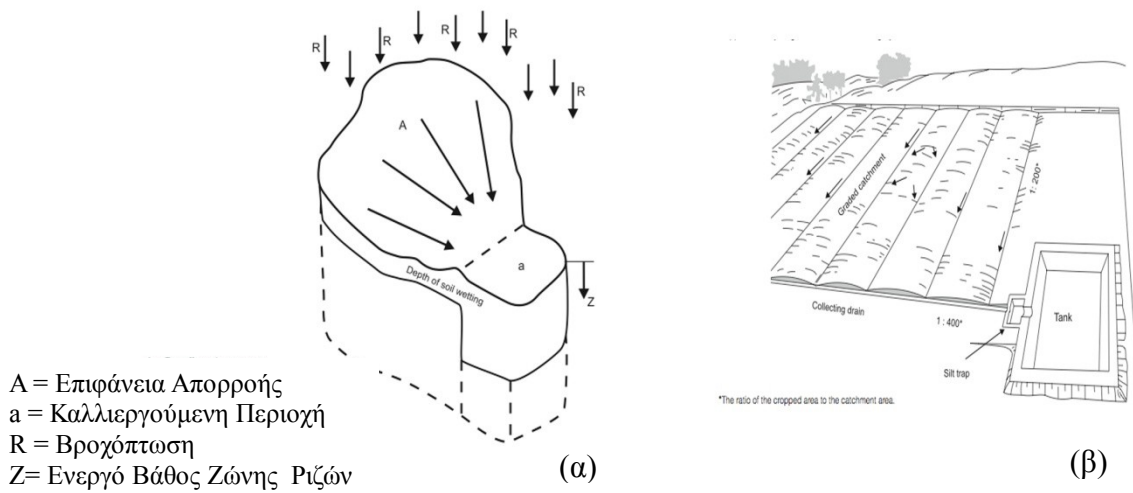
Η αποθήκευση όμβριων στο έδαφος συμβάλλει στην παραγωγική αξιοποίηση του νερού στην γεωργία (Run off Farming Water Harvesting- RFWH). Συγκεκριμένα, η τεχνική RFWH είναι αυτή κατά την οποία το συλλεγόμενο νερό από μια εδαφική επιφάνεια απορροής μεταφέρεται απευθείας στην περιοχή που καλλιεργείται κατά τη διάρκεια του γεγονότος της βροχόπτωσης (Εικ. 6.α). Γενικά η ποσότητα της απορροής υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης του εδάφους, συνεπώς, σχηματισμοί από αναχώματα και αυλάκια δημιουργούνται γύρω από την καλλιεργούμενη περιοχή για να συγκρατήσουν το νερό στην επιφάνεια του εδάφους. Οι τεχνικές καλλιέργειας (προετοιμασία του φυτώριου, οι σειρές φύτευσης, αποστάσεις και το πλήθος, το σχεδιάγραμμα του χωραφιού κ.α.) σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας απορροής (μέγεθος, κλίση κ.τ.λ.),[7]. Όταν οι απαιτήσεις των καλλιεργειών δεν καλύπτονται λόγω της ανισοκατανομής ή μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων ανάμεσα στις εποχές, υπάρχει δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των απορροών και μεταγενέστερης χρήσης τους, δηλαδή για συμπληρωματική άρδευση (Supplemental Irrigation- SI), (Εικ. 6.β).

Ανάλογα με το μέγεθος της επιφάνειας απορροής και το λόγο της επιφάνειας απορροής προς την καλλιεργούμενη επιφάνεια διακρίνονται τρεις κατηγορίες RFWH (Εικ. 7), τα κύρια χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πινάκα 4, ενώ συγκεκριμένα παραδείγματα δίνονται στην Εικόνα 8 [2]:

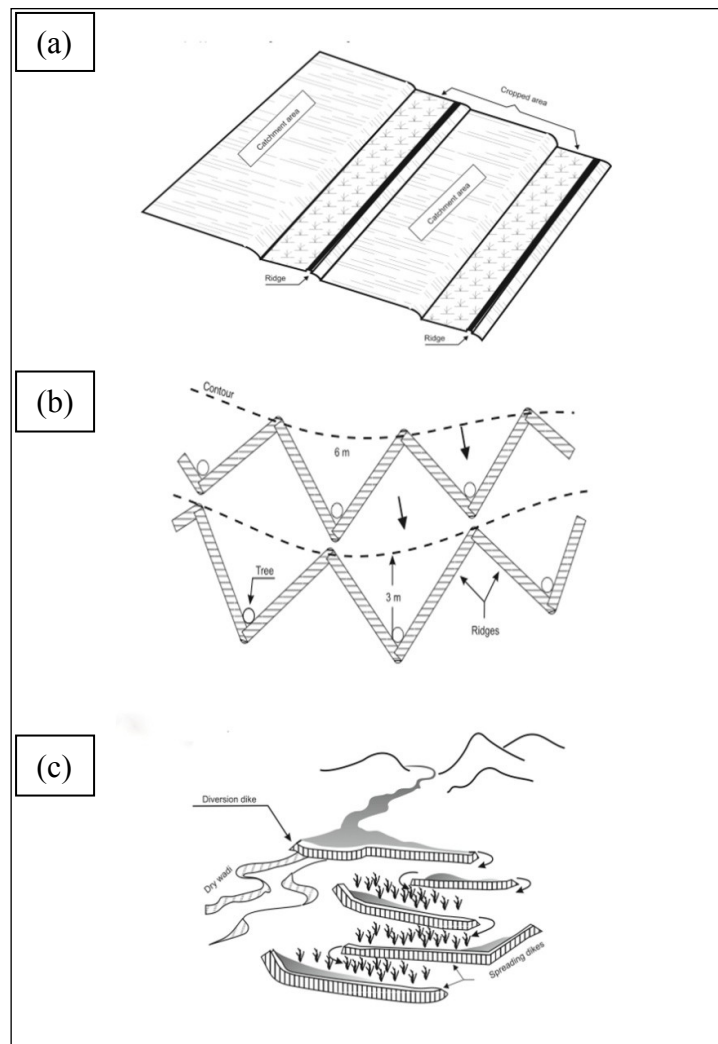
- Συλλογή νερού ανάμεσα σε σειρές καλλιέργειας (Inter-row water harvesting ή Mini Catchment Water Harvesting).
- Συλλογή νερού από επιφάνειες απορροής μικρού μεγέθους (Micro – catchment water harvesting_ MC - WH).
- Συλλογή νερού από επιφάνειες απορροής μεσαίου μεγέθους (Medium Sized catchment water harvesting_MD – WH).
- Συλλογή νερού από επιφάνειες απορροής μεγάλου μεγέθους (Large catchment water harvesting_ MC – WH).

Στο σχεδιασμό των εγκαταστάσεων αποθήκευσης για RFWH οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι οι εξής [7]:

1. **Η ικανότητα αποθήκευσης (storage capacity)**, η οποία εξαρτάται από τον διαθέσιμο όγκο απορροών, την κατανομή τους και τον τρόπο άντλησης από την εγκατάσταση αποθήκευσης.
2. **Τοποθεσία αποθήκευσης**, η οποία βασίζεται στην τοπογραφία, στην αξία της γης και από το αν η ανάληψη γίνεται μέσω άντλησης ή βαρύτητας. Ιδανικά η αποθήκευση πρέπει να γίνεται στο κέντρο του χωραφιού ώστε να ελαχιστοποιείται ή άντληση και το κόστος μεταφοράς για άρδευση. Υπό τις πιο ευνοϊκές συνθήκες το νερό θα ρέει μέσω της βαρύτητας σε όλα τα σημεία του χωραφιού.
Οι αποθηκευτικές εγκαταστάσεις όταν βρίσκονται μέσα στο χωράφι πρέπει να τοποθετούνται σε τοποθεσίες γης χαμηλής ποιότητας ή μη παραγωγικές. Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι βοηθητικό εργαλείο στην χωροθέτηση των αποθηκευτικών εγκαταστάσεων.
3. **Τύπος αποθήκευσης**, ο οποίος μπορεί να είναι οποιοδήποτε κοντέινερ ικανό να κατακρατεί νερό και επιλέγεται βασιζόμενο στη διαθεσιμότητα υλικών και εργασίας. Το έδαφος της τοποθεσίας επηρεάζει τον τύπο και τα υλικά της δεξαμενής. Η επιλογή φραγμάτων με χωματοπλήρωση ενδείκνυται όταν οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης είναι να τοποθετηθούν εγκαρσίως ενός ρέματος ή ενός φρεατίου απορροής. Μια δεξαμενή εδάφους χρησιμοποιείται, όταν η τοποθεσία των εγκαταστάσεων αποθήκευσης είναι μακριά από την πηγή της απορροής. Σε όλες τις περιπτώσεις και κυρίως για φράγματα που κατασκευάζονται εγκάρσιως ενός ρέματος, απαιτείται να υπάρχουν κατασκευές, όπως αυλάκια, που θα απομακρύνουν το πλεονάζον νερό από το χώρο αποθήκευσης, ενώ στην περίπτωση των δεξαμενών πρέπει να υπάρχει η ικανότητα υπερχείλισης στην περίπτωση υπερβολικών εισροών, χωρίς να προκαλείται βλάβη στην δεξαμενή ή στις θεμελιώσεις της.
4. **Γεωμετρία του ταμιευτήρα ή της δεξαμενής αποθήκευσης**, η οποία εξαρτάται από την τοπογραφία και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σχέση ανάμεσα στον όγκο και στην ελεύθερη επιφάνεια της περιοχής.



Εικόνα 6: Εννοιολογικά Μοντέλα για α) RFWH και β) RFWH και SI.



Εικόνα 7: Παραδείγματα τεχνικών RFWH: α) Mini - Catchment Water Harvesting, β) Micro - Catchment Water Harvesting, γ) Macro - Catchment Water Harvesting.



(α)



(β)

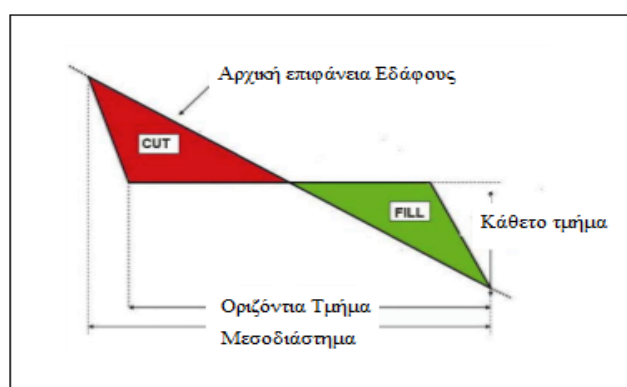
Εικόνα 8: α) Σύστημα Inter row WH με επεξεργασμένη εδαφική επιφάνεια απορροής στο Β. Μεξικό β) Σύστημα Macro- Catchment στο Μαλί.

Τύπος - WH	Είδος Ροής	Είδος Επιφάνειας	Μέγεθος Επιφάνειας Απορροής	Λόγος Επιφάνειας Απορροής/ Καλλιεργ. Περιοχή	Τύπος Αποθήκευσης Νερού	Χρήση Νερού
Συλλογή Νερού από Στέγη	Επιφανειακή Ροή	Στέγες όλων των ειδών	Μικρό		Δεξαμενές, Δοχεία, Στέρνες, Υ.Ο.	Πόσιμο, Οικιακή χρήση, Κτηνοτροφία
Συλλογή νερού για κατανάλωση από ζώα		Επεξεργασμένη εδαφική επιφάνεια	>3 acres	Δεν έχει οριστεί συγκεκριμένη αναλογία	Δεξαμενές, Στέρνες	Κτηνοτροφία
Mini – Catchment WH		Επεξεργασμένη εδαφική επιφάνεια	1 – 5m ²	1:1 – 7:1	Προφίλ Εδάφους. Τεχνητές λίμνες, Στέρνες	Δέντρα, Θάμνοι, Λαχανικά
Micro- Catchment WH	Επιφανειακή ροή και Ροή σε Αυλάκια	Επεξεργασμένες και μη εδαφικές επιφάνειες	2 – 1000m ²	1:1 – 25:1	Προφίλ Εδάφους. Τεχνητές λίμνες, Στέρνες	
Macro - Catchment WH	Στροβιλώδης Ροή/ Ροή σε κανάλια	Επεξεργασμένες και μη εδαφικές επιφάνειες	1000m ² – 200 acres	10 :1 – 100 :1	Προφίλ Εδάφους. Τεχνητές λίμνες, Στέρνες	
Large- Catchment WH	Πλημμυρικές Απορροές	Μη Επεξεργασμένες Εδαφικές Επιφάνειες	200 ha – 50 km ²	100 :1 – 10,000 : 1	Προφίλ του Εδάφους	

Πίνακας 4: Επισκόπηση των Κύριων Κατηγοριών Συστημάτων WH.

2.4.4 ΑΝΑΒΑΘΜΟΙ

Οι αναβαθμοί περιλαμβάνονται στα συστήματα κατακράτησης όμβριων μεσαίας κλίμακας. Οι αναβαθμοί είναι κατασκευές σχετικά με επίπεδες επιφάνειες ενός λογικού μεγέθους, που επιτρέπουν την καλλιέργεια στις κεκλιμένες περιοχές. Δημιουργούνται με τη μετακίνηση λωρίδων εδάφους παράλληλα προς τις ισοϋψείς και την απόθεση του εδαφικού υλικού που μετακινήθηκε αμέσως κάτω από τη λωρίδα διαμορφώνοντας έτσι τη φυσική κεκλιμένη επιφάνεια σε ένα ανθρωπογενές κλιμακωτό τοπίο (Σχ. 1). Το κατακόρυφο τμήμα των λωρίδων εδάφους προστατεύεται με την τοποθέτηση λίθων διαμορφώνοντας τοίχους βαρύτητας.



Σχήμα 1: Σχηματική Απεικόνιση Διαμόρφωσης Αναβαθμών

Η σημαντικότερη αιτία και το όφελος της κατασκευής των αναβαθμών είναι η προστασία του εδάφους και του νερού. Οι αναβαθμοί μειώνουν την ποσότητα και την ταχύτητα του νερού που κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους και συνεπώς μειώνεται σημαντικά η εδαφική διάβρωση. Επιτρέπουν έτσι την εντατικότερη καλλιέργεια του εδάφους, που διαφορετικά θα ήταν αδύνατη. Η διάβρωση είναι μια από τις σημαντικότερες διεργασίες υποβάθμισης και ερημοποίησης του εδάφους στις λοφώδεις Μεσογειακές περιοχές. Η διάβρωση περιλαμβάνει όχι μόνο την απομάκρυνση εδαφικών ανόργανων υλικών, αλλά και την απώλεια της οργανικής ουσίας και των θρεπτικών στοιχείων των φυτών. Μειώνει την παραγωγικότητα του γεωργικού εδάφους, προκαλεί τη ρύπανση των ποταμών και μειώνει την αποθηκευτική ικανότητα σε νερό των επιφανειακών και υπόγειων ταμιευτήρων. Η κατασκευή αναβαθμών συνήθως συνδυάζεται με την κατασκευή ταμιευτήρων ύδατος, δεδομένου ότι οι αναβαθμοί ευνοούν τη ροή του νερού προς την υδρολογική λεκάνη που βρίσκεται ο ταμιευτήρας. Επίσης η κατασκευή των αναβαθμών

αποτρέπει την ιζηματογένεση πίσω από τον ταμιευτήρα, η οποία θα μείωνε την αποθηκευτική ικανότητα του. Επιπλέον η μείωση της επιφανειακής απορροής αποτρέπει τη ρύπανση των υδάτινων ρευμάτων από έναν αγρό ή ένα τμήμα γης. Οι κύριοι σκοποί κατασκευής αναβαθμών συνοψίζονται ως εξής:

- Μείωση της επιφανειακής απορροής του νερού και αύξηση της απορρόφησης του από το έδαφος σε μεγάλες βροχοπτώσεις.
- Έλεγχος της διάβρωσης του εδάφους σε επικλινείς περιοχές.
- Ανακατανομή του εδαφικού υλικού στις πλαγιές με ρηχό ή μέτριο βάθος εδάφους.
- Αύξηση του βάθους του ριζοστρώματος των φυτών, για καλύτερη απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων και νερού.
- Μεταβολή μιας επικλινούς επιφάνειας με μεγάλη κλίση σε λιγότερο κεκλιμένη, βελτιώνοντας έτσι την πρόσβαση και διευκολύνοντας τις αγροτικές εργασίες.
- Καθαρισμός ενός αγρού από πέτρες που παρεμποδίζουν την καλλιέργεια και προκαλούν φθορές στα γεωργικά μηχανήματα [33].

-



Εικόνα 9: Τοπίο με αναβαθμούς για την καλλιέργεια ελιάς στο Δήμο Κίσσαμου, νομός Χανίων.



Εικόνα 10: Σύγχρονοι Αναβαθμοί στο Θέρισο, νομός Χανίων.

2.5 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ και ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η επιτυχία της ανάπτυξης οποιασδήποτε τεχνικής διαχείρισης νερού κυρίως για γεωργία συνδέεται από το αν είναι οικονομικά βιώσιμη [7]. Ανάμεσα σε άλλες διαθέσιμες εναλλακτικές πηγές για παροχή νερού, η συγκομιδή νερού έχει αποτελέσει την μεγαλύτερη οικονομική λύση απέναντι στην κρίση του νερού [6]. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των συστημάτων RWH είναι τα εξής [6,12,27]:

1. Το νερό είναι δωρεάν. Το μοναδικό κόστος βρίσκεται κυρίως στην κατασκευή και συντήρηση των εγκαταστάσεων συλλογής.
2. Η χρήση του συλλεγόμενου νερού βρίσκεται κοντά στην πηγή, έτσι ώστε μειώνεται η ανάγκη για περίπλοκα και δαπανηρά συστήματα μεταφοράς νερού.
3. Σε σχέση με το νερό άντλησης, η συλλογή νερού εξοικονομεί ενέργεια, καθώς μπορεί να εκμεταλλευτεί τη δύναμη της βαρύτητας για την παροχή νερού.
4. Μπορεί να μειώσει το φορτίο των συστημάτων αποχέτευσης όμβριων και τις πλημμύρες στις πόλεις στην περίπτωση καταιγίδων.

5. Ανακουφίζει την πίεση στην οποία υπόκεινται άλλες πηγές νερού καθώς μπορεί να αποτελέσει συμπλήρωμα σε αυτές. Π.χ., τα συστήματα RWH μπορούν να λειτουργήσουν ως συμπλήρωμα υπόγειων υδάτινων πόρων.
6. Όταν η ποιότητα της κεντρικής παροχής νερού κρίνεται ακατάλληλη τα όμβρια ύδατα αποτελούν εναλλακτική πηγή νερού. Τα όμβρια ύδατα είναι σχετικά καθαρά και η ποιότητά τους είναι συνήθως αποδεκτή για πολλούς σκοπούς με μικρή ή και καθόλου επεξεργασία. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των όμβριων είναι συνήθως ανώτερη από πηγές υπόγειων υδάτων που μπορεί να έχουν υποστεί μόλυνση.
7. Παρέχει ένα περιθώριο ασφάλειας για παροχή νερού σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή βλάβης δημόσιων συστημάτων ύδρευσης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών.
8. Οι τεχνολογίες συγκομιδής όμβριων είναι ευέλικτες, μπορούν να κατασκευαστούν σύμφωνα με την κάλυψη οποιασδήποτε απαίτησης και η κατασκευή, λειτουργία και συντήρησή τους δεν απαιτεί υψηλή εργασία, σε σχέση με έργα διαχείρισης υδάτων μεγάλης κλίμακας.
9. Μειώνεται η μόλυνση από μη σημειακές πηγές ρύπανσης.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έρχονται σε αντίθεση με το πρόβλημα της αναξιοπιστίας των βροχοπτώσεων, το οποίο μπορεί να κατανικηθεί με την αποθήκευση, ενώ σύγχρονα υδρολογικά μοντέλα (π.χ. Υπολογισμός Πιθανότητας Βροχοπτώσεων και Απόδοσης Νερού) επιτρέπουν έναν ακριβή προσδιορισμό της επιφάνειας που λειτουργεί ως λεκάνη απορροής [27]. Επίσης η εκκαθάριση μιας επιφάνειας με στόχο να λειτουργήσει ως επιφάνεια απορροής μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση του εδάφους της συγκεκριμένης περιοχής. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων RWH περιλαμβάνεται ακόμη η απαίτηση υψηλότερης εργασίας από τους τοπικούς χρήστες για τη λειτουργία τους.

Η ανάπτυξη κάθε συστήματος RWH για τη παραγωγική αξιοποίηση των υδάτων στη γεωργία βασίζεται σε μεθόδους δοκιμής και σφάλματος, καθώς τα συγκεκριμένα συστήματα προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες ανάγκες και περιβαλλοντικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και των ξεχωριστών υδρογεωλογικών συνθηκών. Συνεπώς, τα συστήματα RWH είναι δύσκολο να τυποποιηθούν καθώς δεν υπάρχουν αρκετές καταγραφές των δεδομένων και των αντίστοιχων αποδόσεων για κάθε διαφορετικό σύστημα και περιοχή.

Οι τεχνολογίες RWH είναι δυνατό να συμβάλλουν στην αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων, είναι όμως σημαντικό να τονιστεί ότι η αντίληψη ότι οι τεχνικές WH χρησιμοποιούν υδρολογικά ασήμαντες ποσότητες νερού δεν πρέπει να γίνει αποδεκτή χωρίς

αποδείξεις. Τα συστήματα WH μπορούν να περιορίσουν την απορροή στο ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής, στερώντας έτσι νερό από τους χρήστες στο κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής.

Η εισαγωγή συστημάτων WH και SI πρέπει να λαμβάνουν υπόψη των παραπάνω κινδύνων κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Στο στάδιο αυτό πρέπει να δίνεται βάρος στις πιθανές επιπτώσεις που αφορούν τους χρήστες του νερού, σε όρους ποσότητας και ποιότητας [19]. Παρά τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας RWH στην επιτυχή εφαρμογή, λειτουργία και συντήρηση οποιουδήποτε σχεδίου εκμετάλλευσης όμβριων είναι σημαντική η συμμετοχή, η υποστήριξη και οι συστάσεις της κοινότητας. Επομένως η κοινότητα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις στρατηγικές διαχείρισης και να έχει έλεγχο σε αυτές, όσον αφορά τις προσπάθειες για την προστασία του νερού ως φυσικό πόρο [6].

Ιδίως στον αγροτικό τομέα πολλά συστήματα WH και SI έχουν αποτύχει, παρά τις ορθές τεχνικές και σχεδιασμό, εξαιτίας της ανεπαρκούς ενσωμάτωσης των κοινωνικών, οικονομικών και διαχειριστικών παραγόντων στην ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. (Bazza and Tayaa 1994). Σε άλλες περιπτώσεις όπου έχουν γίνει προσπάθειες για την εισαγωγή των τεχνολογιών WH και SI, η βιωσιμότητα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (π.χ. επιπτώσεις στον υδροφόρο ορίζοντα) έχουν αγνοηθεί.

Στο μέτρο του δυνατού, η εισαγωγή των τεχνικών WH και SI πρέπει να βασίζεται στα υφιστάμενα εγχώρια μέτρα εξοικονόμησης νερού. Για την επιτυχία των τεχνικών WH και SI σημαντική είναι η αποδοχή από τους ενδιαφερόμενους χρήστες, συνεπώς στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή ενός κατάλληλου συστήματος WH είναι ζωτικής σημασίας η κατανόηση των ιδιαίτερων αναγκών της τοπικής κοινότητας ή της ομάδας δικαιούχων. Μια προφανής προϋπόθεση για την επιτυχία είναι η οικονομική εφικτότητα, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές και στο κόστος συντήρησης των συστημάτων συλλογής νερού. Τα επίπεδα κινδύνου της παραγωγής στη γεωργία και οι δυνατότητες κέρδους πρέπει επίσης να είναι αποδεκτά από τους ίδιους τους χρήστες. Μελέτες που διεξήχθησαν στην Ινδία δείχνουν ότι η αποδοχή μιας νέας τεχνολογίας εξαρτάται από τη στάση των αγροτών απέναντι στον κίνδυνο παραγωγής και της αντίληψης του κινδύνου. Όταν ο κίνδυνος εκφράζεται ως τυπική απόκλιση των καθαρών εισφορών οδήγησε στην αποδοχή της νέας τεχνολογίας από τους αγρότες. Συνεπώς, η απροθυμία ανάληψης της επικινδυνότητας αντισταθμίζεται από τις αυξημένες αποδόσεις, στην περίπτωση που γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα της εισαγωγής νέων τεχνολογιών. Παρόλα αυτά υπάρχουν λίγες μελέτες, που έχουν αξιολογήσει τις οικονομικές πτυχές των τεχνικών WH και SI.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η παροχή κινήτρων και η στήριξη των γεωργών για την εφαρμογή των συστημάτων WH και SI. Ο τύπος της υποστήριξης πρέπει να καθορίζεται σε στενή διαβούλευση με τους τοπικούς χρήστες προκειμένου να βελτιωθούν οι πιθανότητες για την επέκταση και τη σωστή συντήρηση του συστήματος. Γενικά, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε περισσότερα για τους λόγους της έγκρισης ή την απόρριψης των συστημάτων WH και SI από τις τοπικές κοινότητες. Σημαντική είναι η συμμετοχή της επιστημονικής κοινότητας μέσω της έρευνας πάνω στις αρχές λειτουργίας και στις κατάλληλες πρακτικές των συγκεκριμένων συστημάτων. Οι περισσότερες τεχνικές WH είναι αρκετά απλές και μπορούν να είναι κατανοητές από τους αγρότες. Οι τεχνικές SI τείνουν να απαιτούν πιο σύνθετη διαχείριση. Τα οφέλη του έργου θα πρέπει να είναι εμφανή στους αγρότες όσο το δυνατόν νωρίτερα. Είναι απαραίτητο να υπάρχουν κίνητρα και προώθηση της ευαισθητοποίησης των ανθρώπων σε σχέση με τους στόχους του σχεδίου και τους τρόπους για την επίτευξή τους. Είναι συχνή και αρκετά λανθασμένη η θεώρηση ότι οι δικαιούχοι θα κατανοήσουν τις προτεραιότητες, θα συμμετέχουν αποτελεσματικά και θα αυτοοργανωθούν χωρίς να υπάρχει εξήγηση ή κατάρτιση των συγκεκριμένων τεχνικών.

Οι πιθανότητες επιτυχίας είναι πολύ μεγαλύτερες αν οι χρήστες συμμετέχουν από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού και μετά. Επιπλέον, η δέσμευση και η συνεργασία για την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση των εγκαταστάσεων από μια ομάδα γειτονικών αγροτών, όπως επίσης ο συντονισμός και ο έλεγχος της χρήσης της λεκάνης απορροής, είναι τα συστατικά στοιχεία που απαιτούν κατά κανόνα οι τεχνικές συλλογής νερού. Προκειμένου να ενισχυθεί η αίσθηση της κυριότητας από την ίδια την τοπική κοινότητα, η καταγραφή δεδομένων απορροής και των αποτελεσμάτων της συλλογής, μέσα στην άσκηση των καθηκόντων της, βρέθηκε να είναι επιτυχής. Περαιτέρω συμμετοχική δραστηριότητα βρίσκεται στον τομέα της συντήρησης και της αξιολόγησης και στις τυχόν τροποποιήσεις οι οποίες μπορούν να γίνουν στο σύστημα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Τέλος, οι τεχνικές WH και SI για να βελτιωθούν δεν πρέπει να θεωρηθούν ως αυτόνομες τεχνικές, αλλά ως μέρος ενός χωροφίου ή ενός σχεδίου διαχείρισης της περιφερειακής χρήσης γης. Επίσης θα πρέπει να εντάσσονται σε ένα ολοκληρωμένο σχεδιασμό βελτίωσης της χρήσης γης (π.χ., εφαρμογή λιπασμάτων και κοπριάς) για το οποίο οι αγρότες πρέπει να εκπαιδευτούν.

Συνεπώς, για την επιτυχή εισαγωγή των τεχνικών WH και SI απαραίτητη είναι η ενίσχυση της θεσμικής ικανότητας και της πολιτικής διαχείρισης για την ορθή εκμετάλλευση των κατάλληλων υδατικών πόρων. Επίσης αναγκαία είναι η ύπαρξη επενδυτικών προγραμμάτων και προγραμμάτων συντήρησης και διαχείρισης συστημάτων WH και SI [7].

Κεφάλαιο 3^ο

Ιστορική Αναδρομή της Τεχνολογίας RWH

3.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΙΝΩΙΚΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΡΩΜΑΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

Σε αντίθεση με τους πολιτισμούς της Μεσοποταμίας ή της Αιγύπτου, οι οποίοι βασίζονταν στην άντληση νερού από τα μεγάλα ποτάμια του Τίγρη, του Ευφράτη και του Νείλου, στον Ελλαδικό χώρο οι πολιτισμοί χαρακτηρίζονταν από ανεπάρκεια σε φυσικούς υδάτινους πόρους. Το ύψος της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας ήταν πάνω από 1800 mm, ενώ στην Ανατολική περιοχή της Ελλάδας έφτανε μέχρι και το ύψος των 300 mm. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι προηγμένες πολιτιστικές δραστηριότητες εμφανίστηκαν στις ημίξηρες περιοχές της Ελλάδας με τη χαμηλότερη βροχόπτωση και συνεπώς τους φτωχότερους υδάτινους πόρους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η Κνωσός στην Κρήτη, τα Κυκλαδίτικα νησιά και η Αθήνα, όπου η ετήσια βροχόπτωση ήταν περίπου 500mm, 300 – 400mm και 400 mm αντίστοιχα. Η πιθανή εξατμισοδιαπνοή υπερέβαινε τα 1000mm σε όλη την Ελλάδα με τα υψηλότερα ποσοστά να εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες. Συνεπώς, η άρδευση των καλλιεργούμενων περιοχών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ήταν απόλυτα απαραίτητη. Υπό αυτές τις κλιματολογικές και υδρολογικές συνθήκες οι Έλληνες ανέπτυξαν τεχνολογικά μέσα για να συλλέγουν, αποθηκεύουν και να μεταφέρουν το νερό ακόμη και από μεγάλες αποστάσεις, καθώς και νόμους για την αποδοτική διαχείριση των υδάτινων πόρων [34].

