

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Νερό και ενέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες. Μελέτη περίπτωσης: Το Υδραγωγείο της Uxama

Βασίλειος Πασχάκης

Διπλωματική εργασία



Επιβλέπων: Γ.-Φοίβος Σαργέντης



ΑΘΗΝΑ 2024

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Νερό και ενέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες. Μελέτη περίπτωσης: Το Υδραγωγείο της Uxama

Περίοδος εκτέλεσης: 2024

Στοιχεία επικοινωνίας: bill.pasxakhs@gmail.com

Εικόνα εξωφύλλου: Το Pont du Gard είναι το μεγαλύτερο ρωμαϊκό υδραγωγείο που εξακολουθεί να είναι ορατό σήμερα.

1η έκδοση

Αθήνα, 14.07.2024

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος	4
Περίληψη	5
Summary	6
1 Εισαγωγή	7
2 Νερό και Ενέργεια	9
2.1 Προβιομηχανικές κοινωνίες και νερό.....9	
2.1.1 Γενικά.....9	
2.1.2 Πηγάδια και στέρνες.....11	
2.1.3 Αξιοποίηση των φυσικών πόρων.....13	
2.2 Άνθρωπος και καλλιέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες.....19	
2.2.1 Γενικά στοιχεία ανθρώπινης εργασίας.....19	
2.2.2 Επεξεργασία εφάδους.....20	
2.2.3 Σπορά και φύτευση.....22	
2.2.4 Συγκομιδή καρπών.....24	
2.3 Καλλιέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες.....27	
2.3.1 Ισχύς στις εργασίες.....27	
2.3.2 "Βύθισμα" εργαλείου ή πρόσφυση.....28	
2.3.3 Εργασιακή αποδοτικότητα ζώων.....30	
2.3.4 Αξιοποίηση ζώων σε ομάδες.....33	
3 Ιστορική αναδρομή των ρωμαϊκών υδραγωγείων	37
3.1 Γενικά.....37	
3.2 Συστήματα νερού πριν τα υδραγωγεία.....38	
3.3 Τα υδραγωγεία της Ρώμης.....41	
4 Αρχές και λειτουργίες των ρωμαϊκών υδραγωγείων	43
4.1 Εύρεση πηγής.....43	
4.2 Συλλογή και διοχέτευση του νερού σε κανάλια.....44	
4.3 Τοπογραφικά όργανα και εργαλεία.....45	
4.3.1 Groma.....46	
4.3.2 Διόπτρα.....47	

4.3.3	Χωροβάτες	48
4.4	Φιλτράρισμα νερού με δεξαμενές καθίζησης	49
4.5	Σήραγγες και τάφροι	50
4.6	Γέφυρες στα Ρωμαϊκά υδραγωγεία	53
4.7	Σίφωνες	56
4.8	Σύστημα διανομής του νερού	58
4.9	Κλίση στα Ρωμαϊκά υδραγωγεία	61
5	Μελέτη του υδραγωγείου της Uxama	64
5.1	Ιστορία της Uxama Argaela	64
5.2	Βόρειο υδραγωγείο	67
5.3	Η σήραγγα Ucero «La Cueva de la Zorra»	68
5.4	Οι στέρνες	70
5.4.1	Στέρνα «El Arca» (η κιβωτός)	70
5.4.2	Στέρνα σε σχήμα ωμέγα	71
5.5	Μέθοδος ανύψωσης του νερού με την τεχνική Noria	73
5.5.1	Σύγκριση απόδοσης των βοδιών με τον άνθρωπο και τη σύγχρονη αντλία	75
5.5.2	Σύγκριση κόστους του noria με σύγχρονη αντλία	78
5.6	Ανατολικό υδραγωγείο	79
6	Σύνοψη - Συμπεράσματα	81
	Συμπεράσματα μέρος 1: Ενέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες	81
	Συμπεράσματα μέρος 2: Νερό και ενέργεια στα Ρωμαϊκά υδραγωγεία	84
7	Βιβλιογραφία	88

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γ.-Φοίβο Σαργέντη για υποστήριξη του, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον καθ. Νικόλαο Μαμάση για την εμπιστοσύνη και τις χρήσιμες υποδείξεις του.

Επίσης, ευχαριστώ τη μητέρα μου, Ελένη και τον πολύ καλό μου φίλο Δημήτρη για την υποστήριξη και την υπομονή τους.

Περίληψη

Οι προβιομηχανικές κοινωνίες ανέπτυξαν ευφυείς και αποτελεσματικές μεθόδους για την αξιοποίηση των υδάτινων πόρων τους. Ένας από τους κορυφαίους πολιτισμούς σε αυτόν τον τομέα ήταν η Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία, η οποία κατασκεύασε εντυπωσιακά υδραγωγεία που όχι μόνο έλυσαν τα προβλήματα ύδρευσης των πόλεων, αλλά έθεσαν και τα θεμέλια για τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις στην υδρολογία και τη μηχανική.

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια παρουσίαση των στοιχείων που θα αναλυθούν, η μελετητική πορεία που θα ακολουθηθεί καθώς επίσης και θα παρουσιαστούν οι στόχους και τα σημεία θα εμβαθύνει η εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται οι μέθοδοι συλλογής και αποθήκευσης νερού, όπως τα πηγάδια και οι στέρνες, καθώς και οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για την αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Εξετάζεται ο ρόλος της ανθρώπινης και ζωικής εργασίας στις γεωργικές δραστηριότητες, τονίζοντας τις μεθόδους επεξεργασίας εδάφους, σποράς και φύτευσης αλλά και τη συγκομιδή των καρπών. Επιπλέον εξετάζονται η ισχύς στις εργασίες, η αποδοτικότητα των ζώων και η χρήση εργαλείων για την καλλιέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η ιστορία των ρωμαϊκών υδραγωγείων, από την πρώιμη χρήση των φυσικών πηγών έως την κατασκευή σύνθετων συστημάτων ύδρευσης. Εξετάζονται οι προγενέστερες υδραυλικές κατασκευές και οι καινοτομίες των Ρωμαίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναδεικνύονται οι βασικές αρχές και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των υδραγωγείων. Συμπεριλαμβάνονται η εύρεση πηγής, η συλλογή και διοχέτευση του νερού σε κανάλια, τα τοπογραφικά όργανα και εργαλεία, καθώς και οι μέθοδοι φιλτραρίσματος και διανομής του νερού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, εξετάζεται αναλυτικά η περίπτωση του υδραγωγείου της Uxama Argaela. Παρουσιάζεται η ιστορία της πόλης, η κατασκευή και η λειτουργία του βόρειου και ανατολικού υδραγωγείου, καθώς και η τεχνική της ανύψωσης του νερού με τη μέθοδο Noria. Γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης της απόδοσης του συστήματος Noria με χρήση ζώων αλλά και ανθρώπων, ενώ συγκρίνονται το κόστος λειτουργίας του Noria με αυτό της σύγχρονης αντλίας.

Στο έκτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα ευρήματα της μελέτης, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα συγκρίσεων που έγιναν στην εργασία και τέλος αναδεικνύεται η συμβολή των ρωμαϊκών υδραγωγείων στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στην ανάπτυξη των αστικών κέντρων.

Summary

The pre-industrial societies developed intelligent and effective methods for utilizing their water resources. One of the leading civilizations in this field was the Roman Empire, which constructed impressive aqueducts that not only solved the water supply problems of the cities but also laid the foundations for future technological advancements in hydrology and engineering.

In more detail, the first chapter presents the elements that will be analyzed, the study path that will be followed, as well as the goals and points the study will delve into.

In the second chapter, the methods of water collection and storage, such as wells and cisterns, are described, along with the technologies developed for the exploitation of natural resources. The role of human and animal labor in agricultural activities is examined, emphasizing the methods of soil processing, sowing and planting, as well as the harvest of crops. Additionally, the chapter explores the labor force in these activities, the efficiency of animals, and the use of tools for cultivation in pre-industrial societies.

The third chapter presents the history of Roman aqueducts, from the early use of natural springs to the construction of complex water supply systems. Earlier hydraulic constructions and Roman innovations are examined.

In the fourth chapter, the basic principles and techniques used in the construction of aqueducts are highlighted. These include the identification of sources, the collection and conveyance of water into channels, the topographical instruments and tools, as well as the methods of water filtration and distribution.

The fifth chapter provides a detailed examination of the case of the Uxama Argaela aqueduct. The history of the city, the construction and operation of the northern and eastern aqueducts, as well as the technique of water lifting with the Noria method, are presented. An attempt is made to estimate the efficiency of the Noria system using animals and humans, while the operating cost of the Noria is compared with that of a modern pump.

In the sixth chapter, the study's findings are summarized, presenting the results of the comparisons made in the work, and finally, the contribution of Roman aqueducts to the improvement of quality of life and the development of urban centers is highlighted.

1 Εισαγωγή

Η σημασία του νερού στις προβιομηχανικές κοινωνίες ήταν θεμελιώδης για την επιβίωση και την ανάπτυξη των ανθρώπινων πολιτισμών. Από την αυγή της ανθρώπινης ιστορίας, οι κοινωνίες στηρίζονταν στην πρόσβαση σε καθαρό νερό για τη γεωργία, την υγιεινή και τις καθημερινές τους ανάγκες. Η διαχείριση των υδάτινων πόρων υπήρξε καθοριστικός παράγοντας για την οργάνωση και την εξέλιξη των κοινωνιών, επηρεάζοντας την κοινωνική συνοχή, την οικονομική ανάπτυξη και την πολιτική σταθερότητα.

Στις προβιομηχανικές κοινωνίες, η πρόσβαση στο νερό ήταν ζωτικής σημασίας για την επιβίωση και την ανάπτυξη των κοινωνιών. Τα πηγάδια και οι στέρνες αποτέλεσαν τις πρώτες και πιο διαδεδομένες κατασκευές για τη συλλογή και την αποθήκευση νερού. Οι άνθρωποι ανέπτυξαν τεχνολογίες για να αξιοποιούν στο έπακρο τους φυσικούς πόρους, ενσωματώνοντας τη χρήση ζώων στις γεωργικές τους εργασίες.

Στις προβιομηχανικές κοινωνίες, η βελτιστοποίηση της ανθρώπινης και ζωικής εργασίας ήταν πολύ σημαντική για την εξέλιξη της αγροτικής οικονομίας. Η καθημερινή ζωή και η γεωργική παραγωγή βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό στη σωματική εργασία των ανθρώπων και στη δύναμη των ζώων. Οι κοινότητες ανέπτυξαν διάφορες τεχνολογίες και μεθόδους για την καλλιέργεια της γης, τη σπορά και τη συγκομιδή των καρπών, χρησιμοποιώντας εργαλεία και τεχνικές που αύξαναν την αποδοτικότητα. Η επεξεργασία του εδάφους, η χρήση άροτρων και άλλων εργαλείων, καθώς και η αξιοποίηση των ζώων για τη μεταφορά και την άντληση των πόρων, ήταν κεντρικά στοιχεία της παραγωγικής διαδικασίας.

Καθώς οι κοινωνίες εξελίσσονταν, η ανάγκη για πιο εξελιγμένα και αποδοτικά συστήματα ύδρευσης έγινε επιτακτική. Οι Ρωμαίοι, με την εξαιρετική τους μηχανική και τεχνολογική δεινότητα, κατάφεραν να αναπτύξουν εντυπωσιακά υδραγωγεία που εξασφάλιζαν την παροχή καθαρού νερού στις πόλεις τους. Αυτά τα υδραγωγεία δεν ήταν μόνο τεχνικά θαύματα, αλλά και αναπόσπαστα στοιχεία της ρωμαϊκής καθημερινότητας, συμβάλλοντας στην υγειονομική βελτίωση, την αστική ανάπτυξη και την κοινωνική συνοχή.

Η παρούσα μελέτη ενσωματώνει δύο βασικά θέματα: τη γεωργική εργασία και την ενεργειακή αξιοποίηση στις προβιομηχανικές κοινωνίες και τις προηγμένες υδραυλικές κατασκευές των Ρωμαίων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που συνδυάζει αυτά τα δύο στοιχεία είναι το υδραγωγείο της Uxama, όπου η μέθοδος Noria χρησιμοποιήθηκε για την ανύψωση του νερού σε υψηλότερα υψόμετρα. Σε αυτήν τη διαδικασία, τα ζώα παρείχαν την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία της Noria, αναδεικνύοντας έτσι τη σημασία της ζωικής δύναμης στην τεχνολογία της εποχής.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι η εις βάθος ανάλυση των προβιομηχανικών μεθόδων γεωργίας και ενέργειας, με έμφαση στις διάφορες ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιούνταν εκείνη την

εποχή. Η έρευνα θα επικεντρωθεί στην κατανόηση και τη ανάλυση της γεωργικής εργασίας, αναδεικνύοντας πώς η χρήση ζώων επηρέασε την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα των κοινωνιών.

Επιπλέον, η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο οι Ρωμαίοι σχεδίασαν και κατασκεύασαν τα υδραγωγεία τους, αξιοποιώντας τις γνώσεις τους στη γεωμετρία, τη μηχανική και την υδρολογία. Η εξέλιξη των ρωμαϊκών υδραγωγείων θα μελετηθεί διεξοδικά, με ιδιαίτερη αναφορά στο υδραγωγείο της Uxama, το οποίο αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των τεχνολογικών καινοτομιών της εποχής. Μέσα από την ανάλυση των δομικών στοιχείων, των υλικών και των μεθόδων κατασκευής, θα αποκαλυφθούν οι αρχές και οι πρακτικές που έκαναν τα ρωμαϊκά υδραγωγεία να αντέχουν στο χρόνο και να λειτουργούν αποτελεσματικά.

2 Νερό και Ενέργεια

2.1 Προβιομηχανικές κοινωνίες και νερό

2.1.1 Γενικά

Το νερό αποτελεί το πιο σημαντικό συστατικό για τη δημιουργία, τη διατήρηση και την εξέλιξη της ανθρώπινης ζωής. Από τα προϊστορικά χρόνια, ο άνθρωπος αφιέρωνε μεγάλο μέρος της ημέρας του στο να βρει φαγητό μέσα από το κυνήγι και το ψάρεμα, ενώ προμηθεύονταν νερό από πηγές που ήταν είτε φυσικές είτε τεχνητές. Σύντομα ο άνθρωπος κατάλαβε, ότι αν έσθηνε τις κοινωνίες του κοντά στις πηγές νερού, θα έλυνε όχι μόνο το πρόβλημα της ύδρευσης, αλλά και της σίτισης, αφού θα μπορούσε να καλλιεργήσει και να αναπτύξει την γεωργία.

Αυτά τα καθήκοντα απαιτούσαν μια καλά οργανωμένη κοινωνία, βοηθώντας έτσι στη δημιουργία κρατών, και μαζί με αυτά, πολιτισμών (Hosseiny et al., 2021). Ως φυσικές πηγές ο άνθρωπος αξιοποιούσε λίμνες, ποτάμια και ρυάκια. Εάν λόγω ξηρασίας, τα ρέματα σταματούσαν να ρέουν, οι άνθρωποι θα μετακινούνταν προς τα ανάντη ή θα αναζητούσαν άλλες πηγές νερού. Εάν η ξηρασία επέμενε, μετανάστευαν πιο μακριά αναζητώντας μία πιο πρόσφορη πηγή νερού.

Με τη συγκρότηση των πρώτων ιστορικά πόλεων, οι ανάγκες πρόσβασης σε νερό αυξήθηκαν, αφού η παροχή του νερού ήταν απαραίτητη για το πότισμα των καλλιεργειών, το μαγείρεμα, την καθαριότητα και την υγιεινή. Έτσι, κάθε κοινωνία δημιούργησε μια σχέση με το νερό που διαμορφώθηκε από τους περιβαλλοντικούς πόρους, το κλίμα και τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε πληθυσμιακού κέντρου, έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται ως «πολιτισμοί του νερού». Το νερό δεν είναι μόνο απαραίτητο για ύδρευση - άρδευση αλλά και για την υγιεινή, το εμπόριο, τις μεταφορές, ακόμη και την άμυνα από τους εχθρούς (Vuorinen et al., 2007).

Στους αρχαίους χρόνους οι άνθρωποι ανέπτυξαν την τεχνολογία της ναυσιπλοΐας με άμεσα παρακλάδια την αλιεία, το εμπόριο και την εξερεύνηση. Ωστόσο, η εξέλιξη της κοινωνίας αύξανε την ζήτηση, με αποτέλεσμα οι κοντινές φυσικές πηγές νερού να μην επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών. Κάθε πολιτισμός άρχισε να αναπτύσσει «βέλτιστες πρακτικές» στη χρήση της γης-νερού. Για το σκοπό αυτό, επινοήθηκαν τεχνολογίες συλλογής και αποθήκευσης ύδατος, καθώς υπήρχε πάντα ο κίνδυνος μιας κρίσης, που συνήθως προκαλούνταν από ξηρασίες. Ο πολυμήχανος άνθρωπος έπρεπε να βρει τρόπο να εκμεταλλευτεί πηγές μακρύτερα από τον πολιτισμό του εξαλείφοντας τις αποστάσεις, είτε να αυξήσει τις πηγές δημιουργώντας νέες «τεχνητές».

Συνήθως έβρισκε το υψηλότερο υψόμετρο ενός λόφου, κατασκεύαζε εκεί μία στέρνα-δεξαμενή ώστε να μαζεύεται το βρόχινο νερό και να αποθηκεύεται, ενώ ταυτόχρονα έχτιζε κανάλια, υδραγωγεία και σωλήνες για τη μεταφορά του, αποσυμπιέζοντας έτσι τις κοντινές φυσικές πηγές που είχε στη διάθεσή του (Sterns F. H., 1915).

Η τεχνολογική εξέλιξη, με αιχμή του δόρατος την Βιομηχανική επανάσταση, επηρέασε αργά και σταθερά τη σχέση του ανθρώπου με το νερό. Ο άνθρωπος το αντιμετώπισε με πειθαρχία ανέπτυξε την υδρολογία, ως την επιστήμη της κατανομής του νερού στις κοινωνίες, δημιουργώντας μία σταθερή και αξιόπιστη προσφορά.

Η ριζοσπαστική αντικατάσταση των αρχαϊκών τεχνικών με σύγχρονες και αυτοματοποιημένες, επηρέασε μια σειρά από παραμέτρους άρρηκτα συνδεδεμένες με την εξέλιξη μιας κοινωνίας όπως η υγεία, η επιστήμη, η γεωργία και η κτηνοτροφία, Αυτό ωστόσο δεν συνέβη σε μία νύχτα, ούτε σε ένα χρόνο ούτε ακόμα και σε μία εποχή.

Ο Βρετανός Μαθηματικός Samuel Lilley, καταγράφοντας τις εφευρέσεις και τις εξελίξεις από το 5500 π.Χ. μέχρι τον 20ο αιώνα μ.Χ. κάνει λόγο για 4 εποχές, της Μεσοποταμίας, των λαών της ανατολικής Μεσογείου, την Ελληνορωμαϊκή εποχή και τέλος τη Δυτικοευρωπαϊκή (Price, R., 1971). Αρχίσαμε να κάνουμε χρήση του όρου «βιομηχανική επανάσταση» περίπου τον 19^ο αιώνα μ.Χ. μίας και τότε ξεκινήσαμε να καταγράφουμε τη ραγδαία εξέλιξη των κοινωνιών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό της Μεγάλης Βρετανίας όπου η εφεύρεση της ατμομηχανής στα τέλη του 17ου και στις αρχές του 18ου αιώνα, σηματοδοτεί την έναρξη μίας νέας, αυτοματοποιημένης και πολύ πιο εντυπωσιακής κοινωνίας (Abel E. K., 1979).

Το νερό, ο αέρας και ήλιος άρχισαν να παραχωρούν τη θέση τους ως πηγή ενέργειας που επέλεξαν οι κοινωνίες στο πετρέλαιο, τον άνθρακα και το φυσικό αέριο. Η μαζική παραγωγή και η αυτοματοποίηση, βελτίωσαν σημαντικά το παγκόσμιο εμπόριο βοηθώντας τις κοινωνίες να εξελιχθούν οικονομικά, συγκριτικά με τα τοπικά συστήματα ανταλλαγής της προβιομηχανικής εποχής. Η ανάπτυξη του σιδηροδρόμου και των ατμοκίνητων πλοίων διευκόλυναν τη μεταφορά αγαθών και ανθρώπων αλλά επηρέασαν και την παγκοσμιοποίηση μιας και οι λαοί ερχόντουσαν ολοένα και πιο κοντά (Taylor, G. R., 1951).

Η εισαγωγή μηχανών όπως η κλωστική μηχανή (spinning jenny) και ο μηχανικός αργαλειός αλλάζει ριζικά την κλωστοϋφαντουργία και οδηγεί σε μαζική παραγωγή (Ayres R. U., 1989). Παρατηρείται ότι οι πρώτες διαδικασίες παραγωγής και επεξεργασίας σιδήρου αναπτύχθηκαν στην Εποχή του Σιδήρου (περίπου 1200 π.Χ.), όταν οι άνθρωποι έμαθαν να εξάγουν σίδηρο από μεταλλεύματα χρησιμοποιώντας απλούς καμίνους. Η βελτίωση των υψικαμίνων κατά τη διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης οδήγησε στην παραγωγή περισσότερης και καλύτερης ποιότητας χυτοσιδήρου (Demirag I. & Tylecote A., 1992). Οι πρώτες εργαλειομηχανές που εφευρέθηκαν ήταν ο βιδωτός τόρνος, η μηχανή διάτρησης κυλίνδρων και η φρέζα .

Οι εργαλειομηχανές κατέστησαν δυνατή την οικονομική κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων ακριβείας που συντέλεσαν σημαντικά στην εξέλιξη και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών στις βιομηχανίες (Hounshell, D., 1984).

2.1.2 Πηγάδια και στέρνες

“Αναγνωρίζουμε την αξία του νερού, μόνο όταν το πηγάδι είναι άδειο”

Benjamin Franklin

Εδώ και χιλιάδες χρόνια, οι κοινωνίες σε όλο τον κόσμο έχουν βρει διάφορους τρόπους πρόσβασης στο νερό. Ένας από αυτούς είναι το παραδοσιακό πηγάδι. Τα πηγάδια είναι ένα από τα παλαιότερα συστήματα που είναι γνωστά στην ανθρωπότητα, μιας και χρονολογούνται από τη νεολιθική περίοδο, περίπου το 8500 π.Χ. (Nir Y., 1997).

Η πρώιμη τεχνολογία πηγαδιών έχει βρεθεί στην ανατολική Ασία, την Αφρική (ιδιαίτερα τη Βόρεια Αφρική), καθώς και σε πολλά μέρη στην Ευρώπη. Πηγάδι ονομάζεται μία κατασκευή που βασίζεται σε μία τρύπα που έσκαβε ο άνθρωπος στο έδαφος, μέχρι να βρει νερό σε κάποιον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Νεολιθικά πηγάδια είναι γνωστά από την Ανατολική Μεσόγειο με το παλαιότερο αξιόπιστο χρονολογημένο πηγάδι να είναι από την προ κεραμική νεολιθική εποχή, στην περιοχή της Κισσόνεργα - Μυλουθκιά στην Κύπρο . Περίπου το 8400 π.Χ. ένας κατακόρυφος άξονας κυκλικής διαμέτρου έφτασε μέσω ασβεστόλιθου σε έναν υδροφόρο ορίζοντα σε βάθος 8 m (Peltenburg Edgar, 2012).

Υπάρχουν επίσης στοιχεία για πηγάδια στην Κίνα περίπου το 600 π.Χ. Τα κινεζικά πηγάδια φαίνεται να είναι ελαφρώς πιο προηγμένα από τον υπόλοιπο κόσμο εκείνη τη εποχή. Χρησιμοποίησαν κεραμικά πλακίδια ως πρώιμη μορφή περιβλήματος φρεατίων για να κρατήσουν τη βρωμιά και τα ιζήματα έξω από το νερό, ενώ οι Δυτικές χώρες συχνά κατασκεύαζαν τα πηγάδια τους με ξύλο (Zeng et al., 2023).

Το νερό του πηγαδιού (εικ.2.1.2.1) αντλείται χρησιμοποιώντας δοχεία, όπως κουβάδες που ανυψώνονται μηχανικά, μέσω κάποιας τροχαλίας με σχοινιά. Τα εσωτερικά τοιχώματα αυτού του φρεατίου επενδυόταν σχεδόν πάντα με κάποιο υλικό για σταθερότητα και διατήρηση της ποιότητας του νερού όπως πέτρα, ξύλο και αργότερα κονιάματα.



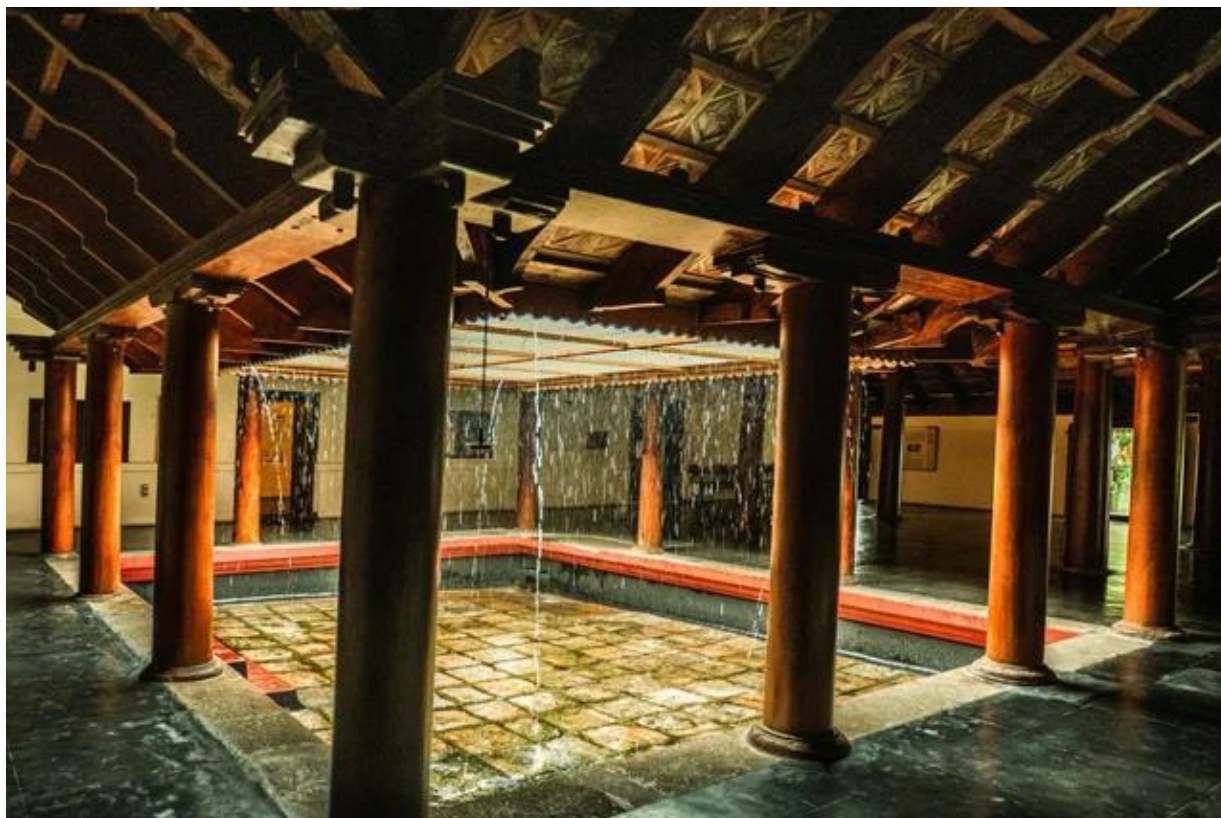
Εικόνα 2.1.2.1: Ένα παλιό πηγάδι που βρίσκεται στην έρημο του Μαρόκου [πηγή:
<https://education.nationalgeographic.org/resource/groundwater/>]

Η ανάγκη για μια σταθερή και αξιόπιστη πηγή νερού ξεκίνησε όταν οι αρχαίοι πρόγονοί μας άρχισαν να εξερευνούν νέες τοποθεσίες προκειμένου να εγκατασταθούν. Τα πρώτα πηγάδια σκάφτηκαν σε περιοχές που οι αρχαιολόγοι θεωρούν ότι είναι αγροτικές περιοχές. Για να καλλιεργήσουν τα χωράφια τους, να μαγειρέψουν και γενικότερα να επιβιώσουν σε ένα μέρος, χρειαζόταν μια κοντινή πηγή νερού. Ένα πλεονέκτημα που είχαν τα πηγάδια είναι ότι ως πηγή, ήταν καλύτερα προστατευμένα και λιγότερο επιρρεπή στη μόλυνση μιας και πολλές φορές προστάτευαν την ποιότητα του νερού με κάποιο καπάκι (ξύλινο ή πέτρινο). Μέχρι το 1808 μ.Χ., τα περισσότερα τεχνητά πηγάδια ήταν σκαμμένα με το χέρι, ενώ σε ορισμένες αγροτικές περιοχές, τα χρησιμοποιούν έως σήμερα ως πηγή πόσιμου νερού (Ozis et al., 2020).