Αρχαιολογικά ευρήματα και μελέτες αποκαλύπτουν ότι ο Μινωικός πολιτισμός, φαίνεται να αποτελεί την αρχή σχεδιασμού και υλοποίησης έργων κυρίως ύδρευσης, που τεκμηριώνουν ότι οι υδραυλικοί μηχανικοί της περιόδου εκείνης ήταν γνώστες βασικών αρχών της επιστήμης υδατικών πόρων (όπως της ροής υγρών σε κλειστούς και ανοικτούς αγωγούς και του σίφωνος, καθώς ακόμη υδρογεωλογίας και υγειονομολογίας). Οι τεχνολογίες αυτές αναπτύχθηκαν περαιτέρω κατά τη διάρκεια των Ελληνιστικών, των Ρωμαϊκών και των Ενετικών περιόδων. Ενδεικτικές τεχνολογίες, που αναπτυχτήκαν τις περιόδους αυτές είναι οι παρακάτω [35]:

- **Υδραγωγεία.** Από την Μινωική μέχρι την Ενετική περίοδο είναι γνωστά πάνω από 40 υδραγωγεία στην αρχαία Κρήτη. Τα πρώτα υδραγωγεία βρίσκονται στην Μινωική Κρήτη, που πιθανόν είναι τα πρώτα στην ιστορία της ανθρωπότητας. Τέτοια είναι τα υδραγωγεία της Κνωσού, των Μαλίων, της Τυλίσσου και άλλα. Αρκετά υδραγωγεία κατασκευάστηκαν και λειτούργησαν κατά τη διάρκεια των Ελληνιστικών και Ρωμαϊκών περιόδων.
- **Δεξαμενές (Στέρνες).** Πέντε στέρνες είναι γνωστές από την μεσο-και υστερο-μινωική περίοδο (ca.2000- 1200 π.Χ.) δύο στον Πύργο Μύρτου και από μια στην κεντρική πλατεία του ανακτόρου της Ζάκρου, στις Αρχάνες και στην Οικία Γ στην Τύλισσο. Οι τεχνολογίες αυτές βελτιώθηκαν περαιτέρω στους μετέπειτα πολιτισμούς και είχαν σημαντική ανάπτυξη, κυρίως στην Ανατολική Κρήτη μέχρι τα μέσα του περασμένου αιώνα.
- **Πηγάδια.** Πηγάδια αναπτύχθηκαν κατά τη Μέσο Μινωική εποχή (ca. 2000 - 1550 π.Χ.) στην περιοχή του «ανακτόρου» της Κνωσού. Η χρήση πηγαδιών ήταν πιο εκτεταμένη στην Ανατολική Κρήτη εξαιτίας των περιορισμένων επιφανειακών υδατικών πόρων. Έτσι, σε ανάκτορα και πόλεις, όπως της Ζάκρου, του Παλαιόκαστρου και της Ιτάνου, η χρήση υπόγειου νερού ήταν υποχρεωτική. Οι τεχνολογίες χρήσης υπόγειων νερών συνεχίστηκαν και αναπτύχθηκαν περαιτέρω στους μετέπειτα πολιτισμούς. Αυτή η τεχνολογική ανάπτυξη δημιούργησε μια σημαντική παράδοση σε όλη την Κρήτη με αποτέλεσμα ακόμη και σήμερα η υδατική οικονομία της νήσου να βασίζεται στα υπόγεια νερά.
- **Άλλες Εγκαταστάσεις.** Στους αρχαίους Κρητικούς πολιτισμούς αναπτύχθηκαν επίσης άλλες υδραυλικές εγκαταστάσεις, όπως πήλινοι σωλήνες διαφόρων διατομών και διαστάσεων, ανοικτοί ή κλειστοί, μολύβδινοι αγωγοί διαφόρων διαστάσεων, πέτρινοι

αγωγοί σχήματος ανεστραμμένου Π και κτιστοί αγωγοί βαρύτητας, κυρίως σε αποχετευτικά συστήματα.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ - ΕΠΟΧΗ	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ
Μινωική και Κυκλαδική	3500-1200 π.Χ.
Μυκηναϊκή	1600-1100 π.Χ.
Αρχαϊκή	~ 800-500 π.Χ.
Κλασσική	500-336 π.Χ.
Ελληνιστική	323 -146 π.Χ.
Ρωμαϊκή	146π.Χ. - 323 μ.Χ.

Πίνακας 5: Περίοδοι Κατασκευής Αρχαίων Υδραυλικών Έργων [36].

3.1.1 ΜΙΝΩΙΚΗ ΕΠΟΧΗ (3500 -1200 π.Χ.)

Ο Μινωικός Πολιτισμός άνθισε στην Κρήτη κατά τη διάρκεια της Περιόδου του Χαλκού (2800 –1100 π.Χ.). Μία συστηματική εξέλιξη της διαχείρισης του νερού στην αρχαία Ελλάδα ξεκίνησε από την Κρήτη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. (Πρωτομινωική περίοδος 3500 – 2150 π.Χ.). Την προϊστορική περίοδο στην Κρήτη οι άνθρωποι εφοδιάζονταν με νερό από τα ποτάμια και τις πηγές. Κατά τη διάρκεια της Πρωτομινωικής Περιόδου εφαρμόστηκε μία ποικιλία τεχνολογιών όπως πηγάδια, δεξαμενές και υδραγωγεία. Επίσης η Μινωική αρχιτεκτονική συμπεριλάμβανε επίπεδες στέγες και ανοιχτούς προαύλιους χώρους, τα οποία κατείχαν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση του νερού, καθώς λειτουργούσαν ως επιφάνειες απορροής για τη συλλογή των όμβριων νερών από όπου έρρεαν μέσα σε περιοχές αποθήκευσης και δεξαμενές [37]. Οι γνώσεις μας πάνω στους τρόπους με τους οποίους οι Μινωικές πόλεις είχαν παροχή πόσιμου νερού έχουν αποκτηθεί κυρίως μέσα από το παλάτι της Κνωσού. Σημειώνεται όμως ότι ακόμη και στην Κνωσό, οι υδάτινοι πόροι και οι μέθοδοι εκμετάλλευσης και παροχής έχουν μόνο μερικώς κατανοηθεί [34].

Οι συνθήκες υδροδότησης των ανακτόρων και άλλων οικιστικών εγκαταστάσεων, διαφοροποιούνται όχι μόνο ανάλογα με τις χρονικές περιόδους, αλλά και ανάλογα με τις υδρολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Έτσι, οι βασικές Μινωικές τεχνολογίες και

πρακτικές που εφαρμόζονταν διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες:

α) Σε περιοχές με σχετικά υψηλά υψόμετρα και έλλειψη υπόγειου υδροφορέα αλλά και άλλων πηγών νερού η υδατική οικονομία βασιζόταν στη συλλογή και αποθήκευση επιφανειακών απορροών σε υπόγειες δεξαμενές τις περιόδους των βροχοπτώσεων [35]. Οι δεξαμενές αποθήκευαν όμβρια ύδατα από τις στέγες και τους προαύλιους χώρους και παρείχαν νερό στα σπίτια κατά τη διάρκεια των ξηρών καλοκαιριών της Μεσογείου.

Οι δύο πρώτες μεγάλες δεξαμενές της Μινωικής Κρήτης κατασκευάστηκαν στο πρώτο μισό της δεύτερης Χιλιετίας π.Χ. στο χρόνο των πρώτων Μινωικών ανακτόρων στον Πύργο στην περιοχή Λασιθίου (Εικ. 11). Οι δεξαμενές αυτές παραμένουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της Μινωικής αποικίας, καθώς ο ποταμός Μύρτος παρείχε νερό στη βάση του λόφου Πύργος. Και οι δύο δεξαμενές ήταν κυκλικές με κάθετους τοίχους και στρογγυλεμένο πάτο. Οι τοίχοι και ο πάτος είχαν ένα επίστρωμα από ασβέστη πάχους 1 έως 2cm [37].



Εικόνα 11: Πρωτομινωική κεντρική δεξαμενή στον Πύργο Μύρτος, Λασιθί, Κρήτη.

(φωτ. www.a-aggelakis.gr)

Ο λόφος της Φαιστού κατοικήθηκε για πρώτη φορά στα τέλη της Νεολιθικής περιόδου (4^η χιλιετία π.Χ.) και άκμασε με την ανέγερση του πρώτου ανάκτορου στα τέλη της Προανακτορικής Περιόδου 2000/1900 π.Χ. Η παροχή νερού στο παλάτι της Φαιστού, γινόταν μέσω του μικρού ποταμού Ιεροπόταμου στους πρόποδες του λόφου [38], αλλά, όπως και σε άλλα χωριά και πόλεις της Μινωικής Κρήτης, η Φαιστός βασιζόταν άμεσα στη βροχόπτωση, η οποία συλλέγονταν από στέγες και αυλές και στη συνέχεια κατευθύνονταν σε δεξαμενές (Εικ. 12). Τα συστήματα αποστράγγισης σε κάποιες περιπτώσεις μεταφέρονταν μέσα σε δοχεία από τερακότα, τα οποία λειτουργούσαν ως συλλέκτες νερού [37].

Χαρακτηριστική είναι η διευθέτηση πλατειών, αυλών και άλλων ανοιχτών χώρων κατάλληλα, ώστε να καθαρίζονται επιμελώς πριν από τη διαδικασία συλλογής με την επιμελή δημιουργία υποτυπωδών αυλακών συλλογής ή ειδικών κεραμικών αγωγών, που όμως δεν επηρεάζουν άλλες λειτουργίες των θεωρούμενων χώρων. Επίσης, παράπλευρα των δεξαμενών αποθήκευσης κατασκευάζονται αμμοδιυλιστήρια για την επεξεργασία του επιφανειακού νερού πριν από την αποθήκευσή του σε καλαίσθητες, προστατευμένες και πολύ λειτουργικές υπόγειες δεξαμενές [35]. Έχει εκτιμηθεί ότι ανά έτος συλλέγονταν περίπου 8 Mm³ όμβριων υδάτων το οποίο χρησίμευε για το πλύσιμο των ρούχων και άλλες λειτουργίες καθαρισμού [39].



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 12: Ανάκτορο της Φαιστού: α) Αρδευτικά Έργα κάτω από την κεντρική αυλή, β) Διάδρομος που οδηγεί στους βασιλικούς θαλάμους με κανάλι άρδευσης, γ) Φίλτρα άμμου στο ανάκτορο της Φαιστού.

Η Τύλισσος (2000 - 1100 π.Χ), ήταν μία από τις πιο σημαντικές πόλεις στην αρχαία Κρήτη. Στην αρχαία Τύλισσο το νερό μεταφέρονταν από τις πηγές του Αγίου Μάμα από απόσταση 3km στις τρεις Μινωικές κατοικίες μέσω ενός υδραγωγείου. Στις πηγές έγινε ανεύρεση κεραμικών σωλήνων πληρωμένων με κάρβουνο, οι οποίοι είχαν το ρόλο του ενεργού άνθρακα ως προς τη διαδικασία διαχωρισμού οργανικών και ανόργανων συστατικών από το νερό (Εικ. 13.α). Το υδραγωγείο κατασκευάστηκε από κλειστούς σωλήνες και καμπυλωτά πέτρινα κανάλια. Δευτερεύοντες αγωγοί χρησιμοποιούνταν για να μεταφέρουν το νερό σε μία δεξαμενή απόθεσης ιζημάτων κατασκευασμένη από πέτρα, με τη χρήση της οποίας απομακρύνονταν τα ιζήματα. Στο κάτω μέρος της δεξαμενής υπήρχε μία τρύπα για να καθαρίζεται η δεξαμενή με την στράγγιση. Το νερό από εκεί έρρεε στη κύρια δεξαμενή αποθήκευσης νερού (Εικ. 14), [37,39].

Σημειώνεται ότι γινόταν χρήση πήλινων στενόμακρων κατασκευών (υδραυλικά φίλτρα) με μικρές οπές στο ένα άκρο, που πιθανόν χρησιμοποιούνταν ως μικρά διυλιστήρια στις εξόδους του νερού από τα υδραγωγεία (Εικ. 13.β). Η στροβιλώδης ροή του νερού δημιουργεί μικρές σχετικά πιέσεις στα εξωτερικά διάτρητα τοιχώματα εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας ροής. Έτσι, η εκροή απαλλάσσεται από αιωρούμενα και διαλυτά στερεά.



Εικόνα 13: α) Κεραμικοί μηχανισμοί οι οποίοι ήταν πληρωμένοι με κάρβουνο για το φιλτράρισμα του νερού, Τύλισσο (φωτογραφία Μ. Νικηφοράκης 2006) β) Μινωικό φίλτρο νερού.



(α)



(β)



(γ)

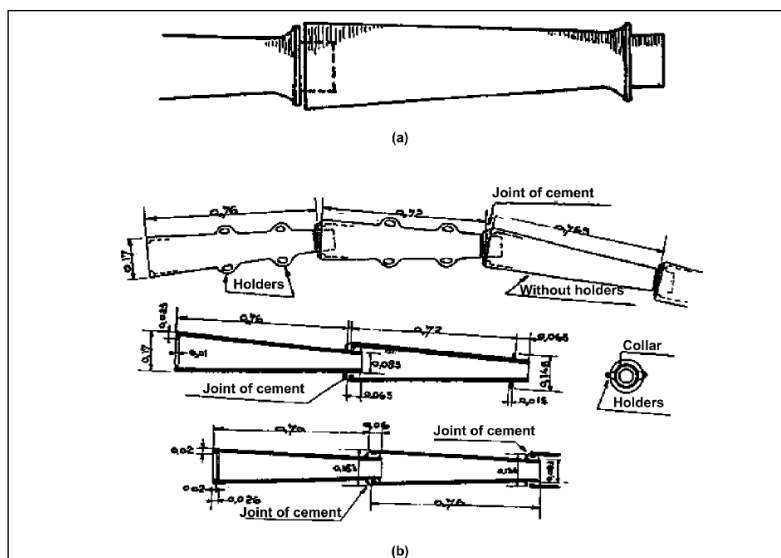


(δ)

Εικόνα 14: Σύστημα Συλλογής Νερού στην Τύλισσο, Κρήτη. α) Υδραγωγείο
β) Δεξαμενή απόθεσης ιζημάτων, γ) Κανάλι που συνδέει τη δεξαμενή ιζηματοπόθεσης με τη
δεξαμενή αποθήκευσης όμβριων, δ) Δεξαμενή όμβριων για οικιακή χρήση νερού.

Παρόμοιες τεχνικές συλλογής όμβριων αναφέρονται και σε άλλες πόλεις και ανάκτορα της Μινωικής Κρήτης. Χαρακτηριστική είναι μια ορθογώνια δεξαμενή αποθήκευσης όμβριων (διαστάσεων $1,6 \times 2,0 \times 6,0 \text{ m}^3$) στην Αγία Τριάδα. Από αυτή τη δεξαμενή το νερό χρησιμοποιούνταν πιθανώς για πλύση ή άλλες οικιακές χρήσεις. Επίσης, υπάρχουν ενδείξεις ότι στο ανάκτορο της Φαιστού και στη βίλα της Αγίας Τριάδας, εκτός από τη χρήση όμβριων, γινόταν διάθεση εκροών αστικών υγρών αποβλήτων σε γεωργικές εκτάσεις. Όπως είναι γνωστό, η Κρήτη δεν έχει πλούσιο υδατικό δυναμικό, ενώ αρκετές περίοδοι του Μινωικού πολιτισμού πρέπει να χαρακτηρίζονταν από σοβαρή λειψυδρία. Κατά συνέπεια, η επαναχρησιμοποίηση νερού ήταν μια ανάγκη. Έτσι, φαίνεται ότι νερό λουτρών μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί για άρδευση κήπων και γεωργικών εκτάσεων.

β) Σε περιοχές με πηγαία νερά, η μεταφορά του νερού ύδρευσης σε ανάκτορα και άλλους κατοικήσιμους χώρους γινόταν με κεραμικούς σωλήνες κατασκευασμένους επιμελώς, ώστε ο ένας να συνδέεται με τον άλλο με ειδική συνθετική ύλη. Οι σωλήνες ήταν σχήματος κωνικού, μήκους 76 εκ. περίπου. Το σχήμα τους διευκόλυνε τη σύνδεση τους και επιδρούσε σημαντικά στη μείωση εναπόθεσης αλάτων στα τοιχώματά τους σε περιπτώσεις νερών με αυξημένο pH, (Εικ. 15), [35].



Εικόνα 15: Μινωικοί αγωγοί παροχής νερού α) Επισκόπηση, β) Πραγματικές διαστάσεις.

Αγωγοί υπό πίεση χρησιμοποιήθηκαν στο ανάκτορο της Κνωσού για τη μεταφορά του νερού ύδρευσης αρχικά από την πηγή «Μαυροκόλυμπος» και αργότερα από άλλες γειτονικές πηγές. Το αποχετευτικό σύστημα της Κνωσού ήταν μεγάλου ενδιαφέροντος καθώς αποτελούνταν από δύο ξεχωριστά συστήματα. Ένα για τη διοχέτευση λυμάτων και ένα για τη συλλογή όμβριων (Εικ. 16). Επίσης, η ίδια τεχνολογία εφαρμόστηκε στη διανομή του νερού σε ανάκτορα και άλλους κατοικήσιμους χώρους.

γ) Τέλος, σε περιοχές με υπόγειους υδροφορείς, όπως στο ανάκτορο της Ζάκρου και στην πόλη του Παλαιοκάστρου, η τεχνολογία ανόρυξης και άντλησης νερού από πηγάδια φαίνεται να ήταν αρκετά ανεπτυγμένη. Η τεχνολογία που εφαρμοζόταν για την άντληση του νερού των πηγαδιών ήταν επίσης αξιοθαύμαστη [35].



Εικόνα 16: Λαξευμένα πέτρινα κανάλια συστήματος συλλογής όμβριων από τις στέγες, Κνωσός (φωτ. [www. Waterencyclopedia.com](http://www.Waterencyclopedia.com))

3.1.2 ΜΥΚΗΝΑΪΚΗ ΕΠΟΧΗ (1600 - 1100 π.Χ.)

Στις Μυκήνες της Ηπειρωτικής Ελλάδας στο τέλος του 13^{ου} αι π.Χ. είχαν κατασκευάσει μία υπόγεια δεξαμενή (Εικ. 17), η οποία εφοδιαζόταν με νερό από τις πηγές της Περσεΐας μέσω ενός κλειστού αγωγού από τερακότα μήκους 200m ο οποίος ήταν σκαμμένος μέσα σε βράχο. Ο σωλήνας από τερακότα φαίνεται ακόμα από τη στέγη της δεξαμενής [37]. Εσωτερικά στη δεξαμενή παρατηρείται επίστρωση υδραυλικού ασβεστοκονιάματος. Η δεξαμενή βρίσκεται εντός των τοίχων της Μυκηναϊκής ακρόπολης για να παρέχει νερό στους κατοίκους ακόμη και σε περίπτωση πολιορκίας.



Εικόνα 17: Υπόγεια Μυκηναϊκή Δεξαμενή .

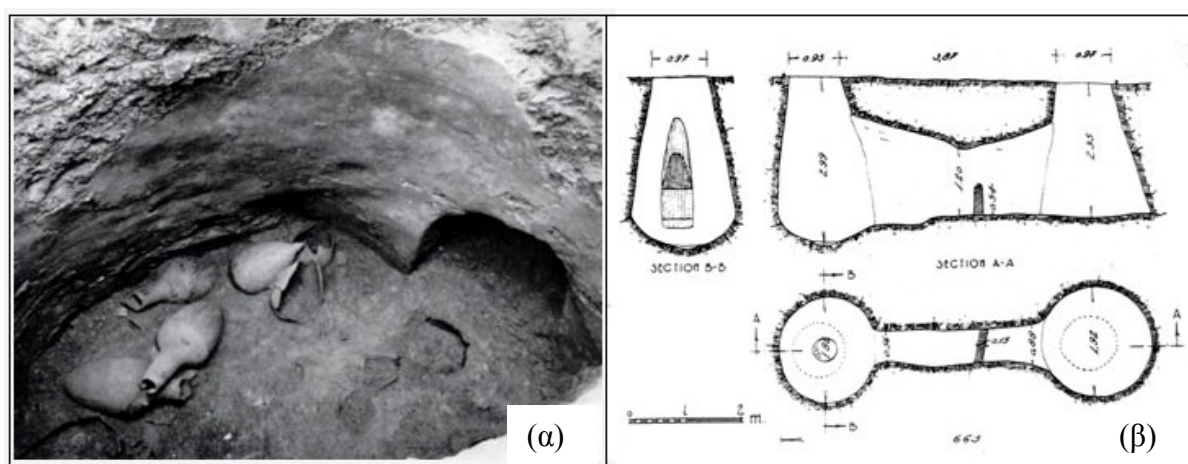
3.1.3 ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΕΠΟΧΗ (500 – 336 π.Χ.) - Η ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Η διαχείριση υδάτινων πόρων στην αρχαία Αθήνα, με πληθυσμό που ανέρχεται στους 200.000 κατά τη διάρκεια της Χρυσής εποχής (5^ο αι π.Χ.) είναι μεγάλου ενδιαφέροντος. Οι Αθηναίοι κατέβαλαν μεγάλες προσπάθειες πάνω στην παροχή νερού για την άνυδρη πόλη τους. Οι πρώτοι κάτοικοι επέλεξαν το λόφο της Ακρόπολης για την αποίκισή τους λόγω της φυσικής προστασίας που προσέφερε και την παρουσία τριών φυσικών πηγών. Παρόλα αυτά το νερό από τις πηγές δεν ήταν αρκετό για να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό. Ως εκ τούτου οι αθηναίοι εκμεταλλευόντουσαν το υπόγειο νερό, χρησιμοποιώντας πηγάδια, και τα όμβρια ύδατα με την κατασκευή στερνών [34].

Ο Αριστοτέλης στην Πολιτεία το 320 π.Χ. γράφει: « Οι πόλεις χρειάζονται δεξαμενές που να τους εξασφαλίζουν σε περίοδο πολέμου.» Κατά τη διάρκεια αυτής της εποχής υπήρχε μία περίοδος ξηρασίας που διήρκεσε 25 χρόνια και ήταν αναγκαία η συλλογή και αποθήκευση βρόχινου νερού. Εκείνη την περίοδο δεξαμενές κατασκευάστηκαν στην Αγορά της Αθήνα για πρώτη φορά [36] και μέχρι σήμερα στην αρχαία αγορά έχουν ανευρεθεί πολλές στέρνες, οι οποίες χρονολογούνται ανάμεσα στον 4^ο – 1^ο αιώνα π.Χ. και πιστεύεται ότι αξιοποιούνταν για δευτερεύουσα χρήση ή όταν η φυσική παροχή νερού δεν ήταν επαρκής. Συνεπώς χρησιμοποιούσαν το νερό από τα πηγάδια για πόσιμο, ενώ το νερό μέσα στις στέρνες το χρησιμοποιούσαν κυρίως για καθάρισμα. Τα όμβρια συλλέγονταν από τις περιβάλλουσες στέγες από όπου διοχετεύονταν στις υδρορροές και κατέληγαν μέσα σε ένα κανάλι στο επίπεδο του εδάφους που οδηγούσε στο στόμα της στέρνας. Οι στέρνες ήταν σχετικά μικρές με διάμετρο περίπου 3m και είχαν το σχήμα φιάλης, πιθανώς για να αποφεύγεται ο κίνδυνος κατάρρευσης των πετρωμάτων (Εικ. 18). Συχνά δύο διαδοχικές στέρνες συνδέονταν με ένα κανάλι, ενώ τα τοιχώματα των στερνών και των καναλιών είχαν επίστρωση υδραυλικού κονιάματος [40].

Η σημασία του νερού στην Αθήνα δε συνδεόταν μόνο με τις βασικές χρήσεις (πόσιμο νερό, μαγείρεμα, καθάρισμα). Το νερό σχετιζόταν επίσης και με την αισθητική ομορφιά της πόλης, το οποίο αναδεικνύεται μέσα από τα πολλά σιντριβάνια που βρίσκονται στην Αθήνα. Μια άλλη σημαντική χρήση του νερού αφορούσε τα δημόσια λουτρά, για τα οποία αποτελεί ενδιαφέρον το ότι ήταν κοινά για γυναίκες και άντρες και αποτελούσαν χώρο ψυχαγωγίας, υγιεινής, κοινωνικοποίησης και πολιτισμού.

Εκτός από τις κατασκευαστικές λύσεις για την παροχή νερού και του αποχετευτικού συστήματος, ο Αθηναϊκός πολιτισμός ανέπτυξε νόμους και θεσμικά πλαίσια. Οι πρώτοι γνωστοί νόμοι οφείλονται στον Σόλωνα, πολιτική προσωπικότητα της Αθήνας και ποιητής στα τέλη του 7^{ου} αι και στις αρχές του 6^{ου} αι π.Χ. Το σύνολο των ρυθμιστικών κανονισμών και των συστημάτων διαχείρισης νερού στην Αθήνα πρέπει να λειτουργούσε εξαιρετικά προσεγγίζοντας αυτό που ονομάζουμε σήμερα βιώσιμη διαχείριση υδάτων. Για παράδειγμα η σύγχρονη χάραξη πολιτικής και οι μηχανικοί που ασχολούνται πάνω στη διαχείριση υδάτινων πόρων τονίζουν τη σημασία των έργων μικρής κλίμακας όπως οι εγχώριες δεξαμενές, οι οποίες μειώνουν το ποσό των όμβριων που πρέπει να απορριφθούν ενώ προσφέρουν μια πηγή νερού για ιδιωτική χρήση [34] .



Εικόνα 18: α) Στέρνα στην αρχαία Αγορά, β) Στέρνες στον λόφο του Κολωνού Αγοραίου.

3.1.4 ΡΩΜΑΪΚΗ ΕΠΟΧΗ (146 Π.Χ. – 323 μ.Χ.)

Κατά τη διάρκεια της κλασσικής εποχής, οι πολιτικές εξελίξεις στην Ελλάδα χαρακτηρίζονταν από πολέμους ανάμεσα σε διάφορες πόλεις, οι Περσικοί πόλεμοι, και από έντονες διαμάχες ανάμεσα στους διαδόχους του Μ. Αλεξάνδρου μετά τον θάνατο του. Η Ρωμαϊκή αυτοκρατορία, δυτικά της περιοχής της Ελλάδας, βαθμιαία μεγάλωνε και αναδείχτηκε η πιο ισχυρή δύναμη στην περιοχή της Μεσογείου, μετά την ήττα της Καρχηδόνας το 146 π.Χ. και με διαδοχικά βήματα κατέκτησαν όλο τον Ελληνικό κόσμο. Οι πολιτικές καταστάσεις επηρέασαν τις εγκαταστάσεις νερού και κυρίως τα συστήματα παροχής [37]. Η παράδοση και η τεχνολογία διαχείρισης υδατικών πόρων της Μινωικής

περιόδου συνεχίστηκε και ολοκληρώθηκε κατά την περίοδο αυτή (Ελληνιστική και Ρωμαϊκή περίοδο 330 π.Χ.- 330 μ.Χ.). Έτσι, βελτιώθηκε σημαντικά η ποιότητα των πήλινων σωλήνων ύδρευσης και η τεχνολογία των υδραγωγείων και των δεξαμενών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα στην Κρήτη είναι το σύστημα διανομής και καθαρισμού του υδρευτικού νερού στη Ρωμαϊκή Κίσσαμο, οι δεξαμενές υδροδότησης της αρχαίας Πολυρρήνιας και τα υδραγωγεία Χερσονήσου και Λύττου. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας και σπουδαιότητας αποτελούν οι δεξαμενές υδροδότησης της Δρήρου, της Λατούς, της Ελευθέρας (Εικ. 19) και των Απτέρων. Κάθε μια από αυτές αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας έργο, με ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά που, ακόμη και σήμερα, τεχνικοί επιστήμονες μπορούν να διδαχθούν από την κατασκευή τους, τη συλλογή, τη μεταφορά νερού και από τα συστήματα διανομής του νερού για αστική χρήση. Την ίδια περίοδο κατασκευάστηκαν και λειτούργησαν τα μοναδικά στην ιστορία της ανθρωπότητας λιμενικά έργα στην αρχαία Φαλάσαρνα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και οικιακές δεξαμενές, λουτρά και υδραγωγείο [35]. Συνοπτικά περιγράφονται δύο από τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις υδροδότησης για το νομό Χανίων, της Πολυρρήνιας και της Απτέρας.



Εικόνα 19: Δεξαμενή Υδροδότησης στην Ελευθέρνα , Ν. Ρεθύμνου. (φωτ. a- aggelakis.gr).

3.1.4.1 Η ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΡΡΗΝΙΑ

Στο λόφο του Παλαιόκαστρου, στην Κίσσαμο εντοπίστηκαν εκτεταμένα ερείπια της αρχαίας πόλης Πολυρρήνιας. Ο Nowicki αναφέρει ότι επιφανειακά ευρήματα μαρτυρούν την κατοίκηση του χώρου ήδη από τη Νεολιθική περίοδο και κυρίως κατά τους Υστερομινωικούς και Γεωμετρικούς χρόνους, [41], ενώ η ιστορία της αρχαίας Πολυρρήνιας φτάνει μέχρι την Ρωμαϊκή εποχή. Στο λόφο της αρχαίας Πολυρρήνιας είναι ορατές λαξευτές οικίες σε βράχο που διέθεταν υπόγειες στέρνες στις οποίες το νερό καθοδηγείτο με σκαλισμένα αυλάκια (Εικ. 20), τα οποία πιθανά χρονολογούνται πριν τη Ρωμαϊκή Περίοδο.

Επίσης στην Πολυρρήνια υπήρχαν κρήνες σε λατρευτικούς χώρους και μέχρι σήμερα σώζονται δύο Ρωμαϊκά υδραγωγεία με δύο μεγάλες δεξαμενές (Εικ. 21 και 22), για την κατασκευή των οποίων εκμεταλλεύτηκαν το βραχώδη σχηματισμό του λόφου. Το νερό από τα υδραγωγεία αξιοποιούνταν από τους κατοίκους του χωριού μέχρι τους νεώτερους χρόνους (περίπου μέχρι το δεύτερο μισό του 20^{ου} αι). Από πληροφορίες του τέως προέδρου του χωριού, οι δύο δεξαμενές ενώνονται στο βάθος τους και στις αρμοδιότητες των κατοίκων του χωριού ήταν κάθε χρόνο να μπαίνουν μέσα στις δεξαμενές και να τις καθαρίζουν φροντίζοντας για την ποιότητα του νερού. Στο χωριό παρατηρούνται πέτρινα αυλάκια που καθοδηγούν το νερό στους κήπους και τα χωράφια ή τα διοχετεύουν μέσα σε στέρνες και, τέλος, υπάρχουν υπόγειοι δίοδοι, ώστε οι άνθρωποι να έχουν πρόσβαση για τη συντήρηση εσωτερικά των υδραγωγείων.



Εικόνα 20: (α) Σπίτι λαξευμένο σε σπηλιά με (b) στέρνα για συλλογή νερού (c) μέσω αυλακιού στο πάνω μέρος της σπηλιάς



(a)



(b)



(c)



(d)

Εικόνα 21: Μεγάλο Ρωμαϊκό Υδραγωγείο Πολυρρήνιας, α)Πρόσοψη Υδραγωγείου, β) Εικόνα από τη δεξαμενή εσωτερικά του Υδραγωγείου γ), δ) Πέτρινα κανάλια που καθοδηγούν το νερό από το Υδραγωγείο σε καλλιεργούμενες εκτάσεις ή μέσα σε στέρνες για μεταγενέστερη χρήση.



(a)



(b)



(c)



(d)

Εικόνα 22: a) Δεύτερο Υδραγωγείο Πολυρρήνιας, b) και c) Σημείο εξόδου νερού, d) Εγκαταστάσεις για πλύσιμο ρούχων. Το νερό που χάνονταν από τη διαδικασία αυτή συγκεντρωνόταν σε ένα κατώτερο σημείο για άρδευση.

3.1.4.2 *Η ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΠΤΕΡΑ*

Στο νομό Χανίων, νοτιοανατολικά του κόλπου της Σούδας εντοπίζεται ο λόφος της Απτέρας. Οι γραπτές πηγές, κυρίως επιγραφικές μαρτυρίες δείχνουν ότι η περίοδος της μεγαλύτερης ακμής της Απτέρας ήταν οι πρώιμοι Ελληνιστικοί χρόνοι, οπότε η πόλη είχε κόψει δικό της νόμισμα και είχε ισχυροποιηθεί οικονομικά και πολιτικά. Με τη Ρωμαϊκή κατάκτηση η Άπτερα όπως και οι περισσότερες πόλεις – κράτη, χάνει τον πολιτικό της χαρακτήρα και ακολουθεί σε οικονομικό κυρίως επίπεδο τις βλέψεις της Ρώμης. Καθώς ο βασικός τομέας της οικονομίας ήταν ο αγροτικός, πρέπει να υποθέσουμε ότι και η Άπτερα μετατράπηκε σε πόλη με τέτοιο χαρακτήρα.

Στο κέντρο της περιτειχισμένης πόλης σώζονται δύο εντυπωσιακές σε μέγεθος και κατασκευή δεξαμενές. Η μία έχει κάτοψη σε σχήμα Γ, με μήκος μεγάλου σκέλους 55.80m και μικρού 34.20m, πλάτους 9m και χωρητικότητας 3050 m³ νερού. Κατά τις πρόσφατες εργασίες καθαρισμού και στερέωσης στην ίδια δεξαμενή εντοπίστηκε φρεάτιο καθίζησης και κλειστός αγωγός εξόδου μικρής διατομής, με πιθανό σύστημα καθαρισμού (Εικ. 24 γ, ε). Η άλλη δεξαμενή είναι τρίκλιτη, με εσωτερικές διαστάσεις 17.00 x 25.00 m² και χωρητικότητας 2900m³ (Εικ. 24 α, β, δ). Οι δύο αυτές δεξαμενές είναι κατά το μεγαλύτερο τμήμα τους υπόσκαφες στο βράχο, ενώ το υπέργειο τμήμα τους στηρίζεται σε αντηρίδες, ώστε να παραλαμβάνονται οι πιέσεις από το νερό.

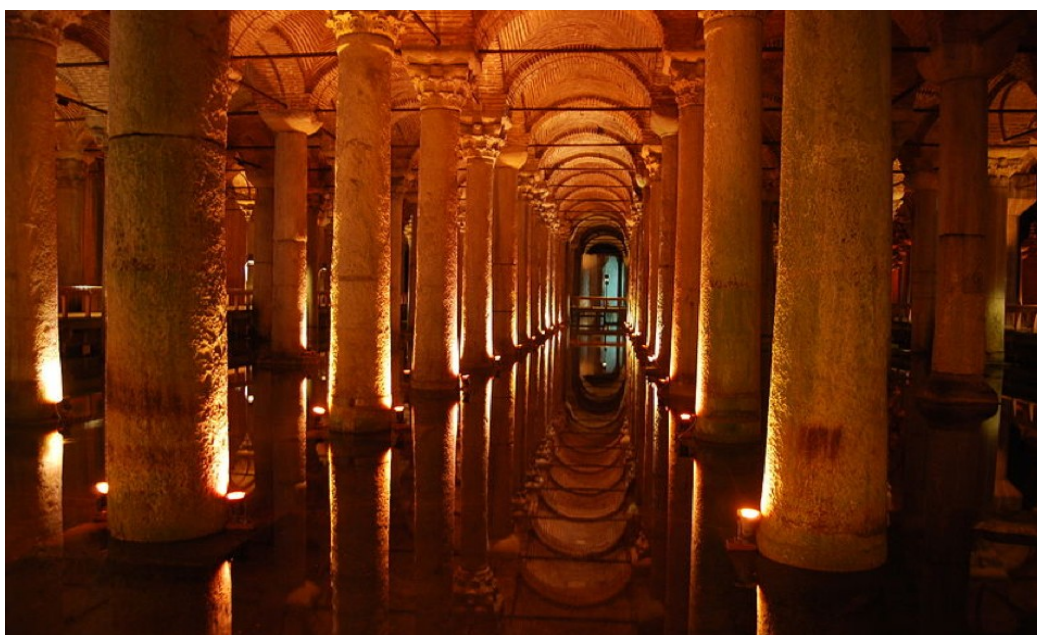
Το μέγεθος των δεξαμενών, καθώς και η ανεξάρτητη λειτουργία τους (δεν ήταν δηλαδή ενταγμένες σε κτιριακά συγκροτήματα, αλλά εξυπηρετούσαν ανάγκες της πόλης) παραπέμπουν σε σύνδεσής τους με υδραγωγείο. Όμως εδώ το μεγάλο μέγεθος δηλώνει την ανάγκη αποθήκευσης του νερού για περίοδο ανομβρίας και όχι την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας νερού για περιορισμένο χρονικό διάστημα, που θα ήταν δυνατή μόνο μέσω υδραγωγείου. Άλλωστε δεν έχουν εντοπιστεί ίχνη υδραγωγείου στα όρια της ρωμαϊκής Απτέρας και γύρω από αυτήν, ενώ οι γνωστές πηγές του Στύλου και του Καλαμίου βρίσκονται σε χαμηλότερη στάθμη τουλάχιστον 150m. Ο τρόπος κατασκευής είναι ο εξής:

- Υδραυλικό κονίαμα εσωτερικά, πολύ επιμελημένο.
- Θολωτή επικάλυψη κυρίως από επιμήκεις θόλους.
- Υπόσκαφες για καλύτερη υγιεινή του νερού.
- Σκάλα καθόδου.
- Σύστημα καθαρισμού και φρεάτιο καθίζησης.

Η τοιχοποιία των δεξαμενών είναι χυτή τοιχοποιία με τσιμεντοκονίαμα ενώ αποτελείται από δύο επιπλέον στρώματα, τα οποία καλύπτουν την εσωτερική λιθοδομή. Ένα στρώμα από τριγωνικές λίθους με αρμό κονιάματος πάχους 1.5 -2.2 cm και ένα στρώμα με πλίνθους στο $\frac{1}{4}$ των διαστάσεων μιας πλίνθου 25.5 x25.5 cm και πάχους 4.5cm. Οι πλίνθοι είναι επιχρισμένοι με υδραυλικό κονίαμα 4cm. Το δάπεδο έχει διαστρωθεί με υδραυλικό κονίαμα. Ο θόλος της δεξαμενής Γ που δε διατηρείται πρέπει να ήταν κατασκευασμένος με ολόκληρες πλίνθους, όπως φαίνεται από τα σημεία γένεσής του, ενώ οι θόλοι της τρίκλιτης που διατηρούνται είναι από ημίεργες πέτρες [42]. Επίσης στην περιοχή της Απτέρας διασώζονται στέρνες λαξευμένες σε βράχο για οικιακή χρήση νερού.

3.1.5 ΠΡΩΤΟΒΥΖΑΝΤΙΝΗ ΕΠΟΧΗ (4^{ος} – 5^{ος} αι μ.Χ.)

Η ιστορία των δεξαμενών συνεχίζεται μέχρι τις μεγαλοπρεπείς δεξαμενές που κατασκευάστηκαν την εποχή του Βυζάντιου. Η μεγαλύτερη δεξαμενή εκτιμάται ότι είναι στην Κωνσταντινούπολη (Yerebatan Sarayı). Κατασκευάστηκε υπό την κυριαρχία του Ιουστινιανού (527 – 565 μ.Χ) και έχει διαστάσεις 140m x 70 m και χωρητικότητα 80,000 m³ [37].



Εικόνα 23: Yerebatan Sarni ή η Βασιλική δεξαμενή (φωτ. Wikipedia)



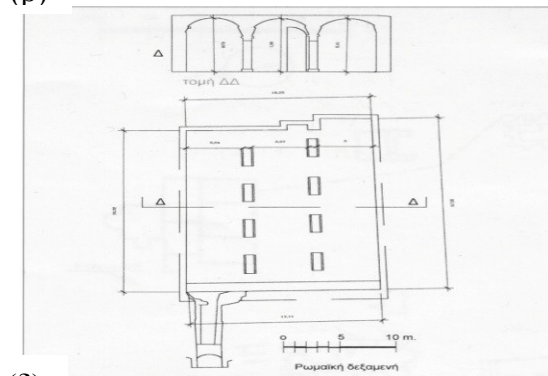
(α)



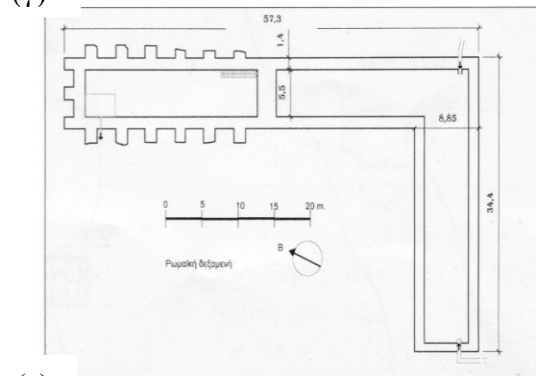
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Εικόνα 24: Άπτερα α) Τρίκλιτη Δεξαμενή β) Εσωτερική Άποψη γ) Δεξαμενή σε σχήμα Γ, (φωτ. Γ. Μπομπολάκης) δ) Αποτύπωση Τρίκλιτης Δεξαμενής ε) Αποτύπωση Δεξαμενής σε σχήμα Γ.

3.2 Η ΑΞΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ – ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

Η γνώση της παράδοσης αναφέρεται σε καινοτομίες και πρακτικές των τοπικών κοινωνιών ανά τον κόσμο. Οι πληροφορίες, δεξιότητες και πρακτικές αυτές μεταφέρονται προφορικά από γενιά σε γενιά και καθώς προσαρμόζονται στην τοπική κουλτούρα και στο περιβάλλον, εξελίσσονται και εμπλουτίζονται μέσα στους αιώνες. Ενώ παράλληλα η συμβολή της παράδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς οδηγεί σε πρακτικές που συνδέονται με την αειφόρο εκμετάλλευση και διαχείριση φυσικών πόρων [43].

Επομένως η παραδοσιακή γνώση είναι λάθος να θεωρείται ως μικρής σπουδαιότητας συγκρινόμενη με τις οικονομικές ωφέλειες και τεχνολογικές διαδικασίες που βρίσκονται σε εξέλιξη. Ακόμα και από μία ποσοτική προσέγγιση, η χρήση τους υποστηρίζει το μεγαλύτερο μέρος της ανθρωπότητας, η οποία είναι διασκορπισμένη σε λιγότερο βιομηχανοποιημένες χώρες. Ωστόσο στα μέρη αυτά όπου οι παραδοσιακές τεχνικές χρησιμοποιούνται ακόμα μαζικά, θεωρούνται από τους νεότερους ως οπισθοδρομικές.

Το παραπάνω εξηγεί το παράδοξο κατά το οποίο οι ανεπτυγμένες χώρες έχουν επιτύχει να υποστηρίζουν τις απαραίτητες προσπάθειες με μία μεγάλη αύξηση της αξίας του προϊόντος και έχουν καταφέρει να διατηρήσουν ένα υψηλό επίπεδο των παραδοσιακών τους τεχνικών. Στις περιοχές Valais στην Ελβετία, Loire Valley στην Γαλλία και Tuscany στην Ιταλία, η διατήρηση παραδοσιακών τεχνικών στη γεωργία εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την υψηλή ποιότητα του τοπίου. Οι δυσκολίες που προκύπτουν από την απαίτηση υψηλής εργασίας και συντήρησης εξισορροπούνται από τα προϊόντα μεγάλης αξίας που επιτυγχάνονται από αυτές τις τεχνικές. Από τη στιγμή που είναι δυνατά παλαιότερα συστήματα παραγωγής, χάρη στη διατήρηση παραδοσιακών τεχνικών διαχείρισης εδάφους, η καλλιέργεια της ελιάς και των αμπελώνων και άλλων γεωργικών προϊόντων μπορεί να διασφαλίσει ένα καλαίσθητο περιβάλλον, ενώ παράλληλα προωθεί την αειφόρο ανάπτυξη.

Τα παραδοσιακά συστήματα διαχείρισης υδάτινων πόρων και προστασίας εδάφους προϋποθέτουν τη συμμετοχή της εγχώριας κοινότητας, η οποία δύναται να έχει τον έλεγχο των συστημάτων μικρής και μεσαίας κλίμακας που προτείνει και αναπτύσσει η ίδια. Με αυτόν τον τρόπο η κοινότητα μιας περιοχής αποκτά γνώση και επαφή με το περιβάλλον στο οποίο ζει και είναι δυνατό, μέσω της συνεργασίας και της πρωτοβουλίας των γηγενών κατοίκων, να συμμετέχει στις λύσεις απέναντι σε προβλήματα που της παρουσιάζονται, δημιουργώντας μια αρμονική και βιώσιμη σχέση με το περιβάλλον, και επιπλέον μπορεί να

συμβάλλει ενεργά στην αειφόρο ανάπτυξη του τόπου όπου βρίσκεται και να αναπτύσσει ισχυρή κοινωνική δομή. Αποτελεί γεγονός ότι οι συνθήκες ανθρώπων που προτιμούν τη κοινωνική συνοχή και αποκτούν αυτοπεποίθηση μέσα στην πολιτιστική τους ταυτότητα είναι πιο ευνοϊκές.

Συνεπώς οι αξίες της παράδοσης, οι μέθοδοι των κατασκευών και οι δεξιότητες των τεχνιτών συνιστούν τις βάσεις πάνω στις οποίες θεμελιώνεται η παραγωγή η οποία είναι τεράστιας οικονομικής σημασίας για πολλές σύγχρονες χώρες. Επομένως μπορούμε να δηλώσουμε ότι η παράδοση είναι ένα μέλλον πετυχημένου εκσυγχρονισμού, ικανού να προσφέρει πλεονεκτήματα και οικονομικά οφέλη και η προστασία και η εξέλιξη των παραδοσιακών συστημάτων διαχείρισης φυσικών πόρων είναι κρίσιμη για την προστασία του τοπίου και για να γίνει αντιληπτό ένα ασφαλές και βιώσιμο μέλλον .

Με τη μετανάστευση και τη δραματική μετεγκατάσταση από τις παραδοσιακές περιοχές σε νέα αστικά κέντρα, με τη ραγδαία εγκατάλειψη ενός μεγάλου τμήματος του αγροτικού τομέα από τον πληθυσμό ή την εκμηχάνιση των καλλιεργειών και την επιπόλαια υπόδειξη της σύγχρονης τεχνολογίας ως ανώτερη, η διαδικασία της προστασίας και της διάδοσης της γνώσης διακόπτεται και χάνεται. Ολόκληρα ιστορικά κέντρα και αγροτικά τοπία είναι καταδικασμένα να αφανιστούν και να εγκαταλειφτούν όταν δεν έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν τις καινοτομίες που χρειάζονται για να λειτουργήσουν [44]. Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα παραδοσιακών συστημάτων που ήταν λειτουργικά μέχρι τα μέσα περίπου του 20^{ου} αιώνα στο Ν. Χανίων.

3.2.1 ΘΕΡΙΣΟΣ

Στο χωριό Θέρισο, υπάρχει μικρό ρεύμα (*Κολύμπα*), το οποίο αξιοποιούσαν οι κάτοικοι του χωριού για άρδευση των κήπων τους. Σε αυτό το ρεύμα χρησιμοποιούσαν ένα μικρό ξύλινο εμπόδιο, το οποίο είχε το ρόλο του φράγματος (Εικ. 25α). Το χειμώνα το άφηναν ανοιχτό και μέρος του νερού συγκεντρωνόταν σε κλειστή ορθογώνια υπόγεια στέρνα (*Μάνα*), μέσω ενός πέτρινου καναλιού (Εικ. 25.γ και 25.β). Το καλοκαίρι έφραζαν τη ροή του ρεύματος, και το άνοιγαν όταν έπρεπε να ποτίσουν τους κήπους τους, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούσαν το νερό της στέρνας για συμπληρωματική άρδευση. Στις ευθύνες των κατοίκων ήταν η απομάκρυνση των φερτών υλών πίσω από το φράγμα για να μη μειώνεται η χωρητική ικανότητα της κοιλάτητας μέσα στο υδατόρευμα .

Επίσης σε υψηλότερο σημείο από την τοποθεσία των καλλιεργειών, οι οποίες σήμερα έχουν εγκαταλειφθεί, υπάρχουν δύο επιφανειακές ρηχές πέτρινες δεξαμενές, οι οποίες συλλέγανε τις επιφανειακές απορροές και χρησίμευαν για άρδευση (Εικ. 26 και 27). Για τη λειτουργία των παραπάνω συστημάτων υπήρχε υδρονόμος ο οποίος καθόριζε την ώρα που το νερό θα περάσει από τα τεχνητά συστήματα καναλιών σε κάθε ξεχωριστό χωράφι ή κήπο.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 25: α) Μικρό ρεύμα για την άρδευση κήπων. β) Πέτρινο κανάλι μεταφοράς νερού από το ρεύμα στους κήπους. γ) Στέρνα για συμπληρωματική άρδευση.



Εικόνα 26: Πέτρινες δεξαμενές παρείχαν νερό άρδευσης με τη δύναμη της βαρύτητας μέσω χωμάτινων αυλακιών στις καλλιέργειες.



Εικόνα 27: Τοποθεσίες εγκαταλειμμένων καλλιεργειών. Στο μπροστινό μέρος της φωτογραφίας φαίνονται οι καλλιέργειες που βασίζονταν στο νερό των επιφανειακών στερνών για άρδευση (Εικ. 26).

3.2.2 Δ. ΒΑΜΟΥ

Στο δήμο Βάμου, στο Κόκκινο χωριό είναι συγκεντρωμένες σε μια πλαγιά περίπου 13 στέρνες. Από πληροφορίες των κατοίκων της περιοχής οι στέρνες είναι φτιαγμένες από ασβεστόλιθο και έχουν εσωτερικά επίστρωση από αργιλώδες χώμα, ενώ αρκετές έχουν προσθήκη σκυροδέματος στο πάνω μέρος τους (Εικ. 28). Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά την εγκατάλειψή τους, μέχρι σήμερα ένας γηραιός κάτοικος της περιοχής, κτηνοτρόφος, συνεχίζει να παρέχει από αυτές νερό στο κοπάδι του. Επίσης, στο Γαβαλοχώρι είναι κατασκευασμένα στο ίδιο σημείο εφτά Ενετικά Πηγάδια (Εικ. 29).



Εικόνα 28: Παραδείγματα στερνών στο Κόκκινο Χωριό, Δ. Βάμου. Δεξιά παρουσιάζεται στέρνα κατασκευασμένη κάτω από βραχώδη επιφάνεια που λειτουργεί ως επιφάνεια απορροής.



Εικόνα 29: Ενετικά Πηγάδια στο Γαβαλοχώρι, Βάμος

3.2.3 ΣΤΕΡΝΕΣ

Άλλο ένα παράδειγμα αποτελεί το χωριό Στέρνες στον Δ. Ακρωτηρίου. Λόγω έντονης έλλειψης φυσικών υδάτινων πόρων στην περιοχή έγινε εκτεταμένη χρήση στερνών, από όπου πήρε και το όνομα της η περιοχή. Λόγω του πετρώματος της περιοχής οι περισσότερες είναι λαξευμένες σε βράχο και σε κάποιες περιπτώσεις διακρίνεται κονίαμα. Επίσης στην τοποθεσία της εκκλησίας εντοπίστηκε ένας μεγάλος υπόγειος ταμιευτήρας νερού σμιλευμένος σε βράχο, χωρισμένος σε τρεις χώρους, όπου τους παλαιότερους χρόνους, πριν τη χρήση του για αποθήκευση των απορροών, ήταν ομαδικός τάφος (Εικ. 30).



Εικόνα 30: Υπόγειος ταμιευτήρας νερού στο χωριό Στέρνες, Δ. Ακρωτηρίου.

3.2.4 *ΑΝΑΒΑΘΜΟΙ*

Τέλος όσον αφορά τους αναβαθμούς, παρατηρήθηκε ότι μεγάλο ποσοστό των παραδοσιακών ξερολιθιών στο Ν. Χανίων, που λειτουργούσαν ως τοίχος αντιστήριξης, έχει καταρρεύσει ή βρίσκεται σε οριακή κατάσταση ισορροπίας (Εικ. 31). Θεωρείται ότι η εγκατάλειψη επικλινούς περιοχής με αναβαθμούς καταλήγει σε μεγαλύτερους ρυθμούς διάβρωσης από το να μην είχαν κατασκευασθεί. Η αυξανόμενη απορροή απομακρύνει μεγάλες ποσότητες εδάφους σε λίγα χρόνια, οι οποίες ποσότητες είχαν διατηρηθεί για αιώνες μέσα στον αναβαθμό, και τις μεταφέρει στις κοιλάδες υπό τη μορφή πλημμυρικών αποθέσεων. Συνεπώς, εάν ο έλεγχος της διάβρωσης είναι ο κύριος σκοπός για την κατασκευή αναβαθμών, η έλλειψη συντήρησης οδηγεί σε μεγάλους ρυθμούς διάβρωσης [33].



Εικόνα 31: Μεγάλο ποσοστό παραδοσιακών αναβαθμών στο νομό Χανίων κινδυνεύει από κατάρρευση, οδηγώντας σε αυξανόμενη διάβρωση εδάφους.

Κεφάλαιο 4^ο

Ξερολιθικοί Τοίχοι Αντιστήριξης

4.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι ξερολιθικοί τοίχοι κατασκευάζονται χωρίς τσιμέντο ή κάποιο άλλο συνδετικό υλικό. Αυτή η ήπια τεχνική χτισίματος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, ένα από τα οποία είναι η αντοχή των ξερολιθικών κατασκευών στο χρόνο. Η τεχνική της ξερολιθιάς (λιθοδομή χωρίς συνδετικό κονίαμα) είναι ένας αρχαίος τρόπος κατασκευής λιθοδομής, η ακεραιότητα της οποίας βασίζεται στην προσεχτική κατασκευή παρέχοντας τον κατάλληλο βαθμό επικάλυψης ανάμεσα στις πέτρες, οι οποίες συγκρατούνται στη θέση τους μέσω της γεωμετρικής τους διασύνδεσης και της τριβής [45]. Δεν παρουσιάζουν την ακαμψία των τοίχων από σκυρόδεμα αλλά έχουν μια προσαρμόσιμη δομή: μπορούν να παραμορφώνονται με την πάροδο των ετών χωρίς να υφίστανται ρωγμές. Έτσι δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από την παγωνιά, ακόμα κι όταν οι μεμονωμένες πέτρες σκάσουν σε μικρά κομμάτια. Η επιβίωση αυτής της αρχαίας μεθόδου χτισίματος επιβεβαιώνεται από την διατήρηση των τοίχων που είναι ζωντανοί ακόμη μάρτυρες αυτής της τεχνικής. Οι ξερολιθικοί τοίχοι, επίσης, είναι ένα θαυμάσιο παράδειγμα ανακύκλωσης άχρηστων υλικών, διότι κατασκευάζονται από τις πέτρες που μαζεύονται όταν γίνεται ο καθαρισμός των χωραφιών [13].

Στην περιοχή της Μεσογείου, της Ευρώπης και της Μέσης ανατολής οι ξερολιθιές αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο του φυσικού τοπίου κι ένα πολύ σημαντικό μέρος της λαϊκής αρχιτεκτονικής κληρονομιάς. Τη διαχείριση νερού με ξερολιθικές κατασκευές εξασφάλιζαν οι γούρνες και οι λάκκοι, τα κανάλια του νερού, η διαμόρφωση χειμάρρων και

ποταμών, οι νεροδεσιές, οι διαμορφωμένες πηγές και υδρομαστεύσεις και οι αποθήκες χιονιού ή πάγου [12]. Μια σημαντική κατηγορία ξερολιθικών τοίχων που συμβάλλουν στη διατήρηση της δομής του τοπίου και τη διαχείριση του νερού είναι οι τοίχοι αντιστήριξης.

Οι τοίχοι αντιστήριξης ή αναλημματικοί (μιας όψης) χρησιμεύουν στη συγκράτηση γαιών και τη δημιουργία αναβαθμών καλλιέργειας σε κεκλιμένα εδάφη, ενώ μια ειδική μορφή τοίχου αντιστήριξης χρησιμοποιείται για την κατασκευή ομβροδεξαμενών. Όπως αναφέρθηκε από το 1^ο κεφάλαιο, οι αναβαθμοί προστατεύουν το έδαφος από τη διάβρωση στα επικλινή εδάφη και συμβάλλουν στην συγκράτηση του γόνιμου εδάφους και την κατακράτηση νερού στο υπέδαφος και οι στέρνες στην συγκομιδή των όμβριων και των επιφανειακών απορροών. Τοίχος μιας όψης κατασκευάζεται επίσης για να υποστηρίξει έργα οδοποιίας ή πλατείες.

Οι τοίχοι αντιστήριξης εκτός από το ίδιο βάρος τους δέχονται και οριζόντιες δυνάμεις κάθετες στο επίπεδο του τοίχου λόγω των ωθήσεων γαιών και της υδροστατικής πίεσης, τα οποία διαφοροποιούνται σε σχέση με την ποιότητα του εδαφικού σχηματισμού, τις συνθήκες υγρασίας και την κλίση του εδάφους, πιθανών οριζόντιων σεισμικών φορτίων και λοξών δράσεων από την στήριξη επάνω στον τοίχο τόξων ή τοξοτών κατασκευών. Οι διαστάσεις, το σκαρίφημα και η διατομή ενός τέτοιου τοίχου είναι συνάρτηση κυρίως του ύψους του τοίχου, της γωνίας τριβής, του ειδικού βάρους του αντιστηριζόμενου υλικού και γενικά των φορτίων που ενεργούν στην επιφάνεια του αντιστηριζόμενου εδάφους ή του ίδιου του τοίχου αντιστήριξης. Η κλίση του τοίχου ποικίλλει ανάλογα με το πλάτος, το μέγεθος και την κανονικότητα των πετρών. Μικρές πέτρες με ακανόνιστο σχήμα απαιτούν μεγαλύτερη κλίση τοίχου από ότι οι ομοιόμορφες, λείες και μεγάλου όγκου πέτρες [13, 46]. Από άποψη αντίδρασης αυτών των τοίχων για τις αντιστηρίξεις γαιών κυρίως διακρίνουμε τρεις κατηγορίες [13]:

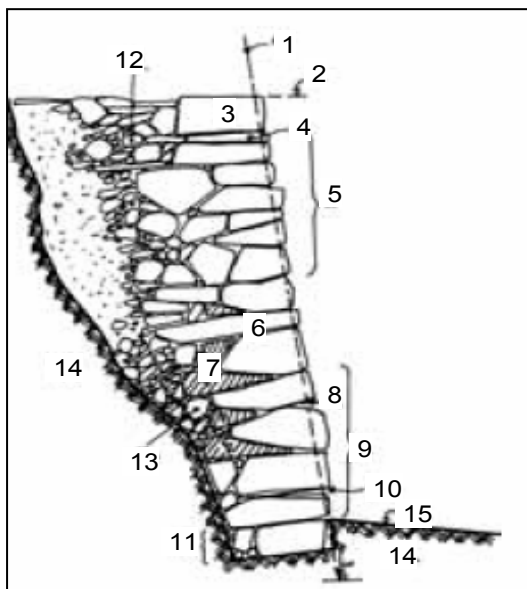
1. Τους αντιδρώντες με το βάρος τους στην περίπτωση ογκωδών τοίχων με κλίση.
2. Τους αντιδρώντες με τη μορφή τους με κλίση βαθμιδωτή εσωτερική ή με κλίση βαθμιδωτή εξωτερική.
3. Τους αντιδρώντες μέσω ειδικού πέλματος.

Ενδεικτικά δίνονται τα στοιχεία του ιδανικού τοίχου αντιστήριξης (Εικ.32), [13]:

1. Ιδεατή γραμμή της κλίσης στη εξωτερική όψη του τοιχείου. Η όψη να κτίζεται με την μικρότερη δυνατή απόκλιση από τη γραμμή.

2. Επίπεδο τελειώματος του τοίχου (άνω βαθμίδα).
3. «Κεφαλάρυ»: πέτρα με μεγάλο όγκο και καλή έδραση για την προστασία του τελειώματος του τοίχου.
4. Πέτρα για την εξασφάλιση της καλής έδρασης του «Κεφαλαριού».
5. Άνω μέρος του τοίχου: οι μικρότερες σε όγκο πέτρες από αυτές που έχει στην διάθεσή του ο κτίστης.
6. Συνδετήρια πέτρα (παίζει το ρόλο του σενάζ). Με μεγάλο σχετικά μήκος τοποθετείται κατά διαστήματα και αγκυρώνει τον τοίχο στην πίσω επιφάνεια.
7. Πέτρες πλήρωσης στη μη ορατή πλευρά καλά στερεωμένες για την πλήρη ακινητοποίηση των στοιχείων της όψης (τοποθέτηση σφηνών στη μη ορατή πλευρά).
8. Οι σφήνες στην όψη είναι άχρηστες.
9. Στη βάση του τοίχου οι μεγαλύτερες σε όγκο πέτρες.
10. Πρόβλεψη κύρια στη βάση του τοίχου ανοιγμάτων που επιτρέπουν να περάσουν τα νερά της βροχής.
11. Η θεμελίωση τουλάχιστον βαθύτερα απ' ότι τα περιοδικά σκαψίματα των γεωργικών εργασιών.
12. Πλήρωση της πίσω όψης με μικρότερες πέτρες, καθώς και σκύρο για την στερέωση της όψης, αλλά και το σταμάτημα του χώματος που παρασύρει το νερό.
13. Πλήρωση του κενού με χώματα των εκσκαφών αναμιγμένων με χαλίκι (σκύρο). Οι εργασίες πλήρωσης γίνονται σταδιακά ακολουθώντας το ύψος του κτιζόμενου τοίχου. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό για το φιλτράρισμα των ομβρίων από το χώμα που κλείνει μακροπρόθεσμα τους πόρους του τοίχου με αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων, την παραμόρφωση ή και υποχώρηση του τοίχου.
14. Φυσικό έδαφος πρανούς.
15. Κάτω στάθμη (χαμηλή βαθμίδα).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή του τύπου και της ποιότητας της πέτρας είναι σημαντικά για τη σταθερότητα του τοίχου. Κάποιοι λίθοι είναι πολύ σκληροί και αντιστέκονται στην αποσάθρωση, ενώ άλλοι μειωμένης σκληρότητας, όπως ο αργιλικός σχιστόλιθος, θρυμματίζονται. Επίσης προσθέτοντας μεγάλη ποσότητα χώματος ανάμεσα στα επίπεδα των λίθων έχει ως αποτέλεσμα την αποδυνάμωση του τοίχου. Επιπρόσθετος έλεγχος της διάβρωσης παρέχεται επιτρέποντας την ανάπτυξη βλάστησης σε μεμονωμένες περιοχές δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα σταθερό σύστημα ριζών διαμέσου του τοίχου. Ωστόσο, μεγάλα ξυλώδη φυτά δεν είναι επιθυμητά [46].