Κατά τον Μεσαίωνα, όπου τα πηγάδια δεν μπορούσαν να σκαφτούν, είτε λόγω βάθους είτε λόγω σκληρού πετρώματος, άρχισαν να κατασκευάζονται στέρνες σε κάστρα λόφων ανά την Ευρώπη. Η στέρνες είναι κατά βάση σκαμμένες δεξαμενές στο έδαφος που σκοπό έχουν τη συλλογή και αποθήκευση βρόχινου νερού. Τα τοιχώματα αυτής της δεξαμενής ήταν συνήθως επενδυμένα με πέτρες, γύψο ή κάποιου είδους κονιάματος, προκειμένου να αποφευχθούν οι διαρροές αλλά και να διασφαλίζεται η καθαρότητα του νερού (Katzenstein et al., 1992).

Οι στέρνες αποτελούσαν αποτελεσματική λύση σε περιοχές άνυδρες ή σε περιοχές όπου έχει εξαντληθεί ο υδροφόρος ορίζοντας λόγω μεγάλης χρήσης. Έχουν βρεθεί στέρνες ακόμα και στις οροφές σπιτιών, αλλά η συνηθισμένη θέση τους ήταν στο έδαφος, σε υψόμετρο ψηλότερο από τις κατοικίες.

Αργότερα εμφανίστηκε το αρχαίο ρωμαϊκό impluvium, ένα τυπικό χαρακτηριστικό του σπιτιού domus (αρχοντικό) όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.2.2. Αριστοκράτες και πλούσιοι άρχοντες της εποχής είχαν την πολυτέλεια να έχουν στο υπόγειο τους, ιδιωτικές στέρνες, συλλέγοντας το νερό της βροχής μέσω φρεατίου, αφού η οροφή του σπιτιού είχε μία τρύπα ώστε το νερό να καταλήγει εκεί (Gagarin, Michael, 2009).



Εικόνα 2.1.2.2: Αρχαίο ρωμαϊκό impluvium [πηγή:

https://www.reddit.com/r/Kerala/comments/113dt0k/the_roman_impluvium_could_it_have_been_influenced/]

2.1.3 Αξιοποίηση των φυσικών πόρων

Μπορούμε να αντιληφθούμε τη ζωτική σημασία εκμετάλλευσης ενεργειακών πηγών από τον άνθρωπο, προκειμένου να αντλήσει ενέργεια και να λειτουργεί εξελικτικά η κοινωνία του. Αύτη η σχέση αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ενέργειας δεν έχει αλλάξει μέσα τους αιώνες και με τη ζήτηση για ενέργεια να αυξάνεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες, έχουμε βρεθεί ως κάτοικοι αυτού του πλανήτη αντιμέτωποι με το φαινόμενο της εξάντλησης των φυσικών μας πόρων (Steffen et al., 2015).

Οι πηγές που μας προμηθεύουν με ενέργεια, χωρίζονται σε ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εξαντλούνται και η προσφορά τους στον άνθρωπο από το περιβάλλον είναι ατέρμονη, με τις πιο σημαντικές την αιολική ενέργεια και την ηλιακή ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανήκουν το πετρέλαιο, ο γαιάνθρακας, το φυσικό αέριο, με την προσφορά τους στον άνθρωπο να είναι πεπερασμένη και η εξάντλησή των αποθεμάτων να πλησιάζει (Bunsen et al., 2021).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ οι μη ανανεώσιμες πηγές, αν και συχνά πιο αποδοτικές βραχυπρόθεσμα, έχουν σημαντικό αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος έπρεπε να λύσει το πρόβλημα της μετουσίωσης των φυσικών πόρων σε ενέργεια. Ο Ήρωας της Αλεξάνδρειας (Ηρώνας) στη Ρωμαϊκή Αίγυπτο του πρώτου αιώνα, περιέγραψε ένα σύστημα με έναν τροχό που με τη βοήθεια του ανέμου είναι ικανός να τροφοδοτήσει με ενέργεια μια κατασκευή (Rowlandson, J., 2013).

Οι πρώτοι που αξιοποίησαν την αιολική ενέργεια φαίνεται να είναι οι Πέρσες στο 700–900 μ.Χ., μιας και στην κοιλάδα της Μεσοποταμίας έχει βρεθεί ένα από τα πρώτα καταγεγραμμένα σχέδια ανεμόμυλων, το ranemone. Στην εικόνα 2.1.3.1 απεικονίζεται μία κατασκευή με κάθετα ελαφριά ξύλινα πανιά που συνδέονται με οριζόντιες αντηρίδες σε έναν κεντρικό κατακόρυφο άξονα. Καθώς φυσούσε ο άνεμος, τα πανιά γύριζαν τον άξονα, ο οποίος με τη σειρά του ήταν συνδεδεμένος με μύλους σιτηρών ή κάποια μορφή κατασκευής μεταφοράς νερού (Eldridge, F. R., 1975).

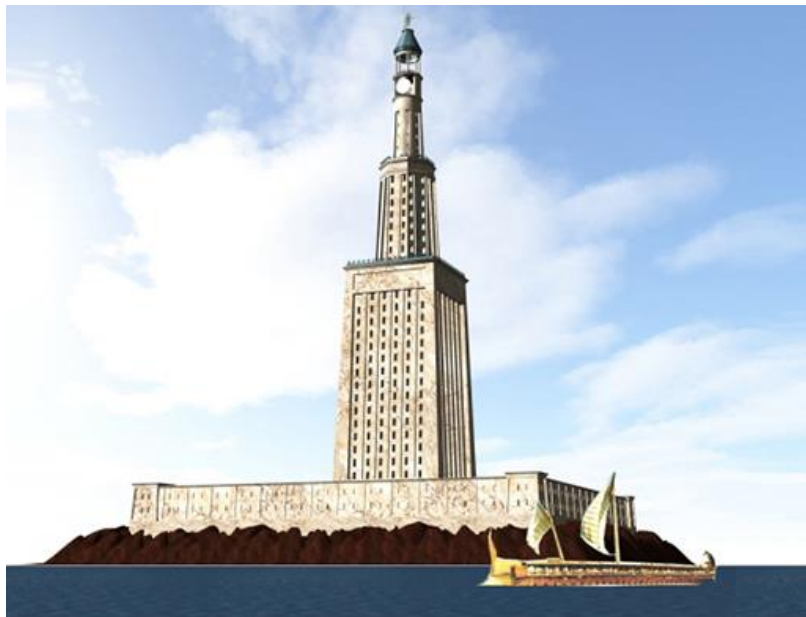
Ο Έλληνας φιλόσοφος Σωκράτης αναφέρει ότι με σωστό σχεδιασμό των κατοικιών, με μεγάλα νότια παράθυρα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση, ενώ αγρότες διαμόρφωναν τις καλλιέργειές τους με τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η έκθεσή τους στον ήλιο (Perlin, J., 2022). Χρησιμοποιούσαν υλικά όπως το μάρμαρο και η πέτρα τα οποία είχαν την ικανότητα να απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας και να την απελευθερώνουν μόλις πέσει η νύχτα διατηρώντας έτσι μία σταθερή θερμοκρασία στο εσωτερικό της κατοικίας.

Τα πολύ ανθεκτικά αυτά υλικά, υπήρχαν σε αφθονία τότε στη φύση και μέσω πολυάριθμων λατομείων γινόταν η περισυλλογή τους. Με αυτόν τον τρόπο πετύχαιναν μία παθητική ηλιακή θέρμανση.



Εικόνα 2.1.3.1: Περσικός ανεμόμυλος Panemone [πηγή: https://www.prohistoire.fr/1458642_les-panemones-de-la-perse-antique-sont-toujours-dans-le-vent]

Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι, στην Αλεξάνδρεια χρησιμοποίησαν έναν ηλιακό φάρο (εικ.2.1.3.2) για να αντανακλούν το φως του ήλιου μέσω καθρεπτών και να καθοδηγούν τα πλοία (Clayton, Peter A., 2013). Αυτός ο πύργος συνολικού ύψους 140 m, κατασκευάστηκε τον 3^ο αιώνα π.Χ. από τον Μικρασιάτη αρχιτέκτονα Σώστρατο τον Κνίδιο αποτελώντας ένα από τα 7 θαύματα του κόσμου, ενώ καταστράφηκε τον 14^ο αιώνα έπειτα από 2 σεισμούς.

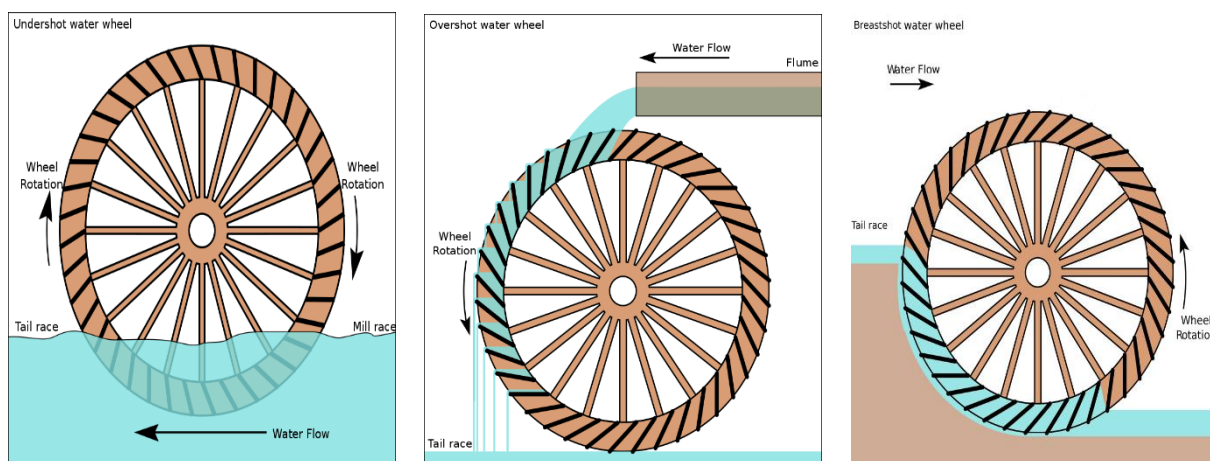


Εικόνα 2.1.3.2: Ηλιακός φάρος Αλεξάνδρειας [πηγή: <https://www.michanikos.gr/>]

Οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι, αξιοποιώντας την ενέργεια του νερού, χρησιμοποιούσαν τους νερόμυλους για να αντλήσουν νερό από τις πηγές τους, προκειμένου να είναι σε θέση να επεξεργαστούν και να παράγουν πολλά υλικά αγαθά όπως αλεύρι, ξυλεία, χαρτί και υφάσματα (Parsons, A. W., 1936). Υπήρχαν δύο τύποι νερόμυλων ανάλογα με το πώς περιστρέφονταν ο τροχός, οριζόντια ή κάθετα. Ο κάθετος, αποτελείται από έναν κατακόρυφο τροχό μέσω ενός μηχανισμού γραναζιών και ο οριζόντιος είναι εξοπλισμένος με έναν οριζόντιο τροχό (εικ.2.1.3.3.)



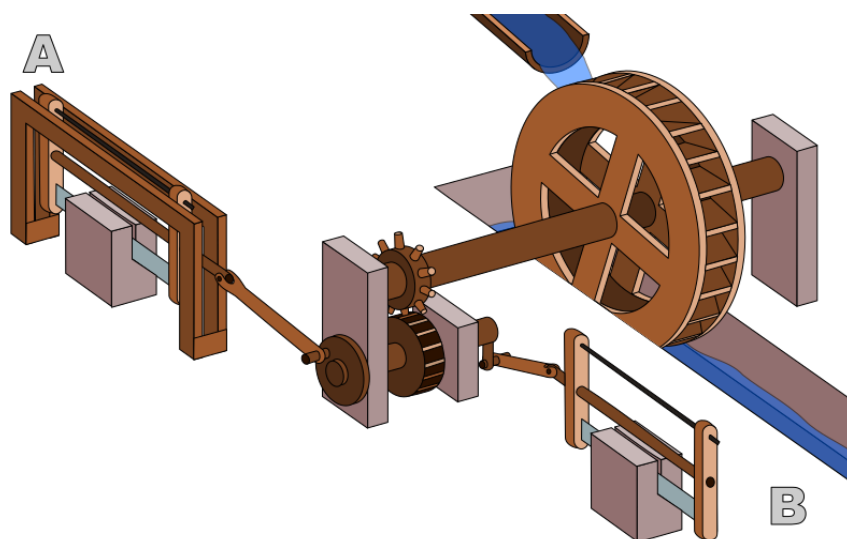
Εικόνα 2.1.3.3: Υδρόμυλος του Braine-le-Château [πηγή: <https://de.wikipedia.org/>]



Εικόνα 2.1.3.4: Βασικοί τρόποι περιστροφής του τροχού [πηγή: <https://de.wikipedia.org/>]

Στην εικόνα 2.1.3.4, φαίνονται οι βασικοί τρόποι περιστροφής του νερού, ανάλογα με το πως εισέρχονταν το νερό στο σύστημα, δίνοντας ενέργεια για κίνηση.

Μία άλλη πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση αξιοποίησης του νερόμυλου είναι μία κατασκευή που λειτουργούσε ως πριονιστήριο στην Ιεράπολη της Μικράς Ασίας (εικ.2.1.3.5) και χρονολογείται τον 3^ο αιώνα μ. Χ. Εκμεταλλευόμενοι την ροή του νερού, έδιναν ενέργεια σε έναν τροχό ο οποίος με τη σειρά του κινούσε έναν στρόφαλο με σκοπό να ταλαντώνει μηχανικά οριζόντιες λεπίδες. Περισσότερα παρόμοια υδροκίνητα συστήματα, που τροφοδοτούνται επίσης από μηχανισμούς με στρόφαλο και μπιέλα, βρέθηκαν στην Έφεσο, με εκτιμήσεις να κάνουν λόγο για περίοδο κατασκευής τον 6^ο αιώνα μ. Χ. (Ritti, T. et al., 2007).



Εικόνα 2.1.3.5: Υδρομυλος - πριονιστήριο [πηγή: <https://de.wikipedia.org/>]

Η μέση απόδοση των υδροκίνητων τροχών μέχρι τον 18ο αιώνα ήταν περίπου 4 kW ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι του 18ου αιώνα είχαν μέση ισχύ λίγο λιγότερο από 5 kW (Smil, V. 2004). Η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε σημαντικά με την εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και των υδρογονανθράκων.

Το 1900 μ.Χ., η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο ήταν 14 gigajoules (GJ). Αυτό περιλαμβάνει την ενέργεια που χρησιμοποιούνταν για θέρμανση, φωτισμό, βιομηχανία, μεταφορές κ.λπ. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.1, μέχρι το 2000, η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο είχε αυξηθεί σε 60 GJ. Αυτή η αύξηση αντικατοπτρίζει την εκτεταμένη χρήση πιο αποδοτικών και πλούσιων πηγών ενέργειας, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και η ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, χάρις την τεχνολογική πρόοδο, την βιομηχανική ανάπτυξη, την αυξημένη χρήση μηχανών και την ευρύτερη πρόσβαση σε ενεργειακές πηγές οι κοινωνίες ευημέρησαν και εξελίχθηκαν (Smil, V., 2004).

Το 1 gigajoule (GJ) ισοδυναμεί με 277,78 kWh, άρα τα 60 GJ ισοδυναμούν με:

$$\text{Ενέργεια ανθρώπου σε kWh} = 60 \text{ GJ} \times 277,78 \text{ kWh} = 16.668,8 \text{ kWh} \quad (1)$$

Για να μπορέσουμε να αντιληφθούμε το μέγεθος της ενέργειας που χρειάζεται ένας άνθρωπος, ο Smill, μετατρέπει τις kWh σε λίτρα βενζίνης. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι το 1 gigajoule (GJ) ισοδυναμεί με περίπου 26,8 L βενζίνης (Smil, V. 2004).

$$\text{Ενέργεια σύγχρονου ανθρώπου σε L βενζίνης} = 60 \text{ GJ} \times 26,8 \text{ L} = 1.608 \text{ L βενζίνης} \quad (2)$$

Ένα αυτοκίνητο που καταναλώνει 8 L/100 km και μπορεί να διανύσει περίπου 20.100 km με αυτή την ποσότητα βενζίνης.

Πίνακας 2.1: Σύνοψη ιστορικής κατανάλωσης ενέργειας

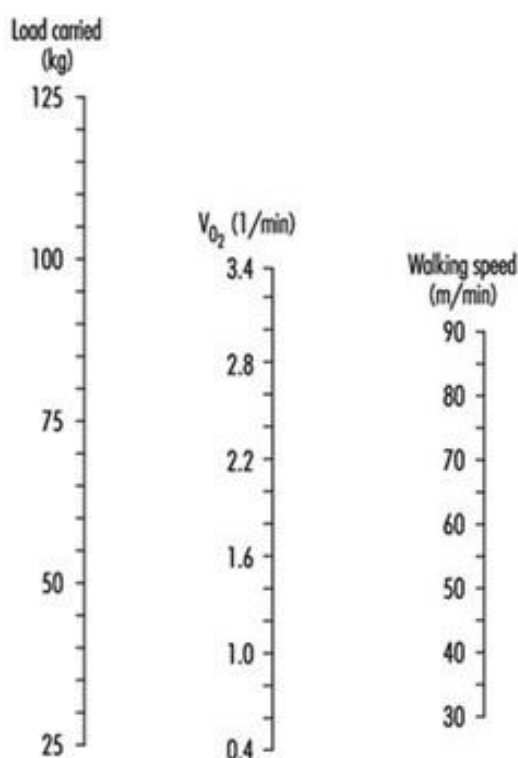
Χρονική Περίοδος	Κατανάλωση Ενέργειας (GJ/άτομο)	Κυρίαρχη Πηγή Ενέργειας	Προσφορά ενέργειας από πηγή(W)	Πηγή ενέργειας
Προϊστορία	< 1	Ανθρώπινη Ενέργεια	50 - 90	Χρήση μυϊκής δύναμης και φωτιάς για μαγείρεμα
Πρώιμη Γεωργία	1 εως 5	Ζώα	200-500	Εξημέρωση ζώων, χρήση για όργωμα και μεταφορές
Μεσαίωνας	5 εως 10	Υδροκίνητοι Τροχοί	500 - 700	Χρήση υδροκίνητων τροχών, ανεμόμυλων, βελτίωση αποδοτικότητας ζώων
Βιομηχανική Επανάσταση	20 εως 50	Άνθρακας και Ατμομηχανές	700-1000	Εισαγωγή ατμομηχανών, αύξηση παραγωγικότητας
20ός Αιώνας	60 εως 100	Πετρέλαιο και Ηλεκτρική Ενέργεια	-	Χρήση ηλεκτρισμού, αύξηση βιομηχανικής παραγωγής
21ος Αιώνας	>100	Υδρογονάνθρακες και Ανανεώσιμες Πηγές	-	Ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση χρήσης άνθρακα

2.2 Άνθρωπος και καλλιέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες

2.2.1 Γενικά στοιχεία ανθρώπινης εργασίας

Σε αγροτικές περιοχές, οι άνθρωποι μεταφέρουν φορτία βάρους έως 100 kg για μεγάλες αποστάσεις καθημερινά (Nag P. K. et al., 1980). Σε ορισμένες χώρες, γυναίκες και παιδιά χρειάζεται να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες νερού από μακριά προκειμένου να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους για νερό. Αυτές οι επίπονες εργασίες έπρεπε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο για να βελτιωθεί η ποιότητα ζωής του ανθρώπου.

Διάφορες μέθοδοι μεταφοράς νερού περιλαμβάνουν τη μεταφορά στο κεφάλι, στο ισχίο, στην πλάτη και στον ώμο. Αυτές οι μέθοδοι, επιβάρυναν αρκετά την ανθρώπινη υγεία καθώς έχουν συνδεθεί με διάφορες επιπτώσεις και τραυματισμούς στο σώμα και πιο συγκεκριμένα στη σπονδυλική στήλη (Dufaut, 1988). Η βέλτιστη ποσότητα φορτίου που μπορούν να μεταφέρει ένας άνδρας, μπορεί να προσδιοριστεί από το γράφημα που φαίνεται στην εικόνα 2.2.1.1. Το γράφημα βασίζεται σε μια πολλαπλή παλινδρόμηση μεταξύ της ζήτησης για οξυγόνο (ανεξάρτητη μεταβλητή), του μεταφερόμενου φορτίου και της ταχύτητας βόδισης (εξαρτημένες μεταβλητές). Μπορεί κανείς να βάλει ένα χάρακα στο γράφημα και να προσδιορίσει το αποτέλεσμα. Πρέπει να είναι γνωστές δύο μεταβλητές για να βρεθεί η Τρίτη (Nag P. K. et al., 1980).



Εικόνα 2.2.1.1: Γράφημα απεικόνισης της μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας εργατών (Nag P. K. et al., 1980).

Για παράδειγμα, με ζήτηση οξυγόνου 1,2 L/min (περίπου 50% της μέγιστης ικανότητας εργασίας) και ταχύτητα βάδισης 45 m/min, το βέλτιστο φορτίο θα ήταν περίπου 43 kg.

Οι περισσότερες γεωργικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν χειροκίνητες εργασίες χειρισμού υλικών όπως ανύψωση, κατέβασμα, τράβηγμα, ώθηση και μεταφορά βαρειών φορτίων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μυοσκελετικές καταπονήσεις, πτώσεις και τραυματισμούς στη σπονδυλική στήλη. Ο ρυθμός τραυματισμού από πτώση αυξάνεται δραματικά όταν το ύψος της πτώσης υπερβαίνει τα 2 m. Οι δυνάμεις πρόσκρουσης μειώνονται σημαντικά εάν το θύμα πέσει σε μαλακό έδαφος, σανό ή άμμο.

Λόγω της ποικιλίας των γεωργικών δραστηριοτήτων, κάποια οργανωτικά μέτρα για τον επανασχεδιασμό εργαλείων, όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση προφυλακτών σε μηχανήματα, έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της ανθρώπινης έκθεσης σε δυσμενές περιβάλλον εργασίας, βελτιώνοντας σημαντικά τις συνθήκες για τους αγροτικούς πληθυσμούς (Christiani, 1990).

Η εκτεταμένη εργονομική έρευνα στις μεθόδους, τις πρακτικές, τα εργαλεία και τον εξοπλισμό των αγροτικών εκμεταλλεύσεων μπορεί να προσφέρει σημαντικές γνώσεις για τη βελτίωση της υγείας, της ασφάλειας και της παραγωγικότητας δεκάτομμυριών αγροτών. Ως η μεγαλύτερη βιομηχανία στον κόσμο, η παραδοσιακή εικόνα του αγροτικού τομέα, ιδιαίτερα στη φτώχη σε πόρους τροπική γεωργία, θα μπορούσε να μετασχηματιστεί σε έναν τομέα προσανατολισμένο στην εργασία. Έτσι, οι εργαζόμενοι στην ύπαιθρο μπορούν να λάβουν συστηματική εκπαίδευση για τους κινδύνους των εργασιακών θέσεων και να αναπτυχθούν ασφαλείς επιχειρησιακές διαδικασίες.

2.2.2 Επεξεργασία εδάφους

Η προετοιμασία του εδάφους ήταν ζωτικής σημασίας για την επιτυχή φύτευση και ανάπτυξη των καλλιεργειών. Ένα κατάλληλο σπορείο πρέπει να είναι μαλακό, συμπαγές και απαλλαγμένο από βλάστηση που θα μπορούσε να παρεμποδίσει τη σπορά. Η προετοιμασία του χωραφιού, περιλαμβάνει τη χρήση διαφορετικών τύπων χειροκίνητων εργαλείων όπως φτυάρια που χρησιμοποιούνται για το σκάψιμο και το χαλάρωμα του εδάφους ή τσάπες που είναι ιδανικές για την αφαίρεση ζιζανίων αλλά και τη διαμόρφωση του εδάφους.

Επίσης ρηχά καλλιεργητικά άροτρα χρησιμοποιούνταν από τον άνθρωπο για το όργωμα και την επεξεργασία του εδάφους. Περίπου 0,4 εκτάρια (ha)¹ γης μπορούν να οργωθούν από άροτρο που τραβιέται από ένα ζευγάρι βοδιών σε μια ημέρα, το οποίο υπολογίζεται να έχει ιπποδύναμη ίση με 1 ίππο (hp) (Nag P. K. et al., 1980).

¹ Ένα εκτάριο είναι ίσο με 10.000 τετραγωνικά μέτρα.



Εικόνα 2.2.2.1: Άροτρο με δύο άλογα (<https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/ploughs/>)

Σύμφωνα με την εικόνα 2.2.2.1, κατά τη χρήση εργαλείων που έλκονται από ζώα, ο εργάτης λειτουργεί ως χειριστής των ζώων και κατευθύνει το εργαλείο από μια λαβή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο χειριστής περπατάει πίσω από το εργαλείο ή κάθετα πάνω στον εξοπλισμό (π.χ. δισκοσβάρνες και άροτρα).

Η λειτουργία των εργαλείων που έλκονται από ζώα απαιτεί σημαντική ανθρώπινη ενεργειακή δαπάνη. Για ένα άροτρο με υνί πλάτους 15 cm, ένα άτομο μπορεί να περπατήσει περίπου 67 km για να καλύψει μια περιοχή 1 ha. Με ταχύτητα περπατήματος 1,5 km/h, η ανθρώπινη ενεργειακή δαπάνη ανέρχεται σε 21 kJ/min (περίπου 5.6×10^4 kJ / ha) (Nag P. K. et al., 1980).

Μια λαβή σε εργαλεία που είναι πολύ μακριά ή πολύ κοντή, προκαλεί σωματική δυσφορία. Ο Gite (1991) πρότεινε ότι το βέλτιστο ύψος της λαβής ενός εργαλείου μπορεί να οριστεί μεταξύ 64 και 84 cm (1,0 έως 1,2 φορές το ύψος του μετακαρπίου III του χειριστή).

Για να μειωθεί η κόπωση στη δουλειά με φτυάρι (εικ.2.2.2.2), ο Freivalds (1984) υπολόγισε τον βέλτιστο ρυθμό εργασίας (δηλαδή ρυθμός φτυαρίσματος) από 18 έως 21 φτυαριές / min. Υπολόγισε ότι το φορτίο του φτυαριού έπρεπε να είναι 5 έως 7 kg για να έχει ρυθμό φτυαρίσματος 15 έως 20 φτυαριές / min και 8 kg για 6 έως 8 φτυαριές / min.

Τέλος, υπολόγισε τη βέλτιστη απόσταση ρίψης στα 1,2 m (σε μήκος) και το ιδανικό ύψος ρίψης από 1 έως 1,3 m. Οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν επίσης γωνία ανύψωσης φτυαριού περίπου 32°, μακριά λαβή εργαλείου, μεγάλη τετράγωνη λεπίδα για φτυαρίσμα και στρογγυλή λεπίδα για σκάψιμο, προκειμένου να μειωθεί το βάρος του φτυαριού.



Εικόνα 2.2.2.2: Εργάτες να τσαπίζουν και φτυαρίζουν ένα χωράφι (Nag P. K. et al., 1980).

Το βάρος της τσάπας πρέπει να είναι 2 kg. Η γωνία μεταξύ της λεπίδας και της λαβής πρέπει να κυμαίνεται από 65° έως 70°. Το μήκος της λαβής συνιστάται να είναι 70 έως 75 cm, ενώ το μήκος της λεπίδας πρέπει να είναι 25 έως 30 cm. Το πλάτος της λεπίδας πρέπει να κυμαίνεται από 22 έως 24 cm και η διάμετρος της λαβής από 3 έως 4 cm. Το σχήμα της λεπίδας είναι ορθογώνιο, τραπεζοειδές, τριγωνικό ή κυκλικό μιας και εξαρτάται από τον σκοπό και τις προτιμήσεις των τοπικών χρηστών (Gite L. P., 1991).

2.2.3 Σπορά και φύτευση

Η χειροκίνητη σπορά ενός χωραφιού είναι μια παραδοσιακή γεωργική εργασία που περιλαμβάνει διάφορα στάδια και απαιτεί σημαντική ανθρώπινη προσπάθεια. Το πρώτο βήμα που είναι η προετοιμασία του σπορείου με τη διάνοιξη αυλακιών μέσω άροτρων και φτυαριών, αποτελεί εφαλτήριο για την σωστή καλλιέργεια του εδάφους .

Περίπου το 8% του συνολικού χρόνου εργασίας απαιτείται για τη διασπορά σπόρων, το ξερίζωμα και τη μεταφύτευση δενδρυλλίων. Κατά τη χειροκίνητη διασπορά σπόρων ή λιπασμάτων, γίνεται χρήση εξαρτημάτων που ονομάζονται διασκορπιστές και επιτρέπουν ομοιόμορφη κατανομή με ελάχιστη κόπωση. Κατά τη γεώτρηση, οι σπόροι τοποθετούνται στο έδαφος με γεωτρύπανο ή με σποροτρύπανο λιπασμάτων. Η δύναμη ώθησης/έλξης που απαιτείται από έναν εργαζόμενο για να χειριστεί το γεωτρύπανο (χειροκίνητο ή ζωοκίνητο με μονάδες σε τροχούς) ποικίλει ανάλογα τον τύπο εδάφους.