Εικόνα 32: Σκαρίφημα Τοίχου Αντιστήριξης Ξερολιθιάς

Απομείωση αντοχών του τοίχου ξερολιθιάς και επακόλουθη αστοχία μπορεί να αποδοθεί σε αρκετές αιτίες, περιλαμβάνοντας [13, 47]:

- Ανακατανομή φορτίων στο έδαφος και στο υπέδαφος λόγω φυσικών αιτιών, όπως η κίνηση ρευστών σε πορώδη μέσα.
- Βαθμιαία αύξηση της πίεσης νερού.
- Υποχώρηση του ελαφρώς συμπαγούς εδαφικού σχηματισμού ή της θεμελίωσης.
- Χρήση υλικών χαμηλής ποιότητας.
- Απροσεξία στην κατασκευή.
- Διάβρωση της πέτρας.
- Άστοχες πρώιμες διορθώσεις.
- Ανάπτυξη βλάστησης.
- Επίδραση νέων κατασκευών στην περιοχή που επηρεάζουν την αποστράγγιση του νερού.

Στις μέρες μας, οι συγκεκριμένοι τοίχοι αντικαθίστανται από τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος (béton), γιατί δεν εμπιστεύονται πια οι άνθρωποι έργα κατασκευασμένα από πέτρες χωρίς τσιμέντο και γιατί δεν ξέρουν πλέον να κατασκευάζουν τέτοια έργα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο παρελθόν, οι ιδιομορφίες στην κατασκευή ενός πηγαδιού, το οποίο αποτελούσε κατεξοχήν ξερολιθικό έργο, απαιτούσε ειδικό τεχνίτη (πηγαδά). Σήμερα ο τρόπος αυτός έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί στη χώρα μας αφού τα πηγάδια κτίζονται με επάλληλους τσιμεντένιους δακτυλίους. Όμως το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει μειονεκτήματα.

Πρώτον, είναι ένα στοιχείο εμφανώς ξένο προς το τοπίο. Έπειτα οι τοίχοι αυτού του τύπου, μονοκόμματοι και συνήθως με ελάχιστη υδατοπερατότητα δεν είναι προσαρμοσμένοι στην διαρκή πίεση του εδάφους και του νερού. Εμφανίζουν βαθιές ρωγμές, ενώ οι ξερολιθικοί τοίχοι αντιδρούν με σημειακές παραμορφώσεις. Τέτοιου είδους ρωγμές μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του τοίχου σε σύντομο χρονικό διάστημα [13].

4.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΞΕΡΟΛΙΘΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΑΝΤΙΣΤΗΡΗΣΗΣ

Με τον όρο μηχανική αντοχή ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να παραλαμβάνει εξωτερικά φορτία χωρίς να καταστρέφεται η μικροδομή του. Οι κυριότεροι τύποι μηχανικών αντοχών που ενδιαφέρουν όταν εξετάζεται μια κατασκευή από τοιχοποιία είναι η αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό, σε διάτμηση και σε κάμψη. Η θλιπτική αντοχή της ξερολιθιάς εξαρτάται από, [48]:

- Τη θλιπτική αντοχή των τοιχοσωμάτων.
- Το βαθμό εμπλοκής των τοιχοσωμάτων μεταξύ τους.
- Τη γεωμετρία των τοιχοσωμάτων.
- Το μέγεθος και την τραχύτητα των επιφανειών.
- Τη μικροδομή της τοιχοποιίας.

Απαιτείται ικανή θλιπτική αντοχή όλης της στήλης λιθοσωμάτων, της θεμελίωσης και του εδάφους, καθώς κάθε λιθόσωμα μεταφέρει τα υπερκείμενα φορτία και το βάρος του στο υποκείμενο λιθόσωμα και τελικά στη θεμελίωση και το έδαφος [49].

Το κύριο χαρακτηριστικό των ξερολιθικών τοίχων είναι η απουσία συνοχής ανάμεσα στις λίθους, συνεπώς οι ενώσεις των πετρών της λιθοδομής δεν έχουν καθόλου εφελκυστική αντοχή και η διαστρωμάτωση της πέτρας εμφανίζει επίπεδα ολίσθησης τα οποία ενδέχεται να διευρυνθούν. Συνεπώς, οι τοίχοι λιθοδομής πρέπει να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να μην αναπτύσσουν εφελκυσμό σε κανένα σημείο τους ή να συμβούν αστοχίες από λυγισμό ή διάρρηξη [16, 50]. Στην περίπτωση της ξερολιθιάς πρέπει ο τοίχος να είναι ισχυρός σε θλίψη και κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να μην επιτρέπεται να αναπτυχθεί εφελκυσμός σε κανένα τμήμα του τοίχου, ειδικά στη βάση του [11]. Η κάμψη αποτελεί ένα είδος φόρτισης το οποίο προκαλεί ταυτόχρονα στο σώμα που εφαρμόζεται εφελκυστικά, διατμητικά και θλιπτικά φορτία. Για το λόγο αυτό οι εφελκυστικές τάσεις που εμφανίζονται σε μια

τοιχοποιία οφείλονται κυρίως σε καμπτικές ροπές που προκαλούνται από την ύπαρξη έκκεντρων κατακόρυφων φορτίων εντός ή εκτός του επιπέδου της και από οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται κάθετα στο επίπεδο αυτής (οριζόντια σεισμικά φορτία, ωθήσεις γαιών, υδροστατική πίεση).

Οι διατμητικές τάσεις που εμφανίζονται σε μια φέρουσα τοιχοποιία αποτελούν είτε συνιστώσες θλιπτικών φορτίων σε επίπεδα κάθετα στην τοιχοποιία τα οποία σχηματίζουν γωνία με τους αρμούς διαφορετική από 0 και 90°, είτε συνισταμένες ενός πολυδιάστατου εντατικού πεδίου, είτε δυνάμεις αντίδρασης στην επιβολή οριζόντιων φορτίων (π.χ. ωθήσεις γαιών) [48].

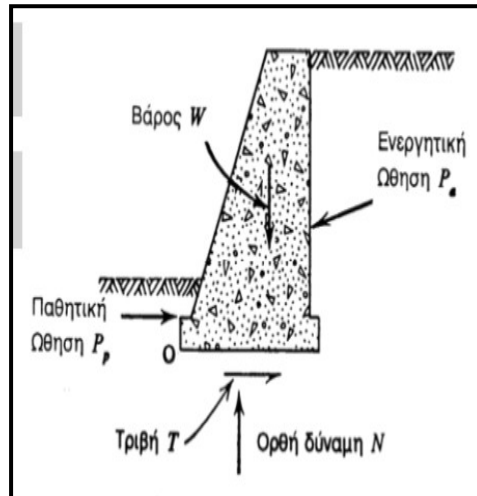
4.3 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Τα εδάφη, λόγω του βάρους τους, ασκούν πιέσεις (πλευρικές ωθήσεις) στα κατακόρυφα στοιχεία που τα περιορίζουν γνωστές ως ωθήσεις γαιών. Οι ωθήσεις αυτές ασκούνται στα έργα αντιστήριξης στην λεγόμενη «ενεργητική πλευρά» που θεωρούνται ως δυσμενείς γεωτεχνικές δράσεις και στην λεγόμενη «παθητική πλευρά» που θεωρούνται ως αντιστάσεις [17,51]. Επίσης, ως δυσμενείς δράσεις, που ασκούνται στην ενεργητική πλευρά, θεωρούνται και οι υδατικές πιέσεις, ή ακριβέστερα, η διαφορά των υδατικών πιέσεων στην ενεργητική και παθητική πλευρά (εφόσον η συνισταμένη πίεση τείνει να αποσταθεροποιήσει τον τοίχο, ως συνήθως συμβαίνει). Δυνάμεις αγκύρωσης, δυνάμεις αντηρίδων ή σταθεροποιητικές δυνάμεις στον πόδα του τοίχου θεωρούνται ως ευμενείς δράσεις (και όχι ως αντιστάσεις) που τείνουν να σταθεροποιήσουν τον τοίχο. Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική επειδή επηρεάζει τις τιμές των επιμέρους συντελεστών, αφού οι επιμέρους συντελεστές δράσεων και αντιστάσεων διαφέρουν σημαντικά.

Στις συμβατικές μεθόδους ελέγχου ευστάθειας κατασκευής οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτές που δε θα δημιουργήσουν σημαντική παραμόρφωση στην κατασκευή και/ ή σημαντική μετακίνηση του εδάφους [50]. Η ευστάθεια των έργων αντιστήριξης ελέγχεται υπό την επιρροή των εξής δυνάμεων (Εικ. 33) [51]:

1. Της ενεργητικής ώθησης γαιών πίσω από τον τοίχο.
2. Της παθητικής ώθησης γαιών εμπρός από τον τοίχο, σε περίπτωση που το θεμέλιο του τοίχου έχει σημαντικό ύψος. Συνήθως όμως η παθητική ώθηση αμελείται ή λαμβάνεται με μειωμένη τιμή, καθώς απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη παραμόρφωση από την ενεργητική για να ενεργοποιηθεί η πλήρης παθητική ώθηση.

3. Του βάρους του τοίχου (W).
4. Της ορθής δύναμης (N) και της δύναμης τριβής στη βάση του τοίχου (T).
5. Της υδροστατικής πίεσης.



Σχήμα 2: Δυνάμεις σε Τοίχο Αντιστήριξης.

4.3.1 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για να γίνει έλεγχος έργων αντιστήριξης σε οριακή κατάσταση αστοχίας, υπολογίζονται αρχικά οι χαρακτηριστικές τιμές των ωθήσεων γαιών (ενεργητικές και παθητικές). Με χρήση των χαρακτηριστικών τιμών των εδαφικών παραμέτρων, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού επιβάλλοντας τους επιμέρους συντελεστές επί τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές και ζητείται η ικανοποίηση της ανισότητας [11]:

$$R_d > E_d \quad (1)$$

(αντοχές > δράσεις)

δηλαδή:

$$\frac{\text{Παθητική Αντίσταση}}{\gamma_R} > (\text{Ενεργητική Ωθηση}) \gamma_F - (\text{Δύναμη Αγκύρωσης}) \gamma_F \quad (2)$$

όπου οι συντελεστές ασφάλειας είναι ίσοι με: $\gamma_R = 1.40$, $\gamma_F = 1.35 \div 1.50$ και $\gamma_F = 1.00$.

Οι κατασκευές αντιστήριξης πρέπει να σχεδιάζονται για να αποφεύγονται τα εξής [50]:

A) Κατάρρευση/ βλάβη από αστάθεια της εδαφικής μάζας λόγω μετατόπισης ή ολίσθησης.

Οι έλεγχοι ασφαλείας που πρέπει να γίνονται είναι:

1. Έλεγχος επάρκειας σε ολίσθηση στη βάση του τοίχου :

$$FS_s = \frac{N \tan \delta}{T} > 1.5 \quad (3)$$

όπου, δ , είναι η γωνία τριβής μεταξύ της βάσης του τοίχου και του υποκείμενου εδάφους.

2. Έλεγχος επάρκειας σε ανατροπή ως προς το σημείο O (Σχήμα 2).

Υπολογίζεται η ροπή ανατροπής της P_a και οι ροπές στήριξης των W και P_p (εφόσον υπολογίζεται) και πρέπει $FS_s > 2$ υπό στατικές συνθήκες φόρτισης.

3. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας του εδάφους.

Η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη πίεση που ασκείται στη βάση του τοίχου.

B) Αστογία των δομικών μελών σε κάμψη και διάτμηση, που ονομάζεται εσωτερική Ευστάθεια.

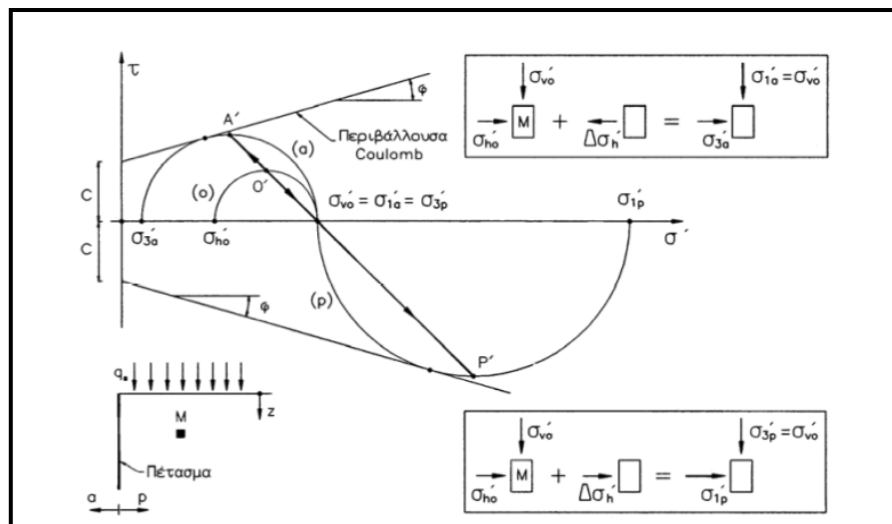
Η εσωτερική ευστάθεια έχει σχέση με τη δομική ακεραιότητα των μελών του τοίχου. Οι ξηρολιθοδομές χαρακτηρίζονται από την απουσία συνοχής μεταξύ των λίθων, το οποίο επιτρέπει την εσωτερική παραμόρφωση. Η κατασκευή δεν είναι άκαμπτη, αλλά υφίσταται σημαντικές παραμορφώσεις, χωρίς αντίστοιχη μείωση της αντοχής. Έτσι μπορεί να εκδηλωθεί καμπύλωση του τοίχου προς τα έξω (bulging deformation) χωρίς κατάρρευση. Ένας βασικός παράγοντας που συμβάλλει στην παραμόρφωση είναι το πορώδες και η εσωτερική διάταξη των λίθων, καθώς η έλλειψη κανονικότητας των πετρών επιτρέπει την περιστροφή, τη θραύση και την μετατόπιση, όσο το φορτίο αυξάνεται. Τέλος στην ευστάθεια του τοίχου συμβάλλει σημαντικά και η γωνία τριβής, καθώς, όταν είναι αρκετά υψηλή, επιτρέπει την αντίσταση στις οριζόντιες δυνάμεις.

Οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας των γεωλογικών υλικών, (βραχομάζα, εδάφη κλπ), καθώς και της λιθοδομής κάτω από την επίδραση εντατικών πεδίων συνοψίζονται στους εξής [52]:

- Τμήματα του ακέραιου υλικού είναι δυνατό να παραμορφωθούν ελαστικά κάτω από συγκεκριμένο εντατικό πεδίο, και στη συνέχεια όταν οι τάσεις αυξάνονται να επέλθει διαρροή (πλαστική παραμόρφωση) ή ψαθυρή αστοχία του υλικού.
- Τυχόν ασυνέχειες του υλικού είναι δυνατό να διευρυνθούν, να κλείσουν ή να ολισθήσουν.
- Τμήματα του υλικού είναι δυνατόν να μετατοπιστούν, είτε μεταφορικά είτε στροφικά.

4.3.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΘΗΣΕΩΝ ΓΑΙΩΝ

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ώθησης γαιών είναι ότι το μέγεθος της εξαρτάται από την πλευρική μετακίνηση, δηλαδή από τη δυνατότητα του στοιχείου που δέχεται την ώθηση να ενδώσει στην οριζόντια διεύθυνση (ενεργητική ώθηση) ή να κινηθεί προς το έδαφος και να το συμπιέσει (παθητική ώθηση), [51]. Στην επιλογή της κατάλληλης ανάλυσης και μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των ωθήσεων σημαντική είναι η εκτίμηση των συνθηκών στράγγισης του εδάφους, οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής, συνοχή c και γωνία τριβής, ϕ και επίσης η γεωμετρία και το είδος του τοίχου αντιστήριξης.



Σχήμα 3: Κύκλοι Αστοχίας του Mohr για την Ενεργητική Οριακή Κατάσταση, (α), και παθητική οριακή κατάσταση, (ρ), θεωρώντας έδαφος που περιορίζεται από κατακόρυφο λείο πέτασμα και λαμβάνοντας την εντατική κατάσταση ενός σημείου Μ.

4.3.2.1 ΩΘΗΣΕΙΣ RANKINE

Για την εφαρμογή της θεωρίας του Rankine θεωρείται ότι οι επιφάνειες του τοίχου αντιστήριξης δεν έχουν τριβή, ο τοίχος αντιστήριξης είναι κατακόρυφος και η επιφάνεια του εδάφους οριζόντια, επομένως οι κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις που ασκούνται εντός της αντιστηριζόμενης εδαφόμαζας, αντιστοιχούν σε κύριες τάσεις. Άρα η κατακόρυφη ολική τάση για ομοιογενές έδαφος υπολογίζεται από τη σχέση (4):

$$\sigma_v = q_s + \gamma \cdot d \quad (4)$$

όπου γ = ειδικό βάρος εδάφους, $[N/m^3]$

d = βάθος εδάφους, $[m]$

q_s = επιπρόσθετο κατακόρυφο φορτίο στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο τύπος ανάλυσης για τον υπολογισμό των ωθήσεων Rankine εξαρτάται από τις συνθήκες στράγγισης του εδάφους και διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- **Συνθήκες Αποστράγγισης Εδάφους ($c' \geq 0$, $\phi' > 0$) – Ανάλυση Ενεργών Τάσεων**

Στις συνθήκες αποστράγγισης εδάφους πραγματοποιείται εκτόνωση του νερού των πόρων και οι ορθές και διατμητικές τάσεις αναλαμβάνονται από τις ενεργές τάσεις, συνεπώς εφαρμόζεται η ανάλυση των ενεργών τάσεων. Οι οριζόντιες ενεργές τάσεις (Εξ.(5), Εξ.(6)) μπορούν να ληφθούν σε όρους κατακόρυφης τάσης από τη γεωμετρία της περιβάλλουσας αστοχίας Mohr – Coulomb, (Σχ. 3), [50, 51]:

Ενεργητική Τάση (ελάχιστο) : $\sigma'_{ha} = p_a = \sigma'_{vo} K_a - 2c'$ (5)

Παθητική Τάση (μέγιστο) : $\sigma'_{hp} = p_p = \sigma'_{vo} K_p + 2c'$ (6)

όπου, $K_a = \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_{vo}} = \frac{1}{N_\phi} = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2(45 - \frac{\phi'}{2})$ (7)

$K_p = \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_{vo}} = N_\phi = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2(45 + \frac{\phi'}{2})$, (8)

είναι οι συντελεστές ενεργητικής και παθητικής ώθησης, αντίστοιχα.

Η συνισταμένη της ενεργητικής πίεσης δηλαδή η ενεργητική ώθηση, και η παθητική ώθηση δίνεται από τις Εξ. (9) και (10):

$$P_a = K_a \left(\frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H \right) - 2c' H \sqrt{K_a} \quad (9)$$

$$P_p = K_p \left(\frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H \right) + 2c' H \sqrt{K_p} \quad (10)$$

• **Αστράγγιστες Συνθήκες Εδάφους ($c_u > 0$ και $\phi_u \geq 0^\circ$) – Ανάλυση Ολικών Τάσεων**

Στην αστράγγιστη φόρτιση κορεσμένων εδαφικών υλικών, το σύνολο της εξωτερικά επιβεβλημένης ισότροπης πίεσης αναλαμβάνεται από τον νερό των πόρων. Σύμφωνα με τον ορισμό των ενεργών τάσεων ($\Delta \sigma' = \Delta \sigma - u$), και δεδομένου ότι η ογκομετρική παραμόρφωση είναι μηδενική, $\Delta \varepsilon_{vol} = 0$, άρα η μέση ορθή ενεργός τάση δεν μεταβάλλεται, συνεπάγεται ότι η μέση αύξηση των ορθών ολικών τάσεων ισούται με την αύξηση της πίεσης πόρων και ο υπολογισμός των ωθήσεων μπορεί να γίνει ως προς τις ολικές τάσεις [51]. Οι οριζόντιες Ολικές Τάσεις υπολογίζονται από τις Εξ. (11) και (12):

$$\text{Ενεργητική Τάση (ελάχιστο)} : \quad \sigma_{ha} = p_a = \sigma_{vo} K_a - 2c_u \quad (11)$$

$$\text{Παθητική Τάση (μέγιστο)} : \quad \sigma_{hp} = p_p = \sigma_{vo} K_p + 2c_u \quad (12)$$

όπου για ομογενές έδαφος, $\sigma_{vo} = \gamma_{sat} Z$.

Η ενεργητική ώθηση και παθητική ώθηση προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$P_a = K_a \left(\frac{1}{2} \gamma_{sat} H^2 + q_s H \right) - 2c_u H \sqrt{K_a} \quad (13)$$

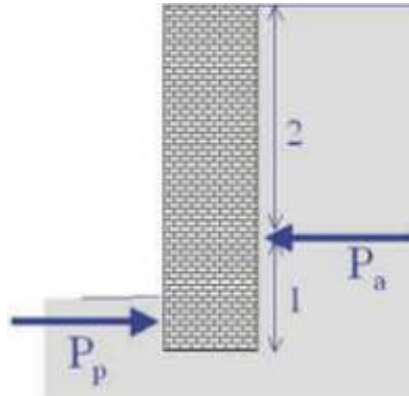
$$P_p = K_p \left(\frac{1}{2} \gamma_{sat} H^2 + q_s H \right) + 2c_u H \sqrt{K_p} \quad (14)$$

Για αστράγγιστες συνθήκες και εφόσον διατηρηθούν αστράγγιστες όπου, $\phi = 0$ προκύπτει ότι $K_a = K_p = 1$. Οπότε, η ενεργητική ώθηση και παθητική ώθηση δίνεται από τις αντίστοιχες εξισώσεις [50] :

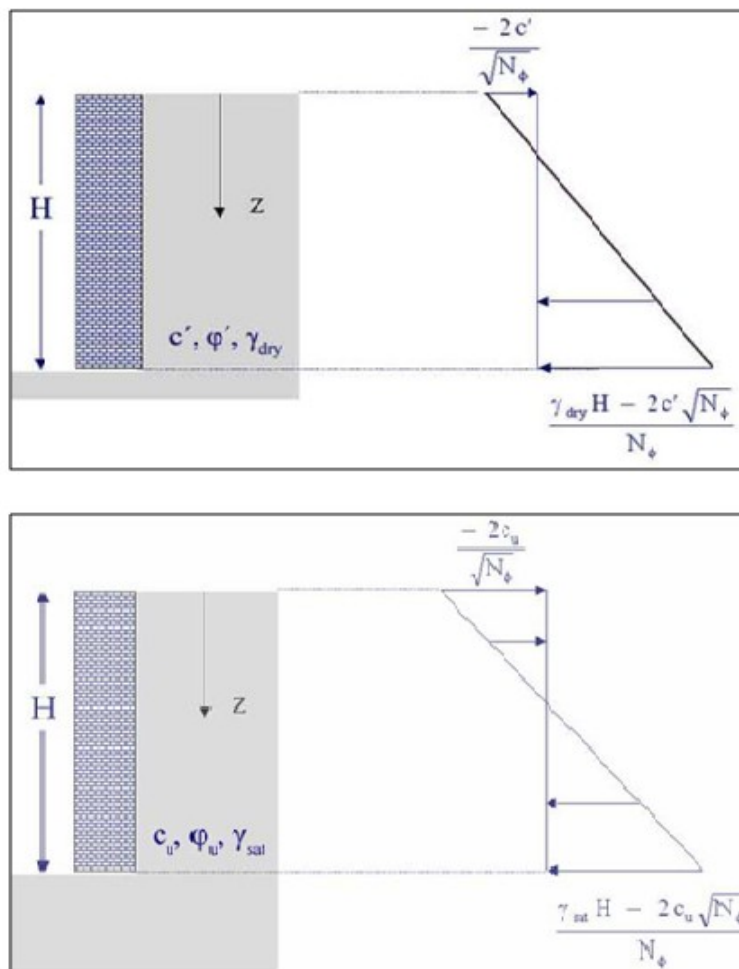
$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H - 2c_u H \quad (15)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 + q_s H + 2c_u H \quad (16)$$

Το σημείο εφαρμογής της οριακής ώθησης υπολογίζεται από την κατανομή των οριακών πιέσεων με το βάθος. Στην περίπτωση της τριγωνικής κατανομής, το σημείο εφαρμογής της ώθησης βρίσκεται στο $1/3$ του ύψους του τοίχου (Σχ. 4).



Σχήμα 4: Σημείο Εφαρμογής Ενεργητικής και Παθητικής Ώθησης.



Σχήμα 5: Ενεργητική κατάσταση αστοχίας τοίχου για: α) συνθήκες εδάφους που πραγματοποιείται στράγγιση, β) αστράγγιστες συνθήκες εδάφους (Συνεκτικό έδαφος).

Όπως αποδεικνύεται γεωμετρικά εύκολα η συνοχή μειώνει τις οριζόντιες ωθήσεις κατά $2c$. Στα Σχ. 5.α και 5.β δίνεται το διάγραμμα των οριζόντιων ωθήσεων, ενεργών και ολικών αντίστοιχα με το βάθος, όπως προκύπτει από τις Εξ. (5) και (11). Παρατηρείται ότι η τιμή των οριζόντιων ωθήσεων είναι αρνητική, δηλαδή εφελκυστική, στο ανώτερο τμήμα του τοίχου. Καθώς η επιφάνεια επαφής τοίχου – γαιών δεν μπορεί να αναλάβει εφελκυστικές τάσεις υπολογίζεται ένα κρίσιμο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, στο οποίο παρουσιάζεται αποσύνδεση του τοίχου από το έδαφος. Αυτό το βάθος δίνεται όταν $p_a = 0$ στις αντίστοιχες εξισώσεις και για μη συνεκτικά εδάφη ή εδάφη συνεκτικά μικρής διαπερατότητας προκύπτει :

$$z_{cr} = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} \quad (17)$$

ενώ για αστράγγιστες συνθήκες οι οποίες παραμένουν αστράγγιστες:

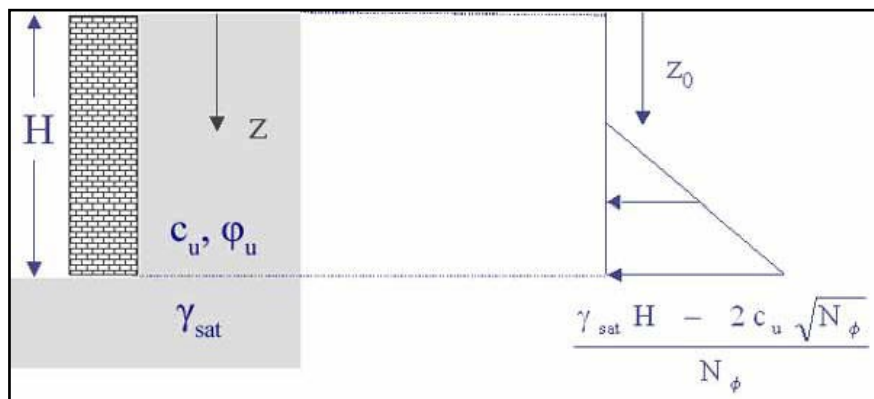
$$z_{cr} = \frac{2c_u}{\gamma} \quad (18)$$

Οι εφελκυστικές δυνάμεις συνήθως δε λαμβάνονται υπόψη (Σχ. 6) και υπολογίζεται η συνισταμένη μόνο των ενεργητικών τάσεων κάτω από τη στάθμη z_{cr} , που είναι αντίστοιχα :

$$P_a = \frac{1}{2} (H - z_{cr}) \left(q_s + \gamma H - 2c \frac{1}{\sqrt{K_a}} \right) \quad (19)$$

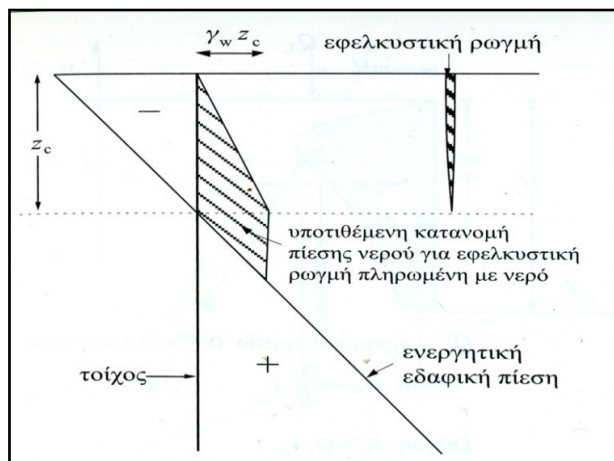
$$P_a = \frac{1}{2} (H - z_{cr}) (q_s + \gamma H - 2c_u) \quad (20)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις εφελκυστικές τάσεις μειώνεται η απαιτούμενη δύναμη ευστάθειας του τοίχου αντιστήριξης. Αγνοώντας τις εφελκυστικές τάσεις προκύπτει μια πιο συντηρητική λύση.



Σχήμα 6: Κρίσιμο βάθος, z_0 , από την επιφάνεια στην οποία αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις.

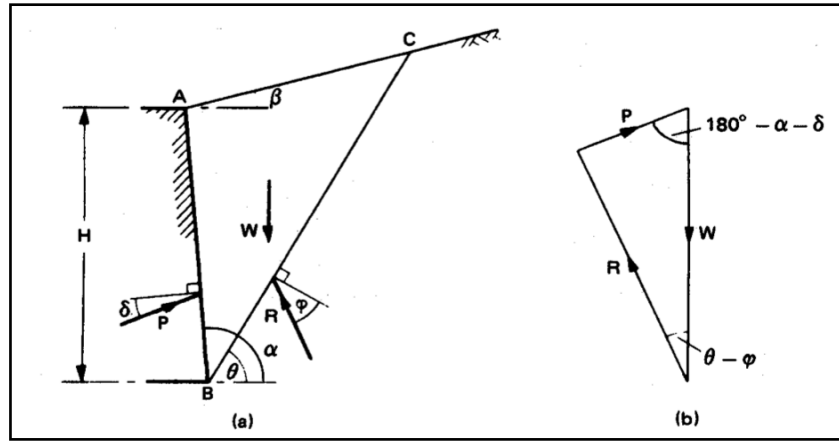
Καθώς το έδαφος δεν μπορεί πρακτικά να υποστηρίξει εφελκυστικά φορτία, μπορεί να προκληθούν κατακόρυφες εφελκυστικές ρωγμές μέσα σε αυτό το θεωρητικό βάθος. Το πραγματικό βάθος στο οποίο αναπτύσσονται εφελκυστικές ρωγμές είναι πιθανό να επηρεάζεται από τη στήριξη που παρέχεται στον τοίχο. Συνεπώς, υποτίθεται ότι η εφελκυστική ρωγμή θα πληρωθεί με νερό μειώνοντας την ευστάθεια του τοίχου, οπότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η υδροστατική πίεση, όπως φαίνεται στο Σχ. 7, [50, 11].



Σχήμα 7: Εφελκυστική ρωγμή πληρωμένη με νερό.

4.3.2.2 ΩΘΗΣΕΙΣ COULOMB

Σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις κατά Rankine, ο υπολογισμός των οριακών ωθήσεων μπορεί να γίνει και με τη μέθοδο Coulomb [51]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της γωνίας τριβής του τοίχου δ , της κλίσης του τοίχου α και της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους β . Καθώς η σφηνοειδή επιφάνεια μετακινείται προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, θεωρείται ότι ενεργοποιείται η πλήρης διατμητική αντοχή του εδάφους στο υποτιθέμενο επίπεδο αστοχίας, και η τριβή του τοίχου ή η συνάφεια ενεργοποιούνται στο πίσω μέρος του τοίχου. Η διατμητική αντοχή και η τριβή του τοίχου στηρίζουν την ενεργητική επιφάνεια του εδάφους, και έτσι η ενεργητική ώθηση που μεταφέρεται στον τοίχο είναι μικρότερη για ανθεκτικότερο έδαφος και μεγαλύτερη τριβή του τοίχου (Σχ. 8).