Η μέθοδος που αφορά την τοποθέτηση των σπόρων με το χέρι, γίνεται με σποροτρύπανο (dibble) (εικ.2.2.3.1), σε αποστάσεις 15 x 15 cm ή 25 x 25 cm. Οι τριβές στα δάχτυλα και η σωματική ενόχληση λόγω των λυγισμένων και καθιστών στάσεων είναι συχνά παράπονα. Κατά τη φύτευση, τα κομμάτια ζαχαροκάλαμου φυτεύονται σε αυλάκι μήκους 30 cm. Οι κόνδυλοι πατάτας φυτεύονται επίπεδα και δημιουργούνται αναχώματα.



Εικόνα 2.2.3.1: Dibbler [πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Dibber>]

Για τη χειροκίνητη μεταφύτευση, οι εργάτες πρέπει να βυθίζονται μέχρι τα γόνατα στη λάσπη. Η καθιστή στάση που χρησιμοποιείται για φύτευση σε ξηρά εδάφη, με ένα ή δύο πόδια λυγισμένα στο γόνατο, δεν μπορεί να υιοθετηθεί σε πλημμυρισμένο χωράφι. Περίπου 85 ανθρωπόωρες απαιτούνται για τη μεταφύτευση σπορόφυτων ανά εκτάριο γης. Η άβολη στάση και το στατικό φορτίο επιβαρύνουν το καρδιαγγειακό σύστημα και προκαλούν πόνο στη μέση (Nag P. K. et al., 1980).

Τα ανεπιθύμητα φυτά και τα ζιζάνια προκαλούν απώλειες μειώνοντας τις αποδόσεις και την ποιότητα των καλλιεργειών, φιλοξενώντας παράσιτα και αυξάνοντας το κόστος άρδευσης. Η μείωση της απόδοσης μπορεί να κυμαίνεται από 10% έως 60%, ανάλογα με την πυκνότητα και το είδος των ζιζανίων. Περίπου το 15% της ανθρώπινης εργασίας δαπανάται για την αφαίρεση των ζιζανίων κατά την καλλιεργητική περίοδο. Οι γυναίκες, συνήθως αποτελούν μεγάλο μέρος του εργατικού δυναμικού που ασχολείται με το ξεβοτάνισμα. Σε μια τυπική περίπτωση, ένας εργάτης ξοδεύει περίπου 190 έως 220 ώρες για να ξεβοτανίσει ένα εκτάριο γης με το χέρι. Τα φτυάρια χρησιμοποιούνται επίσης για το ξεβοτάνισμα και τη διακαλλιέργεια.

Από τις διάφορες μεθόδους (π.χ., μηχανικές, χημικές, βιολογικές, πολιτισμικές), το μηχανικό ξεβοτάνισμα, είτε με το τράβηγμα των ζιζανίων με το χέρι είτε με τη χρήση χειροκίνητων εργαλείων όπως η τσάπα και τα απλά βοτανιστήρια, είναι χρήσιμο τόσο σε ξηρά, όσο και σε υγρά εδάφη (Nag P. K. et al., 1980).

Σε ξηρά εδάφη, οι εργάτες κάθονται οκλαδόν με το ένα ή και τα δύο πόδια λυγισμένα και αφαιρούν τα ζιζάνια χρησιμοποιώντας δρεπάνι ή χειροκίνητη τσάπα. Σε ποτισμένα χωράφια, οι εργάτες σκύβουν προς τα εμπρός για να αφαιρέσουν τα ζιζάνια χειροκίνητα ή με τη βοήθεια βοτανιστηρίων. Το βοτανιστήρι (εικ.2.2.3.2) αποτελείται από έναν ή δύο τροχούς, μια λεπίδα, ένα πλαίσιο και μια λαβή. Απαιτείται δύναμη (ώθηση ή έλξη) περίπου 5 έως 20 kg δύναμης, με συχνότητα περίπου 20 έως 40 κρούσεων ανά λεπτό. Ωστόσο, η καταπόνηση είναι σχετικά μικρότερη στην περίπτωση των βοτανιστηρίων τύπου δρεπανιού με τροχό, με τα οποία χρειάζονται περίπου 110 έως 140 ανθρωποώρες για να καλυφθεί ένα εκτάριο.



Εικόνα 2.2.3.2: Ζιζανιοκόπτης [πηγή: <https://smania.store/gr/proion/>]

2.2.4 Συγκομιδή καρπών

Στις καλλιέργειες ρυζιού και σιταριού, η συγκομιδή απαιτεί από 8 έως 10% των συνολικών ανθρωποωρών που χρησιμοποιούνται στη φυτική παραγωγή. Παρά την ταχεία μηχανοποίηση στη συγκομιδή, η μεγάλης κλίμακας εξάρτηση από χειρωνακτικές μεθόδους θα συνεχιστεί για τα επόμενα χρόνια. Τα εργαλεία χειρός χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στη χειροκίνητη συγκομιδή, με το δρεπάνι (εικ.2.2.4.1) να είναι το δημοφιλέστερο, απαιτώντας ωστόσο την περισσότερη ενέργεια.



Εικόνα 2.2.4.1: Εργάτης να θερίζει σιτάρι με το δρεπάνι [πηγή:
<https://www.archaiologia.gr/blog/photo/75230-2/>]

Η δημοτικότητα του δρεπανιού οφείλεται στην απλότητά της κατασκευής και λειτουργίας του. Το δρεπάνι αποτελείται από μια κυρτή λεπίδα, με λεία ή οδοντωτή άκρη, στερεωμένη σε ξύλινη λαβή. Ο σχεδιασμός του, ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και υπάρχει διαφορά στο καρδιοαναπνευστικό φορτίο ανάλογα τους διαφορετικούς τύπους δρεπανιών.

Η απόδοση κυμαίνεται από 110 έως 165 m² / h, τιμές που αντιστοιχούν σε 90 και 60 ανθρωπόωρες ανά εκτάριο γης. Οι άβολες στάσεις εργασίας μπορεί να οδηγήσουν σε μακροχρόνιες κλινικές επιπλοκές που σχετίζονται με την πλάτη και τις αρθρώσεις των άκρων. Η συγκομιδή σε λυγισμένη στάση έχει το πλεονέκτημα της κινητικότητας και της ευελιξίας, τόσο σε ξηρό όσο και σε υγρό έδαφος και είναι περίπου 16% ταχύτερη από την όρθια στάση. Ωστόσο, μια λυγισμένη στάση είναι 18% πιο απαιτητική σε ενέργεια από την καθιστή ή γονατιστή στάση (Nag P. K. et al., 1980).

Τα ατυχήματα συγκομιδής, οι πληγές και τα κοψίματα, είναι πολύ συχνά σε εργάτες, και πιο συγκεκριμένα σε χωράφια ορυζώνων, σίτου και ζαχαροκάλαμου. Τα εργαλεία χειρός έχουν σχεδιαστεί κυρίως για δεξιόχειρες, αλλά συχνά χρησιμοποιούνται και από αριστερόχειρες χρήστες, οι οποίοι δεν γνωρίζουν τις πιθανές επιπτώσεις στην ασφάλεια αλλά και στην υγεία τους.



Εικόνα 2.2.4.2: Δρεπάνι [πηγή:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CF%81%CE%B5%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9\]](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CF%81%CE%B5%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9)

Οι σημαντικοί παράγοντες σε ένα σχέδιο δρεπανιού είναι η γεωμετρία της λεπίδας, η οδόντωσή της, το σχήμα και το μέγεθος της λαβής. Με βάση μια μελέτη εργονομίας, οι προτεινόμενες διαστάσεις σχεδιασμού ενός δρεπανιού είναι το βάρος του στα 200 g, το συνολικό μήκος στα 33 cm με το μήκος της λαβής να φτάνει τα 11 cm. Η λαβή πρέπει να έχει διάμετρο 3 cm, ακτίνα καμπυλότητας λεπίδας στα 15 cm, με κοιλότητα λεπίδας στα 5 cm.

Το οδοντωτό δρεπάνι (εικ.2.2.4.2), πρέπει να έχει βήμα δοντιού 0,2 cm, ενώ πρέπει τα δόντια να είναι τοποθετημένα πάνω στη λεπίδα υπό γωνία 60°. Δεδομένου ότι οι εργαζόμενοι εκτελούν δραστηριότητες κάτω από ακραίες κλιματικές συνθήκες, τα θέματα υγείας και ασφάλειας είναι εξαιρετικά σημαντικά στην γεωργία. Το καρδιοαναπνευστικό σύστημα των εργατών, συσσωρεύει πολλές ώρες εργασίας, κάτω από ακραίες κλιματικές συνθήκες, επιβαρύνοντας την υγεία τους και μειώνοντας την ικανότητα εργασίας.

2.3 Καλλιέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες

2.3.1 Ισχύς στις εργασίες

Αν και τα βοοειδή φαίνεται να χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 3200 π.Χ., από τους Σουμέριους για μεταφορά, όργωμα και αλώνισμα χωραφιών, μόλις τον 18ο αιώνα μετρήθηκε η δύναμη που παρήγαγαν τα ζώα ενώ έκαναν δουλειά (Zeuner, 1963).

Η μονάδα μέτρησης ονομάστηκε ιπποδύναμη από τον James Watt, εφευρέτη της πρώτης πρακτικής ατμομηχανής. Για να διαθέσει την ατμομηχανή του στην αγορά, ο Watt χρειαζόταν να καθορίσει τον αριθμό των αλόγων που θα μπορούσε να αντικαταστήσει η ατμομηχανή του. Η ποσότητα ισχύος προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας άλογα για να τραβήξουν ένα σχοινί που περνούσε πάνω από μια τροχαλία που ήταν συνδεδεμένη με ένα βάρος στον πυθμένα ενός βαθιού πηγαδιού. Ένα άλογο μπορούσε εύκολα να σηκώσει βάρος 45 kg ενώ περπατούσε με ταχύτητα 4 km/h. Έτσι, καθορίστηκε η ιπποδύναμη, με 1 hp να ισοδυναμεί με 33.000 ft lb/min ή 4516.8 kg m/ min² (Goe M. R. et al., 1980).

Η ιπποδύναμη, ο ρυθμός δηλαδή με τον οποίο εκτελείται μια εργασία, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας δύο συνιστώσες, το έργο (δύναμη x απόσταση) και το χρόνο. Η ποσότητα ίπων που απαιτείται για την εκτέλεση της εργασίας εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο εκτελείται.

Ένας πιο ακριβής όρος για να κατανοήσουμε την ποσότητα ιπποδύναμης³ που απαιτείται για το τράβηγμα ενός εργαλείου, π.χ. άροτρο, καρότσι ή μύλος, είναι η ελκτική ιπποδύναμη. Η ελκτική ιπποδύναμη μπορεί να υπολογιστεί καταγράφοντας την ταχύτητα διαδρομής (απόσταση x χρόνο) και προσδιορίζοντας την αντίσταση του φορτίου (βύθισμα) μέσω ενός δυναμόμετρου.

Η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται, είτε ζώο, είτε άνθρωπος είτε μηχανή, πρέπει να παρέχει περισσότερους από τους απαιτούμενους ελκτικούς ίπους για να κινηθεί το εργαλείο (Campbell, 1973). Ωστόσο, λόγω της δυσκολίας που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μιας τόσο ακριβούς μέτρησης, η ισχύς που ασκεί ένα ζώο για τη δική του κίνηση θεωρείται αμελητέα και δεν προστίθεται στη βασική ιπποδύναμη που απαιτείται για τη λειτουργία ή τη μετακίνηση ενός εργαλείου (King F. H., 1907), (Collins et al., 1926).

² Η ατμομηχανή του Watt ήταν στην πραγματικότητα ικανή να παράγει μόνο τα δύο τρίτα της ιπποδύναμης (Collins & Caine, 1926).

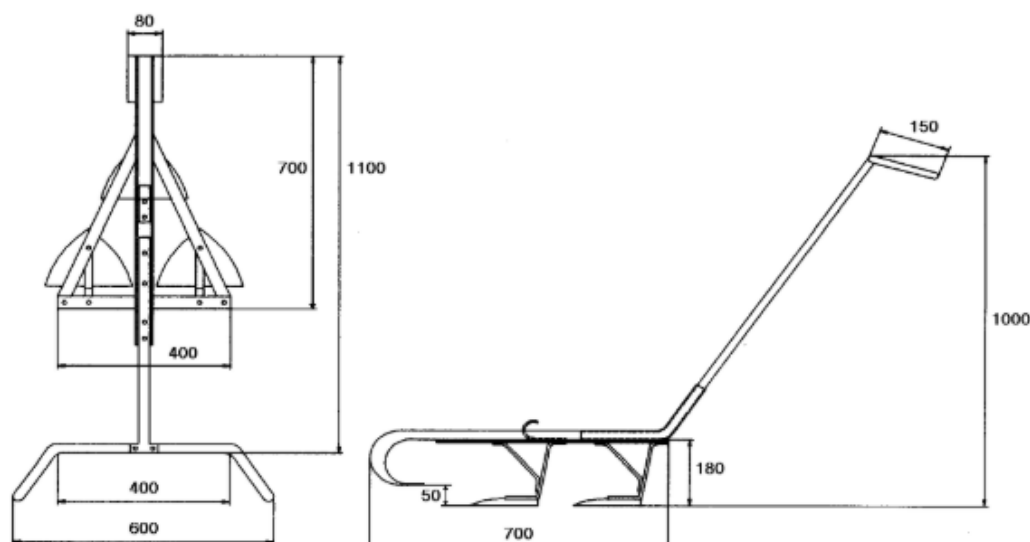
³ Τόσο η ελκτική ιπποδύναμη (tractive hp) όσο και η ιπποδύναμη (hp) θα χρησιμοποιούνται εναλλακτικά σε αυτό το έγγραφο.

2.3.2 «Βύθισμα» εργαλείου ή πρόσφυση

Ο όρος "βύθισμα" ή πρόσφυση, όπως χρησιμοποιείται στη γεωργία, αναφέρεται στη δύναμη που απαιτείται για να τραβηχτεί ένα αντικείμενο για μία δεδομένη απόσταση. Μερικές φορές δηλώνεται ως ελκτική προσπάθεια ή έλξη και είναι ένα από τα κύρια στοιχεία για τον υπολογισμό της ελκτικής ιπποδύναμης. Η πρόσφυση των εργαλείων όπως ένα άροτρο (εικ.2.3.2.1), εξαρτάται από παράγοντες όπως το βάρος του αρότρου, το σχήμα του, οι ιδιότητες καθαρισμού του αρότρου, η γωνία βύθισης, ο χαρακτήρας του εδάφους, ταχύτητα σκαψίματος και το μέγεθος του αυλακιού (Ellis et al., 1911). Παραδείγματα διακύμανσης των απαιτήσεων βύθισης για διάφορα εργαλεία που προέρχονται από τις Ηνωμένες Πολιτείες και την ισημερινή Αφρική αναφέρονται στον πίνακα 2.2. Οι απαιτήσεις ισχύος μετρήθηκαν στην πραγματικότητα με δυναμόμετρο.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά εργαλείων καλλιέργειας U.S. Δεδομένα (Collins & Caine, 1926)

Εργαλείο	Βάθος Άροσης (cm)	Πρόσφυση (kg/s^2)	Ταχύτητα (km/h)	Απαιτούμενη ιπποδύναμη (hp)
Άροτρο με ένα υνί	15,3	0,42	2,4 - 4	2 - 3,4
Άροτρο με δύο υνιά	13	0,75	2,4 - 4	2 - 3,4
Δισκοσβάρνα	15	-	3,2 - 4	2,1-2,7
Ισοπεδωτήρας	-	-	3,2 - 4	2,1-2,7
Συμπιεστής καλλιέργειας	-	-	3,2 - 4	2,1-2,7
Άροτροκαλλιεργητής	6,4-8,9	0,12	3,2 - 4	2,1-2,7



Εικόνα 2.3.2.1: Διαστάσεις σε mm αρότρου με δύο υνιά (Shetto et al., 1999)



Εικόνα 2.3.2.2: Σιδερένια δισκοσβάρνα [πηγή: <https://www.fallbrookhistoricalsociety.org/fallbrook-historical-society-home/museums/the-heritage-center/barn/farming-equipment/12-disk-harrow/>]

Για την καλλιέργεια μεγάλων εκτάσεων γης χρησιμοποιήθηκαν τροχοφόρα εργαλεία, όπως βαγόνια, καρότσια, και άροτρα με τροχούς. Η πρόσφυση των εργαλείων αυτών επηρεάζεται από την τριβή του άξονα στο εργαλείο, την ποιότητα των τροχών και τον συντελεστή τριβής εδάφους. Η τριβή του άξονα ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο στους τροχούς, την ακτίνα του τροχού και τα υλικά των φθαρμένων επιφανειών. Ωστόσο, η δύναμη που απαιτείται για να υπερνικήσει την τριβή του άξονα αυξάνεται αναλογικά με την ακτίνα του άξονα και μειώνεται αντίστροφα με την ακτίνα του τροχού.

Η αντίσταση λόγω της κλίσης του εδάφους είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του τροχού, ενώ έρευνες έδειξαν ότι εξαρτάται μόνο από το φορτίο. Οι Wooley και Jones ανέφεραν ότι απαιτείται 1 hp για να τραβηχτεί ένα φορτίο με βύθισμα 85 kg με ταχύτητα 3,2 km/h σε επίπεδο έδαφος. Για να τραβηχτεί ένα παρόμοιο φορτίο με κλίση 5% και 10% απαιτούνται 3,3 και 5,7 hp, αντίστοιχα (Wooley et al., 1926). Ως εκ τούτου, η ποσότητα του τραβηγμένου βάρους θα πρέπει να προσαρμόζεται σύμφωνα με τη διαφορετική ποιότητα και την επιφάνεια της επιλεγμένης διαδρομής και την ικανότητα των ζώων να παράγουν επαρκή ιπποδύναμη.

Δεδομένα από 629 δοκιμές του πίνακα 2.3 έδειξαν ότι η αύξηση του πλάτους του τροχού από 4 σε 10,2 cm ήταν πιο αποτελεσματική στη βελτίωση της πρόσφυσης του εργαλείου, από την αύξηση του ύψους του τροχού από 91,4 σε 111,8 cm (Wooley et al., 1926). Όλα τα καρότσια που δοκιμάστηκαν, είχαν το μεγαλύτερο βύθισμα σε λασπωμένους δρόμους και οργωμένο έδαφος, ανεξάρτητα από το ύψος ή το πλάτος του τροχού. Η πρόσφυση ήταν πολύ καλύτερη για τους τροχούς με μεγαλύτερο πλάτος σε σκληρή επιφάνεια.

Πίνακας 2.3: Πίνακας πρόσφυσης με διάφορα τροχοφόρα εργαλεία (Sayer, 1934)

Τύπος καροτσιού	Επιφάνεια εδάφους	Βάρος Καροτσιού (kg)	Φορτίο (kg)	Συνολικό βάρος (kg)	Πρόσφυση (kg)
Εύλινο καρότσι με ελαστικά αέρος	Οργωμένο έδαφος	364	933	1297	51
Σιδερένιο καρότσι με ελαστικά αέρος	Οργωμένο έδαφος	495	1866	2361	140
Εύλινο καρότσι με σιδερένιους τροχούς	Οργωμένο έδαφος	373	933	1306	178
Εύλινο καρότσι με ξύλινους τροχούς	Οργωμένο έδαφος	252	597	849	127
Εύλινο καρότσι με ελαστικά αέρος	Δρόμος	364	933	1297	22
Σιδερένιο καρότσι με ελαστικά αέρος	Δρόμος	495	1866	2361	45
Εύλινο καρότσι με σιδερένιους τροχούς	Δρόμος	373	933	1306	27
Εύλινο καρότσι με ξύλινους τροχούς	Δρόμος	252	597	846	36

2.3.3 Εργασιακή αποδοτικότητα ζώων

Η απόδοση της εργασίας των ζώων ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της εργασίας προς τη συνολική ενέργεια που δαπανάται, όπως προσδιορίζεται από τον ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου. Για παράδειγμα, αν ένα άλογο εργάζεται με ρυθμό ισοδύναμο με 1 ίππο (270,000 kg m ή 633 kcal/ h) και καταναλώνει οξυγόνο που αντιστοιχεί σε 3165 kcal, η ενεργειακή απόδοση της εργασίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\text{Ενεργειακή απόδοση} = \frac{633 \text{ kcal (Εργασία)}}{3165 \text{ kcal (Ενέργεια που δαπανήθηκε)}} \times 100 \approx 20 \% \quad (1)$$

Η ενεργειακή απόδοση της μυϊκής εργασίας μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: ακαθάριστη, καθαρή και απόλυτη (Brody S., 1945). Αυτές οι κατηγορίες ορίζονται ως εξής:

$$\text{Ακαθάριστη απόδοση} = \frac{\text{Παραγόμενη εργασία}}{\text{Ενέργεια που χρειάστηκε}} \quad (2)$$

$$\text{Καθαρή απόδοση} = \frac{\text{Παραγόμενη εργασία}}{\text{Ενέργεια που χρειάστηκε χωρίς να την ενέργεια για ανάπαυση}} \quad (3)$$

$$\text{Απόλυτη απόδοση} = \frac{\text{Παραγόμενη εργασία}}{\text{Ενέργεια που χρειάστηκε χωρίς να την ενέργεια περπατήματος με το φορτίο}} \quad (4)$$

Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση που μετρήθηκε για άλογα έλξης ήταν σχεδόν 25% για την ακαθάριστη απόδοση, 28% για την καθαρή απόδοση και 35% για την απόλυτη απόδοση. Η ακαθάριστη απόδοση είναι η πιο εφαρμόσιμη, επειδή περιλαμβάνει όχι μόνο την ενέργεια της πραγματικής εργασίας, αλλά και την επιπλέον ενέργεια του περπατήματος και της ανάπαυσης, αντικατοπτρίζοντας καλύτερα πραγματικές συνθήκες. Η ενεργειακή απόδοση της μυϊκής εργασίας μετρείται από την κατανάλωση οξυγόνου και όχι με το πως μετατρέπεται η τροφή σε ενέργεια (Brody S., 1945).

Αν συμπεριληφθεί το ενεργειακό κόστος της μετατροπής της τροφής, η συνολική απόδοση των αλόγων θα μειωθεί στο 10 με 15% και των βοδιών στο 9 με 10% (Goe M. R. et al., 1980). Τα μικρά ζώα μπορούσαν να τραβήξουν ή να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία από τα μεγάλα ζώα, αναλογικά με το βάρος τους. Ωστόσο, οι δυνατότητες έλξης των ζώων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σωματικό βάρος τους. Δηλαδή, αν έχουμε δύο ζώα και το καθένα έχει τη μυϊκή δύναμη να αξιοποιήσει όλο του το βάρος, το βαρύτερο ζώο θα τραβήξει μεγαλύτερο φορτίο (King F. H., 1907).

Για να συγκριθεί η ενεργειακή απόδοση μεταξύ ζώων διαφορετικού μεγέθους, απαιτείται η εξέταση του συνολικού έργου που επιτελείται. Όσον αφορά την παραγόμενη ιπποδύναμη (hp), τα μικρά ζώα είναι ικανά να αναπτύξουν μεγαλύτερη ακαθάριστη απόδοση από τα μεγάλα ζώα, καθώς η μείωση του βάρους ενός ζώου αυξάνει την τιμή του λόγου $\frac{\text{hp}}{\text{Βάρος σώματος}}$ και επομένως αυξάνει την απόδοση (Proctor et al., 1934).

Για δεδομένους ρυθμούς εργασίας, η ενεργειακή απόδοση, μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του ζώου, αλλά οι διαφορές στην απόδοση μεταξύ μεγάλων και μικρών ζώων μειώνονται με την αύξηση της ποσότητας της παραγόμενης εργασίας (Proctor et al., 1934). Οι Brody και Trowbridge (1937) έδειξαν ότι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος ακόμη και μεταξύ ίδιου είδους ζώων.

Μικρά και μεγάλα ζώα, όλα έφτασαν περίπου στο ίδιο μέγιστο επίπεδο ακαθάριστης απόδοσης 24% κατά την εργασία. Τα πειράματα έδειξαν ότι όσο λιγότερες είναι οι ώρες εργασίας ανά ημέρα, τόσο χαμηλότερη είναι η συνολική ημερήσια απόδοση.

Η ενεργειακή απόδοση των ζώων θα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η έλξη και η ταχύτητα, μέχρι να επιτευχθεί ένας βέλτιστος ρυθμός εργασίας.

Εκτιμήσεις έχουν γίνει για τα χαρακτηριστικά του κάθε ζώου στον πίνακα 2.4. Τα άλογα με βάρος 680 έως 862 kg, φαίνεται να είναι πιο αποδοτικά όταν εργάζονται με ρυθμό 1,0 hp. Μπορούσαν να παράγουν έλξη, ισοδύναμη με το 10% του σωματικού του βάρους, περπατώντας με ταχύτητα 3,5 έως 4 km/h για 32 km/d για μια περίοδο δύο ετών, χωρίς να εμφανίζουν σημάδια σωματικής καταπόνησης.

Άλλες δοκιμές έδειξαν ότι άλογα παρόμοιου βάρους είχαν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση όταν εργάζονταν με ρυθμό 1 hp, ασκώντας έλξη ίση με το 15% του σωματικού τους βάρους με ταχύτητα 2,4 km/h (Brody S. et al., 1943).

Οι νεροβούβαλοι όταν τραβούνε 80 έως 100 kg πετυχαίνουν μέγιστη ακαθάριστη απόδοση 23,5%, ενώ η καθαρή απόδοση ήταν 28,5%, σε ιπποδύναμη που κυμαίνεται από 0,8 έως 1,2 hp Ένα ζευγάρι Hariana βόδια, βάρους 813 kg, ήταν πιο αποδοτικά όταν έσερναν φορτία 60 kg με ταχύτητα 3,8 km/h ή όταν εργάζονταν με ρυθμό 0,8 hp (Goe et al., 1980). Αυτές οι δοκιμές υποδεικνύουν τη σημασία της απασχόλησης των ζώων σε έναν ρυθμό συγκεκριμένο για το καθένα, που θα επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίησή του. Γενικά, τα ζώα έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση όταν εργάζονται σε δεδομένη ιπποδύναμη με αργή ταχύτητα τραβώντας ένα βαρύ φορτίο, παρά με υψηλή ταχύτητα τραβώντας ένα ελαφρύ φορτίο (Brody S., 1945).

Το μέσο γαϊδούρι έχει βάρος 200 kg, καταναλώνει περίπου 6000 θερμίδες την ημέρα για συντήρηση ενώ μπορεί να φτάσει τις 9000 θερμίδες την ημέρα, εάν εκτελεί έντονη εργασία. Μπορούσε να παράγει ιπποδύναμη έως 0,4 ίππους. Ο FAO (1972) ανέφερε ότι ένας γάιδαρος που ζύγιζε 160 kg θα μπορούσε να παράγει μια μέση ελκτική δύναμη 46 kg για 3 έως 3,5 ώρες την ημέρα, για 10 από τις 14 ημέρες (Goe, M. R. et al., 1980).

Διαπιστώθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών, ότι η προσπάθεια να δουλέψετε έναν γάιδαρο για περισσότερες από 3,5 ή 4 ώρες ήταν πιο δύσκολη, ανεξάρτητα από την περίοδο ανάπαυσης. Γενικά, ένας γάιδαρος είναι σε θέση να τραβήξει το 16 έως 20% του βάρους του με ταχύτητα 2,5 έως 2,8 km την ώρα για 3 έως 3,5 ώρες (Goe, M. R. et al., 1980). Στους παρακάτω πίνακες 2.4 και 2.5 φαίνονται οι εκτιμήσεις για την ημερήσια κατανάλωση θερμίδων και για τα χαρακτηριστικά του κάθε ζώου.

Πίνακας 2.4: Εκτιμήσεις για την ημερήσια κατανάλωση θερμίδων (Goe M. R. et al., 1980)

	Άνθρωπος	Άλογο	Γαϊδούρι	Βόδι
Μέσο βάρος (Kg)	70-80	550	200	900
Ημερήσια μέση προσληψη θερμίδων (kcal/d)	1.800 - 3.000	15.000-20.000	3.000-4.000	8.000-10.000

Πίνακας 2.5: Εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά κάθε ζώου (Goe M. R. et al., 1980)

Ζώο	Βάρος ζώου (kg)	Ταχύτητα (km/h)	Φορτίο μέγιστο(kg)	Ιπποδύναμη (hp)	Ισχύς (W)
Άλογο μικρό	350	5,6	55	0,6	-
Άλογο κανονικό	500	5,6	75	0,7	700
Άλογο μεγάλο	635	5,6	95	1,3	-
Γαϊδούρι κανονικό	200	2,4	50	0,3	200
Γαϊδούρι μεγάλο	600	2,4	90	0,9	-
Βόδι μικρό	210	3,5	30	0,3	-
Βόδι κανονικό	450	3,5	64	0,7	540
Βόδι μεγάλο	900	3,5	129	1,3	-
Αγελάδα κανονική	200	2,4	16	0,2	340
Αγελάδα μεγάλη	575	2,4	48	0,6	-
Βουβάλι μικρό	400	2,4	40	0,5	-
Βουβάλι κανονικό	650	2,4	65	0,8	750
Βουβάλι μεγάλο	900	2,4	90	1,1	-
Καμήλα κανονική	370	3,5	37	0,5	700
Καμήλα μεγάλη	600	3,5	60	0,9	-
Ελέφαντας κανονικός	2900	3,5	580	1,7	2000
Ελέφαντας μεγάλος	3600	3,5	720	2,1	-
Σκυλί κανονικό	50	6	20	0,6	100
Πρόβατο κανονικό	50	2,5	12	0,2	50
Κατσίκια	40	2,5	9	-	40

2.3.4 Αξιοποίηση ζώων σε ομάδες

Τα ζώα που είναι δεμένα και λειτουργούν ως ομάδα εμφανίζουν απώλεια ενεργειακής απόδοσης ανά ζώο (Goe, M. R. et al., 1980). Αυτή η απώλεια ανέρχεται σε 7,5% για δύο ζώα, 15% για τρία, 22% για τέσσερα, 30% για πέντε και 37% για έξι ζώα. Για παράδειγμα, ένα ζώο που ζυγίζει 450 kg είναι ικανό να παράγει έλξη ίση με το 10% του βάρους του (45 kg). Ένα ζευγάρι της ίδιας δύναμης θα μπορούσε να αναμένεται να αναπτύξει συνολική έλξη 83 kg και όχι 90. Η συνολική έλξη αυξάνεται, καθώς περισσότερα ζώα δουλεύουν μαζί ταυτόχρονα, αλλά η έλξη ανά ζώο μειώνεται. Στον πίνακα 2.6 φαίνεται ο αριθμός ωρών ανά ζώο, για διάφορες εργασίες, για 1 ha γης.

Πίνακας 2.6: Αριθμός ωρών ανά ζώο, ανά εργασία για 1 ha γης (Goe M. R. et al., 1980)

Είδος εργασίας	Άλογο	Βόδι	Αγελάδα	Βουβάλι
Άροση σε χωράφι ρυζιού	30,8	35,5	36,1	38,8
Όργωμα σε χωράφι ρυζιού	34,9	23,1	28,5	29,6
Άροση ξηρού χωραφιού ρυζιού	34,9	40,9	49,5	47,9
Όργωμα ξηρού χωραφιού ρυζιού	21,9	28,2	-	29

Η άροση στις Βόρειες Μεγάλες Πεδιάδες (Northern Great Plains) και στο Βορειοδυτικό Ειρηνικό (Pacific Northwest) των ΗΠΑ πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας άροτρα με δύο και τρία υνιά, μήκους 35,6 cm και 40,6 cm, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον πίνακα 2.7. Ο αριθμός των αλόγων κυμαινόταν από 4 έως 12 και η ποσότητα γης που οργωνόταν σε μία ημέρα εργασίας 10 h, κυμαινόταν από 2 έως 3,6 ha. Μια ομάδα πέντε αλόγων χρησιμοποιήθηκε πιο συχνά όταν οργωναν με δύννο άροτρο 35,6 cm.

Πίνακας 2.7: Άροση καλλιεργειών Αμερικής με χρήση ζώων σε ομάδες (Washburn, R. S. et al., 1936)

Γεωγραφική Τοποθεσία	Εργαλείο	Αριθμός αλόγων	Ha / 10 h
Northern Great Plains	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 35.6 cm	4	2
Northern Great Plains	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 35.6 cm	5	2,1
Northern Great Plains	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 35.6 cm	6	2,1
Northern Great Plains	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 35.6 cm	8	3,4
Pacific Northwest	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 35.6 cm	6	2,1
Pacific Northwest	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 35.6 cm	8	2
Pacific Northwest	Άροτρο με δύο υνιά πλάτους 40.6 cm	8	2,6
Pacific Northwest	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 35.6 cm	8	2,9
Pacific Northwest	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 35.6 cm	9	3,4
Pacific Northwest	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 35.6 cm	10	3,4
Pacific Northwest	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 35.6 cm	12	3,6
Pacific Northwest	Άροτρο με τρία υνιά πλάτους 40.6 cm	12	3,6

Η προσθήκη ενός έκτου αλόγου δεν είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των εκταρίων που οργώνονταν ανά ημέρα, αφού και στις δύο δοκιμές, ήταν σε θέση να οργώσουν 2,1 εκτάρια σε μία ημέρα των 10 h.

Ο τύπος της εργασίας και ο ρυθμός με τον οποίο εκτελείται, θα καθορίσουν τον αριθμό των ζώων που χρειάζονται. Ορισμένες εργασίες, π.χ., η άροση πολύ υγρού εδάφους ή η έλξη βαριών φορτίων με γρήγορη ταχύτητα, απαιτούν σημαντική δύναμη.

Παρόλο που η έλξη ανά ζώο μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος ή ο αριθμός τους, η προσθήκη τους μπορεί να είναι απαραίτητη για να παρέχεται επαρκής δύναμη για την ολοκλήρωση της εργασίας (Goe, M. R. et al., 1980).

Προκύπτει όμως πρόβλημα όταν τα ζώα που δένονται μαζί και δεν έχουν το ίδιο μέγεθος. Τα μικρότερα ζώα υποφέρουν ιδιαίτερα, καθώς δεν προσπαθούν μόνο να τραβήξουν το εργαλείο, αλλά "τραβούν εναντίον" των μεγαλύτερων ζώων, τα οποία μπορεί να περπατούν με ταχύτερο ρυθμό ή να στρίβουν τον ζυγό και το χαλινάρι λόγω του μεγαλύτερου ύψους τους. Η χρήση κακώς σχεδιασμένων ή μη κατάλληλων ζυγών και χαλιναριών, θα μεγαλώσει την απώλεια απόδοσης καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας.

Πίνακας 2.8: Όργωμα καλλιεργειών με χρήση ζώων σε ομάδες (Washburn et al., 1936)

Γεωργικό εργαλείο	Αριθμός αλόγων	Ha / 10 h
Σβάρνα με καρφιά μήκους 4,6 m	4	12,2
Σβάρνα με καρφιά μήκους 4,9 m	4	13,3
Σβάρνα με καρφιά μήκους 5,5 m	4	14
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,1 m	4	16,1
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,1 m	5	17,6
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,1 m	6	16,8
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,7 m	4	18,2
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,7 m	5	18,7
Σβάρνα με καρφιά μήκους 6,7 m	6	22,6
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,3 m	4	18
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,3 m	5	19,5
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,3 m	6	20,4
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,6 m	4	16,4
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,6 m	5	21,7
Σβάρνα με καρφιά μήκους 7,9 m	4	19,1
Σβάρνα με ελατήρια μήκους 2,7 m	4	7,6
Σβάρνα με ελατήρια μήκους 2,7 m	6	8
Σβάρνα με ελατήρια μήκους 3,1 m	4	6,3
Σβάρνα με ελατήρια μήκους 3,7 m	4	9
Σβάρνα με ελατήρια μήκους 3,7 m	6	9,6

Παρόμοια αποτελέσματα ελήφθησαν για το όργωμα όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.8. Τα εκτάρια που σβαρνίστηκαν από ομάδα έξι αλόγων ήταν 4% περισσότερα από την ομάδα τεσσάρων αλόγων όταν τραβούσαν σβάρνες πλάτους 6,1 m, ενώ ήταν λιγότερα από την ομάδα 5 αλόγων. Η διαφορά στα εκτάρια που σβαρνίστηκαν μεταξύ ομάδων τεσσάρων και πέντε αλόγων που τραβούσαν σβάρνες πλάτους 7,3 m ήταν μόνο 8%.

Ενώ τα δεδομένα στους Πίνακες 2.7 και 2.8 είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό των περίπου δυνατοτήτων εργασίας των ζώων έλξης, πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές που δίνονται αντιπροσωπεύουν δοκιμές καλλιέργειας που πραγματοποιήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες.

Πολλοί παράγοντες εμπλέκονται που μπορούν να προκαλέσουν διακύμανση στα αποτελέσματα, όπως το βάρος των ζώων που χρησιμοποιήθηκαν, η εμπειρία του οδηγού, η επιφάνεια και η κλίση του δρόμου ή της γης, η έλξη του εργαλείου, το φορτίο ή το αντικείμενο που μετακινείται, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του κολάρου ή του ζυγού, το επίπεδο διατροφής, η υγεία και η εκπαίδευση του ζώου. Αυτοί οι παράγοντες, είτε μεμονωμένα είτε συλλογικά, θα επηρεάσουν την απόδοση της εργασίας των ζώων που χρησιμοποιούνται και κατά συνέπεια, την ποσότητα γης που μπορεί να καλλιεργηθεί.

3 Ιστορική αναδρομή των ρωμαϊκών υδραγωγείων

3.1 Γενικά

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα εκμετάλλευσης του νερού για τη διατήρηση αλλά και την εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού είναι το σύστημα υδραγωγείων της αρχαίας Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας. Κατασκευάστηκαν εκατοντάδες υδραγωγεία σε όλη την επικράτειά τους, για να φέρουν νερό από εξωτερικές πηγές σε πόλεις και κωμοπόλεις. Έτσι κατάφερναν να τροφοδοτούν με νερό δημόσια λουτρά, αποχωρητήρια, σιντριβάνια και ιδιωτικά νοικοκυριά. Εργασίες όπως η εξόρυξη πέτρας στα πολυάριθμα λατομεία της εποχής, καθώς και η γεωργία στηρίχθηκαν σε αυτό το σύστημα υδροδότησης. Στη Φυσική Ιστορία του , ο Πλίνιος ο Πρεσβύτερος (23 έως το 79 μ.Χ.) ανέδειξε τα υδραγωγεία της Ρώμης ως «θαύμα» που ήταν «αξεπέραστο» (Bell, 1900).

«Αν λάβουμε υπόψη μόνο την άφθονη παροχή νερού στο κοινό, για λουτρά, λίμνες, κανάλια, οικιακούς σκοπούς, κήπους, μέρη στα προάστια και εξοχικές κατοικίες. και μετά να σκεφτούμε τις αποστάσεις που διανύονται, τις καμάρες που έχουν κατασκευαστεί, τα βουνά που έχουν τρυπηθεί, τις κοιλάδες που έχουν ισοπεδωθεί, πρέπει αναγκαστικά να παραδεχτούμε ότι δεν υπάρχει τίποτα πιο άξιο του θαυμασμού μας σε ολόκληρο το σύμπαν.»

(Bell, 1900)

Τα υδραγωγεία, με τη χρησιμότητά τους αλλά και με το κόστος κατασκευής τους, αποτελούσαν απόδειξη του μεγαλείου της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας (Cary, 1937). Ο γεωγράφος Στράβων (περίπου 64 π.Χ. έως 24 μ.Χ.), σημείωσε ότι:

«Είναι τόσο άφθονη η παροχή νερού από τα υδραγωγεία, που μπορούμε να πούμε ότι τα ποτάμια ρέουν μέσα από την πόλη και τους υπονόμους, και σχεδόν κάθε σπίτι είναι τροφοδοτημένο με νερό, σωλήνες και άφθονες βρύσες»

(Cary, 1937)

Ο Έλληνας ιστορικός Διονύσιος από την Αλικαρνασσό (περίπου 60 έως 7 π.Χ.) κατέταξε τα υδραγωγεία ως ένα από τα «τρία πιο θαυμάσια έργα της Ρώμης», ενώ τα άλλα δύο ήταν οι δρόμοι και το αποχετευτικό σύστημα (Deming D., 2020).

Οι πιο σημαντικές πρωτογενείς πηγές που πληροφορούν τις γνώσεις μας για την παροχή νερού της αρχαίας Ρώμης είναι οι επιγραφές, τα ερείπια των υδραγωγείων που υπάρχουν μέχρι σήμερα και τα γραπτά του Φροντίνου και του Βιτρούβιου. Ο Sextus Julius Frontinus (περίπου 40 έως 103 μ.Χ.) έγραψε μια σύντομη πραγματεία που περιγράφει τις δραστηριότητές του ως επόπτης του συστήματος υδραγωγείων. Ο Βιτρούβιος ήταν μηχανικός και αρχιτέκτονας που εργάστηκε τόσο με τον Ιούλιο Καίσαρα όσο και με τον Αύγουστο. Γύρω στο 30 π.Χ., έγραψε το «De Architectura» (Deming D., 2020).

3.2 Συστήματα νερού πριν τα υδραγωγεία

Οι Ρωμαίοι δεν ήταν οι πρώτοι που κατασκεύασαν τα υδραγωγεία. Πριν από αυτούς λαοί της Μεσοποταμίας είχαν βρει τρόπους να φέρνουν νερό από τις απομακρυσμένες πηγές τους, στις κοινωνίες τους για την κάλυψη των αναγκών τους.

Το υδραγωγείο στο Jerwan (εικ.3.2.1) που κατασκεύασε ο βασιλιάς της Ασσυρίας, Sennacherib (βασίλευσε 704 έως 681 π.Χ.), ήταν μέρος ενός περιφερειακού συστήματος ύδρευσης που αποτελούνταν από πολλά κανάλια, σχεδιασμένα να τροφοδοτούν την πόλη της Νινευή (Fales et al., 2014). Ο Sennacherib αγαπούσε τη φύση, τα πάρκα και τους κήπους (Jacobsen, 1935). Η άφθονη ροή νερού που παρείχε το υδραγωγείο στο Jerwan και τα κανάλια διευκόλυνε τη μετατροπή της Νινευή «σε έναν κήπο σχεδόν παραδεισένιας γονιμότητας» (Jacobsen, 1935). Το υδραγωγείο διέσχισε τον ποταμό Khenis, ήταν κατασκευασμένο με περισσότερες από δύο εκατομμύρια πέτρες και εκεί έκαναν την πρώτη εμφάνισή τους, οι πέτρινες καμάρες και το αδιάβροχο κονίαμα. Θεωρείται από πολλούς ιστορικούς, ότι είναι το πρώτο υδραγωγείο που κατασκευάστηκε ποτέ (Jacobsen, 1935).



Εικόνα 3.2.1: Υδραγωγείο στο Jerwan [πηγή: <https://www.mediastorehouse.com>]

Ένα άλλο αξιοσημείωτο πρόιμο επίτευγμα στην υδραυλική μηχανική είναι το qanat (εικ.3.2.2). Το qanat είναι μια υπόγεια σήραγγα που μεταφέρει νερό από ένα πηγάδι ή υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, στην επιφάνεια του εδάφους (Deming, 2002). Ήδη από τον 9^ο αιώνα π. Χ. Ασσύριοι μηχανικοί μπόρεσαν να σκάσουν σήραγγες μήκους πολλών χιλιομέτρων (Oleson, J. P., & Rihll, T. E., 2008). Τα Qanats εμφανίστηκαν στη Μέση Ανατολή κάποια στιγμή στις αρχές της πρώτης χιλιετίας με την ακριβή τοποθεσία και ημερομηνία προέλευσής τους είναι αβέβαιη. Στη ρωμαϊκή πόλη Timgad στη Βόρεια Αφρική, τα υδραγωγεία προμηθεύονταν από qanats (Matthews, K. D., 1970).

Το συγκεκριμένο σύστημα ύδρευσης έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ανθεκτικό σε φυσικές καταστροφές, όπως σεισμοί και πλημμύρες ενώ σε περίπτωση πολέμου είναι πρακτικά αδύνατο να σταματήσει ο ανεφοδιασμός της πόλης με νερό. Τα Qanat εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σήμερα, συνήθως σε θερμά, άνυδρα και ημίξηρα κλίματα (Oleson, J. P., & Rihll, T. E., 2008). Μεγάλο μέρος του πληθυσμού του Ιράν και άλλων άνυδρων χωρών στην Ασία και τη Βόρεια Αφρική εξαρτιούνται από τα qanats για την παροχή νερού.



Εικόνα 3.2.2: Qanat στη Ghasabeh , Ιράν [πηγή: <https://de.wikipedia.org/>]

Από τον 6^ο αιώνα π. Χ. έως τον 4^ο, η Αθήνα τροφοδοτήθηκε με νερό από τα υδραγωγεία του Πεισίστρατου και του Αδριανού (Chiotis, E. D., & Marinos, P. G. 2012). Ο Πλούταρχος αναφέρει ότι ο Θεμιστοκλής (524 έως 459 π.Χ.) επέβαλε πρόστιμα στους ανθρώπους για εκτροπή του δημόσιου νερού με αγωγούς για ιδιωτική τους χρήση (Duff, T. 1996).

Αν και οι αρχαίοι Έλληνες συνεισέφεραν καθοριστικά στη φιλοσοφία, την επιστήμη και τα μαθηματικά, το μέγεθος και η τεχνολογική τελειοποίηση των έργων υδραυλικής μηχανικής τους, υστερούσαν πολύ, σε σχέση με τα ρωμαϊκά επιτεύγματα (Deming, 2010). Οι Έλληνες έδειχναν να μην έχουν επίσης αποτελεσματικούς υπονόμους. Ο Αριστοτέλης (384 έως 322 π.Χ.) σημείωσε ότι στην Αθήνα μία από τις αρμοδιότητες των επιτρόπων της πόλης ήταν να διασφαλίζουν ότι τα μεμονωμένα νοικοκυριά δεν απορρίπτουν λύματα στους δημόσιους δρόμους (Barnes J. 1995).

Το πιο γνωστό παράδειγμα ελληνικού υδραγωγείου ωστόσο, βρίσκεται στο νησί της Σάμου (Deming, 2010). Η σήραγγα του Ευπαλίνου κατασκευάστηκε τον 6^ο αιώνα π.Χ. με σκοπό τη μεταφορά νερού από μια πηγή στη μεγάλη πόλη της Σάμου (Oleson, J. P., & Rihll, T. E., 2008). Σύμφωνα με τον Ηρόδοτο (περίπου 484 έως 425 π.Χ.), το υδραγωγείο ήταν ένα από τα τρία μεγαλύτερα έργα σε όλη την Ελλάδα (Rawlinson, H. C., & Wilkinson, J. G., 1861).

Η κατασκευή του υδραγωγείου (εικ. 3.2.3) περιελάμβανε την διάνοιξη μιας σήραγγας, εντός ενός λόφου από συμπαγή βράχο, με ανασκαφή και από τις δύο πλευρές ταυτόχρονα. Εντός της σήραγγας, το νερό μεταφέρονταν με έναν σωλήνα από τερακότα τοποθετημένο εντός ενός σκαμμένου καναλιού. Οι εκτεταμένες διαστάσεις της σήραγγας επέτρεπαν χώρο για ανθρώπινη πρόσβαση και συντήρηση του υδραγωγείου, χαρακτηριστικό που μοιράζονται τα ρωμαϊκά υδραγωγεία (Matthews, K. D., 1970).



Εικόνα 3.2.3: Υδραγωγείο της Σάμου [πηγή: <https://www.newsbeast.gr/>]

3.3 Τα υδραγωγεία της Ρώμης

Ο Βιτρούβιος αναφέρει ότι το νερό κάλυπτε άπειρο αριθμό πρακτικών αναγκών και ότι όλα τα πράγματα εξαρτώνται από τη δύναμη του νερού (Pollio V., 1914). Πέρα από τις βασικές χρησιμότητές του, οι Ρωμαίοι απολάμβαναν το νερό στα λουτρά τους και στα διακοσμητικά σιντριβάνια τους (Rogers, 2018). Η άφθονη παροχή πόσιμου νερού που παρείχαν τα υδραγωγεία (εικ.3.3.1) επέτρεψε στην ίδια την πόλη της Ρώμης να αναπτυχθεί και να ευημερήσει (Matthews, K. D., 1970). Για λίγο περισσότερο από 500 χρόνια, κατασκευάστηκαν 11 υδραγωγεία για να τροφοδοτούν με νερό την αρχαία Ρώμη (Van Deman, 1934).



Εικόνα 3.3.1: Χάρτης με τις απολήξεις υδραγωγείων στη Ρώμη [πηγή: <https://en.wikipedia.org/>]

Το πρώτο υδραγωγείο που κατασκευάστηκε ήταν το Aqua Appia , που ανεγέρθηκε το 312 π. Χ. από τον Appius Claudius Caecus, τον ίδιο Ρωμαίο πολιτικό που κατασκεύασε επίσης τη σημαντική Αππία Οδό (Bruun, 2013). Πρόκειται για ένα κανάλι με μήκος 16 km ενώ μπορούσε να τροφοδοτήσει την πόλη της Ρώμης με περίπου 73.000 m³ νερού την ημέρα.

Το δεύτερο υδραγωγείο, το Aqua Anio Vetus , τέθηκε σε λειτουργία περίπου σαράντα χρόνια αργότερα (272 έως το 269 π. Χ.), χρηματοδοτούμενο από θησαυρούς που κατασχέθηκαν από τον Έλληνα Πύρρο της Ηπείρου (Evans H. B., 1997). Η ροή του ήταν υπερδιπλάσια από εκείνη του Aqua Appia και τροφοδοτούσε με νερό τα υψηλότερα υψόμετρα της πόλης.

Ο προπάππος του Ιούλιου Καίσαρα, Quintus Marcus Rex, έφτιαξε το Aqua Marcia (144 έως το 140 π. Χ.), το μεγαλύτερο υδραγωγείο της Ρώμης και αρκετά ψηλό για να τροφοδοτεί τον λόφο του Καπιτωλίου (Erdkamp, P., 2013). Καθώς η ζήτηση ανέβαινε αλλά και η τεχνογνωσία εξελισσόταν, η ανάγκη για περισσότερα υδραγωγεία, οδήγησε στο Aqua Tepula, το 127 π. Χ. (Erdkamp, P., 2013).

Την περίοδο του 1^{ου} αιώνα π. Χ., τα υδραγωγεία παραμελήθηκαν σε μεγάλο βαθμό μίας και είχαν επικεντρωθεί στις πολεμικές επιχειρήσεις. Η ανάληψη του Αυγούστου (63 π.Χ. έως το 14 μ.Χ.) σηματοδότησε μια περίοδο ανακαίνισης και κατασκευής (Singer, C. J., 1954). Στις ημέρες της πρώιμης αυτοκρατορίας του, κατασκευάστηκαν τρία υδραγωγεία υπό την επίβλεψη του Μάρκου Αγρίππα, το Aqua Julia (33 π.Χ.), το Aqua Virgo (19 π.Χ.) και το Aqua Alsietina (2 π.Χ.).

Σύμφωνα με τον Frontinus, ο Αγρίππας « ανακαίνισε τα σχεδόν ερειπωμένα υδραγωγεία της Appia, του Anio Vetus και της Marcia» και «προμήθευσε την πόλη με μεγάλο αριθμό διακοσμητικών βρυσών» (Frontinus S. J., 1913). Το νερό του Aqua Alsietina προερχόταν από μια λίμνη, όχι από μια πηγή, και χαρακτηρίστηκε από τον Frontinus ως «ανθυγιεινό» και ακατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση. Τα νερά του Alsietina χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την άρδευση κήπων, αλλά και για εικονικές ναυμαχίες που διεξάγονταν σε τεχνητές λίμνες για να ψυχαγωγήσει τον πληθυσμό (Frontinus S. J., 1913).

Το 52 μ.Χ., ο Αυτοκράτορας Κλαύδιος (10 π.Χ. έως 54 μ.Χ.) ολοκλήρωσε το Anio Novus και το Aqua Claudia που ξεκίνησε από τον προκάτοχό του, Καλιγούλα (12 έως 41 μ.Χ.). Τα νερά του Aqua Claudia προέρχονταν από μια πηγή τόσο καθαρή, που ανάγκασε τον Frontinus να τα επαινέσει για την αγνότητά τους. Τα νερά των Anio Novus και Anio Vetus, προέρχονταν από τον ποταμό Άνιο. Παρά την εγκατάσταση μιας δεξαμενής καθίζησης, το νερό από το υψηλότερο υδραγωγείο, Anio Novus έφτανε συχνά στη Ρώμη «σε αποχρωματισμένη και λασπωμένη κατάσταση όποτε υπήρχαν έντονες βροχοπτώσεις» (Frontinus S. J., 1913). Η κατασκευή του Aqua Traiana ξεκίνησε το 109 μ.Χ. κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Τραϊανού (53 έως 117). Το τελευταίο από τα 11 υδραγωγεία της αρχαίας Ρώμης, το Aqua Alexandrina χτίστηκε το 226 μ.Χ. (Deming D., 2020).

4 Αρχές και λειτουργίες των ρωμαϊκών υδραγωγείων

4.1 Εύρεση πηγής

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των ρωμαϊκών υδραγωγείων ήταν η πηγή, η αφετηρία του δηλαδή καθώς και η ποιότητα του νερού της (Matthews K. D., 1970). Το να καταφέρει κάποιος εκείνη την εποχή, με τα τεχνολογικά μέσα που είχαν στη διάθεσή τους, να εντοπίσει την καταλληλότερη πηγή με πλούσιο, άφθονο και προπαντός υγιεινό νερό, όχι μόνο δεν ήταν εύκολη διαδικασία αλλά πραγματική επιστήμη.

Όταν μία επιλαχούσα πηγή ήταν ορατή (όπως ανοιχτές πηγές, ρυάκια ή λίμνες), οι Ρωμαίοι είχαν ως ζητούμενο να εξετάσουν την ποιότητα του νερού. Χαρακτηριστική είναι η αναφορά που κάνει ο Βιτρούβιος, στο έργο του "De architectura" που γράφτηκε περίπου το 30 π.Χ., όπου τα χαρακτηριστικά που έπρεπε να εξετάσουν οι μηχανικοί για την κάθε πηγή ήταν η καθαρότητα, η γεύση, η ροή του, καθώς επίσης και το τί αντίκτυπο είχε αυτό στην υγεία των κατοίκων. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι παρατηρούσαν το πως επηρεαζόταν η επιδερμίδα των κατοίκων που χρησιμοποιούσαν αυτό το νερό (Dembskey E. J., 2009).

Επόμενο χαρακτηριστικό που έπαιζε καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα του νερού ήταν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους της κάθε πηγής. Για παράδειγμα η άργιλος δεν ήταν ιδανικός τύπος εδάφους μιας και αποτελείται από μικρούς κόκκους και σωματίδια. Αυτό το είδος έχει την τάση να εμφανίζεται βαρύ και μπορεί να δυσκολεύει την κυκλοφορία του νερού, καθώς έχει μικρή διαπερατότητα. Επίσης, κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών, μπορεί να γίνει σκληρό και ξηρό, ενώ σε υγρές συνθήκες μπορεί να γίνει λασπωμένο και λιγότερο σταθερό (Aicher Peter J., 1995).

Αντιθέτως, οι Ρωμαίοι μηχανικοί επέλεγαν τα νερά που προερχόντουσαν από πηγές με τύπο εδάφους κόκκινης πέτρας αφού χαρακτηρίζονται από την ποιότητα και τη σταθερότητά τους. Τα νερά που προέρχονται από αυτό το είδος, μπορεί να είναι άφθονα και καθαρά. Επιπλέον, η κόκκινη πέτρα μπορεί να περιέχει ορυκτά που προσδίδουν στο νερό τη φυσική του φωτεινότητα και χρώμα, καθιστώντας το πιο ελκυστικό στην όραση και πιο ευχάριστο στην κατανάλωση. Επιπλέον, η παρουσία της κόκκινης πέτρας μπορεί να υποδηλώνει καλή διαπερατότητα του εδάφους και αποτελεσματική ροή του νερού, ενθαρρύνοντας τη σταθερή παροχή από τις πηγές. Η εύρεση ωστόσο αυτών των πηγών ήταν αρκετά δύσκολη, λόγω του γεγονότος ότι ήταν πολλές φορές κρυμμένες υπόγεια και έπρεπε πρώτα να τις ανακαλύψει κάποιος. Αυτό παρουσίαζε προκλήσεις, όπως φαίνεται σε μια από τις ιστορίες που σχετίζονται με το Aqua Virgo, όπου ένα ντόπιο κορίτσι οδηγεί ανίδεους στρατιωτικούς μηχανικούς του Agrippa στις υπόγειες πηγές (Matthews K. D., 1970).