Σχήμα 8: Ωθήσεις Coulomb, Ενεργητική Κατάσταση.

Με βάση τη γεωμετρία της σφήνας και υποθέτοντας $c'=0$ μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των ενεργητικών πιέσεων p_a και του βάρους W , ως συνάρτηση των α , β , θ και δ . Η μέγιστη τιμή της ενεργητικής ώθησης P_a δίνεται από την Εξ. (21):

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (21)$$

με την παραδοχή ότι $\frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$:

$$K_a = \left(\frac{\sin(\alpha - \varphi) / \sin \alpha}{\sqrt{[\sin(\alpha + \delta)] + \left[\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)} \right]}} \right) \quad (22)$$

Υψηλή γωνία τριβής έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγαλύτερο τμήμα των ενεργών τάσεων να ασκούνται κατακόρυφα στη εσωτερική όψη του τοίχου, συνεπώς αυξάνεται η σταθερότητα δίνοντας μεγαλύτερη ροπή επαναφοράς. Αντιθέτως, μικρότερη γωνία τριβής επιδρά δίνοντας υψηλότερα οριζόντια φορτία και χαμηλότερα κάθετα, μειώνοντας τη σταθερότητα. Σημειώνεται ότι η γωνία τριβής δ του τοίχου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τριβής τους εδάφους και την τραχύτητα του τοίχου, και συνήθως δίνεται ως ποσοστό του φ' , ενώ η τιμή του δ δεν υπερβαίνει ποτέ το φ' [50, 53].

Κεφάλαιο 5^ο

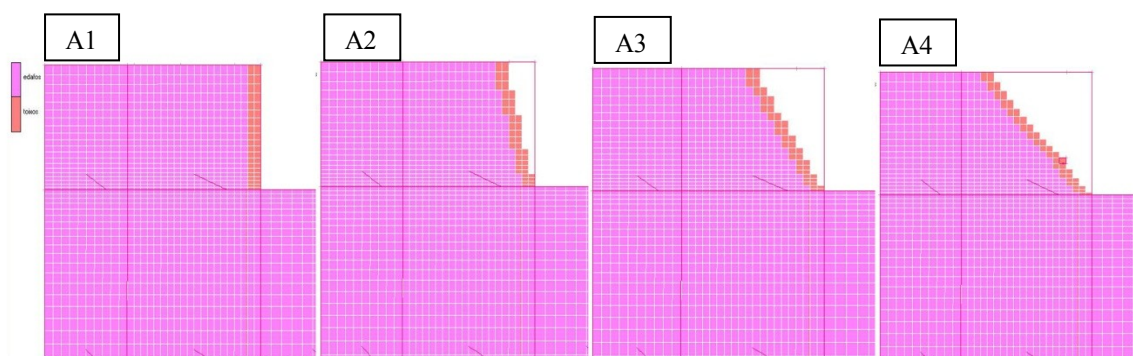
Μελέτη Ξερολιθικών Τοίχων Υδατοδεξαμενών με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΞΕΡΟΛΙΘΙΚΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Σκοπός της ανάλυσης είναι η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ξερολιθικών τοίχων αντιστήριξης ομβροδεξαμενών, η οποία σχετίζεται με την γεωμετρία της δεξαμενής, τις μηχανικές ιδιότητες και τον τρόπο σύνδεσης των τοιχοσωμάτων της λιθοδομής, καθώς και με την ποιότητα του εδάφους περιμετρικά της και τις συνθήκες στράγγισης. Σύμφωνα με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων ένα σώμα διαιρείται σε επιμέρους τμήματα και αναλύεται κάτω από συνθήκες ισορροπίας με τη θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν την κατανομή των μεγεθών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου, ώστε μέσω των υπολογισμένων τιμών των μετατοπίσεων στους κόμβους των τμημάτων να προκύπτουν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που υφίσταται το σώμα. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

5.1.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ (Α΄ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ):

Στην συγκεκριμένη ανάλυση εξετάστηκε η ευστάθεια των τοιχωμάτων απλοποιημένης γεωμετρίας για αστράγγιστο έδαφος και για τοιχώματα κατακόρυφα, καθώς και με κλίση ως προς την κατακόρυφο ίση με 15° , 30° και 45° , Προσομοιώματα Α.1, Α.2, Α.3 και Α.4, αντίστοιχα (Σχ. 9). Ο τοίχος προσομοιάζεται ως συνεχές μέσο και έχει ύψος 5.5m.

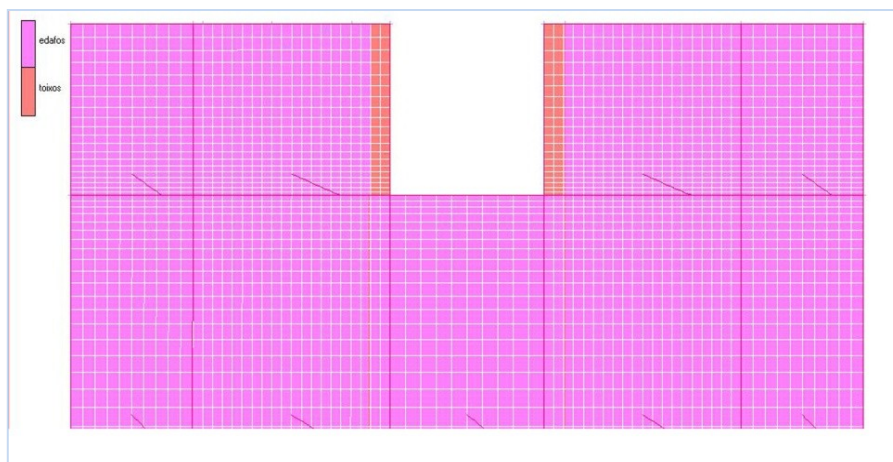


Σχήμα 9: Προσομοιώματα Α΄ Κατηγορίας. Διερεύνηση Επίδρασης Κλίσης Τοιχωμάτων σε σχέση με την κατακόρυφο. β_{A1} : κατακόρυφα τοιχώματα, $\beta_{A2}=15^\circ$, $\beta_{A3}=30^\circ$, $\beta_{A4} = 45^\circ$.

5.1.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ (Β΄ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ):

Στην συγκεκριμένη ανάλυση ο τοίχος επίσης θεωρήθηκε συνεχές μέσο και εξετάστηκαν τρεις συνθήκες εδάφους για κατακόρυφα τοιχώματα απλοποιημένης γεωμετρίας και ύψους 5.5m (Σχ. 10):

- Αστράγγιστες συνθήκες στην άργιλο, που αντιπροσωπεύονται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής, $c = 50\text{KPa}$ και $\phi_u = 0$ (Προσομοίωμα Β.1).
- Δύο περιπτώσεις με στραγγιζόμενες συνθήκες στην άργιλο, όπου αντιπροσωπεύονται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής:
 $c' = 50\text{ KPa}$, $\phi'_2 = 10^\circ$ (Προσομοίωμα Β.2) και $\phi'_3 = 18^\circ$ (Προσομοίωμα Β.3).

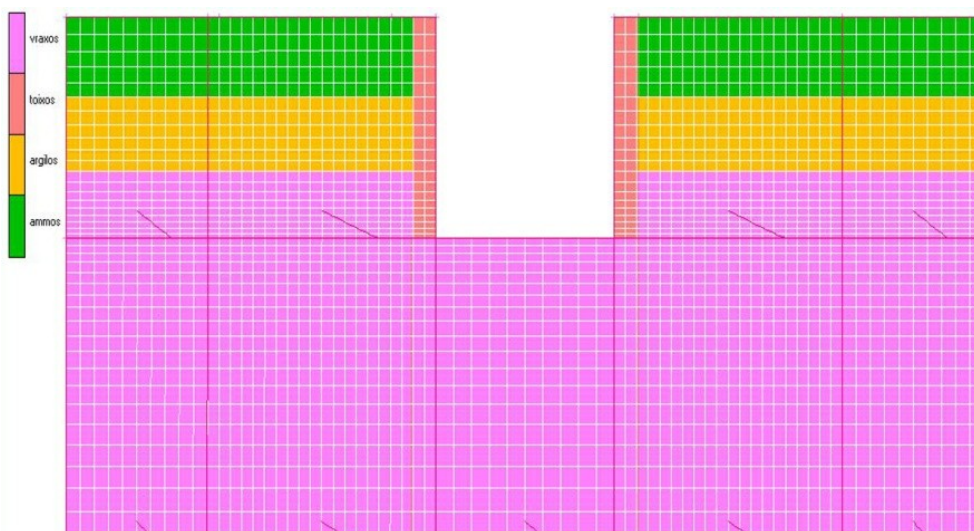


Σχήμα 10: Προσομοίωμα Β' Κατηγορίας. Διερεύνηση Επίδρασης Γωνίας Τριβής για $\varphi_{B1} = 0^\circ$, $\varphi_{B2} = 10^\circ$, $\varphi_{B3} = 18^\circ$.

5.1.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΤΟΙΧΟΥ (Γ' ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στην πραγματοποίηση της ανάλυσης εξετάστηκαν κατακόρυφα τοιχώματα απλοποιημένης γεωμετρίας. Η διαστρωμάτωση του εδάφους περιλαμβάνει στρώσεις άμμου, αργίλου και βράχου από την επιφάνεια του εδάφους (Σχ. 11). Αρχικά, εξετάστηκε καλή σύνδεση μεταξύ των λίθων, λόγω επαρκούς ποσότητας χρώματος, άρα ο τοίχος προσομοιάζεται ως συνεχές μέσο. Επιπλέον εξετάστηκε η περίπτωση όπου δεν υπάρχει επαρκής σύνδεση μεταξύ των τοιχοσωμάτων, συνεπώς αναπτύσσονται φαινόμενα τριβής με τη δυνατότητα αποκόλλησης μεταξύ των λίθων, άρα ο τοίχος προσομοιάζεται με συνθήκες επαφής – τριβής.

Για να γίνει κατανοητή η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του τοίχου, στον τρόπο παραμόρφωσης εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, Μοντέλα C.1 και C.2. Στην πρώτη περίπτωση (Προσομοίωμα C.1) επιλέχτηκε μέτρο ελαστικότητας $E=5 \times 10^7$ Pa και στην δεύτερη περίπτωση (Προσομοίωμα C.2) επιλέχτηκε $E=4 \times 10^{10}$ Pa. Σε όλες τις περιπτώσεις αναπτύσσονται φαινόμενα τριβής με τη δυνατότητα αποκόλλησης ανάμεσα στον τοίχο και το έδαφος περιμετρικά του και η διαστρωμάτωση παραμένει σταθερή.

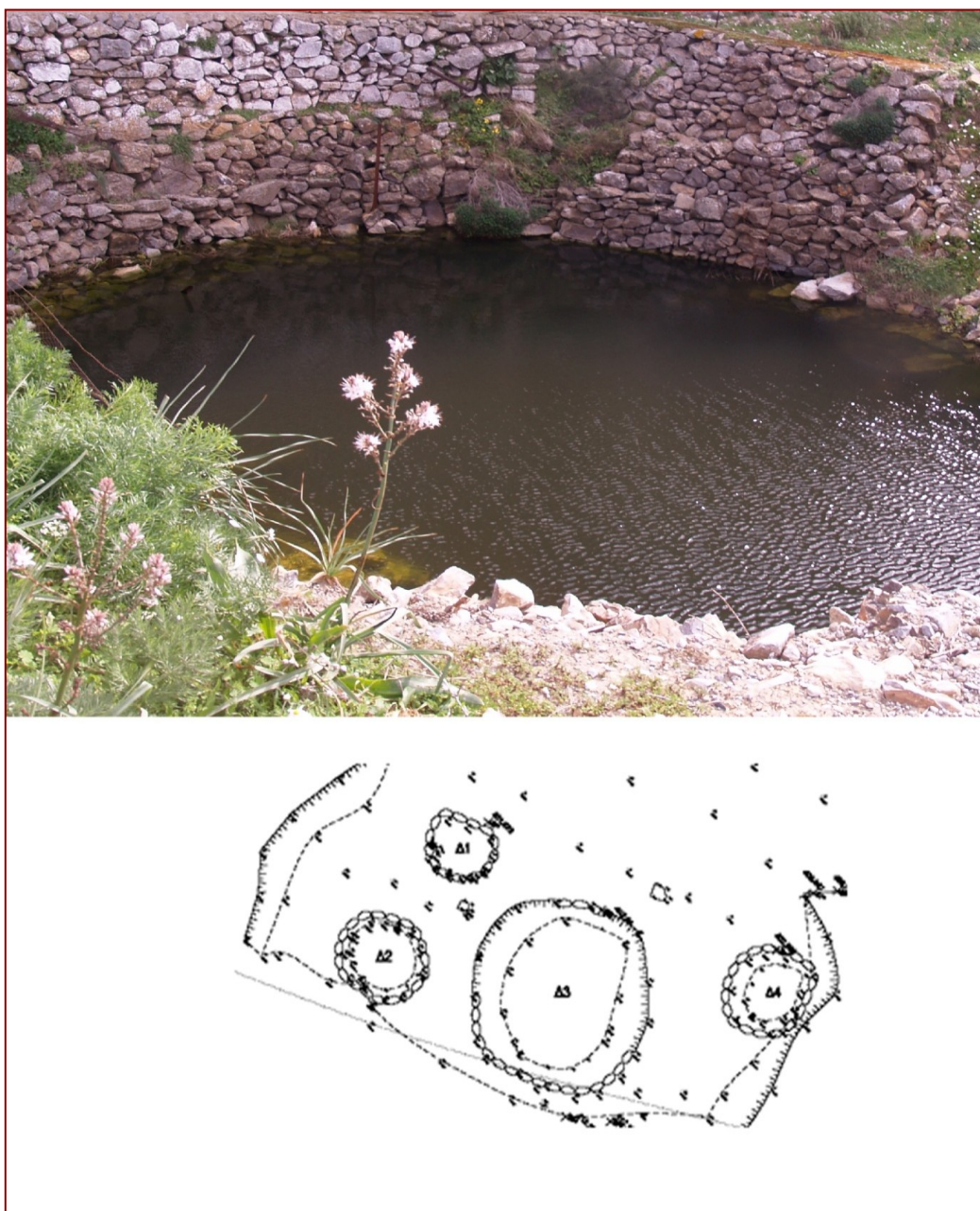


Σχήμα 11: Προσομοίωμα Γ' Κατηγορίας. Διερεύνηση Επίδρασης Διαστρωμάτωσης και Μηχανικών Χαρακτηριστικών Τοίχου. Ορίστηκαν από την επιφάνεια εδαφικές στρώσεις άμμου, αργίλου και βράχου.

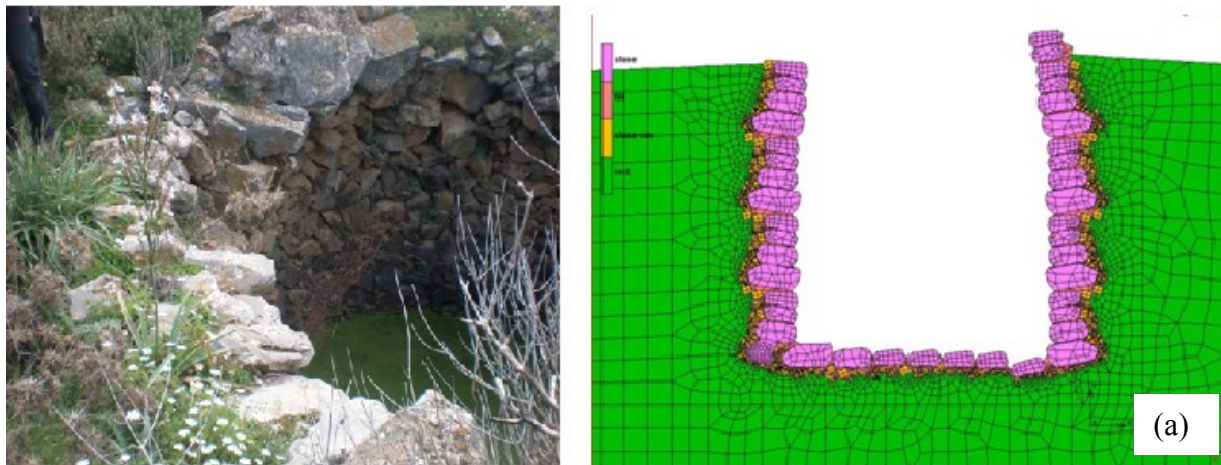
5.1.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΟΜΒΡΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (Δ' ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στην περιοχή Δίλακκος υπάρχουν δύο κυκλικές δεξαμενές, βάθους 4-5m και με τοιχώματα μικρών κλίσεων ως προς την κατακόρυφο (πχ. 0° - 24°), τα οποία βρίσκονται σε αρκετά καλή κατάσταση (Δ2-Δ4, Εικ. 34.β). Μία μικρή κυκλική δεξαμενή, βάθους 4,5m και με τοιχώματα μικρής αρνητικής κλίσης, που θα μπορούσε να είχε κατασκευαστεί αρχικά ως κλειστή δεξαμενή (Δ1 Εικ. 30). Επίσης, μία μεγάλη δεξαμενή (Δ3 Εικ. 34.α), βάθους περίπου 6,5m και με τοίχωμα μεγαλύτερης κλίσης (περίπου 40°) ως προς την κατακόρυφο το οποίο σε μεγάλο βαθμό έχει καταρρεύσει [11] .

Στη δεδομένη μελέτη πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση της μικρής ομβροδεξαμενής Δ1. Τα τοιχώματα της ομβροδεξαμενής προσομοιώθηκαν με μηδενική κλίση ως προς την κατακόρυφο. Αναλυτικά προσομοιώθηκαν το εξωτερικό επίπεδο των λίθων, καθώς και οι μικρότερες πέτρες με το γέμισμα στην πίσω επιφάνεια (Εικ. 35). Συνολικό βάθος δεξαμενής 4.5m. Ορίστηκε επαρκής σύνδεση των υλικών της τοιχοποιίας συνεπώς χρήση συνεχούς μέσου. Τα τοιχώματα της δεξαμενής εξετάστηκαν σε αντιστοιχία με τα μοντέλα της Κατηγορίας Β' και Γ', για αστράγγιστες συνθήκες εδάφους, συνθήκες μερικής στράγγισης και επίσης την περίπτωση της διαστρωμάτωσης εδάφους.



Εικόνα 33: α) Φωτογραφία Δεξαμενής Δ3, β) Αποτύπωση Δεξαμενών στην περιοχή Δίλλακος.



Εικόνα 35: Προσομοίωμα Δ' Κατηγορίας. α) Προσομοίωση Παραδοσιακή ομβροδεξαμενή Δ1, β) Λεπτομέρεια Προσομοιώματος.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Σχετικά με τον εδαφικό σχηματισμό ο όρος της συνοχής του εδάφους χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα αν και έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει πραγματική συνοχή του εδάφους και η αντοχή του εξαρτάται αποκλειστικά από την τριβή. Στην πράξη τα εδάφη είναι μίγματα διαφόρων βασικών εδαφών. Στα μίγματα το σημαντικότερο ρόλο τον έχει η άργιλος. Κατά κανόνα όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αργίλου τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα, η συμπιεστότητα και η συνοχή ενώ τόσο μικρότερη η διαπερατότητα, και η γωνία τριβής [17].

Για να υπάρξει παραμόρφωση και πιθανή επακόλουθη αστοχία στον σκελετό του εδάφους, πρέπει να υπάρξει αλλαγή στις ενεργές τάσεις. Γενικά στα εδάφη, η αστοχία είναι αποτέλεσμα της ενεργοποίησης της μέγιστης διατμητικής τάσης την οποία μπορεί να αντέξει το έδαφος. Στην προσομοίωση του εδαφικού σχηματισμού επιλέχθηκαν υλικά με τη χρήση των οποίων το έδαφος περιγράφεται με εξισώσεις ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς βασισμένες σε μία επιφάνεια διαρροής. Η επιφάνεια διαρροής ορίζεται μέσα από την εφαρμογή του κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας το οποίο επιλέγεται μέσα από μελέτη των συνθηκών στράγγισης και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους άρα και των αντίστοιχων τάσεων που αναπτύσσονται.

5.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ VON MISES

Το κριτήριο αστοχίας αναφέρει ότι διαρροή επέρχεται στο υλικό όταν η ισοδύναμη τάση Von Mises, σ_v , γίνει μεγαλύτερη ή ίση από την τάση διαρροής, σ_y , (Σχ. 11) που έχει μετρηθεί με μονοαξονική δοκιμή:

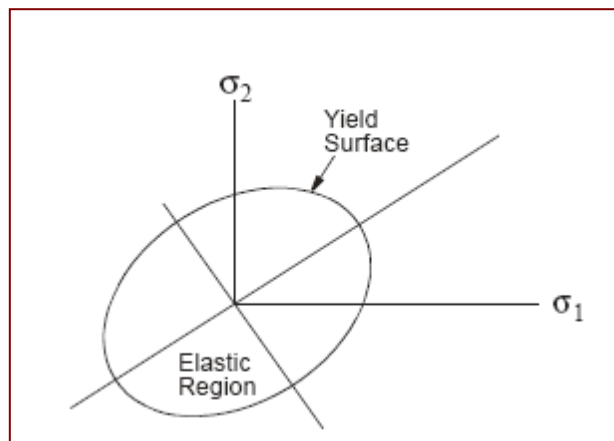
$$\sigma_v \leq \sigma_y \quad (23)$$

Η ισοδύναμη τάση Von Mises μπορεί να γραφεί μέσω των συντελεστών του τανυστή των κύριων τάσεων ως [54] :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)]} \quad (24)$$

Στη περίπτωση επίπεδης παραμόρφωσης η Εξ. (24) απλοποιείται και προκύπτει η Εξ.(25):

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 6(\tau_{12}^2)]} \quad (25)$$



Σχήμα 11: Επιφάνεια Διαρροής von Mises για επίπεδη παραμόρφωση.

Το κριτήριο αστοχίας Von Mises χρησιμοποιείται για τις εξής περιπτώσεις εδάφους:

- α) Συνθήκες πλήρους στράγγισης στην άμμο:
Παράμετροι διατμητικής αντοχής: $c = 0$ και $\varphi = \varphi' (> 0^\circ)$.
- β) Αστράγγιστες συνθήκες στην άργιλο:
Παράμετροι διατμητικής αντοχής, $c = c_u$ και $\varphi_u = 0$.

5.2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ MOHR - COULOMB

Η διατμητική αντοχή του εδάφους εκφράζεται μέσα από τη σχέση Mohr – Coulomb η οποία συναρτά τη διατμητική τάση αστοχίας (διατμητική αντοχή τ_f) σε ένα επίπεδο ή επιφάνεια ολίσθησης με την κάθετη ενεργό τάση σ'_N , που δρα στο επίπεδο αυτό, την συνοχή ή διατμητική αντοχή του υλικού c και την γωνία εσωτερικής τριβής φ [48,50].

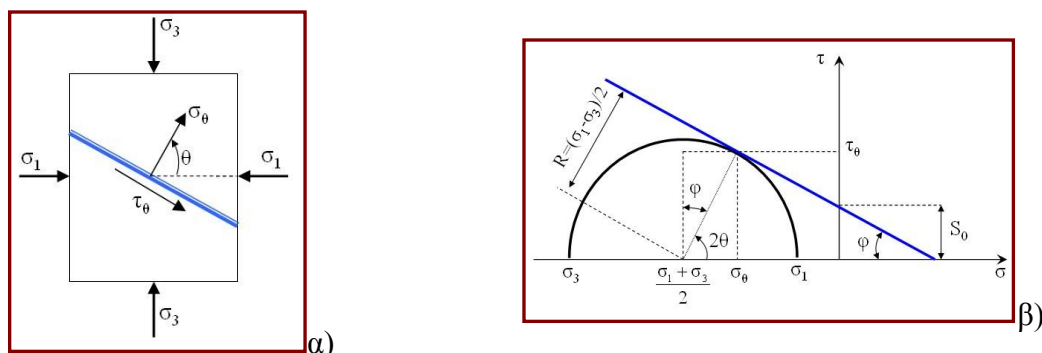
$$\tau_f = c' + \sigma'_N \tan \varphi' \quad (26)$$

Η μαθηματική διατύπωση του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb συναρτήσει των κυρίων τάσεων, γίνεται με την θεώρηση ενός δοκιμίου ψαθυρού υλικού στις δύο διαστάσεις το οποίο καταπονείται μόνο από ορθές τάσεις (Σχ. 12). Το υλικό αστοχεί οριακά σε κάποιο σημείο όταν το κριτήριο του Coulomb εφάπτεται στον κύκλο του Mohr [48].

Το κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb χρησιμοποιείται για την εξής περίπτωση εδάφους:

c) Συνθήκες μερική στράγγισης στην άργιλο:

Παράμετροι διατμητικής αντοχής: $c = c'$ και $\varphi = \varphi' (> 0^\circ)$.



Σχήμα 12: α) Εντατική κατάσταση δοκιμίου ψαθυρού υλικού στις δύο διαστάσεις, β) συνδυασμένη γραφική απεικόνιση του κύκλου Mohr και του κριτηρίου Coulomb.

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην ανάλυση του τοίχου με τη θεώρηση συνεχούς μέσου, η παρουσία των ενώσεων του τοίχου αποδίδεται με τη χρήση στοιχείων χαμηλής δυσκαμψίας και αντοχής. Στην περίπτωση που ο τοίχος προσομοιάζεται με στοιχεία επαφής τότε στη διεπιφάνεια διαφορετικών σωμάτων ή ρωγμών στο εσωτερικό του σώματος γίνεται εμφάνιση δυνάμεων – τάσεων τριβής. Η περιγραφή της εντατικής κατάστασης του συστήματος στην περιοχή της διεπιφάνειας μπορεί να γίνει με τον νόμο τριβής του Coulomb. Ο νόμος αυτός ορίζει ότι η δύναμη – τάση τριβής που εμφανίζεται σε μια διεπιφάνεια είναι ανάλογη της ορθής δύναμης – τάσης που ασκείται κάθετα στη διεπιφάνεια, με συντελεστή αναλογίας το συντελεστή τριβής [20, 54-55]. Εάν η διεπιφάνεια περιγράφεται από μια καμπύλη τότε η τάση τριβής σε κάθε σημείο της διεπιφάνειας έχει διεύθυνση παράλληλη με την εφαπτομένη της καμπύλης στο συγκεκριμένο σημείο (Σχ. 13). Κατά την ανάλυση ενός τέτοιου προβλήματος μπορούν να διακριθούν δύο καταστάσεις, μια κατά την οποία δε υπάρχει σχετική μετατόπιση μεταξύ των δύο σωμάτων (στατική τριβή – stick friction) και η αντίθετη της (τριβή ολίσθησης slip friction) [54].

Όταν το σύστημα των δύο σωμάτων βρίσκεται στην κατάσταση της στατικής τριβής ο νόμος του Coulomb γράφεται:

$$|S_T| = -\mu S_N \quad (27)$$

όπου:

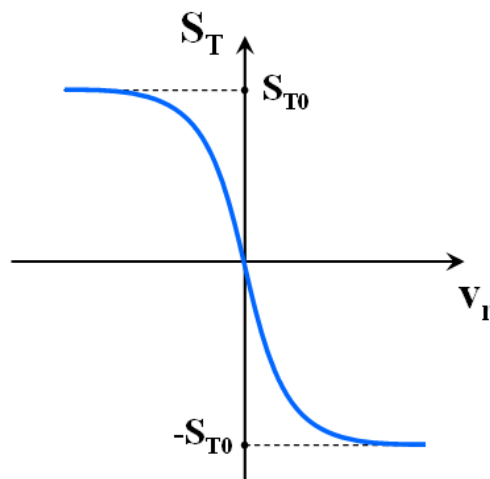
S_T = η τάση τριβής ή εφαπτομενική τάση,

S_N = η ορθή τάση,

μ = ο συντελεστής τριβής,



Σχήμα 13: Σύστημα Δυνάμεων σε σημείο της διεπιφάνειας διαφορετικών υλικών ή σωμάτων.



Σχήμα 14: Καμπύλη Τάσης – Σχετικής Ταχύτητας.

Η ολίσθηση μεταξύ των δύο σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή εμφανίζεται όταν η τάση τριβής ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή S_{T0} (Σχ. 14). Η εφαπτομενική τάση μετά την έναρξη της ολίσθησης εξαρτάται από την σχετική ταχύτητα των δύο σωμάτων και ο νόμος του Coulomb παίρνει την μορφή:

$$S_T = -\mu S_N \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{v_{r0}} \right) t \quad [28]$$

όπου, v_r : το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας ολίσθησης (παράλληλο στην εφαπτομένη της διεπιφάνειας)

v_{r0} : η κρίσιμη τιμή της σχετικής ταχύτητας, πέραν την οποίας ξεκινάει η ολίσθηση

$t = \frac{v_r}{|v_r|}$: το μοναδιαίο διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας ολίσθησης

Ένα άλλο φαινόμενο το οποίο είναι δυνατό να εμφανιστεί σε τέτοια προβλήματα είναι η αποκόλληση του ενός σώματος από το άλλο. Αυτό συμβαίνει όταν στο σημείο της επαφής που εξετάζεται η ορθή τάση είναι εφελκυστική, δηλαδή όταν $S_N \geq 0$. Με βάση αυτή την παρατήρηση είναι δυνατό να οριστούν τα προβλήματα επαφής τύπου κόλλας. Για τα προβλήματα αυτά ισχύει ότι κατά μήκος της διεπιφάνειας ο συντελεστής τριβής είναι πρακτικά άπειρος και τα δύο σώματα μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους όταν η εφελκυστική ορθή τάση ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή [48].

5.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί διακριτά τμήματα του σώματος, επιτρέποντας να οριστούν διαφορετικά προσομοιώματα υλικού που να προσομοιάζουν τους τοίχους της στέρνας και τον εδαφικό σχηματισμό ανάλογα με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Οι τιμές των σταθερών των προσομοιωμάτων που ανήκουν στις κατηγορίες ανάλυσης δίνονται στον Πίνακα 6 και 7. Επίσης, στα υλικά που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή εφελκυστική αντοχή, έγινε εισαγωγή της πιθανότητας ρηγμάτωσης, όπου στο υλικό αναπτύσσεται διάρρηξη ανάλογη με την κατεύθυνση των μέγιστων κύριων τάσεων (Σχ. 15) [54].

Συνεπώς λήφθηκαν υπόψη τα εξής μηχανικά χαρακτηριστικά υλικού (HSTMA200, TUC):

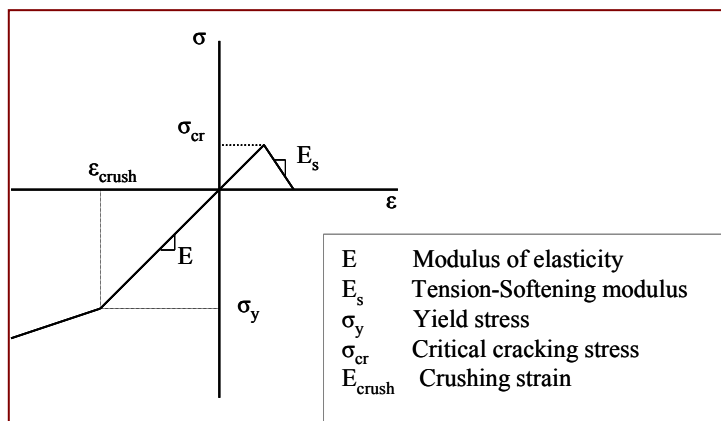
- Μονοαξονική θλιπτική αντοχή : 30 MPa
- Μέτρο Χαλάρωσης λόγω αστοχίας σε εφελκυσμό (Tension Softening Modelus): 0.333 GPa
- Παραμόρφωση Ρηγμάτωσης (Crushing Strain) : 0.01
- Παράμετρος Διατμητικής Παρακράτησης (Shear Retention factor) : 0.01

	Συμπαγές αργιλικό έδαφος	Αργιλικό έδαφος μικρής διαπερατότητας	Αμμόδες έδαφος	Βράχος
Πυκνότητα Μάζας (kg/m ³)	2100	2100	1550	2650
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	12,5	13,5	8	40.000
Λόγος του Poisson	0,4	0,3	0,3	0,3
Εσωτερική Γωνία Τριβής (degrees)	0	10° (M.B2) κ' 18° (M.B3)	28	45
Συνοχή (kPa)	50	50	0	100.000

Πίνακας 6: Μηχανικά Χαρακτηριστικά Εδάφους, [16, 50, 56].

	Μοντέλα A _{1,2,3,4} B _{1,2,3} C ₁	Μοντέλο C ₂	Μοντέλο D1		
			Εξωτερικοί λίθοι	Εσωτερικοί λίθοι (ασβεστολιθικό πέτρωμα)	Γέμισμα (Αργιλικό υλικό)
Πυκνότητα Μάζας (Kg/m ³)	2270	2270	2750	2550	2300
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	50	40.000	74.000	55.000	9*10 ⁻³
Λόγος του Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0.3

Πίνακας 7: Μηχανικές Ιδιότητες Τοιχωμάτων, [16, 11].



Σχήμα 15: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για τοιχοποιία.

5.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΣΤΑΔΙΟ 1: Διαίρεση του πεδίου σε κατάλληλα στοιχεία.

Στη διαίρεση του μέσου χρησιμοποιήθηκαν ισοπαραμετρικά, τετραπλευρικά επίπεδα στοιχεία και κάθε κόμβος θεωρείται ότι έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας στο μοντέλο D1 και 2 βαθμούς ελευθερίας στα μοντέλα A', B' και Γ' Κατηγορίας. Στις περιοχές του πεδίου που αντιπροσωπεύεται η λιθοδομή και στα σημεία επαφής αυτής με το έδαφος, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς και αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, η διαίρεση έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στοιχεία. Ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε προσομοίωμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΚΟΜΒΟΥΣ
A1, A2, A3, B1, Γ1, Γ2	2600	2731
B2	2564	2695
B3	2521	2652
B4	2470	2601
Δ1	5955	8774

Πίνακας 8: Διαίρεση τοιχοποιίας και εδάφους. Αριθμός Στοιχείων και Κόμβων.

ΣΤΑΔΙΟ 2: Επιλογή των συναρτήσεων μορφής.

Οι συναρτήσεις μορφής εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών στη γεωμετρία κάθε στοιχείου και η επιλογή τους σχετίζεται με την εκτίμηση της άγνωστης μεταβλητής σε οποιοδήποτε σημείο του στοιχείου. Στις περιπτώσεις των απλούστερων στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους καθώς και με μικρές διαστάσεις, ενδείκνυται η εφαρμογή γραμμικών συναρτήσεων.

ΣΤΑΔΙΟ 3: Προσδιορισμός των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress – strain) και την ανηγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain displacement).

Για την προσομοίωση εδάφους και τοιχωμάτων επιλέχθηκαν στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, άρα οι ορθές και διατμητικές παραμορφώσεις που έχουν διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του σώματος θεωρούνται μηδενικές. Σημειώνεται ότι στην επίπεδη παραμόρφωση, $\sigma_z \neq 0$. Το σώμα αναλύεται στο επίπεδο x-y και οι τανυστές που περιγράφουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις σε ένα σημείο του χώρου δίνονται παρακάτω:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (29) \quad \text{και} \quad \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Στην επιλογή του προσομοιώματος συμπεριφοράς των υλικών, χρησιμοποιήθηκε για τον τοίχο γραμμικά ελαστικό υλικό σε δύο διαστάσεις, σύμφωνα με το οποίο το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, και για το έδαφος χρησιμοποιήθηκε ελαστοπλαστικό υλικό. Οι σχέσεις που συνδέουν τάσεις με παραμορφώσεις και παραμορφώσεις με μετακινήσεις, στην περίπτωση γραμμικά ελαστικού υλικού, είναι αντίστοιχα οι εξής :

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (31)$$

και

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (32)$$

όπου, σ : Τανυστής Τάσεων, ε : Τανυστής ανηγμένων παραμορφώσεων

$$D: \text{το μητρώο ελαστικότητας: } D = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Η σχέση (32) μετασχηματίζεται με βάση τους βαθμούς ελευθερίας από το καθολικό στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (34)$$

όπου, d : Διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων, με διάσταση $[1 \times 8]$,

B : Πίνακας Συσχετισμού ή Μητρώο Παραμορφώσεως, με διάσταση $[8 \times 1]$.

ΣΤΑΔΙΟ 4: Κατασκευή Καταστατικών Εξισώσεων για κάθε στοιχείο (Element Equation).

Οι καταστατικές εξισώσεις (constitutive relationships), συνδέουν το αίτιο, που είναι η τάση ή η δύναμη με το αποτέλεσμα, που είναι η μετατόπιση, το οποίο και αποτελεί άγνωστο μέγεθος. Σημειώνεται ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων σε ένα σώμα, λόγω της εφαρμογής ενός συστήματος δυνάμεων, εξαρτάται από τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού και το μέγεθος των δυνάμεων που επιδρούν σε αυτό. Όταν οι καταστατικές εξισώσεις είναι ανεξάρτητες από το χρόνο, τότε αναφέρονται και ως εξισώσεις τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης, οι οποίες συνδέουν το διάνυσμα των τάσεων με τις επικόμβιες μετακινήσεις του στοιχείου και έχουν τη μορφή :

$$\sigma = [D][B]\{d\} \quad (35)$$

ΣΤΑΔΙΟ 5: Υπέρθυση των εξισώσεων του στοιχείου για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.

Στα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν, τα φορτία που ασκούνται στις λιθοδομές οφείλονται στην επίδραση της βαρύτητας και στην παρουσία ή όχι υδροστατικής πίεσης. Στην ακόλουθη σχέση, συνδέεται η δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος και η κομβική μετατόπιση $\{d\}$ που υφίσταται:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (36)$$

όπου K : Το τοπικό μητρώο δυσκαμψίας, το οποίο συνδέει τις τοπικές συντεταγμένες με τις κομβικές μετατοπίσεις και τις τοπικές φορτίσεις ενός μόνο πεπερασμένου στοιχείου.

Για στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης το τοπικό μητρώο ακαμψίας δίνεται από τον τύπο :

$$K = h \int_A [B]^T [D] [B] dx dy \quad (37)$$

όπου h : το πάχος του στοιχείου, A : η επιφάνεια του στοιχείου, B : μητρώο παραμορφώσεως.

ΣΤΑΔΙΟ 6: Αποτελέσματα Ανάλυσης.

Με γνωστές τις μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο, πηγαίνοντας πίσω στις εξισώσεις δυσκαμψίας κάθε στοιχείου μπορούμε να υπολογίσουμε την Παραμόρφωση (du/dx) και την Τάση (F/A) του κάθε στοιχείου.

Κεφάλαιο 6^ο

Αποτελέσματα Ανάλυσης

6.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΓΙΑ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (Α΄ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στη Α΄ Κατηγορία προσομοιωμάτων μελετήθηκε η συμπεριφορά παραμόρφωσης του τοίχου με κλίση ως προς την κατακόρυφο για :

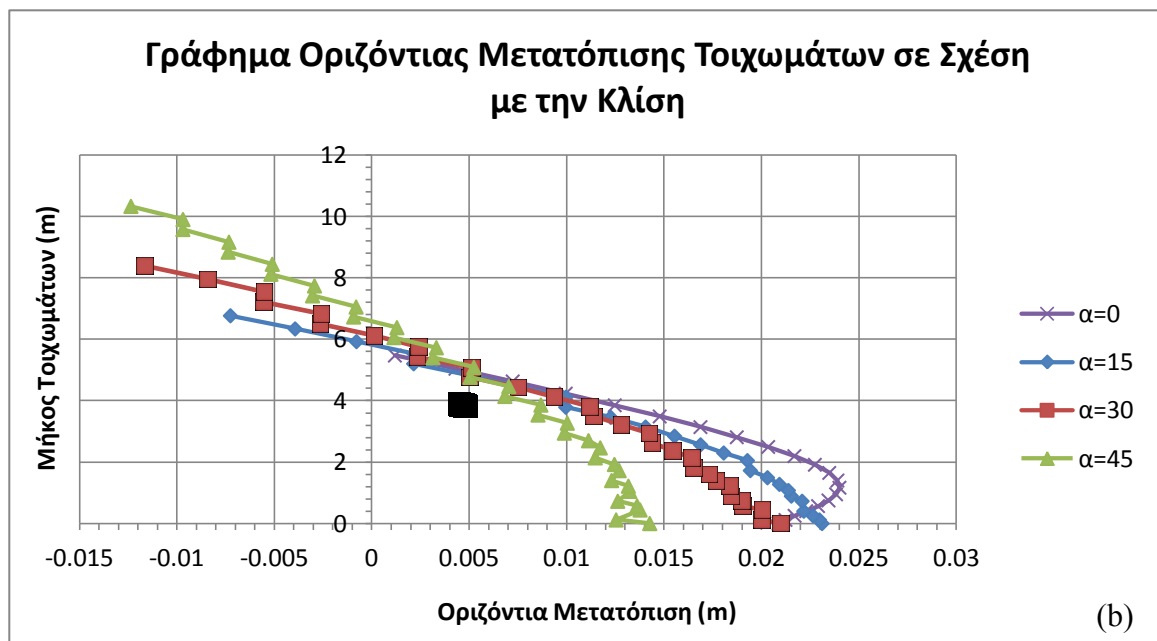
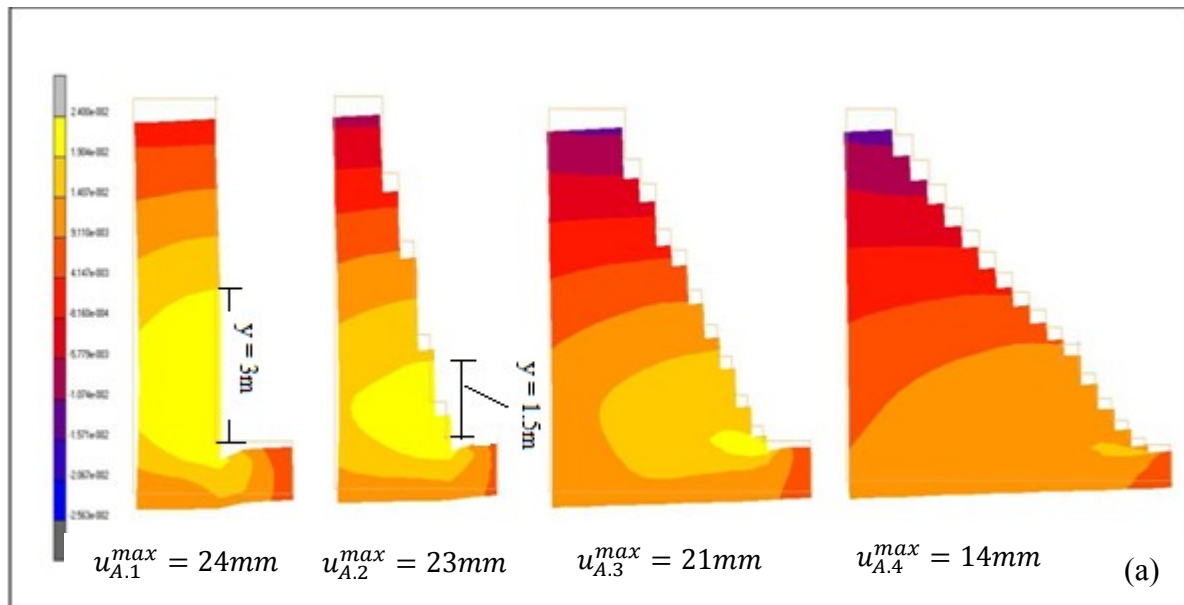
- α_{A1} = κατακόρυφα τοιχώματα (Προσομοίωμα A1).
- $\alpha_{A2} = 15^\circ$ (Προσομοίωμα A2).
- $\alpha_{A3} = 30^\circ$ (Προσομοίωμα A3).
- $\alpha_{A4} = 45^\circ$ (Προσομοίωμα A4).

Τα αποτελέσματα της πεπερασμένης ανάλυσης έδειξαν ότι οι οριζόντιες μετατοπίσεις των τοιχωμάτων μειώνονται με την αύξηση της κλίσης και η μέγιστη τιμή οριζόντιων μετατοπίσεων εμφανίζεται στην περίπτωση κατακόρυφου τοίχου. Αναλυτικά, θεωρώντας το μέσο του τοίχου ως ενιαίο σώμα, από το διάγραμμα των μετατοπίσεων παρατηρήθηκε ότι τοίχος έχει την τάση να παραμορφώνεται αναπτύσσοντας το φαινόμενο της καμπύλωσης. Όσο η κλίση ως προς την κατακόρυφο αυξάνεται η τάση καμπύλωσης μειώνεται. Το φαινόμενο καμπύλωσης εμφανίζεται πιο έντονα στα κατακόρυφα τοιχώματα, όπου

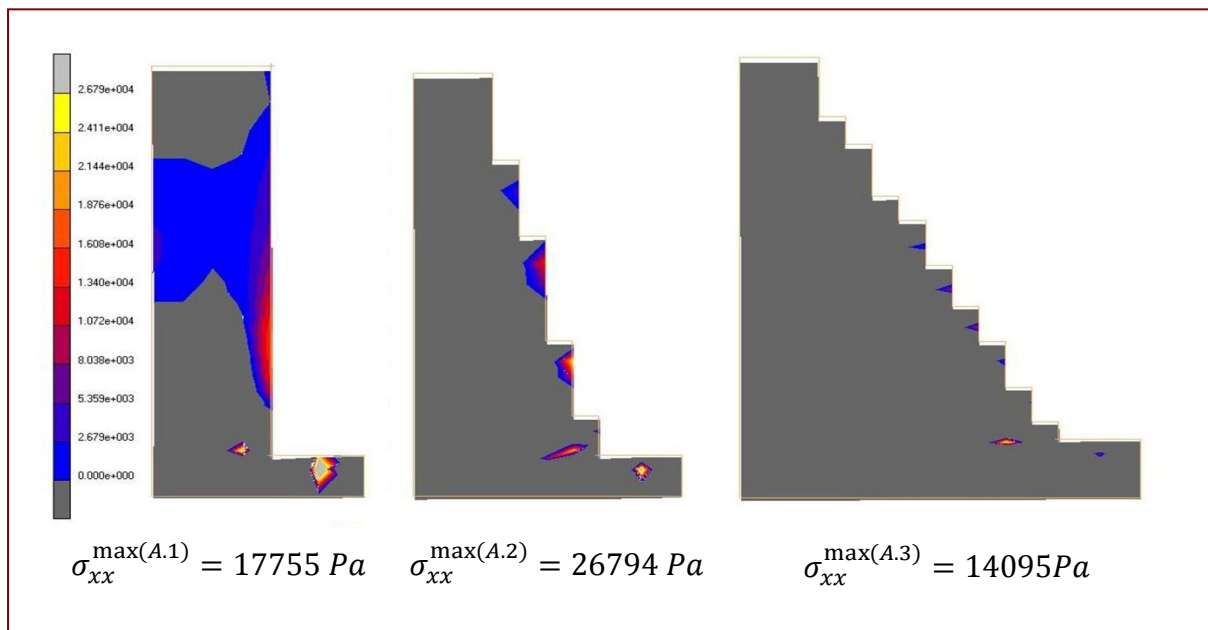
εκδηλώνεται κυρίως μέχρι το ύψος των 3m από τη βάση, όπως φαίνεται στο προσομοίωμα A1. Με την αύξηση της κλίσης μέχρι τις 30° η οριζόντια μετατόπιση αναπτύσσεται σε μικρότερο ύψος από τη βάση, χωρίς να παρουσιάζεται ιδιαίτερη αλλαγή στο μέγεθός της. Στην περίπτωσης κλίσης $\alpha = 45^\circ$, στο μοντέλο A4, η καμπύλωση αμβλύνεται αρκετά, και παρατηρούνται οι ελάχιστες τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων από τις τέσσερις περιπτώσεις, $u_{B4} = 14\text{mm}$, οι οποίες εμφανίζονται στη βάση του τοίχου. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχ. 16.

Οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται μέχρι ύψους 3m από τη βάση. Με την αύξηση της κλίσης του τοίχου οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις εκδηλώνονται σε όλο και μικρότερα τμήματα, ενώ παράλληλα η τιμή τους μειώνεται μέχρι που μηδενίζεται για κλίση $\alpha = 45^\circ$ (Σχ. 17). Επίσης οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στη βάση στο σημείο Α', υποδεικνύοντας την πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμής ή αποκόλλησης των τοιχοσωμάτων στο συγκεκριμένο σημείο, αλλά μειώνονται με την αύξηση της κλίσης. Σημειώνεται ότι ενώ οι εφελκυστικές τιμές των τάσεων μειώνονται με την αύξηση της κλίσης, καθώς και οι περιοχές που αυτές αναπτύσσονται, παρατηρείται μια αύξηση της μέγιστης τιμής για κλίση $\alpha = 15^\circ$. Η βάση του τοίχου υπόκειται σε διάτμηση και με την αύξηση της κλίσης οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται σε όλο και μεγαλύτερο ύψος (Σχ. 18).

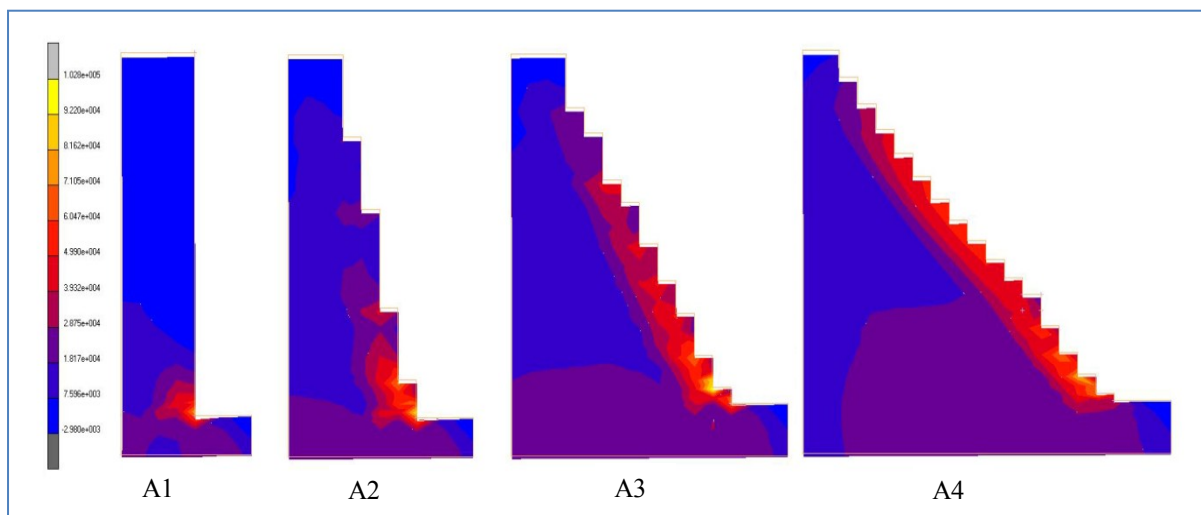
Τέλος, παρατηρείται πιθανή αστοχία του εδάφους στην βάση του τοίχου στο σημείο Β' με την εκδήλωση πλαστικών παραμορφώσεων. Με την αύξηση της κλίσης από 0° έως 30° οι πλαστικές παραμορφώσεις έχουν την τάση να αυξηθούν, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στις διατμητικές πλαστικές παραμορφώσεις. Από $\alpha = 30^\circ$ ως $\alpha = 45^\circ$ οι ορθές πλαστικές παραμορφώσεις παραμένουν σταθερές και οι διατμητικές μειώνονται σημαντικά (Σχ. 19.a). Επίσης, για τοιχώματα κλίσης $\alpha_{B3} = 30^\circ$ και $\alpha_{B4} = 45^\circ$, εμφανίζεται πιθανή αστοχία του εδάφους στα σημεία που ορίζονται από την τομή ΑΑ' και σε ύψος 0.5m από τη βάση. Αλλά το μέγεθος είναι πολύ μικρό συγκριτικά με την εξωτερική όψη του τοίχου (Σχ. 19.b).



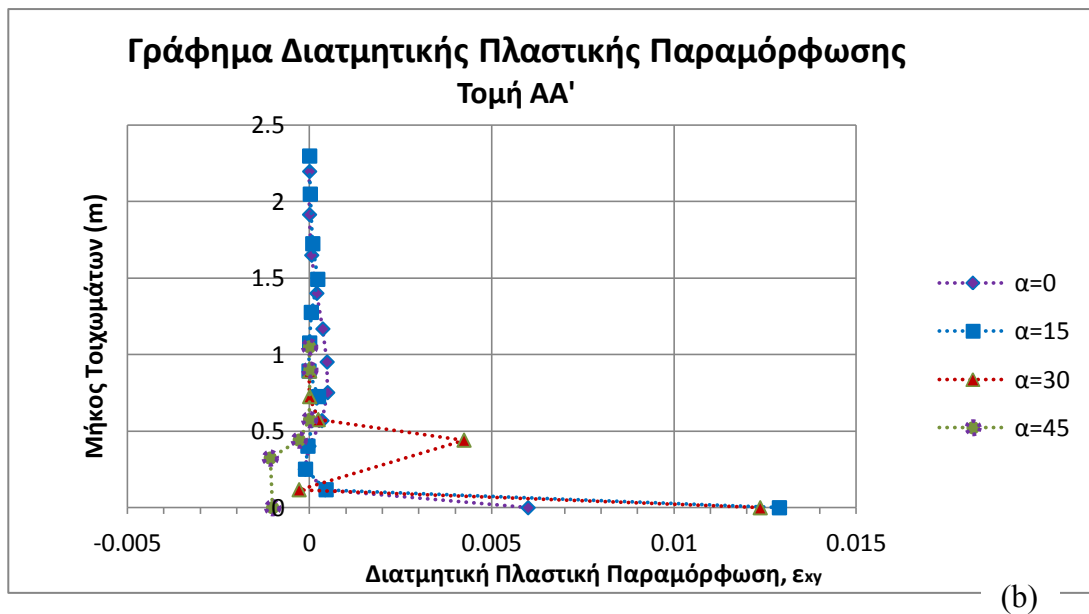
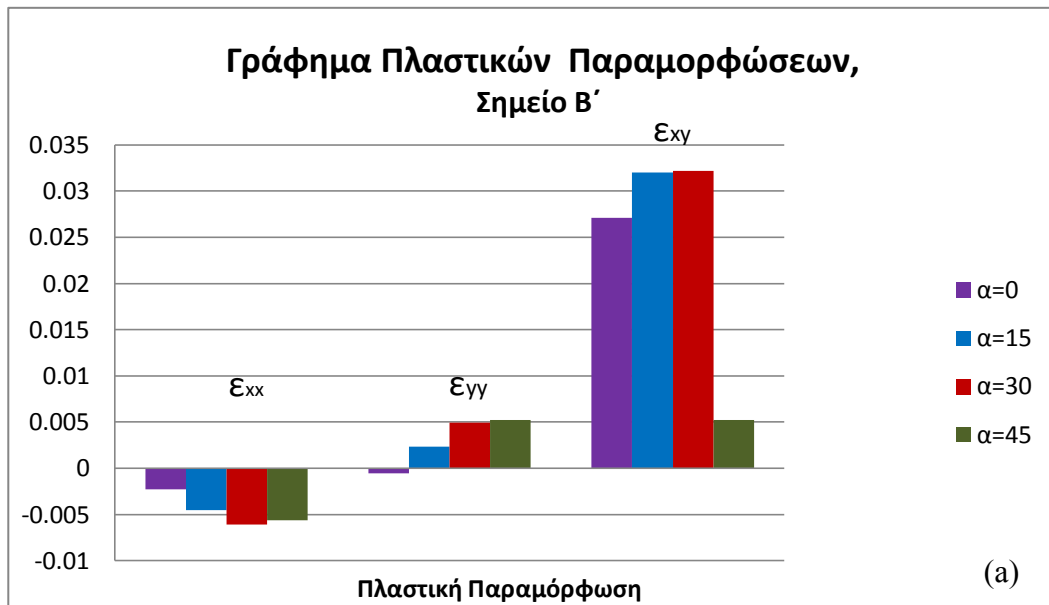
Σχήμα 16: Μεταβολή Οριζόντιων Μετατοπίσεων σε σχέση με την Κλίση Τοίχου α ως προς την Κατακόρυφο α) Σχηματική απεικόνιση, β) Γράφημα μετατοπίσεων. α , σε ($^\circ$).



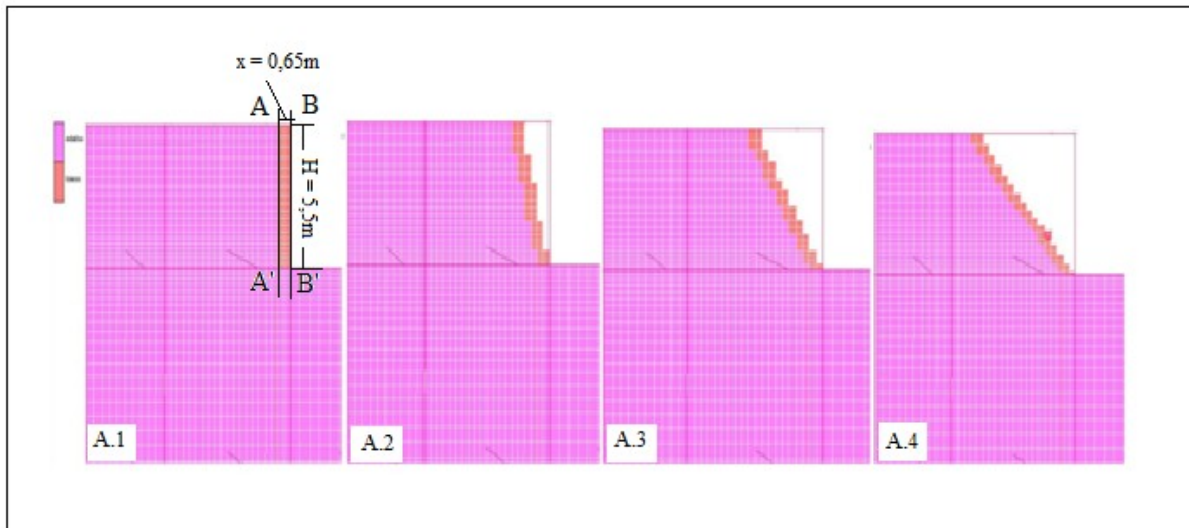
Σχήμα 17: Σχηματική Απεικόνιση Μεταβολής των Εφελκυστικών Τάσεων σε σχέση με την Κλίση του Τοίχου ως προς την Κατακόρυφο, σ_{xx} σε (Pa).



Σχήμα 18: Σχηματική Απεικόνιση Μεταβολής των Διατμητικών Τάσεων σε σχέση με την Κλίση του Τοίχου ως προς την Κατακόρυφο, σ_{xy} σε (Pa).



Σχήμα 19: Πλαστική Παραμόρφωση στο Έδαφος σε σχέση με την Κλίση του Τοίχου, α σε ($^{\circ}$). a) Παραμορφώσεις ϵ_{xx} ϵ_{yy} ϵ_{xy} στο σημείο Β' b) Διατμητική Πλαστική Παραμόρφωση στα σημεία που ορίζονται από την Τομή ΑΑ' (Σχ. 20).



Σχήμα 20: Θεώρηση Τομών AA' και BB' (Ομοίως και για τα υπόλοιπα προσομοιώματα).

6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΤΡΙΒΗΣ ΓΙΑ ΑΡΓΙΛΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ (Β' ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στην Β' Κατηγορία προσομοιωμάτων μελετήθηκαν:

- Οι αστράγγιστες συνθήκες εδάφους, οι οποίες προσομοιώθηκαν από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής $c=50 \text{ KPa}$, $\phi_{B1}=0^\circ$ (Προσομοίωμα B1).
- Οι συνθήκες μερικής στράγγισης, οι οποίες προσομοιώθηκαν από τις παραμέτρους $c=50 \text{ KPa}$, $\phi_{B2}=10^\circ$ και $\phi_{B3} = 18^\circ$ (Προσομοίωμα B2 και B3 αντίστοιχα).

Τα αποτελέσματα της πεπερασμένης ανάλυσης έδειξαν ότι οι οριζόντιες μετατοπίσεις των τοιχωμάτων μειώνονται με την αύξηση της γωνίας τριβής.