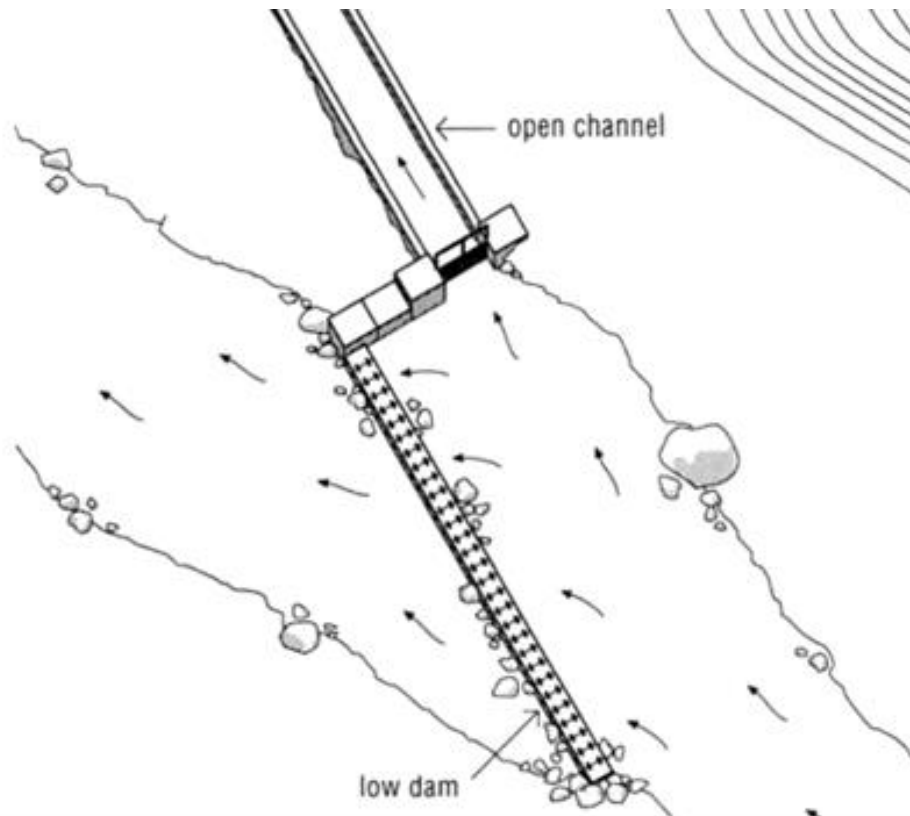
Συνεπώς, ο Βιτρούβιος προτείνει στους μηχανικούς που αναζητούν νερό να εξετάσουν παράγοντες όπως ο τύπος εδάφους, η βλάστηση στην επιφάνεια και το σχήμα του τοπίου. Η παρουσία φυτών που χρειάζονται πολύ νερό, όπως οι ιτιές ή τα σκλήθρα, σε χαμηλότερα εδάφη, μπορούσε να υποδείξει την ύπαρξη φλέβας νερού. Επίσης, η πρωινή ομίχλη ή το φρέσκο πράσινο γρασίδι κατά την ξηρή περίοδο θα μπορούσαν να δείξουν υγρές περιοχές. Όταν οι ενδείξεις ήταν ευνοϊκές, ο μηχανικός θα μπορούσε να ανοίξει έναν λάκκο ή να βαθύνει ένα πηγάδι για να εξετάσει τη ροή του νερού. Εάν αυτό αποδεικνυόταν επιτυχές, το πηγάδι μπορούσε να συνδεθεί με άλλα, δημιουργώντας ένα δίκτυο υπόγειων καναλιών για την παροχή νερού (Aicher Peter J., 1995).

4.2 Συλλογή και διοχέτευση του νερού σε κανάλια

Κατά κύριο λόγο τα περισσότερα υδραγωγεία της Ρώμης λάμβαναν το νερό τους από πηγές. Τα δύο υδραγωγεία του Ανιού (Anio Novus και Anio Vetus) εξαρτώνται από το νερό που άμεσα αντλούσαν από το ποτάμι, μια πηγή νερού που δεν χρειαζόταν να προέρχεται από υπόγειες ή άλλες πηγές νερού που απαιτούσαν σύνθετες υδραυλικές κατασκευές για τη μεταφορά του. Από την άλλη πλευρά, η Αλσιετίνα εξασφάλιζε το νερό της από μια λίμνη, πιθανότατα αποτελώντας μια πιο σταθερή πηγή, καθώς οι λίμνες συχνά παρέχουν σταθερή ποσότητα νερού ανεξάρτητα από τις κλιματικές συνθήκες (Aicher Peter J., 1995).

Για να καταφέρουν λοιπόν να εκμεταλλευτούν την κάθε πηγή οι Ρωμαίοι επιστράτευαν μία σειρά τεχνικών μεθόδων όπως φράγματα και σωλήνες (εικ.4.2.1). Πρώτο μέλημα ήταν αρχικά η δημιουργία μιας λεκάνης συλλογής, προτού το νερό εισέλθει στο κύριο κανάλι του κάθε υδραγωγείου. Ακόμα και σήμερα, αυτό το σύστημα με τις πρώιμες λεκάνες απορροής, προμηθεύει με καθαρό νερό το Aqua Virgo καθώς και το σύγχρονο υδραγωγείο της Marcia Pia το οποίο έπαιρνε νερό από τις πηγές Rosoline, κατάντη του ιστορικού χωριού της κεντρικής Ιταλίας Subiaco (Rogers, 2018).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τυχόν επιδιορθώσεις στο σύστημα αυτό αλλά και η συντήρησή του, απαιτούσαν πλήρη γνώση Υδραυλικής διότι έπρεπε να φράζουν τη ροή του νερού μερικώς ή ολικά, ελλοχεύοντας ο κίνδυνος καταστροφής ή υπερχειλίσης του καναλιού. Στον ποταμό Ανιό δυστυχώς δεν σώθηκε τίποτα από τις λεκάνες συλλογής για τα υδραγωγεία του. Σε μικρότερη κλίμακα, υπάρχει μια παλιά ρωμαϊκή λεκάνη απορροής σε ένα ρέμα πάνω από τη Σεγκόβια, ανακαινισμένη αλλά εξακολουθεί να λειτουργεί στην αρχαία της μορφή, απεικονίζοντας τις τεχνικές λήψης νερού από το ρέμα.



Εικόνα 4.2.1: Λεκάνη συλλογής στη Σεγκόβια [πηγή: Aicher Peter J.,1995]

Μπορεί κανείς να αντιληφθεί πως με τη χρήση φράγματος συλλέγανε σε μια πρώτη λεκάνη το νερό και στη συνέχεια το διοχέτευαν στο υδραγωγείο της Σεγκόβιας.

4.3 Τοπογραφικά όργανα και εργαλεία

Οι πολυμήχανοι Ρωμαίοι μηχανικοί, για τις κατασκευές της αρχαιότητας, «δανείστηκαν» τα εργαλεία που χρησιμοποιούσαν οι Έλληνες και νωρίτερα οι Αιγύπτιοι (Lewis N. D., 2012). Τα αποτελέσματα της μέτρησης υψομέτρων, γωνιών και αποστάσεων στην κατασκευή υδραγωγείων, δείχνουν έναν βαθμό ακρίβειας που μας εκπλήσσει ακόμα και σήμερα.

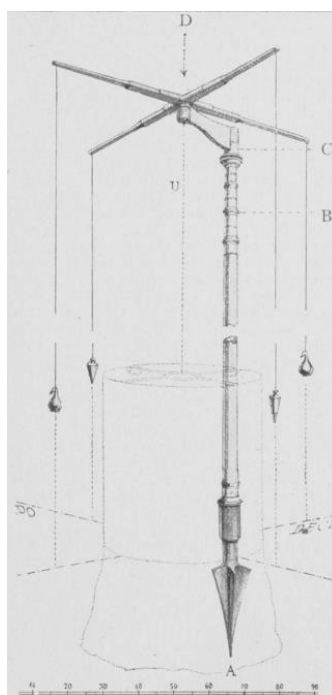
Χρησιμοποιώντας απλά τοπογραφικά όργανα, οι αρχαίοι Ρωμαίοι έπαιρναν ακριβή δεδομένα που θα ικανοποιούσαν ακόμη και τις σύγχρονες απαιτήσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες, η εντατική ερευνητική εργασία οδήγησε στην ανακατασκευή και στην καλύτερη κατανόηση της γρώμας, του χωροβάτη και της διόπτρας, τρία τοπογραφικά οργάνων που αναφέρονται στις αρχαίες επιγραφές. Δεδομένων των αποτελεσμάτων, η ρωμαϊκή μηχανική μπορεί να χαρακτηριστεί απλή και πρακτική ή πιο απλά ιδιοφυής.

4.3.1 Groma

Το groma (όπως τυποποιήθηκε στα αυτοκρατορικά λατινικά, μερικές φορές croma ή gruma στη λογοτεχνία των δημοκρατικών χρόνων) ήταν ένα τοπογραφικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία (Dembskey E. J., 2009). Το όνομα groma προήλθε στα λατινικά από το ελληνικό «gnoma, γνώμων» (Liddell & Scott, 1889) .

Δεν γνωρίζουμε ακριβώς με ποια από τις πολλές έννοιες της Αρχαίας Ελληνικής χρησιμοποιήθηκε, αν και σε πολλές πηγές ο ελληνικός όρος γρώμα, χρησιμοποιείται για να δηλώσει το κεντρικό σημείο του ένα στρατόπεδο ή μια πόλη. Χρησιμοποιήθηκε αρκετά από τους Ρωμαίους μηχανικούς για την κατασκευή δρόμων στο αστικό δίκτυο αλλά και από τους Ρωμαίους στρατιώτες.

Το groma (εικ.4.3.1.1) αποτελούνταν από ένα κεντρικό κάθετο κομμάτι, μία κάθετη ράβδο του Ιακώβ, ή ferramentum. Στο επάνω μέρος της εδράζονταν ένας περιστρεφόμενος οριζόντιος σταυρός με βαρίδια μέσω συρμάτων να κρέμονται στα τέσσερα άκρα του. Το κέντρο του σταυρού αντιπροσωπεύει τον ομφαλό (σημείο αναφοράς) ο οποίος περιστρέφεται σε σχέση με το ferramentum, χρησιμοποιώντας ένα βραχίονα που γυρίζει στην κορυφή του ραβδιού. Τα σύρματα ήταν ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους και χρησίμευαν για να δημιουργήσουν οριζόντιες ή κάθετες γραμμές που να βοηθούν στον συγχρονισμό των οικοδομικών εργασιών. Ένας εργάτης κρατούσε το εργαλείο σε συγκεκριμένη θέση, ενώ άλλοι εργάτες παρατηρούσαν τις κατευθύνσεις των βαριδίων και προσάρμοζαν τις κατασκευές ανάλογα. Το groma ήταν ένα σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη ακρίβειας και ευθυγράμμισης στις κατασκευές.

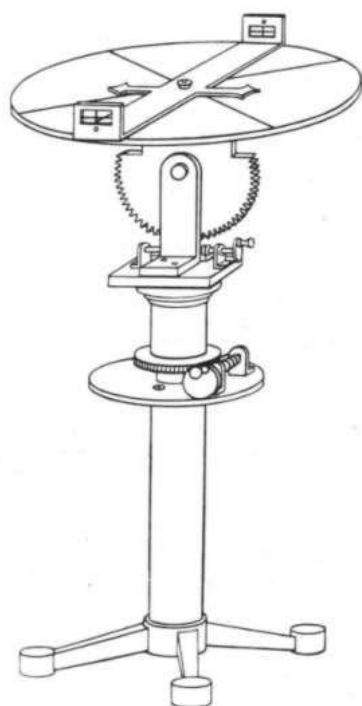


Εικόνα 4.3.1.1: Groma [πηγή: <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/>]

4.3.2 Διόπτρα

Η διόπτρα (εικ.4.3.2.1) είναι ένα κλασικό αστρολογικό όργανο έρευνας, εξοπλισμένο με μοιρογνωμόνια, με κύρια χρήση τη μέτρηση γωνιών, αποτελώντας μια πιο ακριβής εκδοχή του groma. Χρονολογείται από το 3ο αιώνα π.Χ., ενώ Έλληνες αστρονόμοι χρησιμοποίησαν τη διόπτρα για να μετρήσουν τις θέσεις των αστεριών, με τον Ευκλείδη και Γέμινο να αναφέρονται στην διόπτρα σε αστρονομικά έργα τους (Taillet et al., 2018).

Ακουμπούσε στο έδαφος με ένα σταθερό πόδι ή κάποια βάση και ρυθμιζόταν λεπτομερώς περιστρέφοντας το επάνω μέρος μέσω βιδών ακριβείας που διευκόλυναν τη βαθμονόμηση για πολύ ακριβείς μετρήσεις. Έτσι, μπορούσαν οι Ρωμαίοι μηχανικοί να εκτιμήσουν τη γωνία στροφής ενός υδραγωγείου κοιτώντας μέσα από έναν κυλινδρικό σωλήνα που στηρίζονταν πάνω στη βάση της διόπτρας και μπορούσε να περιστρέφεται ελεύθερα. Ο Βιτρούβιος αφήνει την εντύπωση ότι σε ορισμένες περιπτώσεις όπως η διάνοιξη στοών, η διόπτρα, ήταν η πρώτη επιλογή για τους μηχανικούς. Ωστόσο αναφέρει ότι είχε θεωρηθεί πολύ περίτεχνο, ακριβό και δυσκίνητο για γενική χρήση (Dembskey E. J., 2009). Τελικά αντικαταστάθηκε ως όργανο έρευνας από τον σημερινό Θεοδόλιχο.



Εικόνα 4.3.2.1: Διόπτρα [πηγή: <https://catalogue.museogalileo.it/indepth/Diopter.html>]

4.3.3 Χωροβάτες

Ο χωροβάτης ήταν ένα αρχαίο ρωμαϊκό εργαλείο, χρησιμοποιούμενο κυρίως στην οικοδομική και στη μηχανική. Όπως περιγράφονται από τον Βιτρούβιο στο Βιβλίο VIII του De architectura, χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των οριζόντιων αποστάσεων, όπως δρόμοι, υδραγωγεία, και άλλες κατασκευές, προκειμένου να διασφαλιστεί το επίπεδο ή η κλίση τους (Dembskey E. J., 2009).

Συγκεκριμένα αναφέρει ότι ο χωροβάτης αποτελούταν συνήθως από ένα ξύλινο πλαίσιο μήκους 6 m, (σχηματίζοντας το γράμμα Π), έχοντας δύο βαρίδια να κρέμονται στα άκρα του εκατέρωθεν. Στο κέντρο του ξύλινου πλαισίου υπήρχε μία εσοχή στην οποία τοποθετούσαν νερό, παρομοιάζοντας τη χρήση του σημερινού αλφαδιού (εικ.4.3.3.1). Ο μηχανικός που χρησιμοποιούσε τον χωροβάτη έπρεπε να τοποθετήσει το εργαλείο πάνω στην επιφάνεια που επιθυμούσε να ελέγξει και να προσαρμόσει τα νερά ή τα βάρη έτσι ώστε να είναι σε σταθερό επίπεδο. Στη συνέχεια, μετρούσε την απόκλιση του νερού ή των βαριδίων από μια αναφερόμενη γραμμή, έτσι ώστε να προσδιορίσει την κλίση της επιφάνειας.

Αν και ο Βιτρούβιος φαίνεται να εμπιστεύεται περισσότερο τους χωροβάτες από τη διόπτρα, αναφέρει ότι η χρήση του χωροβάτη ορισμένες φορές κάτω από την επιρροή ισχυρών ανέμων, ήταν προβληματική αφού η στάθμη του νερού στην εσοχή επηρεαζόταν και άρα με τη σειρά του το αποτέλεσμα της μέτρησης (Matthews K. D., 1970).



Εικόνα 4.3.3.1: Αρχαίος Ρωμαϊκός χωροβάτης [πηγή: <https://www.quora.com/>]

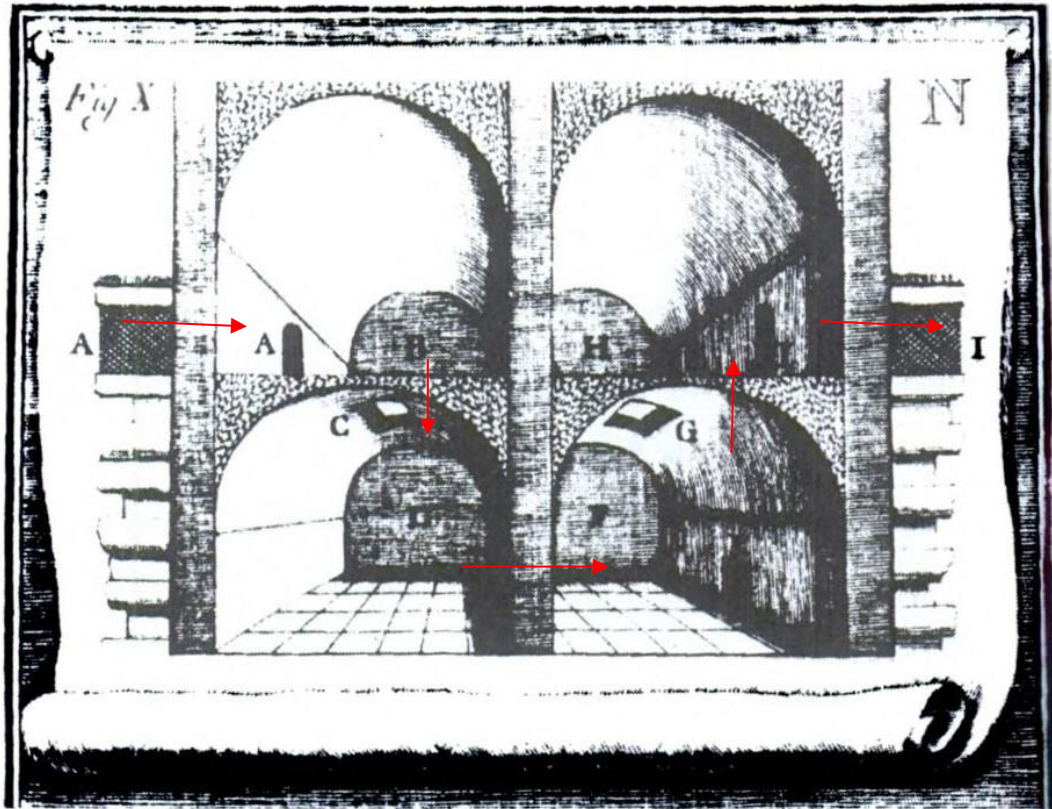
4.4 Φιλτράρισμα νερού με δεξαμενές καθίζησης

Καθώς το νερό είχε αφήσει πίσω του το πρώτο στάδιο της πηγής και είχε διοχετευτεί στα κανάλια των Ρωμαϊκών υδραγωγείων, περιείχε αρκετές ακαθαρσίες και ιζήματα. Οι Ρωμαίοι μηχανικοί για να αντιμετωπίσουν αυτό το φαινόμενο, χρησιμοποίησαν δεξαμενές καθίζησης (piscina limaria), σε σημεία που έκριναν αυτοί ως ιδανικά κατά μήκους του κάθε υδραγωγείου (Rogers, 2018). Υπάρχουν ενδείξεις για δεξαμενών καθίζησης στην πηγή, στα μέσα της διαδρομής ή στο τέρμα ενός υδραγωγείου. Αρκετές φορές ωστόσο, αν το νερό της πηγής είχε μεγάλη καθαρότητα και το υδραγωγείο ήταν μικρού μήκους, τότε οι δεξαμενές καθίζησης παραλείπονταν (Aicher Peter J., 1995).

Με τον όρο δεξαμενές καθίζησης εννοούμε μεγάλες σκαμμένες στέρνες, που πολλές φορές ήταν επενδυμένα τα τοιχώματά τους με τσιμέντο, εντός των οποίων εισέρχονταν το νερό πριν συνεχίσει την πορεία του στο υδραγωγείο. Ο βασικός σκοπός ήταν να επιβραδύνει τη ροή του νερού λόγω βάθους, έτσι ώστε το φορτίο της άμμου και των βράχων που μετέφερε το ρεύμα να συγκεντρωθεί στον πυθμένα της δεξαμενής, επιτρέποντας μόνο στο καθαρό νερό να συνεχίσει την πορεία του. Περιοδικά, το νερό του υδραγωγείου θα μπορούσε να διακοπεί ή να εκτραπεί για να επιτρέψει σε εργάτες ή στρατιώτες να καθαρίσουν τα ιζήματα του πυθμένα.

Το υδραγωγείο της Σεγκόβιας, χρησιμοποιούσε μία δεξαμενή καθίζησης βάθους 1 m, στο υδραγωγείο της Μερίδα είχε βάθος 0,70 m ενώ στο πολύ μικρότερο υδραγωγείο Realillo, η δεξαμενή καθίζησης είχε βάθος 1,70 m. Αυτό υποδηλώνει ότι οι Ρωμαίοι μηχανικοί έδιναν στο κάθε υδραγωγείο την προσοχή και τη μηχανική μελέτη που χρειαζόταν (Borau L., 2019). Άλλες δεξαμενές ήταν πιο περίτεχνες, όπως αυτό που πρόσθεσε ο Αδριανός στο Aqua Virgo κοντά στο τέρμα του. Εδώ το νερό περνούσε μέσα από μια σειρά από θαλάμους, σε δύο επίπεδα πριν συνεχίσει την πορεία του (εικ.4.4.1).

Στην καθαρότητα του νερού, συνέβαλλε και ο εξαερισμός που γινόταν στην πορεία του υδραγωγείου, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι οι Ρωμαίοι είχαν αυτή τη γνώση. Η έκθεση του νερού στον αέρα αναβάθμιζε την ποιότητά του, επιτρέποντάς του να «αναπνέει» και να κατακρημνίζει στον πυθμένα ορισμένα από τα ορυκτά του. Σημαντικό ρόλο έπαιξαν και τα πολλά σιντριβάνια της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας τα οποία λειτουργώντας ως εξαερισμός, φιλτράρανε το νερό.



Εικόνα 4.4.1: Δεξαμενή καθίζησης στο Aqua Virgo [πηγή: (Aicher Peter J. ,1995)]

Με τα κόκκινα βέλη μπορεί να κανείς να αντιληφθεί την πορεία του νερού μέσα στις δεξαμενές καθίζησης.

4.5 Σήραγγες και τάφροι

Το νερό φεύγοντας από τη λεκάνη συλλογής και την (προαιρετική) δεξαμενή καθίζησης, είχε πάρει την πορεία του για την Ρώμη μέσα σε κανάλια. Περίπου το 80% της απόστασης που διένυαν τα ρωμαϊκά υδραγωγεία, ήταν υπόγεια. Αυτή η προτίμηση για υπόγειες κατασκευές είχε μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των επίγειων κατασκευών, που οι Ρωμαίοι μηχανικοί δεν μπορούσαν να αφήσουν ανεκμετάλλευτα.

Τα υπόγεια κανάλια απαιτούσαν λιγότερα και φθηνότερα υλικά από ότι τα επίγεια με τις τεράστιες γέφυρες και τις περίτεχνες καμάρες. Επίσης, δεν υπόκεινται στην αιολική τάση και τη διάβρωση, που αποδυνάμωσε ακόμα και τις πιο ασφαλείς επιφανειακές δομές. Οι περιοδικοί σεισμοί της αρχαιότητας αποτελούσαν μια απειλή και για τους δύο τύπους, αλλά λιγότερο για τη σήραγγα, όπου οι επισκευές θα ήταν φθηνότερες. Επίσης, τα υπόγεια κανάλια κάνανε την ίδια δουλειά με τα επίγεια αλλά επέτρεπαν στις κοινωνίες, να εκμεταλλευτούν δραστηριότητες όπως η κατασκευές δρόμων και η γεωργική καλλιέργεια, ανεπηρέαστα.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το ανθρώπινο δυναμικό και οι πόροι που απαιτούνταν για μια σήραγγα ήταν σημαντικά λιγότερα από αυτό που χρειαζόταν μία γέφυρα. Σύμφωνα με τον Πλίνιο τον Πρεσβύτερο, γράφοντας κάπου γύρω στο 77 μ.Χ., πολλοί από τους εργάτες κατέφυγαν στην αυτοκτονία για να ξεφύγουν από τη μακρά, σκληρή και εξαντλητική εργασία με τον ίδιο ωστόσο να πιστεύει ότι η απώλεια άξιζε τον κόπο.

“Το έδαφος σείεται από τους σεισμούς της γης. αλλά παρόλα αυτά, για 700 χρόνια από την εποχή του Tarquinius Priscus, τα κανάλια παρέμειναν σχεδόν απόρθητα”

(Diamond R. S. & Kassel B. G., 2017)

Οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν δύο μεθόδους για τη δημιουργία υπόγειων καναλιών. Η πρώτη έχει μείνει στην ιστορία γνωστή από τον Βιτρούβιο ως «σκάψε και κάλυψε» (cut and cover) αποτελώντας στην ουσία τις απλές τάφρους. Όταν η πορεία του νερού από την πηγή (εικ.4.5.1), διένυε πεδιάδες, εκμεταλλευόμενοι τη φυσική κλίση του εδάφους, έσκαβαν κανάλια μικρού βάθους τα οποία στο τέλος σφράγιζαν από πάνω με ξύλο, πέτρες ή ακόμα και τσιμέντο για να εξασφαλίσουν την καθαρότητα και την ποιότητα το νερού (Aicher Peter J., 1995).

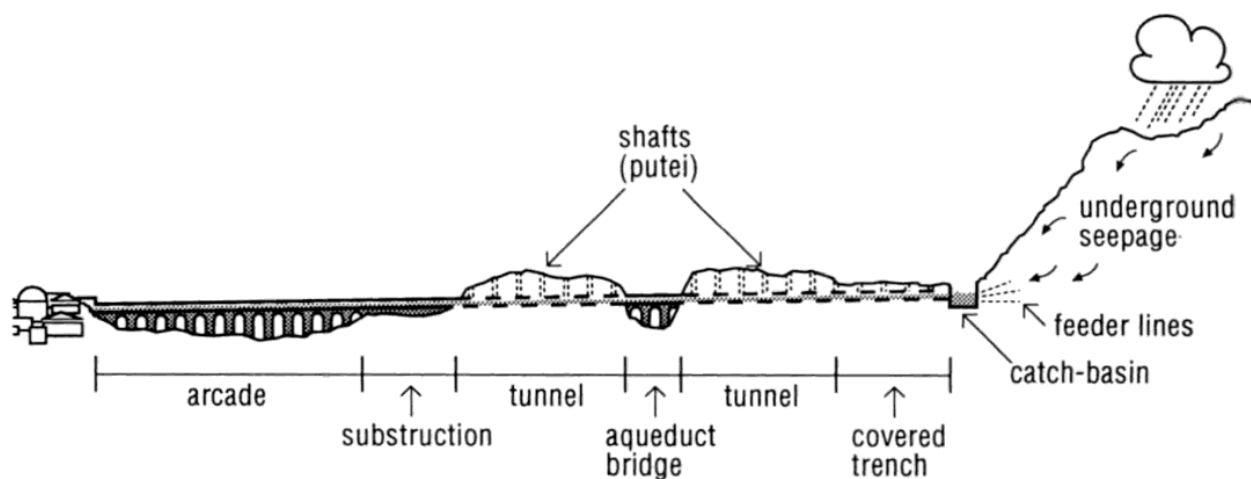
Η δεύτερη είναι λίγο πιο περίτεχνη και είναι αυτή της σήραγγας ή τούνελ. Χρησιμοποιούνταν κυρίως όταν το κανάλι συναντούσε το εμπόδιο κάποιου βουνού ή λόφου και έπρεπε να το διασχίσει. Επίσης γινόταν χρήση σήραγγας όταν η πηγή βρισκόταν πολύ κάτω από το επίπεδο του εδάφους, όπως στις περιπτώσεις των Aqua Appia και του Aqua Virgo (Matthews K. D., 1970).

Το μέγεθος της διατομής των καναλιών διέφερε (μερικές φορές εντός και του ίδιου του αγωγού νερού), αλλά ήταν περίπου 1 m πλάτος και 2 m ύψος, αφήνοντας χώρο στους συντηρητές να εργαστούν. Σε συχνά διαστήματα, περίπου κάθε 30-60 m οι σήραγγες συνδέονταν στην επιφάνεια με έναν κατακόρυφο άξονα που ονομάζεται puteus (ή αυλός) που χρησίμευαν για τον εξαερισμό του καναλιού αλλά και για να μπορούν να εισέλθουν συντηρητές κρεμασμένοι με σχοινιά από την κορυφή. Σήραγγες ωστόσο κάτω από τα βαθύτερα βουνά (όπως η σήραγγα Barberini κάτω από το όρος Arcese) φαίνεται να μην διέθετε αεραγωγούς (Aicher Peter J., 1995).

Τη διάνοιξη της στοάς, στα μικρά κανάλια την ξεκινούσαν από τη μία πλευρά και σκάβανε μέχρι το τέλος της. Στα μεγαλύτερα υπόγεια κανάλια, ξεκινούσαν από τη μία πλευρά αλλά ταυτόχρονα ξεκινούσαν και από το τέλος που θέλανε, με σκοπό να συναντηθούν στη μέση της στοάς. Ο Βιτρούβιος αναφέρει ότι κάθε 35,5 m τοποθετούσαν κάθετα δοκάρια που έφταναν στην επιφάνεια του εδάφους, ούτως ώστε με τη βοήθεια κάποιου παρατηρητή, να μπορέσουν οι μηχανικοί να ευθυγραμμίσουν τη σήραγγα.

Αυτή η μέθοδος ωστόσο αντιμετώπιζε το πρόβλημα του προσανατολισμού με πραγματικά παραδείγματα «αστοχίας» όπως αυτό στο Saldae στη Βόρεια Αφρική (στη σημερινή Αλγερία), να το επιβεβαιώνουν. Μια επιγραφή από τον Nonius Datus, έναν μηχανικό του στρατού, στην οποία παραπονιέται πως στα μισά της σήραγγας έχασαν το προσανατολισμό τους τόσο πολύ, που οι εργάτες μην μπορώντας να συναντηθούν στη μέση, κατέληξαν να φτιάχνουν δύο σήραγγες (Hodge, 2002),(Landels, 2000).

Και στις δύο περιπτώσεις υπόγειων καναλιών, οφείλουμε να αναφέρουμε ότι οι Ρωμαίοι κατάφερναν να διατηρήσουν τη φυσική κλίση του υδραγωγείου είτε με διάχυση κονιαμάτων με βάση το Ρωμαϊκό τσιμέντο, στον πάτο του καναλιού, είτε με διάνοιξη μικρότερου καναλιού μέσα στην ίδια τη σήραγγα προκειμένου να την αυξήσουν ή να την μειώσουν όπου αυτοί έκριναν απαραίτητο (Landers, 2000).