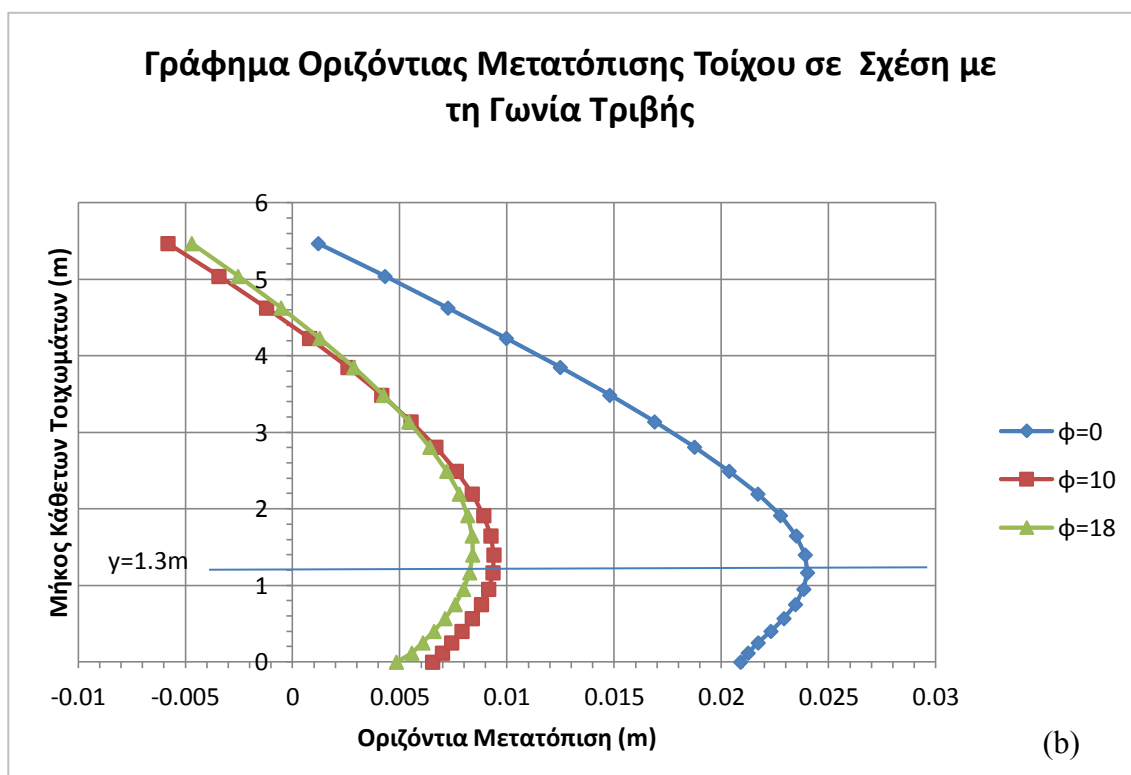
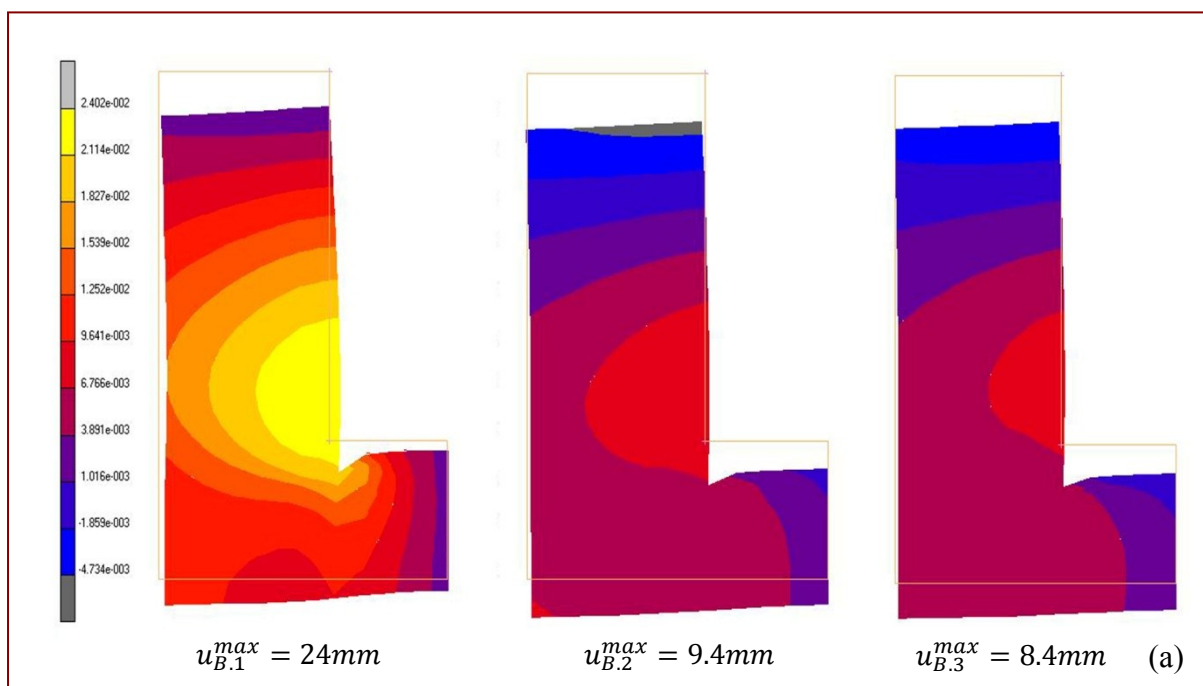
Αναλυτικά, θεωρώντας το μέσο του τοίχου ως ενιαίο σώμα, από το διάγραμμα των μετατοπίσεων παρατηρήθηκε ότι ο τοίχος έχει την τάση να παραμορφώνεται αναπτύσσοντας το φαινόμενο της καμπύλωσης. Έντονη καμπύλωση παρατηρείται μέχρι το ύψος των 3m με μέγιστη τιμή να εκδηλώνεται στο ύψος 1.3 m από τη βάση και στις τρεις περιπτώσεις. Ανάμεσα στα τρία προσομοιώματα η μέγιστη τιμή οριζόντιας μετατόπισης παρουσιάζεται

στο προσομοίωμα B1 όπου ασκούνται έντονες ωθήσεις λόγω υδροστατικής πίεσης ($\varphi=0^\circ$), όπου $u = 24 \text{ mm}$ (Σχ. 21) .

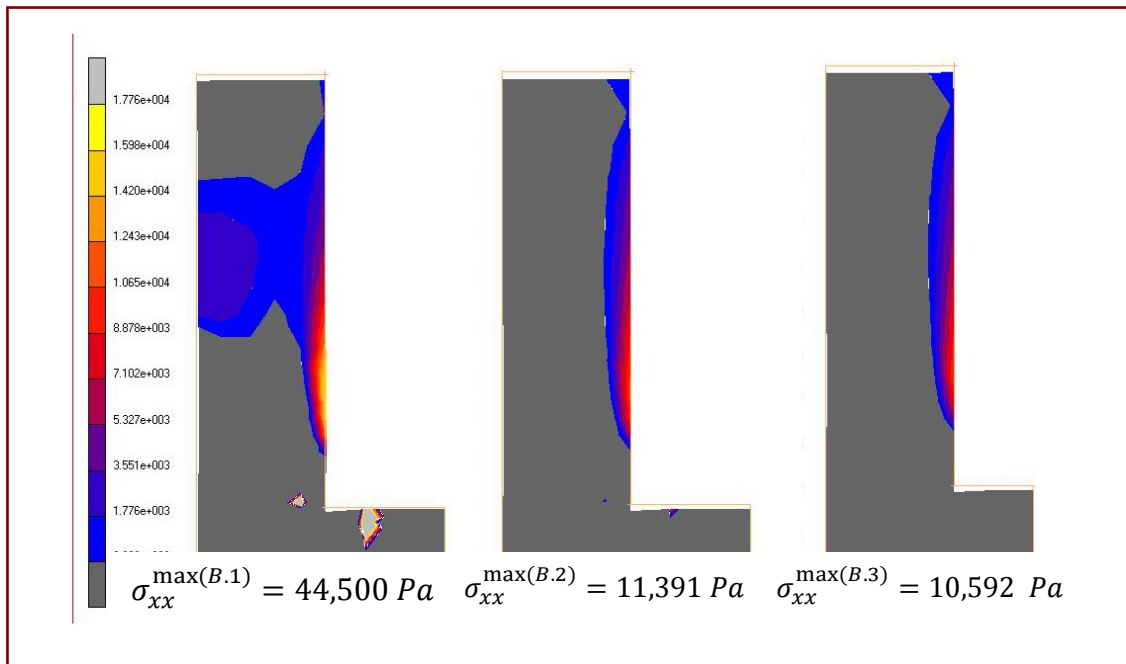
Το εξωτερικό μέρος του τοίχου (Τομή BB') υπόκειται σε εφελκυσμό ως προς την οριζόντια κατεύθυνση σε ύψος από 1 ως 3m από τη βάση, όπου παρατηρείται και έντονη η τάση καμπύλωσης του τοίχου, υποδηλώνοντας στην περιοχή αυτή πιθανά επίπεδα ολίσθησης ανάμεσα στα τοιχοσώματα (Σχ. 22). Με την αύξηση της γωνίας τριβής υπάρχει εκτόνωση της υδροστατικής πίεσης και οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις μειώνονται, ενώ σύμφωνα με τη θεωρία του Coulomb υψηλή γωνία τριβής έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγαλύτερο τμήμα των ενεργών τάσεων να ασκούνται κατακόρυφα στη εσωτερική όψη του τοίχου, αυξάνοντας τη σταθερότητα και δίνοντας μεγαλύτερη ροπή επαναφοράς.

Στη βάση του τοίχου, στο σημείο B', αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις (Σχ.23), όπου και εκδηλώνονται πλαστικές παραμορφώσεις (Σχ. 24.a) εμφανίζοντας την πιθανότητα ψαθυρής αστοχίας του εδάφους με την αύξηση της φόρτισης στο σημείο B'. Τις μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων στο συγκεκριμένο σημείο, με μέγιστη τιμή να παρατηρείται στις αστράγγιστες συνθήκες, εμφανίζουν οι διατμητικές πλαστικές παραμορφώσεις (Σχ. 24.a και 24.b). Παρατηρείται ότι με την αύξηση της γωνίας τριβής αυξάνεται το μέγεθος των διατμητικών τάσεων στη βάση του τοίχου και μειώνονται οι διατμητικές πλαστικές παραμορφώσεις.

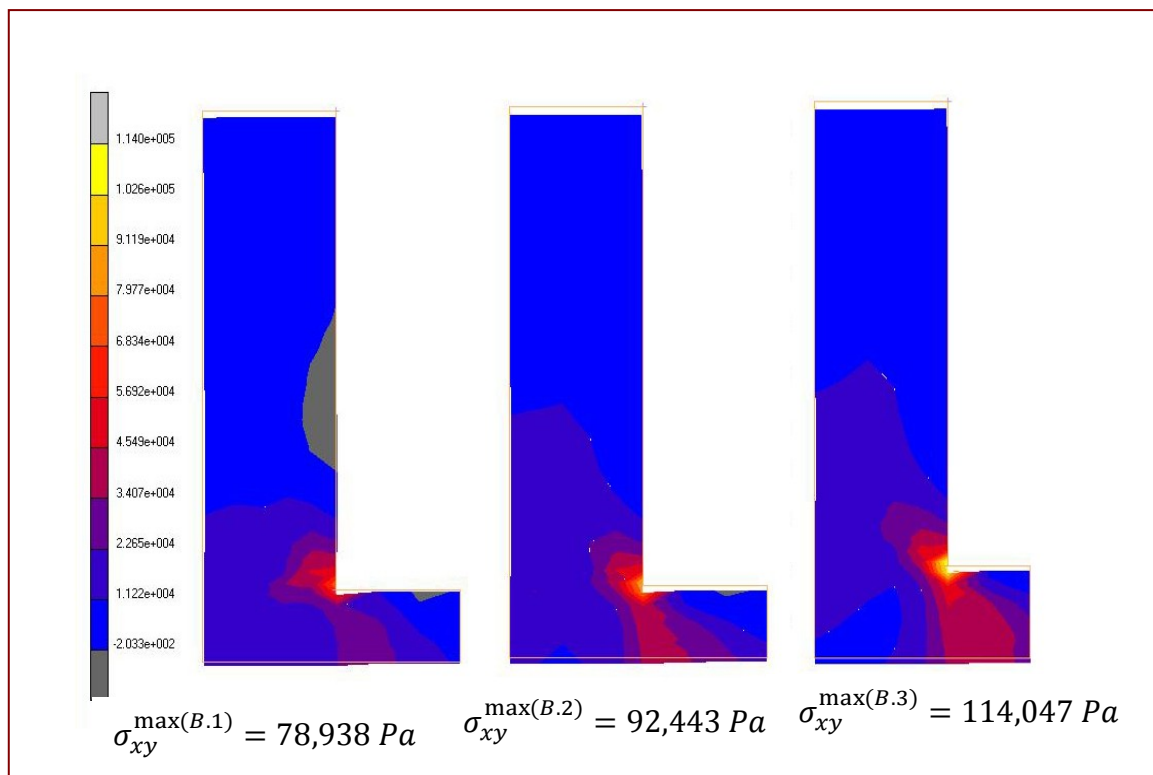
Τέλος, στα σημεία που ορίζονται από την τομή AA' εκδηλώνονται χαμηλότερες τιμές διατμητικών πλαστικών παραμορφώσεων, σχετικά με την πρόσοψη, και μηδενίζονται για $\varphi_{A3} = 18^\circ$ (Σχ. 24. c). Σημειώνεται ότι για $\varphi_{A1}=0^\circ$ εμφανίζονται μέχρι το ύψος του 1.5m, με τοπικό μέγιστο στο 1m, υποδηλώνοντας ένα πιθανό επίπεδο αστοχίας στην εσωτερική πλευρά του τοίχου.



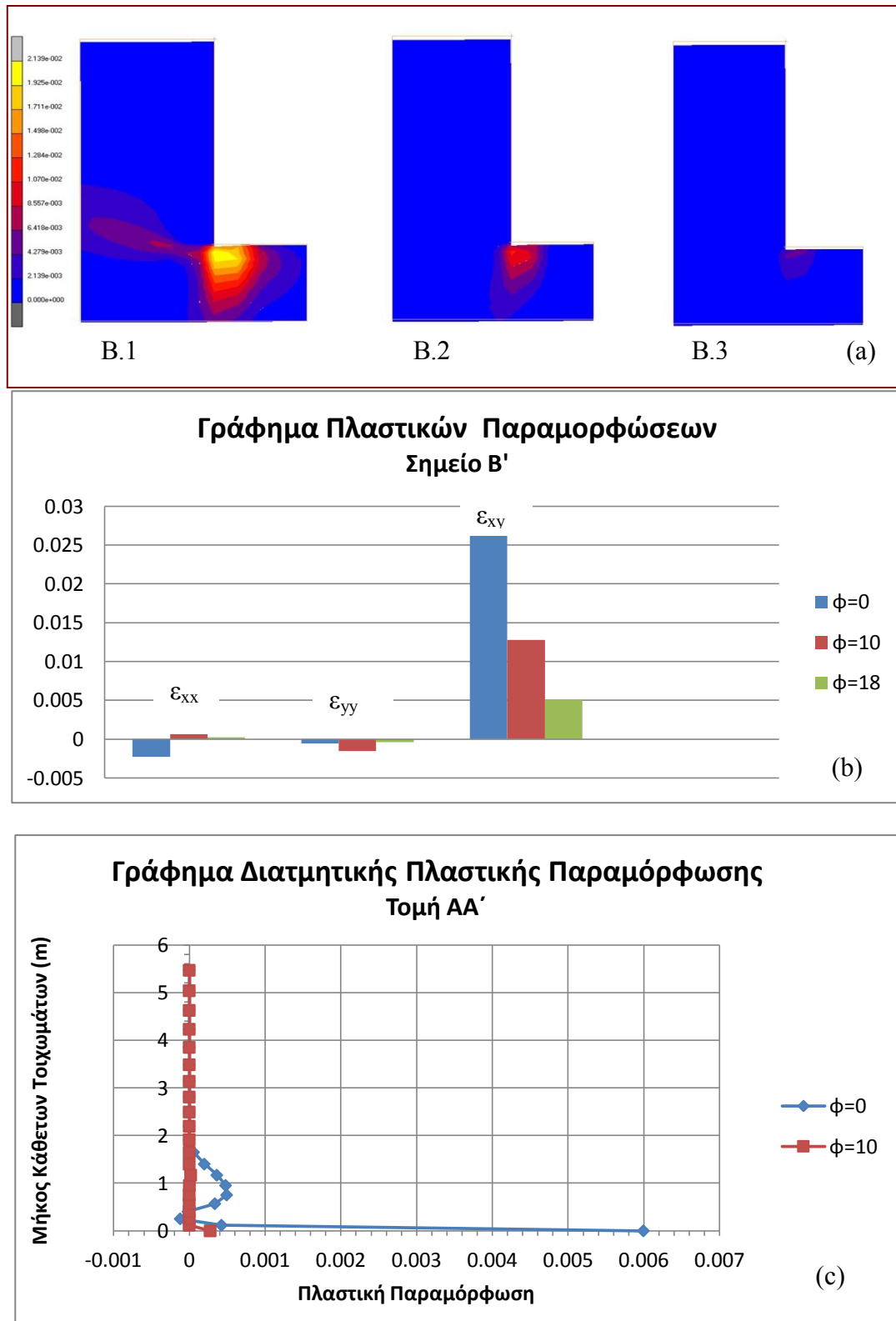
Σχήμα 21: Μεταβολή των Οριζόντιων Μετατοπίσεων του Τοίχου σε σχέση με τη Γωνία Τριβής, α) Σχηματική Απεικόνιση β) Γράφημα Μετατοπίσεων, όπου ϕ σε ($^{\circ}$).



Σχήμα 22: Σχηματική Απεικόνιση Μεταβολής των Εφελκυστικών Τάσεων σε σχέση με την Αύξηση της Γωνίας Τριβής, σ_{xx} σε (Pa).



Σχήμα 23: Σχηματική Απεικόνιση Μεταβολής των Διατμητικών Τάσεων σε σχέση με την Αύξηση της Γωνίας Τριβής, σ_{xy} σε (Pa).



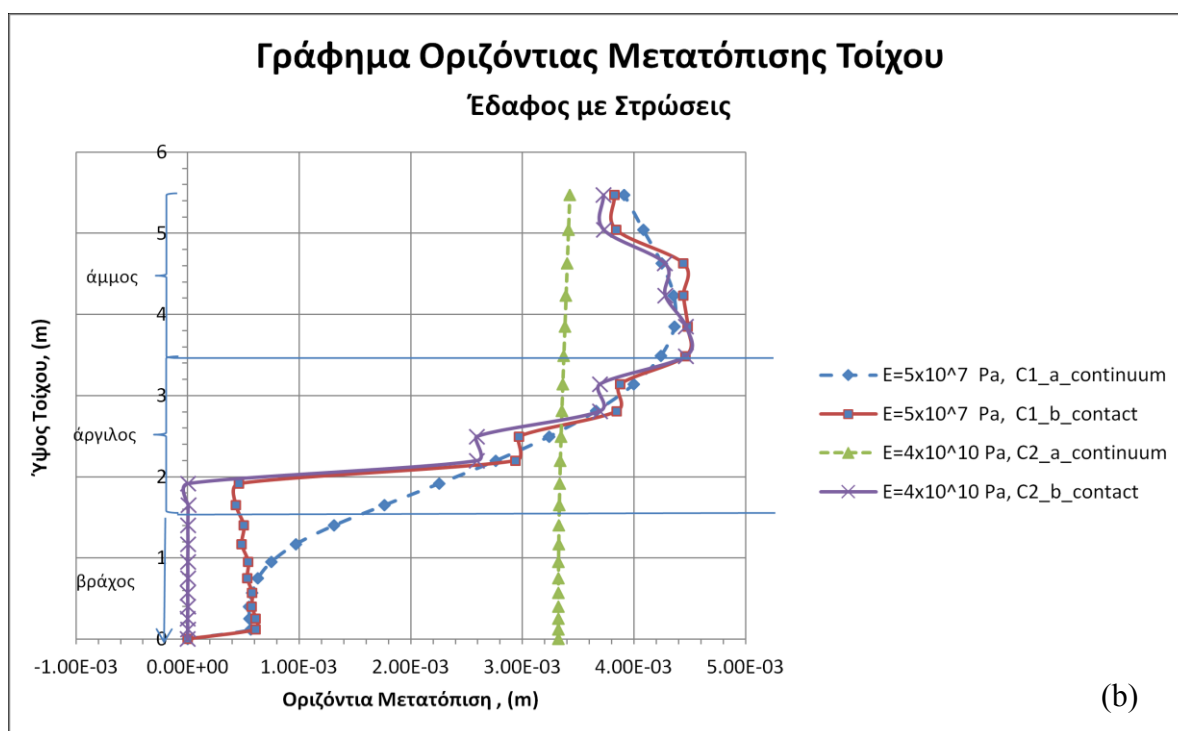
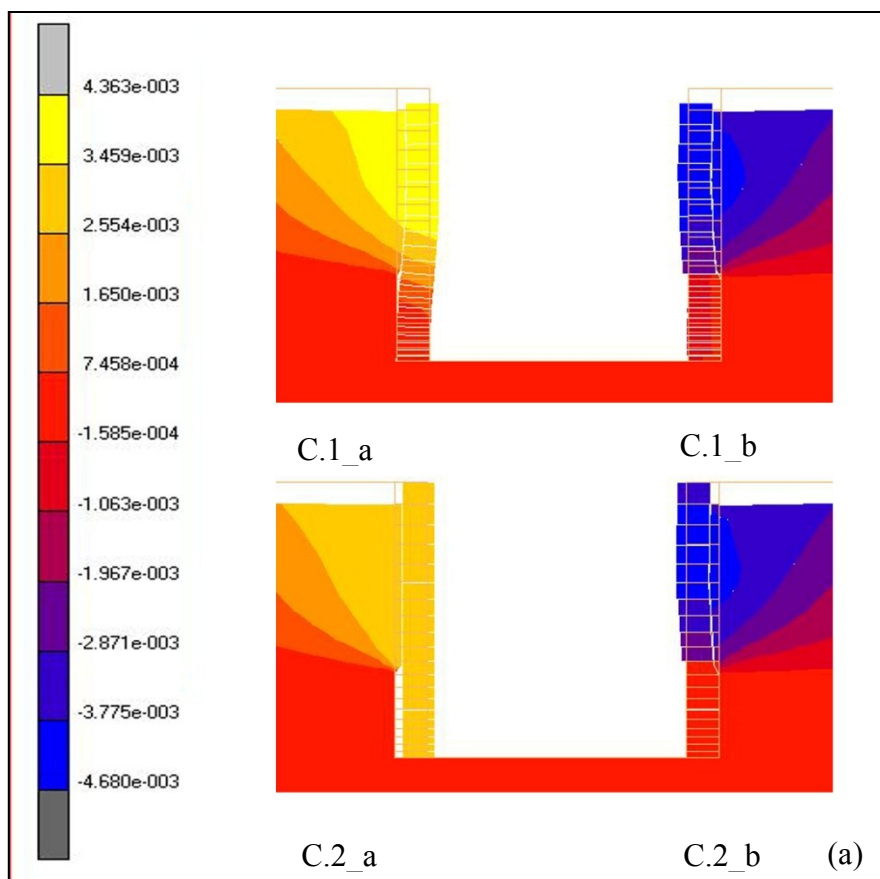
Σχήμα 24: Πλαστική Παραμόρφωση σε σχέση με τη Γωνία Τριβής, ϕ σε ($^{\circ}$) a) Σχηματική Απεικόνιση Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης, b) Πλαστικές Παραμορφώσεις ϵ_{xx} ϵ_{yy} ϵ_{xy} στο σημείο B' c) Διατμητική Πλαστική Παραμόρφωση στα σημεία που ορίζονται από την Τομή AA'.

6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΤΟΙΧΟΥ (Γ'ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στην Γ' Κατηγορία εξετάστηκε η επίδραση της διαστρωμάτωσης ανάμεσα σε τοιχώματα με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και τρόπο σύνδεσης μεταξύ των λίθων.

- Χαρακτηριστικά διαστρωμάτωσης :
 - 0 – 1.5 m : βραχώδης σχηματισμός.
 - 1.5 - 3.5 m : αργιλώδης σχηματισμός, μερικώς διαπερατός.
 - 3.5 – 5.5 m : αμμώδης σχηματισμός.
- Μέτρο Ελαστικότητας του τοίχου:
 - $E_{C.1} = 5 \times 10^7$ Pa Προσομοίωμα C.1.
 - $E_{C.2} = 4 \times 10^{10}$ Pa Προσομοίωμα C.2.
- Και ως προς τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας εξετάζονται οι περιπτώσεις:
 - Επαρκής σύνδεση μεταξύ των λίθων (συνεχές μέσο).
 - Δυνατότητα Αποκόλλησης μεταξύ των λίθων (συνθήκες επαφής - τριβής).

Παρατηρώντας το Σχ. 25 είναι φανερό ότι η εναλλαγή από σκληρότερο εδαφικό στρώμα (βραχώδες εδαφικός σχηματισμός) σε μαλακότερο (άργιλος και στη συνέχεια άμμος) συνοδεύεται από συγκέντρωση ωθήσεων, άρα και αυξημένων οριζόντιων μετατοπίσεων. Στις δεδομένες περιοχές είναι δυνατό να εμφανιστεί το φαινόμενο της καμπύλωσης. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση του άκαμπτου τοίχου (Μοντέλο C.2_a) με καλή σύνδεση μεταξύ των τοιχοσωμάτων, όπου παρατηρείται η μικρότερη τιμή των οριζόντιων μετατοπίσεων και εκδηλώνεται ομοιόμορφη μετατόπιση του τοίχου προς τα έξω. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας στο πάνω μέρος του τοίχου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση ή ανατροπή. Τέλος, στο μοντέλο C.2_b, παρατηρείται ότι όταν υπάρχει δυνατότητα αποκόλλησης μεταξύ των λίθων και για μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, οι ωθήσεις του βράχου προς τον τοίχο δεν τον επηρεάζουν, ώστε να εκδηλωθεί μετατόπιση ή παραμόρφωση στην αντίστοιχη περιοχή.



Σχήμα 25: Οριζόντια Μετατόπιση σε σχέση με τη Διαστρωμάτωση του εδάφους, εξετάζοντας πλήρης σύνδεση μεταξύ των λίθων (περίπτωση C1,2_a) και την περίπτωση επαφής – τριβής (περίπτωση C1,2_b). a) Σχηματική Απεικόνιση b) Γράφημα Μετατόπισης.

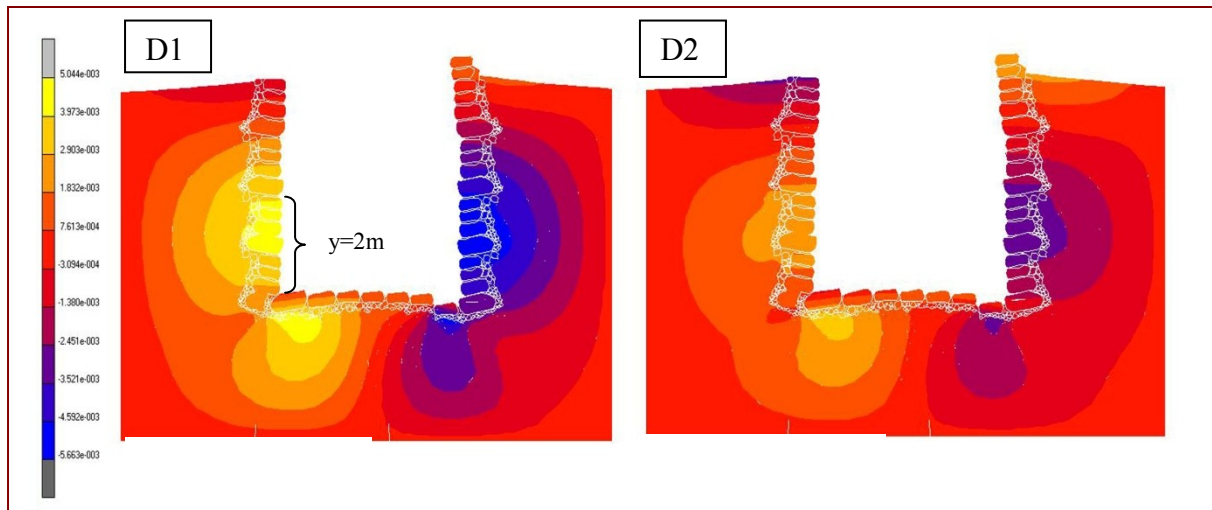
6.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΟΜΒΡΟΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (Δ' ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ)

Στην Δ' Κατηγορία προσομοιωμάτων μελετήθηκαν:

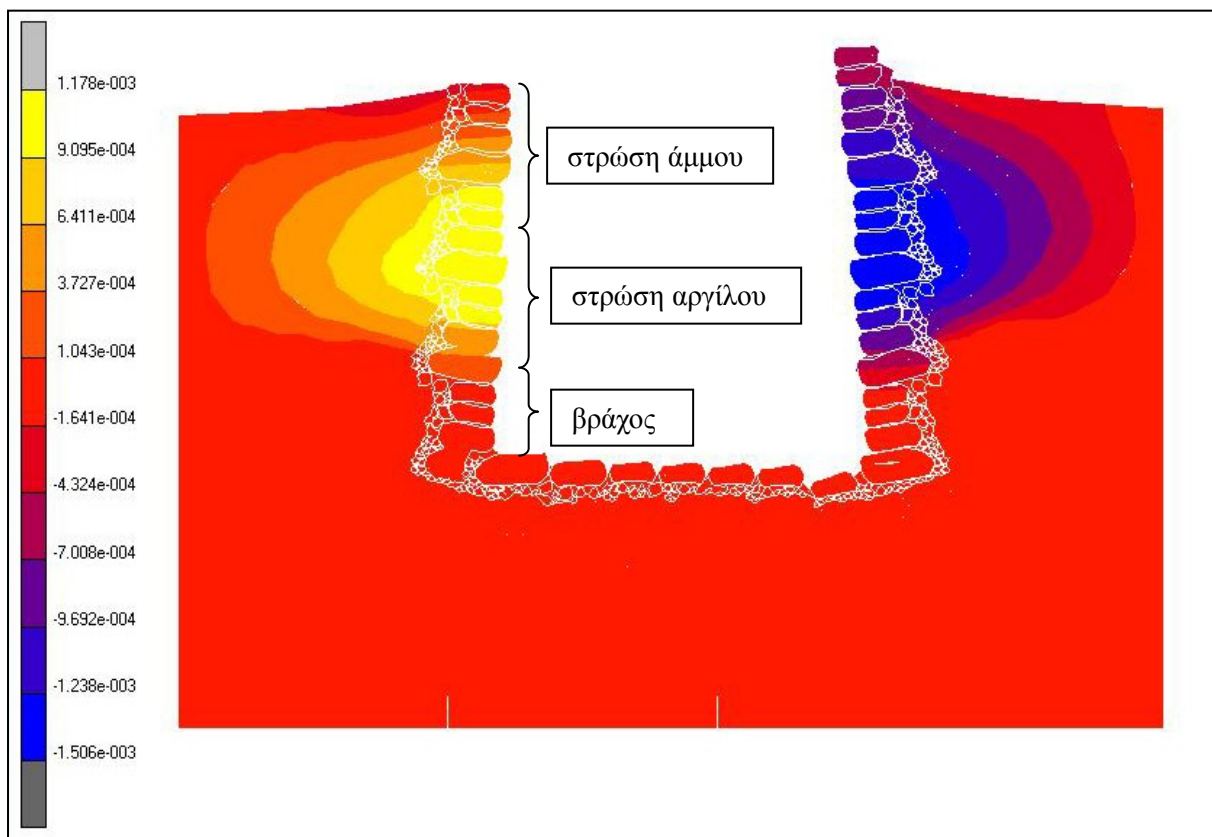
- Οι αστράγγιστες συνθήκες εδάφους, οι οποίες προσομοιώθηκαν από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής $c=50 \text{ KPa}$, $\phi_{D1}=0^\circ$,
(Μοντέλο D.1 σύμφωνα με το προσομοίωμα B.1).
- Οι συνθήκες μερικής στράγγισης, οι οποίες προσομοιώθηκαν από τις παραμέτρους $c=50 \text{ KPa}$ και $\phi_{D2} = 18^\circ$,
(Μοντέλο D.2 σύμφωνα με το προσομοίωμα B.3).
- Οι συνθήκες διαστρωμάτωσης του εδάφους,
(Μοντέλο D.3 σύμφωνα με τα προσομοιώματα Γ' κατηγορίας).

Στα προσομοιώματα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά και γεωμετρία παραδοσιακής στέρνας τα αποτελέσματα συγκλίνουν με αυτά της απλοποιημένης ανάλυσης, με τη διαφορά ότι εκδηλώνονται μικρότερες οριζόντιες μετατοπίσεις. Το φαινόμενο καμπύλωσης εκδηλώνεται μέχρι τα 2m, δεδομένου ότι ο αριστερός τοίχος έχει ύψος 4.5m και οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή από 1 - 2m. Όμοια με τα μοντέλα της Β' Κατηγορίας οι μετατοπίσεις εξασθενούν με την αύξηση της γωνίας τριβής, άρα και της μείωσης της υδροστατικής πίεσης και της αύξησης της διατμητικής αντοχής του εδάφους (Σχ. 26).

Όσον αφορά τη διαστρωμάτωση του εδάφους, παρατηρείται, όμοια με την έρευνα της Γ' Κατηγορίας ότι αναπτύσσεται το φαινόμενο της καμπύλωσης του τοίχου, το οποίο οφείλεται στην αυξημένη συγκέντρωση των ωθήσεων στις περιοχές εναλλαγής από το σκληρότερο εδαφικό στρώμα του βράχου στο μαλακότερο εδαφικό στρώμα της αργίλου και, στη συνέχεια, της άμμου (Σχ. 27).



Σχήμα 26: Σχηματική Απεικόνιση Οριζόντιας Μετατόπισης Τοιχωμάτων βασισμένων σε Κατασκευή Παραδοσιακής Στέρνας, σε σχέση με τη Γωνία Τριβής.



Σχήμα 27: Προσομοίωση Παραδοσιακής Στέρνας. Σχηματική Απεικόνιση Οριζόντιας Μετατόπισης Τοιχωμάτων σε σχέση με τη Διαστρωμάτωση του Εδάφους.

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα, Συστάσεις και Μελλοντικές Προτάσεις

7.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ

Στη συγκεκριμένη διατριβή επιχειρήθηκε αρχικά να εξεταστεί και να αναδειχτεί η αξία των παραδοσιακών συστημάτων διαχείρισης όμβριων και εδάφους μέσα από μελέτη των αρχών λειτουργίας τους και δόμησης τους από τους αρχαίους χρόνους μέχρι την σύγχρονη εποχή. Τα συμπεράσματα από την παρούσα έρευνα συνοψίζονται παρακάτω. Μια συστηματική εξέλιξη στη διαχείριση νερού ξεκίνησε στην Κρήτη, κατά την εποχή του Χαλκού. Η σπουδαιότητα των συστημάτων διαχείρισης υδάτων της δεδομένης εποχής έγκειται [35]:

- (α) στην αρτιότητα των κατασκευών και λειτουργία τους πριν από χιλιετίες,
- (β) στον πρωτοποριακό χαρακτήρα πολλών τεχνολογιών, όπως είναι οι ομβροδεξαμενές, τα υδραγωγεία μεταφοράς νερού σε οικιστικές περιοχές και τα αποχετευτικά συστήματα, και
- (γ) στην μεταφορά αυτών των τεχνολογιών στην κεντρική Ελλάδα και σε άλλες περιοχές του κόσμου.

Για την επίτευξη του σημερινού επιπέδου τεχνογνωσίας πάνω στη διαχείριση υδάτων, οι τεχνολογικές εξελίξεις στην πάροδο του χρόνου αποτελούν αναπόφευκτα στάδια, τα οποία δεν πρέπει να αγνοηθούν. Τα επιτεύγματα όσον αφορά τις ομβροδεξαμενές και τις λειτουργικές απαιτήσεις των συστημάτων συλλογής και διανομής νερού, που εντοπίζονται στην αρχαιότητα, μπορούν να συγκριθούν με τα σύγχρονα αστικά υδατικά συστήματα, τα οποία επανήλθαν στην Ευρώπη και στη Β. Αμερική από το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα μ.Χ. [8].

Δυστυχώς σήμερα τα διδάγματα των προγενέστερων θεωρούνται αναχρονιστικά από ένα μεγάλο μερίδιο πληθυσμού, με αποτέλεσμα για την κάλυψη των απαιτήσεων σε νερό οι άνθρωποι χρησιμοποιούν κυρίως το επιφανειακό νερό από λίμνες, ποτάμια και το υπόγειο νερό. Παράλληλα, υπάρχουν ενδείξεις ότι στις περισσότερες ξηρές και ημί- ξηρες περιοχές του κόσμου, μελλοντικά, οι διαθέσιμοι πόροι υδάτων που λαμβάνονται από τις συγκεκριμένες πηγές δεν θα είναι αρκετοί για την κάλυψη των αναγκών των αγροτικών και αστικών περιοχών. Συνεπώς είναι απαραίτητη η επανεκτίμηση της αξίας παραδοσιακών μεθόδων συλλογής νερού και άρδευσης, καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς μεγάλες δαπάνες, η απόδοση τους έχει δοκιμαστεί θετικά μέσα στους αιώνες, προσφέρουν καλές προοπτικές για μελλοντική ανάπτυξη και μπορούν να συμβάλλουν στην άμβλυνση της μελλοντικής έλλειψης νερού [6, 27].

Αυτό που παρατηρείται όμως είναι ότι μεγάλο ποσοστό των παραδοσιακών δομών από ξερολιθιά που έχουν διαμορφώσει το σημερινό τοπίο σε όλη την περιοχή της Μεσογείου και σχετίζονται με την αποθήκευση, συλλογή και παροχή νερού σε οικίες ή αγροτικές καλλιέργειες (αναβαθμοί, αυλάκια, στέρνες), έχουν εγκαταλειφθεί και καθώς δε διατηρούνται απειλούνται από κατάρρευση με κίνδυνο να ξεχαστούν οι τεχνικές δόμησης τους, που βασίζονταν στην εμπειρία των τεχνιτών, και να χαθεί η γνώση πάνω στις αρχές λειτουργίας που υπακούουν τα συγκεκριμένα συστήματα. Συνεπώς με την εγκατάλειψή τους η διαδικασία προστασίας και εξέλιξης της γνώσης διακόπτεται και χάνεται.

Στην παρούσα διατριβή αποδείχτηκε ότι είναι απαραίτητη η συντήρηση των παραδοσιακών συστημάτων διαχείρισης όμβριων και γενικά των επιφανειακών απορροών και του εδάφους, για τους εξής λόγους:

1. Τα παραδοσιακά συστήματα είναι συμβατά με την αειφορία των υδάτων και την προστασία του τοπίου.

Σε σύγκριση με τις σημερινές τεχνολογίες, υπακούν σε συγκεκριμένα κριτήρια που πηγάζουν από τη συσσωρευμένη γνώση των κλιματικών και υδρογεωλογικών συνθηκών μέσα από χρόνιες εφαρμογές στις περιοχές που εφαρμόζονται.

2. Με τις κατάλληλες επεμβάσεις αποκατάστασης και ενσωμάτωσης της σημερινής τεχνολογίας σε παλαιότερα συστήματα διαχείρισης υδάτων υπάρχει η δυνατότητα εξέλιξης τους και επαναλειτουργίας.

- ως συμπληρωματικές πηγές νερού, ώστε να μειωθεί η ζήτηση και να εκτονωθεί η κατάσταση που έχει διαμορφωθεί σε σχέση με τους υδάτινους πόρους,
- ως μέτρα αντιμετώπισης της αυξανόμενης διάβρωσης εδάφους, στην οποία οδηγεί η εγκατάλειψη των αναβαθμών,
- ως πεδία έρευνας ικανά να προσφέρουν προτάσεις για την αειφόρο εξέλιξη της σημερινής τεχνολογίας πάνω στη διαχείριση φυσικών πόρων, επομένως και λύσεις επάνω στην επερχόμενη κρίση νερού,

3. Σχετικά με τα έργα μεγάλης κλίμακας ΔΥΠ.

- Απαιτούν χαμηλότερες δαπάνες συντήρησης.
- Υποστηρίζουν την αειφόρο λειτουργία των ήδη υπαρχόντων έργων μεγάλης κλίμακας όταν συνδυάζεται η λειτουργία τους με αυτά, και περιορίζεται η ανάγκη κατασκευής νέων έργων ΔΥΠ μεγάλης κλίμακας, η οποία προέρχεται από τη συνεχόμενη αύξηση απαίτησης σε νερό του σημερινού τρόπου ζωής.
- Αποφεύγεται η αυξημένη συγκέντρωση νερού σε έναν τόπο, η οποία οδηγεί σε συγκρούσεις ανάμεσα σε γειτονικές περιοχές.
- Αποφεύγονται προβλήματα που προέρχονται από την πιθανή μόλυνση ενός μεγάλου ταμιευτήρα νερού.

4. Μπορούν να παρέχουν κοινωνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα με την κατάλληλη θεσμική υποστήριξη καθώς :

- Συμβάλλουν στην υψηλή ποιότητα της γεωργικής παραγωγής χωρίς την υποβάθμιση του τοπίου και την υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων.
- Προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες ανάγκες του τοπικού χρήστη και δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου και βελτίωσης τους από τον ίδιο.
- Μέσα από τα συστήματα αυτά, ευνοείται η συνεργασία και η συμμετοχή των γηγενών κατοίκων στην αντιμετώπιση φυσικών προβλημάτων από όπου μπορούν να προκύψουν σύνθετες στρατηγικές διαχείρισης.
- Η προστασία και η εξέλιξη της πολιτιστικής κληρονομιάς και των αξιών της παράδοσης ενισχύει την πολιτιστική ταυτότητα μιας περιοχής και την κοινωνική συνοχή.

Στο σχεδιασμό και την εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης όμβριων για παραγωγική αξιοποίηση του νερού και για οικιακή χρήση, προτείνεται η:

1. Η συμμετοχή της επιστημονικής κοινότητας μέσω της έρευνας πάνω στις αρχές λειτουργίας και στις κατάλληλες πρακτικές των συγκεκριμένων συστημάτων. Η έρευνα πάνω στο σχεδιασμό των συστημάτων συλλογής νερού πρέπει να περιλαμβάνει :

- Την αποφυγή του περιορισμού της απορροής στο ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής, στερώντας έτσι νερό από τους χρήστες στο κατάντη τμήμα της λεκάνης.
- Τη συγκέντρωση δεδομένων από τις τοποθεσίες όπου εφαρμόζονται τα συστήματα αυτά, ώστε μελλοντικά να μειωθεί ο παράγοντας της δοκιμής – σφάλματος στις εφαρμογές τους, άρα και να υπάρχει βελτιστοποίηση στην απόδοσή τους.
- Τις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές και το κόστος συντήρησης των συστημάτων συλλογής νερού.

2. Η ενίσχυση της θεσμικής ικανότητας και της πολιτικής διαχείρισης για την ορθή εκμετάλλευση των κατάλληλων υδατικών πόρων.

Για την εφαρμογή των συστημάτων WH και SI και τη διατήρηση των ήδη υπαρχόντων παραδοσιακών συστημάτων είναι αναγκαία:

- Η ύπαρξη επενδυτικών προγραμμάτων και προγραμμάτων συντήρησης και διαχείρισης συστημάτων WH και SI.
- Η παροχή κινήτρων και η στήριξη των γεωργών για την εφαρμογή των συστημάτων WH και SI, η οποία πρέπει να καθορίζεται σε στενή διαβούλευση με τους τοπικούς χρήστες.
- Υδραυλική Μελέτη στα υπάρχοντα δημόσια κτίρια και όσα νέα κατασκευάζονται, τα οποία αποτελούν ένα πρόσφορο πεδίο για την εγκατάσταση και τη μελέτη συστημάτων συλλογής όμβριων, ώστε να γίνεται προσιτή η δεδομένη τεχνολογία στην τοπική κοινωνία και είναι ευκαιρία για την τοπική αυτοδιοίκηση να εφαρμόσει στην πράξη την προστασία των υδάτινων πόρων [5,6].

3. Εκπαιδευτικές δραστηριότητες μέσα από τους τοπικούς φορείς για τη συνειδητοποίηση, την αντιμετώπιση και τη βελτίωση θεμάτων που αφορούν [6]:

- Την έλλειψη νερού.
- Εποχιακές πλημμύρες.
- Εμπλουτισμό υπόγειου νερού.
- Εναλλακτικές πηγές νερού.

Στη μελλοντική διερεύνηση, είναι απαραίτητο να διεξαχθούν μελέτες που να εξετάζουν σε όρους περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς τις σύγχρονες συμβατικές τεχνολογίες διαχείρισης υδάτων και τις εναλλακτικές τεχνολογίες αφαλάτωσης, ανακύκλωσης και συλλογής νερού, ώστε να επιλέγεται ένα ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης νερού σε όρους ποσότητας και ποιότητας.

7.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΞΕΡΟΛΙΘΙΑΣ

Για την αποκατάσταση και διατήρηση των παραδοσιακών συστημάτων, η εφαρμογή της μεθόδου της πεπερασμένης ανάλυσης πάνω στις παραδοσιακές κατασκευές μπορεί να συμβάλλει στην κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας, και να οδηγήσει σε αποτελεσματικές προτάσεις αποκατάστασης με σεβασμό στον ιστορικό χαρακτήρα της κατασκευής. Προς αυτήν την κατεύθυνση στη συγκεκριμένη διατριβή, μελετήθηκε ο μηχανισμός αστοχίας τοίχων αντιστήριξης ξερολιθιάς, για την κατασκευή αναβαθμών και στερνών, πραγματοποιώντας παραμετρική ανάλυση για διαφορετικές ποιότητες εδάφους και μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τοίχου. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πεπερασμένη ανάλυση πάνω σε ξερολιθικούς τοίχους αντιστήριξης είναι τα παρακάτω.

1. Αυξημένες ωθήσεις στον τοίχο και ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στην όψη του παρατηρούνται στις περιπτώσεις :
 - i. Μικρής γωνίας εκσκαφής σε σχέση με την κατακόρυφο.
 - ii. Χαμηλής γωνία τριβής στην εσωτερική όψη του τοίχου.
 - iii. Εναλλαγής από σκληρότερο σε μαλακότερο σε μαλακότερο εδαφικό στρώμα.
2. Οι αυξημένες ωθήσεις εκδηλώνονται με την ανάπτυξη του φαινομένου της καμπύλωσης, και στις δύο περιπτώσεις συμπεριφοράς των ενώσεων, όταν ο τοίχος θεωρείται εύκαμπτος, ενώ στην περίπτωση του άκαμπτου τοίχου παρατηρείται καμπύλωση στη θεώρηση συνθηκών επαφής – τριβής ανάμεσα στα τοιχοσώματα. Η ευστάθεια του τοίχου μετά την παραμόρφωση του υποδεικνύει ότι η καμπύλωση αυξάνει την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής ως ένα σημείο. Με την επακόλουθη αύξηση του φορτίου είναι πιθανό να εκδηλωθεί αστοχία στον τοίχο ως κατάρρευση ή ολίσθηση.
3. Η μετατόπιση του τοίχου προς τα έξω και πιθανή αστοχία λόγω κατάρρευσης του ανώτερου τμήματος ή ανατροπής του τοίχου εκδηλώθηκαν για κατακόρυφο άκαμπτο τοίχο με επαρκή σύνδεση ανάμεσα στα τοιχοσώματα.
4. Στην περίπτωση βραχέδους σχηματισμού δεν προκαλούνται ωθήσεις στον τοίχο.

5. Η αύξηση της κλίσης της εκσκαφής του τοίχου συμβάλλει:

- Στη μείωση των εφελκυστικών τάσεων στην εξωτερική όψη του τοίχου.
- Στη μη υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους με κίνδυνο της ψαθυρής αστοχίας του, κυρίως για κλίση 45° από την κατακόρυφο.

Για την αποκατάσταση και διατήρηση ξερολιθικών τοίχων αντιστήριξης προτείνεται η αναβάθμιση της αντοχής τους με την:

- Προσθήκη κονιάματος, αυξημένης αντοχής και με δυνατότητα ανάληψης μεγάλων παραμορφώσεων, ώστε να παραλαμβάνονται οι αυξημένες ωθήσεις. Η εφαρμογή κονιάματος αρμολόγησης πρέπει να γίνεται τοπικά στα σημεία έντονων παραμορφώσεων, π.χ., στην εναλλαγή των εδαφικών στρώσεων διαφορετικής ποιότητας, και η επιλογή της ποιότητας του κονιάματος πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των ιστορικών υλικών, ώστε να μην επηρεάζεται ο χαρακτήρας της ξερολιθικής κατασκευής.
- Αντικατάσταση των τμημάτων του τοίχου που έχουν καταρρεύσει με συμβατά υλικά με την προϋπάρχουσα κατασκευή.
- Κατάλληλη αποστράγγιση του υπόγειου νερού, με την τοποθέτηση κατάλληλων διατάξεων διαπερατών ενστρώσεων στην επιχωμάτωση ώστε να περιορίζεται ή να αποτρέπεται η δημιουργία υδροστατικών πιέσεων στην εσωτερική όψη του τοίχου.
- Επικάλυψη της στέψης με κονίαμα συμβατό με τα υπάρχοντα υλικά το οποίο θα ενισχύσει την στέψη του τοιχώματος, θα σταθεροποιήσει λίθους που τείνουν να μετακινηθούν και θα προστατέψει τη διάβρωση του τοιχώματος από την βροχή μέσα στην δομή της τοιχοποιίας.
- Καθαρισμός από τις ρίζες και την βλάστηση στα τοιχώματα τα οποία παρουσιάζουν τοπικά έντονες παραμορφώσεις.
- Αύξηση του βάθους θεμελίωσης για την αποτροπή εκδήλωσης πλαστικών παραμορφώσεων στη βάση του τοίχου.

Τέλος, σε μελλοντική συνέχιση της μέλετης για την κατανόηση μηχανισμών παραμόρφωσης και αστοχίας ξερολιθικών τοίχων με στόχο αρχικά την ορθή αποκατάστασή τους και την εξέλιξη της δόμησής τους στη συνέχεια, προτείνεται η διερεύνηση :

- Των μηχανικών χαρακτηριστικών των ιστορικών υλικών μέσα από πειραματικές μελέτες, για την αντιπροσωπευτικότερη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των παραδοσιακών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Της επίδρασης των κενών ανάμεσα στα τοιχοσώματα πάνω στην ευστάθεια του.
- Της επίδρασης της εσωτερικής κατανομής των τοιχοσωμάτων και της δυνατότητας μετακίνησης και περιστροφής τους, μελετώντας το πως οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί συμβάλλουν στο φαινόμενο της καμπύλωσης του τοίχου.
- Της επίδρασης συνθηκών ανομοιογενούς αντιστηριζόμενου εδαφικού σχηματισμού στην αλληλεπίδρασή του με τον τοίχο.
- Της επίδρασης των γειτονικών κατασκευών και επιπρόσθετων κατακόρυφων εξωτερικών φορτίων στην ευστάθεια των παραδοσιακών τοίχων ξερολιθιάς.
- Τη μελέτη ευστάθειας ξερολιθικού τοίχου υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης.

Συνοψίζοντας, καθώς ολόκληρα ιστορικά κέντρα και αγροτικά τοπία είναι καταδικασμένα να αφανιστούν, όταν δεν έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν τις καινοτομίες που χρειάζονται για να λειτουργήσουν, η συντήρηση ή και ανακατασκευή των παραδοσιακών συστημάτων προκύπτει σαν ανάγκη προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, διατήρησης της τεχνικής δόμησής τους, προστασίας του τοπίου και αειφόρου ανάπτυξης ενός τόπου. Ό,τι αναγνωρίζουμε ως παράδοση δεν είναι μια στατική και αμετάβλητη συνθήκη, αλλά ένα δυναμικό σύστημα το οποίο εξελίσσεται με καινοτόμες κατευθύνσεις [9].

Βιβλιογραφία

- [1] UNEP and Stockholm Environment Institute. (2009). Rainwater Harvesting: A Lifeline for Human Well-being.
- [2] UNEP. DTIE. IETC. (2002) Rainwater Harvesting and Utilisation. An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management: An introductory Guide for Decision-Makers. Newsletter and Technical Publication
<http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/Urban/UrbanEnv-2/index.asp>
- [3] Bougiatioti F., Oikonomou A., (2008) 270: Water Conservation in the Traditional Environment of the island of Sifnos, Greece, 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October
- [4] Νικολαΐδης Ν., Σκουλικίδης Ν., Παπαδουλάκης Β., Τσακίρης Κ., & Καλογεράκης Ν. (2009). Στρατηγικό Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα και της Παράκτιας Ζώνης του – Περιβαλλοντικοί Στόχοι και Μέτρα, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, EU – LIFE Environment.
- [5] Γιαννάκη Σ. (2007). Οικιακή χρήση του βρόχινου νερού με τις «σύγχρονες στέρνες». LINK: February 2012, <http://www.monumenta.org>,

-
- [6] Sultana F., (2007). Sustainable Water Supply: Rainwater Harvesting for Multistoried Residential Apartments in Dhaka,Bangladesh, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.
 - [7] Oweis T., Hachum A., Kijne J. (1999) Water Harvesting And Supplemental Irrigation for Improved Water Used Efficiency in Dry Areas. International Water Management Institute, series IWMI Books, No HO24198.
 - [8] Antoniou G., Xarchakou R. and Angelakis A.N. (2006). Water Cistern Systems in Greece From Minoan to Hellenistic Period. 1st IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, Greece, 457-462.
 - [9] Laureano P. (2008). Traditional Knowledge Role for Security and Mitigation of Water Conflicts. Water Culture and Water Conflict in the Mediterranean Area, A No 83, Ipogea Florence.
 - [10] Prinz D. (2002). The Role of Water Harvesting in Alleviating Water Scarsity in Arid Areas. Keynote Lecture, Institute for Scientific Research, Kuwait. Proceedings, International Conference on Water Resources Management in Arid Regions, Vol. III, pp.107 -102.
 - [11] Σταυρουλάκη Μ., Κεχαγιά Α. (2010). Τεχνική έκθεση ερευνητικού προγράμματος, ‘Μοντελοποίηση και Στατική Φόρτιση – Προτάσεις Αποκατάστασης Ομβροδεξαμενών Νεαπόλεως – Λασιθίου ’, Πολυτεχνείο Κρήτης.
 - [12] Βερνίκος Ν., Δασκαλοπούλου Σ., Παυλογεωργάτος Γ. Δ.. (2001) Πρόταση Ταξινόμησης Ξερολιθικών Κατασκευών. Πρακτικά Διεθνής επιστημονικής ημερίδας: "Ο δομικός λίθος στα μνημεία". Διοργάνωση: ICOMOS - Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα και Μυτιλήνη.
 - [13] Μιχαήλ Γ., Παγκρατίου Ε., Πουλογιάννη Ν. (2001). Εγχειρίδιο Ξερολιθικών Κατασκευών. Πρόγραμμα Λίθος του Interreg II.

- [14] Powrie W., Harkness J. (2009). An Experimental and Analytical Study of Dry Stone Retaining Walls. Engineering and Physical Sciences Research Council, EP/DO37875/1.
- [15] Zhang X., Koutsabeloulis N.C., Hope S. & Pearce A. (2004) A Finite Element Analysis for the Stability of Dry Stone Retaining Wall. *Geotechnique* 54, No 1, 57-60.
- [16] Villemus B., Morel J.C., Boutin C. (2007). Experimental Assessment of Dry Stone Retaining Wall Stability on a Rigid Foundation. *Engineering Structures*, ScienceDirect, 29, pp. 2124 – 2132.
- [17] Βαλαλά Δ. Θ. (1984). Εδαφομηχανική. Εκδοτικός οίκος Αφών Κυριακίδη. Θεσσαλονίκη.
- [18] Hatzigeorgiou G.D., Beskos D.E., Theodorakopoulos D.D., Sfakianakis M. (1999). Static and Dynamic Analysis of the Arta Bridge by Finite Element Analysis. *TA UNIVERSITATIS*, Seried: Architecture and Civil Engineering, 2(1), pp. 41-51.
- [19] Thavalingam A., Bicanic N., Robinson J.I., Ponniah D.A. (2001). Computational Framework for Discontinuous Modelling of Arch Bridges. *Computers & Structures*, 79, pp. 1821-1830.
- [20] Leftheris B., Stavroulaki M.E., Sapounaki A.C., Stavroulakis G.E. (2006). *Computational Methods for Heritage Structures*. WIT Press, Southampton, U.K.
- [21] Lourenço, P.B. Computations of Historic Masonry Structures. (2002). *Prog. Struct. Engng, Mater*, 4, pp. 301-319.
- [22] Lourenço P.B., Rots J.G. and Blaauwendraad J. (1998). Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validatiion. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(6), pp. 642-652.

-
- [23] Lourenço P.B. (1997) An Isotropic Macro- Model for Masonry Plates And Shells: Implementation and Validation. Report No. 03.21.1.3.07, Delft University of Technology, Delft.
 - [24] Λιβανίου Ι., (2010) Διαχείριση Νερού για Γεωργική Χρήση: Ανάγκες Επικρατούσες Πρακτικές και Μέτρα Βελτιστοποίησης, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
 - [25] Χατζουλάκης Κ., Ψαρράς Γ., Κασαπάκης Ι. (2009) Πιλοτικές Δράσεις Ενάντια στην Ξηρασία και την Ερημοποίηση στις Περιοχές της Λεκάνης της Μεσογειακής Ευρώπης Εφαρμογή στην Περιφέρεια Κρήτης, Περιοδικό ΕΘΙΑΓΕ, 20-23.
 - [26] Τουμαζής Δ. & Συνεργάτες, Καραβοκύρης Γ. & Συνεργάτες. (2009) Μελέτη Διερεύνησης Χρήσης Όμβριων Υδάτων, Υπουργείο Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων, Αριθμός Σύμβασης: ΤΑΥ 21/2009.
 - [27] Prinz D.(1994) Water Harvesting: Past and Future. In: Pereira, L. S. (ed.), Sustainability of Irrigated Agriculture. Proceedings, NATO Advanced Research Workshop, Vimeiro, Balkema, Rotterdam, 21, pp. 135 – 144.
 - [28] Food and Agriculture Organization of the United Nations
LINK: February 2012. http://www.fao.org/nr/index_en.htm
 - [29] Civil Research Group. (2005). Domestic Rain Water Harvesting Technology. University of Warwick.
LINK: February 2012, <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/>
 - [30] Smet J. (2003) Domestic Rainwater Harvesting. WELL - Resource Centre Network for Water, Sanitation and Environmental Health
LINK : February 2012, <http://www.lboro.ac.uk/well/>
 - [31] RDC. Tank Types and Pumps Selection.
LINK: February 2012, www.RaindropsCisterns.com

-
- [32] Ruffino L. (2009) Water Conservation Technical Briefs : Rain Water Harvesting & Artificial Recharge to Groundwater. Sai Platform, ID: TB-02.
 - [33] Κοσμάς Κ., Γιασόγλου Ν., Κουναλάκη Κ., Καϊρης Ορ. Παραδοσιακές και Σύγχρονες Κατασκευές Καλλιέργειας του Εδάφους. Lucinda, Σειρά Φυλλαδίων: Γ, No 2.
 - [34] Angelakis A.N., and Koutsoyiannis D. (2003). Urban Water Engineering And Management In Ancient Greece. *The Encyclopedia of Water Science*, 999–1007, Dekker, New York.
 - [35] Αγγελάκης Α. (2011) Τεχνολογίες Ύδρευσης και Αποχέτευσης στην Αρχαία Κρήτη με έμφαση τη Μινωική Περίοδο. Εκδόσεις Ένωσης Δημοτικών Επιχειρήσεων Ύδρευσης Αποχέτευσης
 - [36] Γρίβα Ε. (2008). Υλοποίηση Βάσης Δεδομένων Αρχαίων Υδραυλικών Έργων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ) “Περιβάλλον και Ανάπτυξη”, Αθήνα.
 - [37] Mays L. W. (2007). Ancient Urban Water Supply in Arid and Semi - Arid Regions, International Symposium on New Directions in Urban Water Management, UNESCO, Paris.
 - [38,] LINK: February 2012. <http://www.ancient-greece.org/archaeology/phaistos.html>
 - [39] Sklivaniotis M. & Angelakis A.N. (2006). Water For Human Consumption Through The History. IWA 1st International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, Iraklio, Greece, 659 -666.
 - [40] Hydria Project, Collection & Distribution of Water in Antiquity Linking Ancient Wisdom to Modern Needs.
LINK: February 2012. <http://www.hydriaproject.net/>

-
- [41] ITE, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών,
LINK: February 2012. <http://www.ims.forth.gr/>
 - [42] Κινδελή Β. Ν., Χριστοδουλάκος Γ. (2000) Ρωμαϊκή Άπτερα μια Πρώτη Προσέγγιση. Congresso internazionale su Creta Romana e Protobizantina, Iraklion, 23-30.
 - [43] United Nations University International Network on Water, Environment and Health (UNU-INWEH), (2009). Seeing Traditional Technologies in a New Light Using Traditional Approaches for Water Management in Dry Lands Insights. Edited by Bigas H., Adeel Z. and Schuster B., Published by UNESCO.
 - [44] Laureano P. (2008). Traditional Knowledge Role for Security and Mitigation of Water Conflicts. Water Culture and Water Conflict in the Mediterranean Area, A No 83, Ipogea Florence.
 - [45] Mundell C., McCombie P., Heath A., Walker P. (2009) Dry Stone Retaining Walls: From Full – Scale Testing to Construction Requirements. Proceedings of the 11th International Conference on Non- Conventional Materials and Technologies.
 - [46] Sutton R.K., Steinegger D. (1986). Rock Retaining Wall Construction . Historical Materials from University of Nebraska, Lincoln. G86-823.
 - [47] Claxton M., Hart R. A., McCombie P. F. and Walker P. J. (2005). Rigid Block Distinct – Element Modeling of Dry Stone Retaining Walls In Plain Strain. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 131:3 (381).
 - [48] Λιαράκος Β. Ε. (2008) . Αριθμητική Διερεύνηση Κριτηρίων Αστοχίας και Μεθόδων Ενίσχυσης Κατασκευών από Τοιχοποιία. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
 - [49] Κουμούσης Β.(2008). Βασικές Αρχές Ενίσχυσης Κατασκευών από Λιθοδομή. Παρουσίαση ΤΕΕ Τμήμα Κέρκυρας, 2008.

-
- [50] Barnes G. E. (2005). Εδαφομηχανική, Αρχές και Εφαρμογές, , Εκδόσεις “ Κλειδάριθμος”.
 - [51] Κάββαδας Μ. (2005). Στοιχεία Εδαφομηχανικής Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου. 2005
 - [52] Αγιουτάντης Ζ.Γ. (2008). Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανικής Πετρωμάτων. Εκδόσεις ΙΩΝ.
 - [53] Brady K.C. and Kavanagh J. (2002). Analysis of the Stability of Masonry – Faced Earth Retaining Walls. Transport Research Foundation Reinvestment Programme, TRL Report 550.
 - [54] MARC-MENTAT. (2000) MANUALS, MSC engineering group, Theory and User Information.
 - [55] Stavroulaki M.E., Stavroulakis G.E. (2002). Unilateral Contact Application Using FEM Software. Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Special issue on Mathematical Modeling and Numerical Analysis in Solid Mechanics, Guest Editors Sofonea M., Viano J.M., pp 101-111.
 - [56] Πολ – Μηχ. ΕΜΠ. (2007 – 08). « ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ», Διάλεξη, Πεδιλοδοκοί και Κοιτοστρώσεις.