Εικόνα 4.5.1: Σκίτσο με την πορεία του νερού [πηγή: (Aicher Peter J. ,1995)]

4.6 Γέφυρες στα Ρωμαϊκά υδραγωγεία

Συνεχίζοντας την προσπάθειά του ο Ρωμαίος μηχανικός να φέρει το πολύτιμο νερό από την πηγή του βουνού, στο σιντριβάνι του Ρωμαίου πολίτη, συνάντησε άλλο ένα πρόβλημα, αυτό της υψομετρικής διαφοράς του εδάφους. Έτσι, στο υπόλοιπο 20 % των υδραγωγείων, έπρεπε να φτιάξει κατασκευές όπως γέφυρες και αψίδες, για να διατηρήσει την πορεία του νερού (Aicher Peter J., 1995). Για παράδειγμα, το Aqua Marcia, το οποίο αποπερατώθηκε το 140 π.Χ., είχε συνολικό μήκος περίπου 92 km αλλά μόλις 11 km αψίδες (Matthews K. D., 1970).

Δυστυχώς, από τα 11 υδραγωγεία που κατέληγαν στη Ρώμη μόνο σε 6 έχουν καταφέρει να διατηρηθούν απομεινάρια αυτών των επιβλητικών αψίδων (Dembskey E. J., 2009). Αυτά είναι τα Marcia, Julia, Claudia, Anio Novus, Alexandrina και Celimontano (ή Νερόνιο υδραγωγείο) με το καθένα, να διατηρεί το χαρακτηριστικό του στυλ και σύνθεση (εικ.4.6.1). Οι καμάρες και οι αγωγοί του Marcia και του Claudia είναι χτισμένες από πέτρα η οποία έχει πελεκισθεί στο χέρι. Οι πέτρινες προβλήτες τους στηρίζονται σε μεγάλα υπόγεια θεμέλια από σκυρόδεμα. Η πέτρα ελήφθη από μια ποικιλία τοπικών λατομείων και είναι κυρίως μια από τις ποικιλίες ασβεστοφόρου τούφα, ενός σχετικά μαλακού βράχου ηφαιστειακής προέλευσης.

Μερικές φορές ένα λεπτό στρώμα κονιάματος, βοήθησε να δώσει στερεότητα στη δομή και κατά τόπους μια σφήνα από τσιμέντο ή μόλυβδο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να συγκρατήσει τις πέτρες στη σειρά. Οι καμάρες της στοάς του Celimontano και του Alexandrina βασίστηκαν στο τούβλο, μια τεχνική κατασκευής (opus cae menticium) που έγινε ολοένα και πιο δημοφιλής στην Ρώμη, ιδιαίτερα μετά τις καινοτομίες της αυτοκρατορίας του Νέρωνα. Τα ίδια τα τούβλα πιέζονταν αρχικά σε μεγάλα τετράγωνα, τα οποία έπειτα κοβόντουσαν και έδιναν ένα νέο τύπο τριγωνικού τούβλου που ήταν λεπτότερο και μακρύτερο από το συνηθισμένο (Aicher Peter J., 1995).

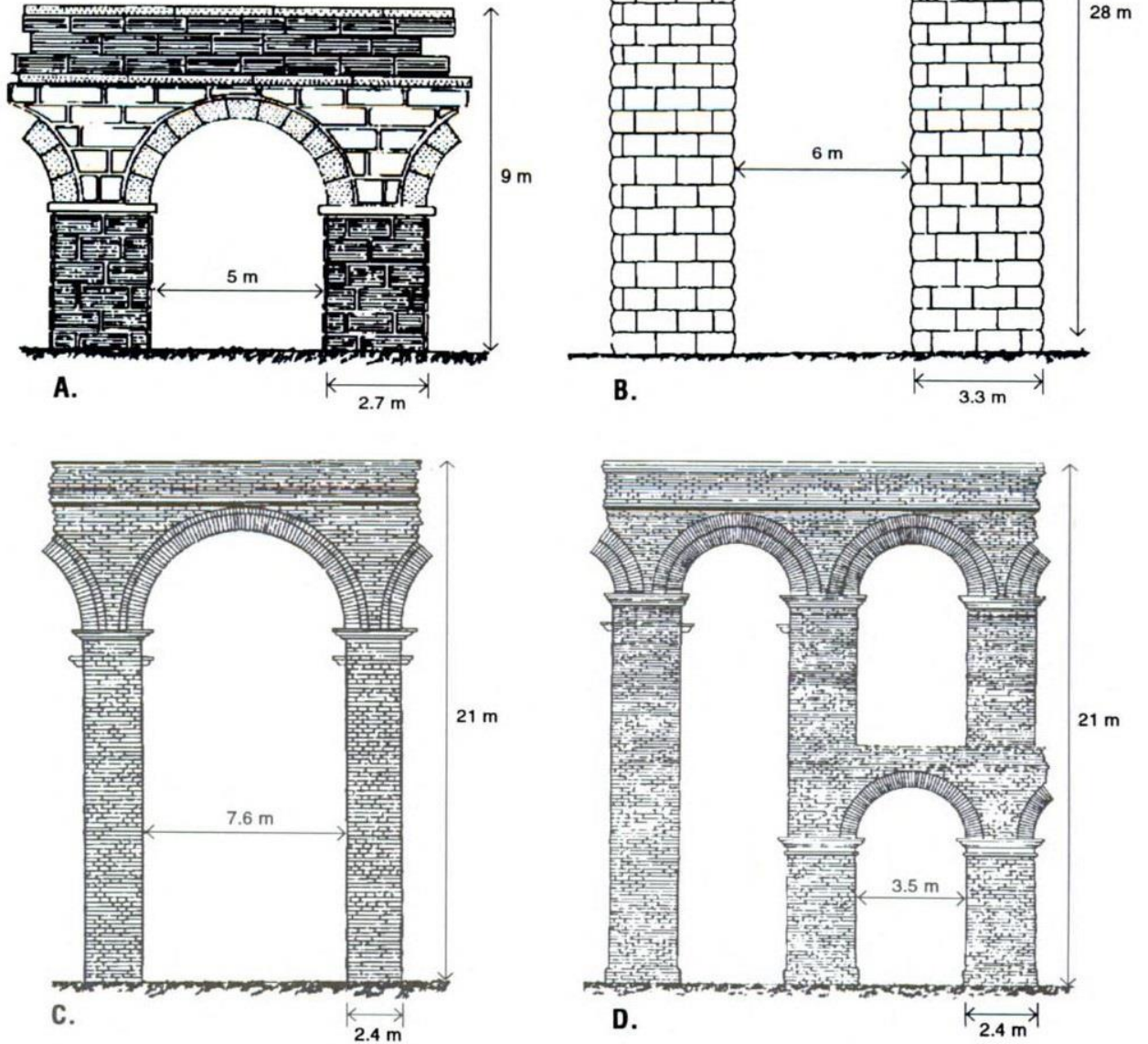
Τα τούβλα κολλήθηκαν με ένα κονίαμα αποτελούμενο από άμμο και ασβέστη. Καθώς δημιουργήθηκαν οι εξωτερικοί τοίχοι, το εσωτερικό θα γέμιζε με ακανόνιστους βράχους σε μέγεθος γροθιάς (γενικά τούφα) απλωμένοι χαλαρά σε στρώσεις. Συχνά στην επιφάνεια του σκυροδέματος αντί για τούβλα δόθηκε μια πρόσοψη από μικρές κομμένες πέτρες. Η τοποθέτηση, γινόταν σε μοτίβο που θυμίζει δίχτυ, για αυτό πήρε και την ονομασία opus reticulatum («δίκτυο»). Οι εικόνα 4.6.1 δείχνει ότι οι αναλογίες των κατασκευών διαφέρουν χαρακτηριστικά, ως προς τα υλικά, το ύψος του τόξου, το φορτίο του και την εμπιστοσύνη του αρχιτέκτονα στο υλικό του. Το Marcia είναι μοναδικό, μιας και οι προβλήτες των καμάρων του ποικίλλουν σε μήκος από 2 έως 3,3 m, ανάλογα με το ύψος της στοάς, το άνοιγμα του τόξου παραμένει σχεδόν σταθερό σε λίγο πάνω από 5 m. (Aicher Peter J., 1995).

ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΑΡΕΣ

A. MARCIA B. CLAUDIA

C. CELIMONTANO

D. ALEXANDRINA



Εικόνα 4.6.1: Καμάρες από 4 διαφορετικά υδραγωγεία⁴ [πηγή: (Aicher, Peter J., 1995)]

⁴ Το κάθε υδραγωγείο διατηρούσε τη δική του αισθητική

Πέραν ωστόσο των όμορφων και επιβλητικών προσόψεων, οι γέφυρες με τις καμάρες είχαν σκοπό τη μεταφορά νερού στην πόλη (εικ.4.6.2). Στην κορυφή τους διέθεταν κανάλια, μέσα στα οποία έρεε το νερό, διατηρώντας την κλίση του, με αφετηρία την πηγή και προορισμό τη Ρώμη. Τα ανοίγματα αυτά ήταν στεγανά με ρωμαϊκό τσιμέντο και για να διατηρήσουν την καθαρότητα του νερού, η επιφάνεια του καναλιού, ήταν καλυμμένη με ορθογώνιες πέτρες που χρησίμευαν ως «καπάκι» (Matthews K. D., 1970).



Εικόνα 4.6.2: Ρωμαϊκό υδραγωγείο στην Πορτογαλία [πηγή: <https://www.flickr.com/>]

4.7 Σίφωνες

Οι Ρωμαίοι αρκετές φορές για την μεταφορά του νερού σε ένα υδραγωγείο έκαναν χρήση σιφώνων. Με τον όρο σίφωνα, εννοούμε ένα καμπυλωτό σωλήνα που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού από ένα υψόμετρο σε ένα χαμηλότερο και μετά σε ψηλότερο (μικρότερο από το αρχικό υψόμετρο) χωρίς τη χρήση αντλιών.

Η κυκλική μορφή του σίφωνα είναι μια κλειστή διατομή, που εμποδίζει την είσοδο του αέρα και επιτρέπει στο νερό να κινηθεί με τη βαρύτητα. Οι σωλήνες ενός σίφωνα ήταν γενικά κατασκευασμένοι από μόλυβδο και συνήθως ήταν παραταγμένοι σε μια σειρά για να εξυπηρετήσουν τη μεγάλη ροή των ρωμαϊκών καναλιών. Το Aqua Gier για παράδειγμα, μετέφερε το νερό του καναλιού σε εννέα σωλήνες τοποθετημένους δίπλα-δίπλα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.7.1, οι σωλήνες ήταν επικαλυφθεί περιμετρικά τους με ρωμαϊκό τσιμέντο (Aicher, Peter J., 1995).



Εικόνα 4.7.1: Ρωμαϊκός σίφωνας στην Τουρκία [πηγή: <http://www.electrummagazine.com>]

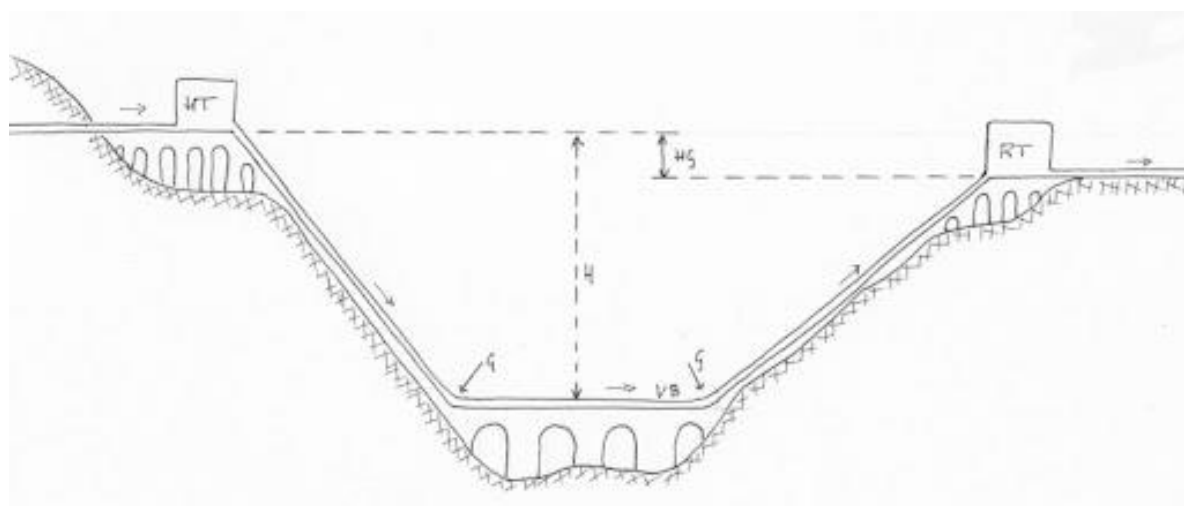
Ωστόσο οι Ρωμαίοι μηχανικοί για να επιλέξουν αυτή τη μέθοδο μεταφοράς νερού είχαν να λάβουν υπόψη τους και τον οικονομικό παράγοντα. Οι μολύβδινοι σωλήνες, μπορούσαν να αντέξουν μεγαλύτερες πιέσεις και ήταν αρκετά αποτελεσματικά χωρίς αστοχίες, χρειάζονταν όμως τεράστιες ποσότητες μόλυβδου για την κατασκευή τους και ενώ υπήρχε άφθονος στην αυτοκρατορία, δεν βρισκόταν πάντα κοντά στο υδραγωγείο και έπρεπε να μεταφερθεί με μεγάλα έξοδα (Middleton, 1892).

Η πέτρα για τις γέφυρες, ήταν γενικά περισσότερο διαθέσιμη, αφού υπήρχαν αρκετά λατομεία στη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία. Η συγκόλληση χιλιάδων μέτρων σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν στους σίφωνες ήταν επίσης μια χρονοβόρα διαδικασία. Αν και δεν είναι ξεκάθαρο πώς θέρμαιναν τον σωλήνα για να κάνουν τη συγκόλληση, υπάρχει η ένδειξη ότι φορητά μαγκάλια, ήταν τοποθετημένα κάτω από τις ενώσεις (Aicher Peter J., 1995).

Οι επιβλητικές γέφυρες με τις περίτεχνες καμάρες ωστόσο δεν ήταν πάντα η πρώτη επιλογή, αφού αρκετές κοιλάδες και γκρεμοί είχαν τόσο μεγάλο βάθος που η κατασκευή τους, ήταν πρακτικά αδύνατη. Όταν η κοιλάδα ήταν 50 m κάτω από το επίπεδο του καναλιού, οι Ρωμαίοι τότε εφάρμοζαν τους αντεστραμμένους σίφωνες (εικ.4.7.2).

Το νερό ρέει από την είσοδο μέσω ενός αγωγού που κατεβαίνει προς τα κάτω, συνήθως μέσα από μια κοιλάδα ή φαράγγι. Η βαρύτητα προκαλεί την επιτάχυνση του νερού καθώς κατεβαίνει. Όταν το νερό φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της διαδρομής, η δυναμική του ενέργεια είναι στο ελάχιστο, αλλά η κινητική του ενέργεια είναι στο μέγιστο λόγω της επιτάχυνσης από τη βαρύτητα. Στη συνέχεια, το νερό περνάει σε έναν αγωγό ανύψωσης, όπου η πίεση που δημιουργήθηκε από το κατέβασμα του νερού, το αναγκάζει να ανυψωθεί. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου στο χαμηλότερο σημείο, είναι αρκετή για να ωθήσει το νερό προς τα πάνω μέχρι να φτάσει σε ένα επίπεδο ίσο περίπου με το αρχικό σημείο εισόδου.

Όσο πιο βαθιά ήταν η κοιλάδα, τόσο πιο μεγάλη ήταν η (στατική) πίεση στους σωλήνες στο κάτω μέρος. Μερικές φορές χτίζονταν μια μικρή οδογέφυρα στον πυθμένα της κοιλάδας για να μειώσει το μέγιστο ύψος της, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πίεση του νερού που απαιτείται για την ανάβαση στην αντίθετη πλευρά (Matthews K. D., 1970).



Εικόνα 4.7.2: Ρωμαϊκός ανεστραμμένος σίφωνας [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

Ο σίφωνας Beaunant του υδραγωγείου Gier που εξυπηρετούσε τη Λυών, είχε πτώση 123 m και ήταν μήκους 2,6 km. Αν και δυστυχώς, δεν υπάρχουν σήμερα ερείπια ανεστραμμένων σιφώνων στη Ρώμη, είναι πιθανό ότι τουλάχιστον κάποιο από αυτά, χρησιμοποιήθηκε στην αρχαία πρωτεύουσα. Κάποιο μπορεί να κατασκευάστηκε ανάμεσα στους λόφους Quirinal και Capitoline, με το τελευταίο να είναι ένα από τα τέρματα του Aqua Marcia (Aicher Peter J., 1995).

4.8 Σύστημα διανομής του νερού

Το πολύτιμο νερό είχε φτάσει πλέον στις περιοχές που κατοικούσαν οι πολίτες της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας και έπρεπε οι μηχανικοί να διανείμουν το νερό στα σιντριβάνια, στα σπίτια, στα λουτρά και στα ανάκτορα. Αυτό επιτυγχάνονταν με τη χρήση δεξαμενών διανομής, τα περίφημα castellum (Deming D., 2020).

Πρόκειται για μεγάλες στέρνες (εικ.4.8.1), οι οποίες λειτουργούσαν ως πρώτο σημείο αποθήκευσης και διανομής του νερού. Αρχικά, έστελναν μία ποσότητα σε μία δευτερεύουσα δεξαμενή αποθήκευσης, σε περίπτωση διακοπής παροχής από την πηγή, να μην κινδυνέψουν με λειψυδρία. Ο Frontinus αναφέρει χαρακτηριστικά ότι το 30% της ποσότητας που έφτανε στην πόλη διοχετεύονταν σε αυτή την εφεδρική δεξαμενή (Aicher Peter J., 1995). Ένα castellum είχε τρύπες περιμετρικά, ούτως ώστε το νερό να διαχωρίζεται και να πηγαίνει στον κάθε προορισμό του, μέσω μολύβδινου σωλήνα.

Προτεραιότητα είχαν τα ιδιωτικά σπίτια και βίλες, ακολουθούσαν τα λουτρά και τέλος οι δημόσιες βρύσες (Aicher Peter J., 1995). Στον πυθμένα του κάθε castellum συναντά κανείς τρύπες, οι οποίες επέτρεπαν τη δεξαμενή από υπερχειλίση. Κάθετοι σωλήνες τοποθετημένοι από τον πάτο μέχρι λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια της δεξαμενής, ρύθμιζαν τη στάθμη του castellum μιας και δεν επέτρεπαν στο νερό να ξεπεράσει αυτή τη στάθμη. Το υπερχειλισμένο νερό, διοχετευόταν με τη σειρά του υπόγεια, σε κάποιον ποταμό όπως τον Τίβερη.

Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, οι Ρωμαίοι μπορούσαν να επιστρέψουν στο νερό από πηγάδια, στέρνες, στον Τίβερη και στις δεξαμενές αποθήκευσης που υπήρχαν στην πόλη, λόγω των castellum (Matthews K. D., 1970). Όπως εξηγείται από την εικόνα 4.8.2, το νερό μέχρι πριν φτάσει στο castellum βρισκόταν σε ένα δίκτυο μεταφοράς το οποίο βασιζόταν στην βαρύτητα (ανοιχτό σύστημα), ενώ από το castellum και μετά βασιζόταν σε ένα δίκτυο σωληνώσεων, προκειμένου να διανεμηθεί κατάλληλα (κλειστό σύστημα). Όταν το νερό, διοχετευόταν σε σωλήνες μικρής κυκλικής διαμέτρου, αυτομάτως μεταφερόταν υπό πίεση (Aicher Peter J., 1995).



Εικόνα 4.8.1: Castellum στο υδραγωγείο της Nîmes [πηγή: <https://www.tourismegard.com/>]

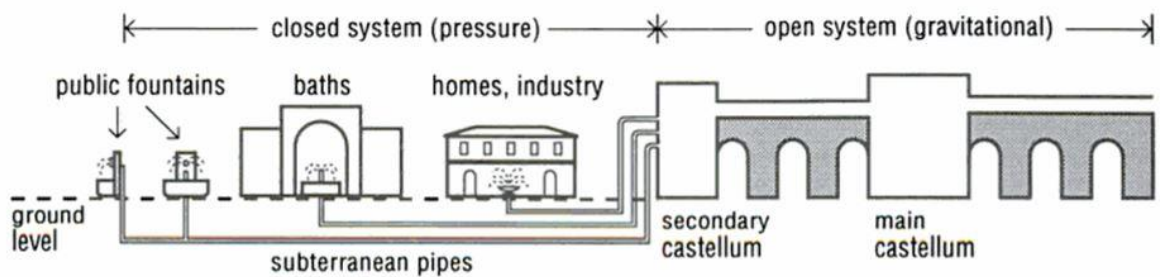
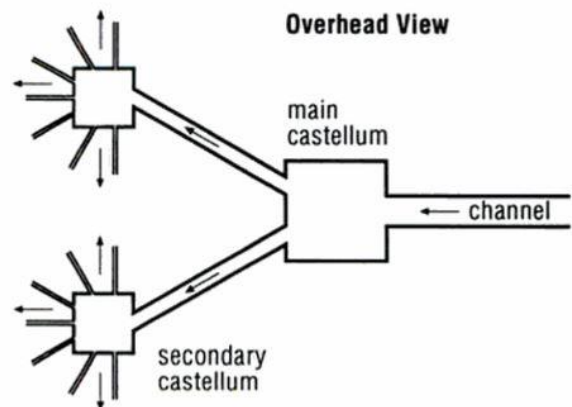


Figure 12.
Distribution
system.



Εικόνα 4.8.2: Δίκτυο διανομής Castellum [πηγή: (Aicher Peter J. ,1995)]

Την εποχή του Frontinus (περίπου 100 μ.Χ.) υπήρχαν 247 τέτοιοι πύργοι, ωστόσο ελάχιστα υπολείμματα έχουν διασωθεί από το σύστημα διανομής στη Ρώμη. Οι σωλήνες κατασκευάζονταν συνήθως είτε από ψημένο πηλό (τερακότα) είτε από μόλυβδο. Δέρματα μπορεί να χρησιμοποιούνταν κατά καιρούς, ενώ ξύλα όπως βελανιδιά αξιοποιήθηκαν ιδιαίτερα στην Αγγλία και τη Γερμανία, όπου υπήρχε μεγάλη προσφορά. Ο Βιτρούβιος προειδοποιεί για την επικινδυνότητα της χρήσης μολύβδινων σωλήνων για πόσιμο νερό, γνωρίζοντας ότι θα μπορούσαν να καταστρέψουν τόσο την ποιότητα όσο και τη γεύση του νερού.

Για να επιβεβαιώσει την επιφυλακτικότητα του, αναφέρει το «άρρωστο» βλέμμα των ανδρών που έριξαν τους σωλήνες μολύβδου (Dembskey E. J., 2009). Αξίζει να αναφέρουμε ωστόσο ότι η ζημία που έκανε ο μόλυβδος στην ποιότητα του νερού, περιορίζονταν από δύο παράγοντες που μπορεί να πει κάποιος έγιναν τυχαία. Αρχικά, παρόλο που τοποθετήθηκαν πολλές βρύσες ή βάνες κατά μήκος του δικτύου και μπορούσαν να σταματήσουν τη ροή του νερού, δεν ανοιγόκλειναν συχνά. Επομένως το νερό ανανεωνόταν συνέχεια χωρίς να περνάει πολύ χρόνο μέσα στις βλαβερές σωληνώσεις.

Δεύτερον, το νερό περιείχε στη σύστασή του διάφορα ορυκτά, με αποτέλεσμα η χρόνια διέλευσή του εντός των σωληνώσεων, να δημιουργεί μία επικάλυψη η οποία το προστάτευε από το μόλυβδο (Matthews K. D., 1970). Οι σωλήνες μολύβδου είχαν περίπου δέκα τυπικά μεγέθη, με εσωτερική διάμετρο περίπου από 1,3 έως 57,4 cm. Το πάχος του σωλήνα μπορεί να ποικίλλει, όπως και το μήκος του. Σε πολλούς από τους σωλήνες προστέθηκαν επιγραφές πιέζοντας γράμματα ή νομίσματα στο καλούπι (Oleson J. P. & Rihll T. E., 2008).

Σε πολλά σημεία, έγινε χρήση σωληνώσεων από πηλό, που κατασκευάζονταν σε τροχό αγγειοπλάστη. Ενώ ποιοτικά ήταν πολύ καλύτερος από εκείνον του μολύβδου, υστερούσε σε μήκος μιας και δεν μπορούσε να ξεπεράσει το 1 m χωρίς να σπάσει. Ο Vitruvius αναφέρει ότι επικαλύφθηκε με ένα μείγμα που μοιάζει με στόκο, ενώ οι ενώσεις των πήλινων σωλήνων, σφραγίστηκαν με ασβέστη και λάδι (Dembskey E. J., 2009).

Οι Έλληνες είχαν αναπτύξει πήλινους σωλήνες με πιο περίτεχνες ενώσεις, αλλά οι Ρωμαίοι προτιμούσαν ένα απλό μοντέλο, το οποίο απαιτούσε λιγότερο εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό για την κατασκευή, επιτρέποντας έτσι τη μαζική παραγωγή (Aicher Peter J., 1995). Οι βρύσες ήταν είτε μικρές στέρνες (Iacus), είτε το νερό έβγαινε μέσα στόμια (salientes). Στην Πομπηία, όπου το αρχαίο σύστημα διανομής διατηρείται μέχρι σήμερα, οι βρύσες έφερναν νερό σε απόσταση 50 m από το castellum (Oleson J. P. & Rihll T. E., 2008). Ο Frontinus αναφέρει άδειασμα δεξαμενών αποθήκευσης νερού σε quinarie, μία μονάδα μέτρησης του όγκου για το νερό (Frontinus S. J., 1913). Οι Ρωμαίοι δεν είχαν κανένα μέσο μέτρησης των ταχυτήτων ροής (Matthews K. D., 1970).

Υπολογίζεται ένα εύρος από 520.000 έως 635.000 m³ νερού ημερησίως μεταφέρονταν καθημερινά στη Ρώμη, ενώ άλλοι μελετητές έχουν υπολογίσει ότι η ημερήσια προσφορά φτάνει τα 1.000.000 m³ (Bruun C. F. M., 1993). Ο πληθυσμός της Ρώμης κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Αυγούστου (27 π.Χ. έως το 14 μ.Χ.) έχει υπολογιστεί ότι ήταν στη γειτονιά του 1 εκατομμυρίου κατοίκων (Carcopino J., 2003).

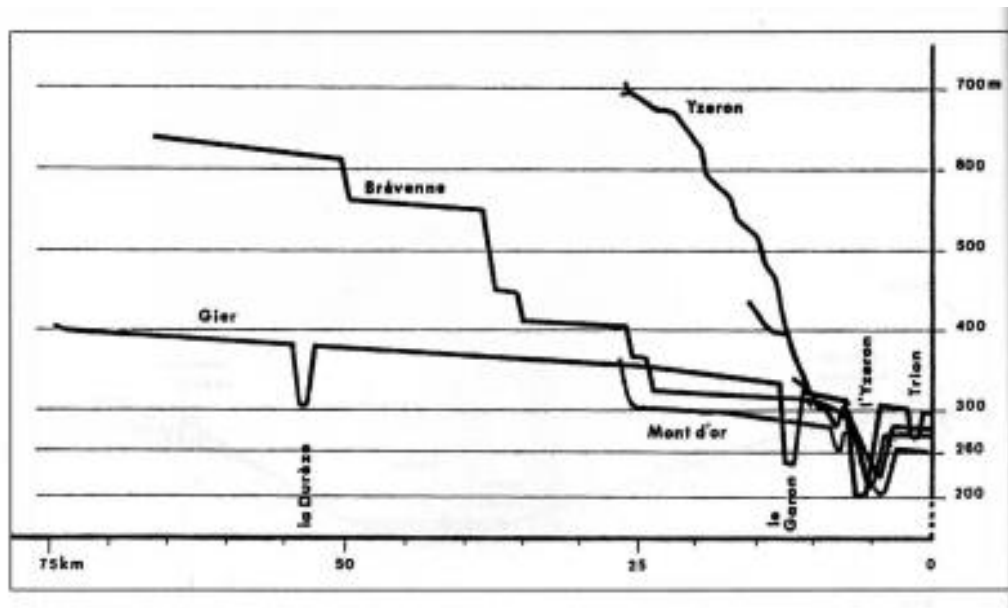
4.9 Κλίση στα Ρωμαϊκά υδραγωγεία

Η κλίση ή η πτώση ενός υδραγωγείου ήταν ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες. Υπερβολικά μικρή κλίση και το νερό δεν κινείται, απότομη κλίση σημαίνει ότι το νερό θα κινείται πολύ γρήγορα και θα είχαμε υπερχειλίση στις απολήξεις του. Τυπικά, μία αργή ροή δεν θα προκαλούσε ζημιές στο κανάλι, αλλά θα υπήρχε περισσότερος χρόνος για να καθιζάνει το ίζημα και να φράξει τις αρτηρίες. Ένα ταχύτερο ρεύμα νερού στο κανάλι θα διατηρούσε το κανάλι καθαρότερο, αλλά θα απαιτούσε περισσότερες επισκευές.

Η κλίση δεν ήταν ομοιόμορφη σε ολόκληρο το υδραγωγείο, για λόγους που αφορούσαν τη μορφολογία του εδάφους. Μια σήραγγα μπορεί να έχει πιο απότομη κλίση από το μέσο όρο του υδραγωγείου, για να διατηρείται καθαρότερη μίας και ο καθαρισμός της ήταν δύσκολος (Matthews K. D., 1970).

Υπάρχει κάποια σύγχυση στις αρχαίες λατινικές επιγραφές σχετικά με την ελάχιστη κλίση για ένα κανάλι υδραγωγείου. Το χειρόγραφο του Βιτρούβιου υποδεικνύει ότι το ελάχιστο που πρέπει να τηρείται είναι το 1 m στα 200 m ή 0.5 % (Dembskey E. J., 2009). Ο Πλίνιος ο Πρεσβύτερος, γράφοντας σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, έδωσε έναν αριθμό 1/4800. Αυτή η ασυμφωνία μπορεί κάλλιστα να οφείλεται σε κάποια παρανόηση εκ μέρους ενός μεσαιωνικού αντιγραφέα που ασχολούνταν με το κείμενο του Βιτρούβιου. Τα υδραγωγεία κυμαίνονται μεταξύ 0,3% και 0,15%, με ακραίες τιμές 0,07% και 3,0% στο Nîmes και στη Ρώμη αντίστοιχα (Matthews K. D., 1970).

Η πόλη της Λυών στη Γαλλία διέθετε τέσσερα υδραγωγεία (εικ.4.9.1) που την εξυπηρέτούσαν στους ρωμαϊκούς αυτοκρατορικούς χρόνους το La Brevenne, το Mont d'Or, το Yzeron και το Gier. Φαίνεται ότι αυτά τα τρία πρώτα υδραγωγεία της Λυών κατασκευάστηκαν μεταξύ του 29 π.Χ. και του θανάτου του Κλαυδίου το 54 μ.Χ. ενώ το Gier χρονολογείται στην περίοδο του Αδριανού το 117-138 μ.Χ. (Matthews K. D., 1970).



Εικόνα 4.9.1: Μηκοτομές 4 υδραγωγείων της Λυών [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

Το La Brevenne είχε μήκος 55 km, με την πηγή του να βρίσκεται στα 616 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ μπορούσε να τροφοδοτήσει με 28.000 m³ νερού σε 24 ώρες. Σε ένα σημείο φαίνεται να έχει πτώση 26 m σε απόσταση ενός χιλιομέτρου, ενώ αργότερα στην πορεία του πέφτει 90 m σε μήκος ελαφρώς μικρότερο από 3 km. Αυτές οι απότομες κλίσεις συμβαίνουν σε μια πορεία του καναλιού αφού πρέπει να ακολουθήσει τη γεωμορφολογία του εδάφους, με το συγκεκριμένο, η κλίση να κυμαίνεται από 1/667 (0,15 %) έως 1/250 (0,4 %). Σε άλλα τμήματα η μέση κλίση μειώνεται στο 1/1428 (0,08 %) και πλησιάζοντας την πόλη της Λυών φτάνει το 1/357 (0,28 %) (Chanson H., 2000).

Το υδραγωγείο Mont d'Or είχε μήκος περίπου 25 km, με την πηγή να εκτιμάται κοντά στο Τουχ σε υψόμετρο 350m. Είχε μέση πτώση σε όλο το μήκος του 3,59 m ανά km ή περίπου 1/279 (0,36 %). Κοντά στην αρχή του είχε πτώση περίπου 1 / 143 (0,7%) σε ένα μήκος 5,5 km. Στη συνέχεια, για περίπου 3,5 km είχε μία κλίση περίπου 1/294 (0,34 %) (Matthews K. D. 1970).

Ο ποταμός Gier τροφοδοτεί με νερό το ομώνυμο υδραγωγείο στα 405,25 m πάνω από την στάθμη της θάλασσας. Η εξέταση δείχνει ότι το κανάλι Gier έχει μέση πτώση περίπου 1/725 (0,14 %). Στα πρώτα δύο τρίτα του μήκους του, περίπου 1/1177 (0,084 %) ενώ σταδιακά αυξανόταν, φτάνοντας πτώση 1/800 (0,125 %) στη δεξαμενή διανομής στο Fourvieres. Προφανώς το κανάλι αυτού του υδραγωγείου τρέχει πιο σταθερά σε κλίσεις, χαμηλότερες από αυτές των προηγούμενων. Η ομαλή κλίση σχετίζεται άμεσα με το μεγάλο μήκος του καναλιού Gier, που ανέρχεται στα 75 km. Οι υπολογισμοί που βασίζονται στους σίφωνες του υδραγωγείου, υποδηλώνουν ότι μπορούσε να τροφοδοτήσει τη Λυών με περίπου 24.000 m³ νερού σε 24 ώρες (Matthews K. D. 1970).

Το υδραγωγείο Yzeron (ή αλλιώς υδραγωγείο Craponne) είναι το τέταρτο από τα αρχαία υδραγωγεία της Λυών, με το μήκος του να φτάνει τα 40 km.. Οφείλει το όνομά του στο γεγονός ότι αντλεί νερό από την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Yzeron, παραπόταμου του Ροδανού . Ωστόσο φαίνεται να δεχόταν νερό και από άλλες μικρότερες πηγές, κοντά στις περιοχές Pollionnay και Vaugneray. Σε αντίθεση με τα υδραγωγεία Gier και Monts-d'Or, η βασική πηγή του, βρίσκεται σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο υψόμετρο κοντά στα 710 m έως 715 m. Αυτό το γεγονός, δεν ήταν απαραίτητως πλεονέκτημα, καθώς μια πολύ απότομη κλίση θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερβολική ταχύτητα του νερού και κατά συνέπεια, σε γρήγορη φθορά της δομής του καναλιού. Υπολογίζεται ότι μπορούσε να μεταφέρει 12.000 με 15.000 m³ νερού την ημέρα (Chanson H., 2000).

5 Μελέτη του υδραγωγείου της Uxama

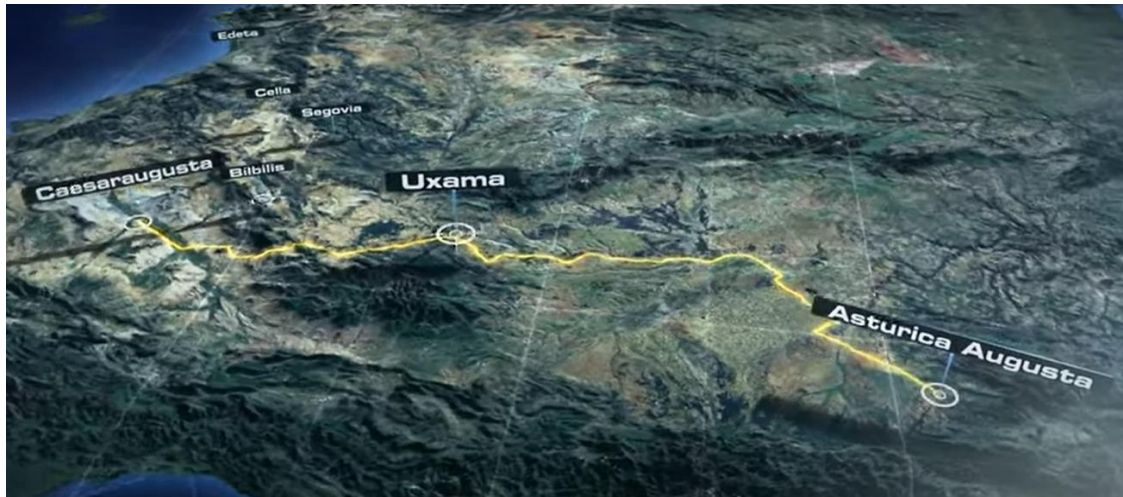
5.1 Ιστορία της Uxama Argaela



Εικόνα 5.1.1: Χάρτης με την τοποθεσία της Uxama [πηγή: Google earth]

Στην επαρχία Soria της Ισπανίας, πάνω στον λόφο El Castro, βρισκόταν η ιστορική πόλη, Uxama Argaela (εικ.5.1.1),(εικ.5.1.4). Μία κελτιβερική πόλη, που συμμετείχε έντονα στους Κελτιβερικούς Πολέμους (153-133 π.Χ.) ανάμεσα στον λαό της Ιβηρικής χερσονήσου, από το τέλος της Εποχής του Χαλκού τον 13^ο αιώνα π. Χ., έως την κατάκτηση της Ισπανίας από τους Ρωμαίους, τον 1^ο αιώνα π.Χ. (Gillani G., 2007).

Πιο συγκεκριμένα η πόλη κατακτήθηκε από τους Ρωμαίους το 99 π.Χ. και γρήγορα αναπτύχθηκε οικονομικά και πολιτιστικά καθώς οι Ρωμαίοι εστίασαν αρκετά στη συγκεκριμένη περιοχή. Η Uxama Argaela είχε θέα στη σημερινή πόλη El Burgo de Osma στην επαρχία Soria της Ισπανίας. Ήταν ένα στρατηγικό οροπέδιο μιας και βρισκόταν στη μέση ενός από τους κύριους δρόμους της Ιβηρικής Χερσονήσου (εικ.5.1.2), που συνέδεε την Asturica Augusta (Astorga) με την Caesar Augusta (Σαραγόσα). Έτσι μπορούσαν να ελέγξουν την πρόσβαση σε άλλες περιοχές της Ισπανίας αλλά και της Γαλατίας (Gillani G., 2007)



Εικόνα 5.1.2: Χάρτης με την στρατηγική τοποθεσία της Uxama [πηγή: <https://www.traianvs.net/>]

Έτσι οι Ρωμαίοι, στηρίχθηκαν στον πολεμικό και πνευματικό πλούτο των Ισπανών, επενδύοντας χρόνο και πόρους στην περιοχή. Αυτό αποδεικνύεται με την ανέγερση πληθώρας δημόσιων και ιδιωτικών κτιρίων όπως βίλες, καθώς και πολλών ρωμαϊκών οικισμών. Η πόλη διατήρησε την αστική της λειτουργία μέχρι το τέλος της Ύστερης Αρχαιότητας (Prsper B., 2011).

Σύμφωνα με τους ιστορικούς Πλίνιο και Πτολεμαίο, η Uxama Argaela ανήκε σε μια επαρχία που ονομαζόταν Conventus Luridicus Cluniensis στην περιοχή Hispania Tarraconensis της Ρωμαϊκής Ισπανίας (García-Bellido P., 1997). Αργότερα, κατά τη διάρκεια της κυριαρχίας του αυτοκράτορα Τιβέριου, η πόλη μετατράπηκε σε Municipium, ένα είδος αυτόνομης πόλης με δικές της διοικητικές και νομικές δομές. Αυτή η αναβάθμιση σηματοδότησε ένα νέο κεφάλαιο για την πόλη, με την κατασκευή ενός ναού, υδραγωγείων, δεξαμενών, λουτρών και άλλων δημόσιων κτιρίων (εικ.5.1.3). Εντυπωσιακά ερείπια από τα αρχαία τείχη και τα λατομεία κατά μήκος των όχθων του ποταμού Ucero αποτελούν μόνιμα στοιχεία του αρχαιολογικού τοπίου (García Merino et al., 2014).

Τα σημαντικότερα αξιοθέατα της πόλης εκτίθενται στο Μουσείο Soria Celtiberian και στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο στη Μαδρίτη, περιλαμβάνοντας γλυπτά, ρωμαϊκά κιονόκρανα, σιδερένια όπλα, νομίσματα, κεραμικά, γυάλινα αντικείμενα και αρχαιολογικά ευρήματα όπως μπρούτζινα άλογα. Ένα μικρό μουσείο, που λειτουργεί κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, βρίσκεται περίπου 2 km μακριά από το παλιό φρούριο.

Η πόλη αργότερα υποστήριξε τον Ρωμαίο επαναστάτη Quintus Sertorius στις προσπάθειές του εναντίον της κεντρικής κυβέρνησης. Έτσι, το 72 π.Χ., καταστράφηκε από τον στρατηγό Lucius Cornelius Sulla Felix, γνωστό και ως Μέγα Πομπήιο, με αποτέλεσμα τον εκδιωγμό των κατοίκων και την ερημοποίησή της (Merino M., 1997).



Εικόνα 5.1.3: Ιστορικός πύργος της Uxama [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]



Εικόνα 5.1.4: Αεροφωτογραφία του Λόφου της Uxama «El Castro» [πηγή: <https://algargosarte.blogspot.com>]

5.2 Βόρειο υδραγωγείο

Στους πρόποδες της βορειοδυτικής πλαγιάς του λόφου Uxama, μπορείτε να βρείτε και να επισκεφθείτε το τελευταίο γνωστό τμήμα του βόρειου υδραγωγείου (εικ.5.2.1). Δεν γνωρίζουμε ακριβώς το *caput aquae* (πηγή/αφετηρία) αλλά υπολογίζεται από την Garcia Merino ότι η πηγή Cuana del Lago (σπήλαιο λίμνης), στο φυσικό πάρκο Galiana, μάζευε νερό από τη συμβολή του ποταμού Ucero με τον ποταμό Losbos και υδροδοτούσε το υδραγωγείο.

Η αφετηρία λοιπόν υπολογίζεται στα 962 m υψόμετρο (Saenz Ridruejo C., 1985). Σύμφωνα με την Garcia Merino θα έπρεπε να χτίστηκε στο δεύτερο μισό του πρώτου αιώνα μ.Χ. και έχει μήκος πάνω από 18 km. Επίσης η πτώση αφετηρίας-τέλους του υδραγωγείου υπολογίζεται περίπου στα 17 m με αποτέλεσμα μια κλίση 0,07 - 0,08% που δεν είναι ασυνήθιστο στα ρωμαϊκά υδραγωγεία (García Merino et al., 2014).



Εικόνα 5.2.1: Χάρτης με το βόρειο υδραγωγείο της Uxama [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

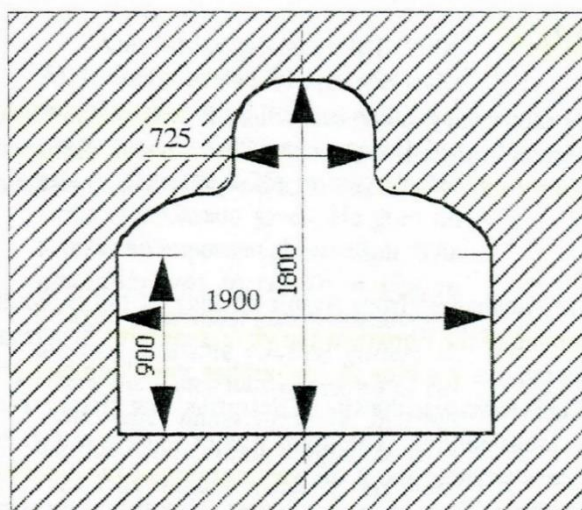
Σχεδόν όλο το μήκος του το υδραγωγείο τρέχει στην ύπαιθρο και έπρεπε να αντιμετωπίσει κάποια φυσικά εμπόδια και να περάσει μέσα από σήραγγες, φράγματα και γέφυρες. Μεταξύ του χωριού Ucero και του λόφου Κάστρο της Uxama, έχουν βρεθεί ερείπια σε αρκετές τοποθεσίες. Ένα από αυτά τα απομεινάρια, η σήραγγα Ucero - τοπικά αποκαλούμενη «La Cueva de la Zorra» (Σπηλιά της αλεπούς) (Merino M., 1997).

5.3 Η σήραγγα Ucero «La Cueva de la Zorra»

Λίγες εκατοντάδες μέτρα από τον ποταμό Ucero, υπάρχει μια σήραγγα λαξευμένη στον βράχο που ήταν μέρος του Βόρειου υδραγωγείου που παρείχε νερό στη ρωμαϊκή πόλη Uxama, από τις πηγές του ποταμού. Πρόκειται για μία σήραγγα, συνολικού μήκους 133 m. Η διατομή της στοάς είχε πλάτος που έφτανε τα 1,90 m και ύψος τα 1,80 m (εικ.5.3.2), γεγονός ασυνήθιστο για τα ρωμαϊκά υδραγωγεία, που δεν ξεπερνούσαν τα 1,20 m (Merino M., 1997).



Εικόνα 5.3.1: Είσοδος στη στοά Ucero [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]



Εικόνα 5.3.2: Διαστάσεις με τη διατομή της στοάς [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

Το πλάτος της στοάς είχε αρκετές διακυμάνσεις μεταξύ των 0,58 – 1,90 m, με αποτέλεσμα η διατομή να θυμίζει ένα αγγείο με ψηλό λαιμό ή το σχήμα αχλαδιού (εικ.5.3.3). Το πέτρωμα της στοάς είναι ασβεστόλιθος αλλά οι Ρωμαίοι για να αποφύγουν τυχόν διαβρώσεις των πετρωμάτων το είχαν καλύψει με ρωμαϊκό σκυρόδεμα, με το οποίο γέμιζαν και τυχόν τρύπες κατά μήκος της σήραγγας.



Εικόνα 5.3.3: Εικόνες με τη διατομή της στοάς [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

Η στοά είχε δύο κυκλικά φρεάτια (κάθετα άξονες ή ανθρωποθυρίδες) που υψώνονται σε 20 και 30 m στην επιφάνεια σε απόσταση 52 m μεταξύ τους, χωρίζοντας έτσι τη στοά σε 3 μικρότερα τμήματα (εικ.5.3.4). Η αποστολή τους ήταν να επιτρέψουν την πρόσβαση σε Ρωμαίους στρατιώτες να κρέμονται από την επιφάνεια με κάποιο σχοινί και να προβαίνουν σε συντήρηση του καναλιού. Όταν ο γεωλόγος Clemente Sáenz Ridruejo έκανε ανασκαφές το 1981 μ.Χ. στην στοά, ανακάλυψε ότι το αρχικό πλάτος της δεν ήταν τόσο μεγάλο και ότι η σήραγγα αρχικά, είχε μικρότερο πλάτος. Αυτή η διεύρυνση περίπου 0,50 – 0,80 cm θεωρεί πως έγινε για να μπορούν οι συντηρητές να εισέρχονται και να καθαρίζουν ευκολότερα τη στοά από ιζήματα και πέτρες (Sáenz Ridruejo, 1985).



Εικόνα 5.3.4: Εικόνα με ανθρωποθυρίδα της στοάς [πηγή: <https://algargosarte.blogspot.com>]

5.4 Οι στέρνες

Το υδραγωγείο μετέφερε το νερό σε στέρνες, οι οποίες με τη σειρά τους αποθήκευαν το νερό. Στον λόφο Uxama έχουν ανασκαφεί περισσότερες από 20 δεξαμενές (στέρνες) που είχαν τη λειτουργία αρχικά να συλλέγουν το νερό και ύστερα να το διανέμουν στους κατοίκους.

5.4.1 Στέρνα «El Arca» (η κιβωτός)

Μια ενδιαφέρουσα δεξαμενή ονομάζεται «El Arca» (η κιβωτός) η οποία εντοπίστηκε στα 978 m υψόμετρο (εικ.5.4.1.1). Είχε εξωτερικές διαστάσεις 7,75 x 4,25 m και εσωτερικές 6 x 2,5 m, με την αποθηκευτική ικανότητα σχεδόν 40 m³. Τα τοιχώματα των 0,90 m ήταν πολύ παχιά για να αντέχουν την ολίσθηση της κατασκευής προς την κοιλάδα.

Είχε αποστραγγιστικές ικανότητες λόγω του «opus caementicium» (Merino C. G., 2010). Το «opus caementicium» είναι ένας τύπος κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην αρχαία Ρωμαϊκή αρχιτεκτονική. Είναι ένα μίγμα από άμμο, ψιλούς λίθους, ρωμαϊκό τσιμέντο και νερό. Αυτό το μίγμα ήταν εξαιρετικά ανθεκτικό και επιτρεπόταν να πλάθεται εύκολα σε διάφορα σχήματα και δομές. Χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την κατασκευή τοίχων, καμάρων, θεμελίων και άλλων κατασκευών στην αρχαία Ρώμη και σε άλλες περιοχές της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Παρόλο που η παρουσία στεγανού ρωμαϊκού σκυροδέματος στους τοίχους και τα δάπεδα δείχνει ότι αυτή η δεξαμενή ήταν κατάλληλη για την αποθήκευση νερού, θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση σιταριού. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ομοιότητες στη μορφή της με άλλες δεξαμενές που είχαν αυτό το σκοπό, χωρίς ωστόσο να υπάρχει απόδειξη ότι χρησιμοποιήθηκαν γι' αυτόν το σκοπό.

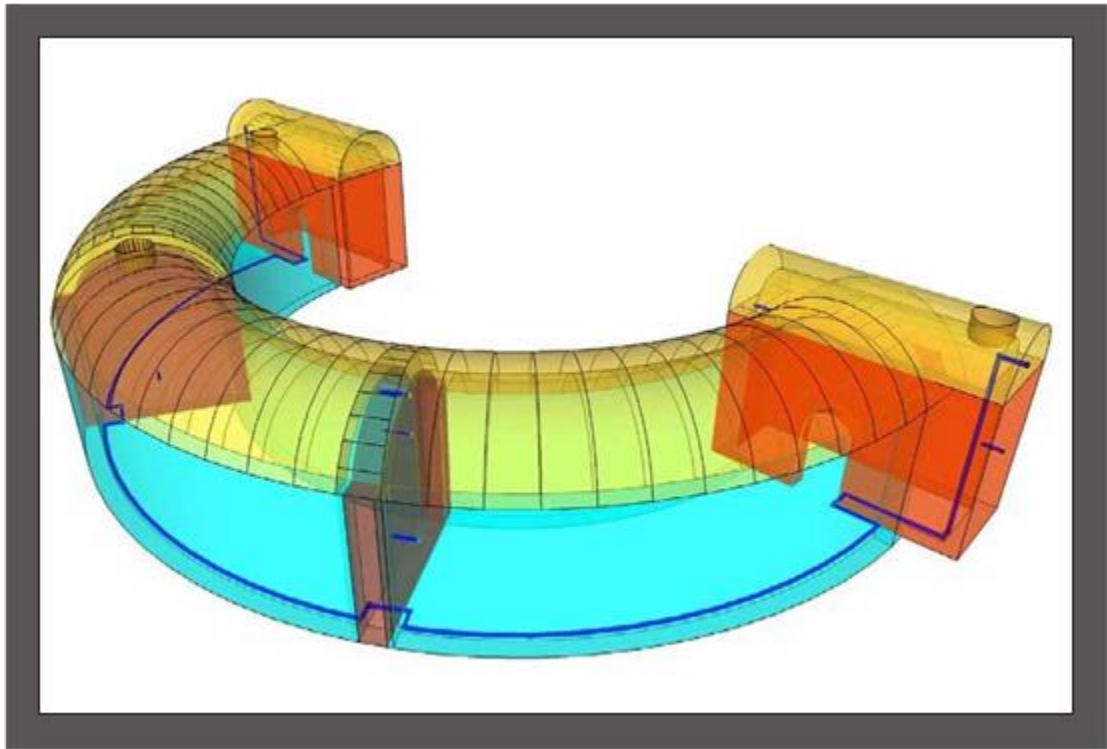


Εικόνα 5.4.1.1: Εικόνα με τη διατομή της στοάς [πηγή: (Merino, C. G. 1996)]

5.4.2 Στέρνα σε σχήμα ωμέγα

Η συγκεκριμένη δεξαμενή βρέθηκε σε 989 m υψόμετρο και ανακαλύφθηκε τυχαία το 1938 μ. Χ. όταν ένα άνοιγμα στην οροφή έμεινε ανοικτό. Είναι μία κυκλική, σε σχήμα πέταλου δεξαμενή, χωρισμένη σε τρία μεγάλα καμπύλα τμήματα και δύο μικρότερα ορθογώνια τμήματα (εικ.5.4.2.1). Η χωρητικότητά της είναι 320 m³ με το κυρτό τμήμα να έχει περίμετρο 28 m, πλάτος 2,70 m και ύψος 4 m. Στις άκρες υπάρχουν δύο ορθογώνιες δεξαμενές με διαστάσεις 4,20m και 4,50m αντίστοιχα σε μήκος και 1,32 και 1,05 m σε πλάτος.

Οι καμπύλες ήταν χωρισμένες έτσι ώστε η μόνη επικοινωνία του νερού ήταν μέσω σωλήνων σε διαφορετικά ύψη. Οι σωλήνες, πιθανόν από μόλυβδο, δεν έχουν βρεθεί γιατί λεηλατήθηκαν. Για την κατασκευή οι Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν ξυλότυπους από θόλους βαρελιών. Αυτή η δομική τεχνική χρησιμοποιήθηκε αρκετά στην αρχαία αρχιτεκτονική για τη δημιουργία οροφών ή οροπεδίων που έχουν κυρτές καμπύλες επιφάνειες.



Εικόνα 5.4.2.1: Εικόνα με δεξαμενή σε σχήμα Ω [πηγή: (Merino C. G. 1996)]

Τα βαρέλια σε αυτόν τον τύπο οροφής στηρίζονται το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργώντας μια ομαλή, κυρτή επιφάνεια. Το δάπεδο και οι αρμοί ήταν αδιαβροχοποιημένοι. Χρησιμοποιήθηκαν υλικά και μορφές κατασκευής που ήταν χαρακτηριστικά της ρωμαϊκής αρχιτεκτονικής (García Merino et al., 2014).

Το «opus signinum» ή αλλιώς «κοκκινωπός σοβάς» είναι μια αρχαία τεχνική οικοδομής που χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία. Αποτελείται από ένα μίγμα ασβεστοκονιάματος ή άμμου και πρόσθετα υλικά όπως κεραμικά, ψηφίδες ή κομμάτια μάρμαρου. Όταν αυτό το μίγμα ξηραίνεται, γίνεται σκληρό και αδιάβροχο, κατάλληλο για χρήση ως δάπεδο ή επίστρωση. Συχνά το χρησιμοποιούσαν σε δημόσια κτίρια, μπάνια ή άλλους εσωτερικούς χώρους όπου ήταν αναγκαία η αδιαβροχοποίηση. Σήμερα κάποιος μπορεί να επισκεφτεί από κοντά αυτή τη δεξαμενή στο αρχαιολογικό μουσείο «Uxama Ruins» (Ερείπια της Ουξάμα) που βρίσκεται στη περιοχή El Burgo de Osma (εικ.5.4.2.2).



Εικόνα 5.4.2.2: Εικόνα με τις δύο εισόδους στη δεξαμενή σε σχήμα Ω [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

Οι σκάλες βρίσκονται στο δυο ορθογώνια τμήματα της δεξαμενής. Εάν οι τρύπες στην οροφή είναι πρωτότυπες, τότε χρησιμοποιούν ως πηγάδι για την άντληση νερού. Επίσης μπορεί κάποιος να διακρίνει το κοκκινωπό χρώμα του σοβά στο εσωτερικό της στοάς.

5.5 Μέθοδος ανύψωσης του νερού με την τεχνική Noria

Το βόρειο υδραγωγείο ξεκινούσε από τα 962 m υψόμετρο και οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι τερμάτιζε σε μία λεκάνη απορροής στα 945-947 m υψόμετρο (CASADO F., 1985). Συνδυάζοντας τα υψόμετρα των δεξαμενών (989 m στην δεξαμενή τύπου ωμέγα και 978 m στην δεξαμενή «Κιβωτό») με το υψόμετρο του βόρειου υδραγωγείου, προκύπτει το ερώτημα, πως οι Ρωμαίοι κατάφερναν να ανεβάζουν το νερό σε τόσο ψηλότερο ύψος,

Η G. Merino υποθέτει ότι οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν μία μέθοδο για να ανεβάζουν το νερό από την τερματική λίμνη του βόρειου υδραγωγείου στις δεξαμενές, την πολύφημη noria (Merino C. G., 2010). Κοντά στις δεξαμενές έχει βρεθεί και ένα βαθύ πηγάδι, με τον πάτο του να υπολογίζεται στα 945 m υψόμετρο κοντά στη λίμνη-απόληξη του υδραγωγείου, γεγονός που ενισχύει τις εικασίες αναφορικά με την εφαρμογή της μεθόδου.

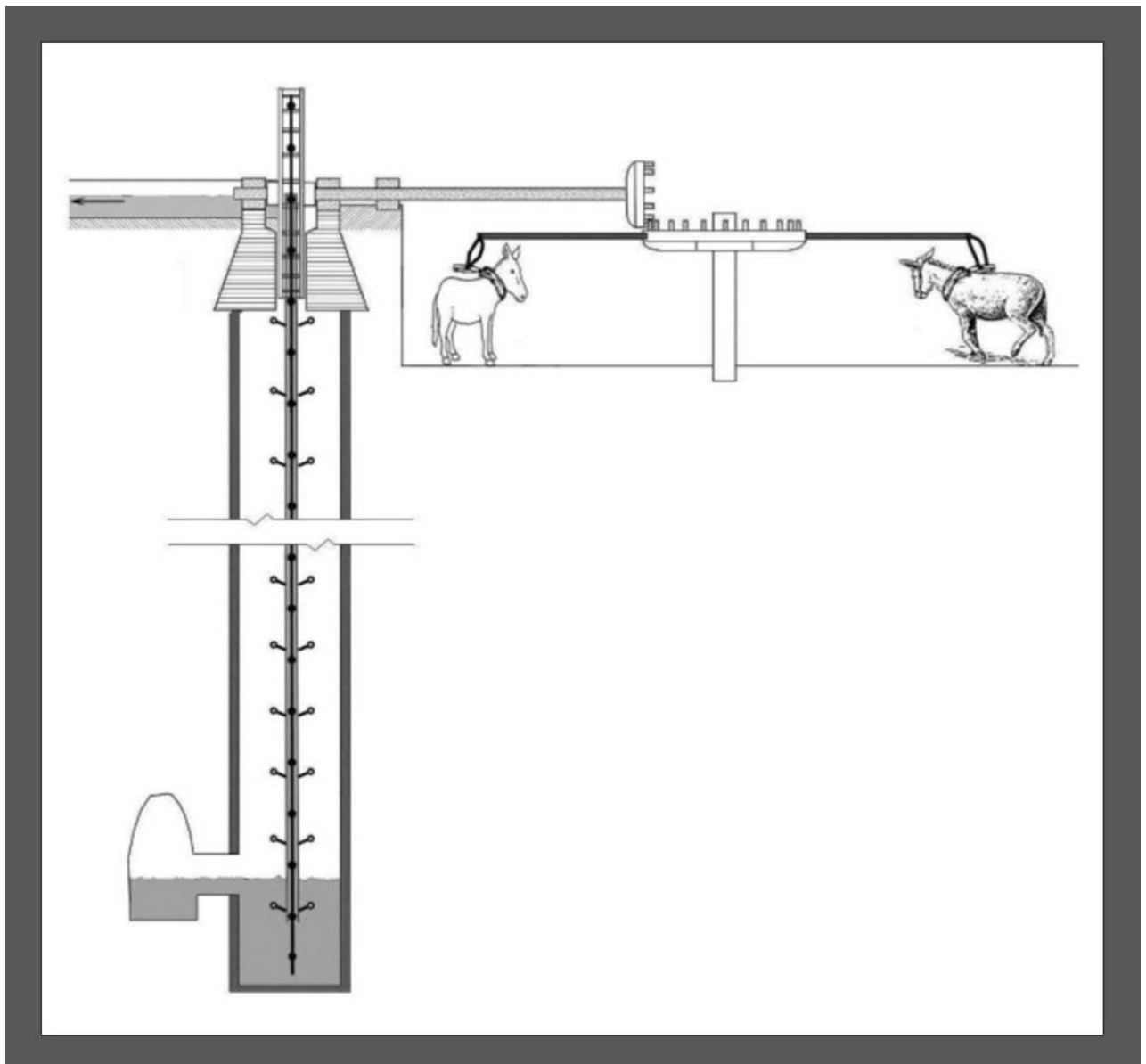
Η μέθοδος ανύψωσης νερού "noria" είναι μια αρχαία τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού από φράγματα, ποτάμια ή πηγές σε περιοχές που χρειάζονται πόσιμο νερό ή για άρδευση γεωργικών εκτάσεων. Είναι ένας τύπος αντλίας νερού που βασίζεται σε τροχούς, σέσουλες, αλυσίδες και στις περισσότερες περιπτώσεις ζώα όπως γαϊδούρια, βόδια ή ακόμα και άλογα.

Οι τροχοί ανύψωσης νερού με σέσουλες εμφανίστηκαν στην αρχαία Αίγυπτο τον 4ο αιώνα π.Χ. συνδυάζοντας την εκμετάλλευση του ανέμου ή ζώων για την λειτουργία τους (Oleson John Peter, 1984).

Ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας Βιτρούβιος αναφέρει ότι γύρω στο 300 π.Χ. οι Ρωμαίοι κατέληξαν στην τελική μορφή αυτού του υδροτροχού με το όνομα *norgia* (Moritz L. A., 1956). Τα τελευταία χρόνια ανακαλύπτονται όλο και περισσότερα τέτοια συστήματα υδροδότησης σε διάφορα μέρη της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, τόσο σε ορυχεία όσο και σε αστικά δίκτυα. Στις αγροτικές ωστόσο περιοχές δεσπόζουν οι ανεμόμυλοι. Ακριβής περιγραφή για τον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού της *norgia* δεν υπάρχει μιας και η εφαρμογή ποίκιλε ανάλογα το σκοπό και το ανάγλυφο του εδάφους. Θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας βασισμένοι σε περιγραφές της G. Merino (Merino C. G., 2010).

Στο εσωτερικό ενός πηγαδιού θεωρούμε ότι υπάρχει ένας εγκάρσιος, όρθιος σωλήνας που συνδέει την πηγή με τη δεξαμενή (εικ.5.5.1). Εντός του σωλήνα υπάρχουν αρκετοί κυκλικοί δίσκοι που είναι τοποθετημένοι-κολλημένοι σε μια αλυσίδα. Καθώς η αλυσίδα τραβιέται πάνω στην κορυφή του σωλήνα, το νερό παγιδεύεται ανάμεσα στους δίσκους, στο εσωτερικό του σωλήνα και ανυψώνεται διαχυμένο στην κορυφή.

Ζώα τα οποία φορούν λουριά, κινούμενα περιστροφικά, δίνουν ενέργεια σε δύο τροχούς, οι οποίοι λειτουργώντας σαν γρανάζια, περιστρέφουν την αλυσίδα. Η G. Merino αναφέρει ότι μία ικανοποιητική διάμετρο για το πηγάδι είναι στα 2 m, ενώ θα έπρεπε ο σωλήνας να έχει διάμετρο 10 cm για να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός ρυθμός ροής στα 16 L/s (Merino, C. G., 2010).



Εικόνα 5.5.1: Αποτύπωση μεθόδου Noria [πηγή: (Merino C. G., 2010)]

5.5.1 Σύγκριση απόδοσης των βοδιών με τον άνθρωπο και τη σύγχρονη αντλία

Έχοντας λοιπόν σαν δεδομένα ότι η διάμετρος σωλήνα είναι 10 cm (0.1 m), ότι ο ρυθμός ροής είναι $16 \text{ L/s} = 0,016 \text{ m}^3/\text{s}$ και ότι η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι 320 m^3 , θα κάνουμε τους παρακάτω υπολογισμούς για να δούμε πόσο χρόνο θα χρειαζόταν το σύστημα πογία κάνοντας χρήση βοοειδών, αλλά και πόσο χρόνο θα κάνει με την αξιοποίηση ανθρώπων. Επίσης θα συγκριθεί χρονικά και κοστολογικά, με μία σύγχρονη αντλία 5 kW, ως προς το γέμισμα της δεξαμενής σε σχήμα Ω, σε υψόμετρο 989 m από την πηγή σε υψόμετρο 945 m.

Υποθέτοντας ότι η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλικών δίσκων είναι $h = 0,5$ m, με τον τύπο του όγκου κυλίνδρου βρίσκουμε ότι :

$$\text{Όγκος μεταξύ δίσκων} = \pi \times (0.05)^2 \times 0.5 = 0,003927 \text{ m}^3 \quad (20)$$

Άρα οι δίσκοι μεταξύ τους είχαν χωρητικότητα περίπου $0,003927\text{m}^3 \times 1000 = 3,927$ L.

Αν θεωρήσουμε την απόσταση μεταξύ δύο δίσκων ως « κουβά », με δεδομένο ότι η δεξαμενή είχε χωρητικότητα 320 m^3 και με χωρητικότητα κάθε κουβά $0,003927\text{m}^3$, τότε για να γεμίσει πλήρως η δεξαμενή:

$$\text{Αριθμός κουβάδων} = \frac{320 \text{ m}^3}{0.003927 \text{ m}^3} \approx 81.490 \text{ κουβάδες.} \quad (21)$$

Η ενέργεια που χρειάζεται για να ανεβεί αυτό το νερό, με βάρος $320 \text{ m}^3 \times 1.000 \text{ kg/m}^3 = 320.000$ kg, σε ύψος 44 m, για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής από δυναμική ενέργεια είναι:

$$\text{Απαιτούμενη ενέργεια (J)} = 320.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 44 \text{ m} = 138.124.800 \text{ J} \quad (22)$$

$$\text{Απαιτούμενη ενέργεια (kWh)} = \frac{138.124.800 \text{ J}}{3.600.000 \text{ J/kWh}} = 38,37 \text{ kWh} \quad (23)$$

Η ισχύς ενός βοδιού υπολογίζεται στα 540 W (Sims et al., 2003). Στο σύστημα της αρχαίας πορτα είχαμε στο μογλοβραχίονα 2 ζώα. Άρα είχαμε ισχύ $2 \times 540 = 1080$ W ή 1,08 kW. Άρα για να ανεβάσουν το νερό για ένα γέμισμα θα χρειαζόντουσαν:

$$\text{Χρόνος βοδιών} = \frac{138.124.800 \text{ J}}{1.080 \text{ J/s}} \approx 127.893,33 \text{ s ή } 35,52 \text{ h} \quad (24)$$

Με την υπόθεση ότι τα βόδια έδιναν ενέργεια στην αλυσίδα 10 h την μέρα θα χρειαζόνταν περίπου 3.55 μέρες για να ανεβάσουν το νερό και να γεμίσει πλήρως η δεξαμενή. Τα 2 βόδια θα καταλάωναν για μία μέρα δουλειάς:

$$\text{Ενέργεια βοδιών σε μία εργάσιμη μέρα} = 1,08\text{kW} \times 10 \text{ h} = 10,8 \text{ kWh} \quad (25)$$

Για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής θα καταλάωναν:

$$\text{Ενέργεια βοδιών για 1 γέμισμα δεξαμενής} = 10,8 \text{ kWh/d} \times 3,55 \text{ d} = 38,34 \text{ kWh} \quad (26)$$

Ένας άνθρωπος υπολογίζεται ότι έχει ισχύ 120 W (Sargentis et al., 2021). Έστω ότι στο σύστημα της αρχαίας ποδιά είχαμε στο μοχλοβραχίονα 2 ανθρώπους . Άρα είχαμε ισχύ $2 \times 120 = 240 \text{ W}$ ή 0,24 kW. Άρα για να ανεβάσουν το νερό για ένα γέμισμα θα χρειαζόντουσαν:

$$\text{Χρόνος ανθρώπων} = \frac{138.124.800 \text{ J}}{240 \text{ J/s}} = 575.520 \text{ s} \text{ ή } 159,87 \text{ h} \quad (27)$$

Με την υπόθεση ότι οι εργάτες έδιναν ενέργεια στην αλυσίδα 10 h την μέρα θα χρειάζονταν περίπου 15,98 μέρες για να ανεβάσουν το νερό και να γεμίσει πλήρως η δεξαμενή. Οι 2 άνθρωποι θα καταλάωναν για μία μέρα δουλειάς:

$$\text{Ενέργεια ανθρώπων σε μία εργάσιμη μέρα} = 0,24 \text{ kW} \times 10 \text{ h} = 2,4 \text{ kWh} \quad (28)$$

Για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής θα καταλάωναν:

$$\text{Ενέργεια ανθρώπων για 1 γέμισμα δεξαμενής} = 2,4 \text{ kWh/d} \times 15,89 \text{ d} = 38,14 \text{ kWh} \quad (29)$$

Αν γινόταν χρήση σύγχρονης αντλίας με ισχύ 5 kW ο χρόνος λειτουργίας για να ανυψώσει το νερό θα ήταν:

$$\text{Χρόνος αντλίας} = \frac{138.124.800 \text{ J}}{5.000 \text{ J/s}} \approx 27.624,96 \text{ s} \text{ ή } 7,67 \text{ h} \quad (30)$$

Για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής θα καταλάωναν:

$$\text{Ενέργεια αντλίας για 1 γέμισμα δεξαμενής} = 5 \text{ kW} \times 7,67 \text{ h} = 38,35 \text{ kWh} \quad (31)$$

5.5.2 Σύγκριση κόστους του πορτία με σύγχρονη αντλία

Κόστος λειτουργίας βοδιών

Τα βόδια είναι χορτοφάγα ζώα και τρέφονται κυρίως με χόρτο, τριφύλλι και σιτηρά. Ένα βόδι 500 kg, καταναλώνει 8 kg τροφής την ημέρα (Fall, A., Pearson et al., 1997). Άρα μιλάμε για ετήσια κατανάλωση ενός βοδιού:

$$\text{Ετήσια κατανάλωση βοδιού} = 8\text{kg/d} \times 365 = 2.920 \text{ kg/έτος} \quad (32)$$

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.2, κατά τη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία ένας λεγεωνάριος λάμβανε ως ημερομίσθιο 13,2 ασάρια με τα οποία μπορούσε να αγοράσει 7,6 kg σιτάρι (Sargentis et al., 2022). Για να σιτίσεις ένα ζεύγος βοδιών εκείνη την εποχή, χρειαζόταν 16 kg σιταριού ανά ημέρα, το οποίο μεταφράζεται σε ημερομίσθιο 2,1 λεγεωνάριων.

Πίνακας 5.1 Ημερομίσθια σε σιτάρι στην Αυτοκρατορία της Ρώμης 1ος αι. μ.Χ. (Sargentis et al., 2022)

Είδος εργασίας	Ημερομίσθιο (Ασάρια)	Ημερήσιο μισθό σίτου (λίτρα)
Αγγελιαφόρος	4.7	3.4
Haruspex (μάντης)	5.2	3.8
Μέση αμοιβή εργατών στην Πομπηία	8.0	4.4
Ομιλητής	6.3	4.6
Εξειδικευμένοι ανθρακωρύχοι στην αγροτική Δακία	10.0	5.5
Γραμματέας	7.9	5.7
Εργάτης σε αγρόκτημα	7.2	6.3
Οδηγοί βοδιών	8.5	7.4
Λεγεωνάριος Στρατιώτης (Ιδιωτικός)	13.2	7.6
Ανάδοχος για οδηγούς βοδιών	17.1	14.9
Ανάδοχος αρμόδιος για έργα ύδρευσης	21.3	18.6
Πραιτοριανός (φρουρός στη Ρώμη)	31.5	22.9
Λεγεωνάριος Στρατιώτης (Centurion)	157,38	114,49

Συνεπώς ένα γέμισμα της δεξαμενής σε σχήμα «Ω», θα χρειαζόνταν 3,55 ημέρες και θα στοίχιζε 98,4 ασάρια, τα ημερομίσθια δηλαδή 6,3 λεγεωνάριων.

Κόστος λειτουργίας αντλίας

Η τιμή της kWh στην Ελλάδα αυτή τη στιγμή είναι στα 0,11 €/kWh (<https://www.pir.gr/timi-kilonatorias/>). Συνεπώς ένα γέμισμα της δεξαμενής σε σχήμα «Ω» θα στοίχιζε :

$$\text{Κόστος αντλίας} = 38,35 \text{ kWh} \times 0,11 \text{ €/kWh} = 4,22 \text{ €} \quad (33)$$

Το κατώτατο ημερομίσθιο στην Ελλάδα είναι 37.07 € (www.kepea.gr/katotatos-apo-1-apriliou-2024#). Αν το συγκρίνουμε με το σύγχρονο ημερομίσθιο ενός εργάτη βρίσκουμε ότι:

$$\text{Ποσοστό αντλίας σε σχέση με σύγχρονο ημερομίσθιο} = \left(\frac{4,22}{37,07} \right) \times 100 = 11,38 \% \quad (34)$$

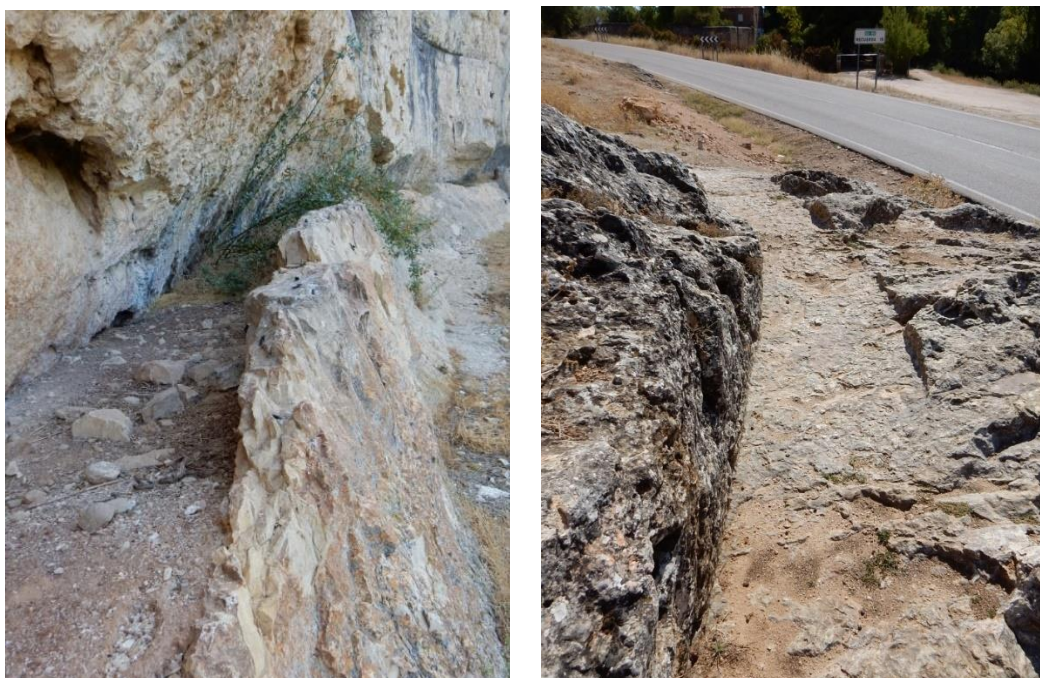
Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αντλία θα γέμιζε τη δεξαμενή με κόστος 4,22 € το οποίο αντιστοιχεί στο 11,38 % από το σύγχρονο ημερομίσθιο ενός εργάτη.

5.6 Ανατολικό υδραγωγείο

Αξίζει να αναφερθεί άλλο ένα υδραγωγείο που λειτούργησε στην ανατολική πλευρά της Uxama. Δεν είναι πολλά γνωστά για τη χρονολογία αυτού του υδραγωγείου, πέραν του ότι φτιάχτηκε την εποχή της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας και ότι σκοπός του ήταν να παρέχει νερό κυρίως για αγροτικές καλλιέργειες καθώς και εξορύξεις στην περιοχή Uxama (Merino C. G., 2010).

Το ανατολικό υδραγωγείο του Uxama έχει την πηγή του (caput aquae) ψηλότερα από το βόρειο, στον ποταμό Ucero. Από εκεί ακολουθούσε την αριστερή όχθη ενός φαραγγιού, κοντά στον ποταμό προς τη γέφυρα Portuguί (εικ.5.6.1). Αυτό το τμήμα ήταν ακόμα καλά διατηρημένο τον 18^ο αιώνα όταν εφευρέθηκε από τον Loperráez (Merino C. G., 2010). Σήμερα έχουν επιβιώσει πολύ λίγα ερείπια, λόγω της κατασκευής του δρόμου από το Μπούργκο ντε Όσμα προς το Γκορμάζ,, με το πιο σημαντικό ένα τμήμα ενός καναλιού μήκους 30 m, λαξευμένο στο βράχο, σε ύψος 1,2 m και πλάτος 1 m, με ένα στηθαίο στα 0,5 m.

Έξω από το φαράγγι έχουν ανασκαφεί και άλλα τμήματα του υδραγωγείου. Φαίνεται ότι ένα από τα κανάλια, είχε πλάτος 0,40 m και βάθος 0,30 m, χρησιμοποιήθηκε για άρδευση και τροφοδοσία διαφόρων αγροτικών οικισμών. Ένα άλλο τμήμα φαίνεται να κατευθύνεται προς μια βιομηχανική περιοχή του Ladrillejos έχει πλάτος 0,35 m και βάθος 0,12 m (Merino, C. G., 2010).



Εικόνα 5.6.1: Ανατολικό υδραγωγείο [πηγή: <http://www.romanaqueducts.info/>]

6 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Συμπεράσματα Μέρος 1: Ενέργεια στις προβιομηχανικές κοινωνίες

- Η βέλτιστη ποσότητα φορτίου που μπορεί να μεταφέρει ένας άνδρας εξαρτάται από τη ζήτηση για οξυγόνο, το μεταφερόμενο φορτίο και την ταχύτητα βάδισης. Για παράδειγμα, με ζήτηση οξυγόνου 1,2 L/min (περίπου 50% της μέγιστης ικανότητας εργασίας) και ταχύτητα βάδισης 45 m/min, το βέλτιστο φορτίο είναι περίπου 43 kg.
- Η ανάλυση των εργονομικών παραμέτρων κατά τη χρήση του φτυαριού αναδεικνύει τη σημασία της προσαρμογής των εργαλείων και των μεθόδων εργασίας για την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση της φυσικής καταπόνησης. Ο βέλτιστος ρυθμός εργασίας για το φτυάρισμα εντοπίζεται μεταξύ 18 και 21 φτυαριές ανά λεπτό, ενώ το φορτίο του φτυαριού πρέπει να κυμαίνεται από 5 έως 7 kg για να διατηρείται ο ρυθμός φτυαρίσματος στις 15 έως 20 φτυαριές ανά λεπτό και να αυξάνεται στα 8 kg για ρυθμό 6 έως 8 φτυαριές ανά λεπτό. Η ιδανική απόσταση ρίψης υπολογίζεται στα 1,2 m κατά μήκος, με το ύψος ρίψης να κυμαίνεται από 1 έως 1,3 m. Η γωνία ανύψωσης του φτυαριού εντοπίζεται περίπου στις 32°, και συνιστάται η χρήση μακριάς λαβής εργαλείου, μεγάλης τετράγωνης λεπίδας για φτυάρισμα και στρογγυλής λεπίδας για σκάψιμο για τη μείωση του βάρους του φτυαριού.
- Η βελτίωση των εργονομικών χαρακτηριστικών των αγροτικών εργαλείων, όπως η τσάπα, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αποδοτικότητα και να μειώσει την κόπωση των εργαζομένων. Η ιδανική τσάπα πρέπει να έχει βάρος περίπου 2 kg, με γωνία μεταξύ της λεπίδας και της λαβής να κυμαίνεται από 65° έως 70°. Το μήκος της λαβής συνιστάται να είναι μεταξύ 70 και 75 cm, ενώ το μήκος της λεπίδας πρέπει να είναι από 25 έως 30 cm. Το πλάτος της λεπίδας πρέπει να κυμαίνεται από 22 έως 24 cm και η διάμετρος της λαβής από 3 έως 4 cm. Το σχήμα της λεπίδας μπορεί να είναι ορθογώνιο, τραπεζοειδές, τριγωνικό ή κυκλικό, ανάλογα με τον σκοπό και τις προτιμήσεις των τοπικών χρηστών.
- Η καλλιεργητική διαδικασία απαιτεί σημαντική χειρωνακτική εργασία, με το 8% του συνολικού χρόνου εργασίας να αφιερώνεται στη διασπορά σπόρων, το ξερίζωμα και τη μεταφύτευση δενδρυλλίων. Συγκεκριμένα, για τη μεταφύτευση σπορόφυτων ανά εκτάριο γης, απαιτούνται περίπου 85 ανθρωπόωρες. Η διαδικασία τοποθέτησης των σπόρων γίνεται είτε με το χέρι είτε με τη χρήση σποροτρύπανου (dibble), με τις βασικές αποστάσεις φύτευσης να είναι 15 x 15 cm ή 25 x 25 cm.

- Η αφαίρεση των ζιζανίων αποτελεί μια σημαντική και απαιτητική εργασία στη γεωργία, με περίπου το 15% της ανθρώπινης εργασίας να δαπανάται για αυτό το σκοπό. Τα ζιζάνια μπορούν να μειώσουν την απόδοση της σοδιάς κατά 10% έως 60%, ανάλογα με την πυκνότητα και το είδος τους. Ένας εργάτης ξοδεύει περίπου 190 έως 220 ώρες για να ξεβοτανίσει ένα εκτάριο γης με το χέρι. Το βοτανιστήρι, που αποτελείται από έναν ή δύο τροχούς, μια λεπίδα, ένα πλαίσιο και μια λαβή, απαιτεί δύναμη ώθησης ή έλξης περίπου 5 έως 20 kg και λειτουργεί με συχνότητα 20 έως 40 κρούσεων ανά λεπτό. Η χρήση βοτανιστηρίου τύπου δρεπανιού με τροχό μειώνει την καταπόνηση και απαιτεί περίπου 110 έως 140 ανθρωπόωρες για να καλυφθεί ένα εκτάριο.
- Η συγκομιδή στις καλλιέργειες ρυζιού και σιταριού απαιτεί από 8% έως 10% των συνολικών ανθρωποωρών που δαπανώνται στη φυτική παραγωγή. Το δρεπάνι, το οποίο αποτελείται από μια κυρτή λεπίδα με λεία ή οδοντωτή άκρη και στερεωμένη σε ξύλινη λαβή, παρουσιάζει απόδοση που κυμαίνεται από 110 έως 165 m³ ανά ώρα. Αυτό αντιστοιχεί σε 90 έως 60 ανθρωπόωρες ανά εκτάριο γης.
- Η εργασία σε άβολες στάσεις μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες κλινικές επιπλοκές που σχετίζονται με την πλάτη και τις αρθρώσεις των άκρων. Η συγκομιδή σε λυγισμένη στάση προσφέρει κινητικότητα και ευελιξία, τόσο σε ξηρό όσο και σε υγρό έδαφος, και είναι περίπου 16% ταχύτερη από την όρθια στάση. Ωστόσο, η λυγισμένη στάση απαιτεί 18% περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με την καθιστή ή γονατιστή στάση. Η εργασία σε άβολες στάσεις μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες κλινικές επιπλοκές που σχετίζονται με την πλάτη και τις αρθρώσεις των άκρων.
- Η συγκομιδή σε λυγισμένη στάση προσφέρει κινητικότητα και ευελιξία, τόσο σε ξηρό όσο και σε υγρό έδαφος, και είναι περίπου 16% ταχύτερη από την όρθια στάση. Ωστόσο, η λυγισμένη στάση απαιτεί 18% περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με την καθιστή ή γονατιστή στάση.
- Το δρεπάνι ζυγίζει περίπου 200 gr, έχει συνολικό μήκος 33 cm και η λαβή του φτάνει τα 11 cm. Η διάμετρος της λαβής είναι 3 cm, η ακτίνα καμπυλότητας της λεπίδας είναι 15 cm και η κοιλότητα της λεπίδας είναι 5 cm. Το οδοντωτό δρεπάνι πρέπει να έχει βήμα δοντιού 0,2 cm, με τα δόντια τοποθετημένα στη λεπίδα υπό γωνία 60°.
- Η χρήση ζώων για την έλξη φορτίων και εργαλείων στην αγροτική παραγωγή απαιτεί προσεκτική διαχείριση της υποδύναμης και της ανθρώπινης ενέργειας. Για την έλξη φορτίου με βάρος βύθισης 85 κιλών και ταχύτητα 3,2 km/h σε επίπεδο έδαφος απαιτείται 1 ίππος (hp). Σε εδάφη με κλίση 5% και 10%, η απαιτούμενη υποδύναμη αυξάνεται σε

3,3 και 5,7 hr αντίστοιχα. Η προσαρμογή του φορτίου πρέπει να γίνεται ανάλογα με την ποιότητα και την επιφάνεια της διαδρομής καθώς και την ικανότητα των ζώων να παράγουν επαρκή ιπποδύναμη.

- Ένα ζευγάρι βοδιών μπορεί να οργώσει περίπου 0,4 εκτάρια γης σε μία ημέρα, αποδίδοντας ιπποδύναμη ίση με 1 hr. Οι δοκιμές των βαγονιών έδειξαν μεγαλύτερο βύθισμα σε λασπωμένους δρόμους και οργωμένο έδαφος, ανεξάρτητα από το ύψος ή το πλάτος του τροχού. Η πρόσφυση ήταν καλύτερη για τους τροχούς με μεγαλύτερο πλάτος σε σκληρή επιφάνεια.
- Η λειτουργία των εργαλείων που έλκονται από ζώα απαιτεί σημαντική ανθρώπινη ενεργειακή δαπάνη. Για ένα άροτρο με υνί πλάτους 15 cm, ένα άτομο χρειάζεται να περπατήσει περίπου 67 km για να καλύψει μια περιοχή 1 εκταρίου, με ταχύτητα 1,5 km/h, δαπανώντας περίπου 21 kJ/min (περίπου 5.6×10^4 kJ/ha). Το βέλτιστο ύψος της λαβής ενός εργαλείου ορίζεται μεταξύ 64 και 84 cm (1,0 έως 1,2 φορές το ύψος του μετακαρπίου III του χειριστή).
- Η ενεργειακή απόδοση της μυϊκής εργασίας των ζώων μετριέται με βάση την κατανάλωση οξυγόνου και όχι από τη μετατροπή της τροφής σε ενέργεια. Η μέγιστη ενεργειακή απόδοση που μετρήθηκε για άλογα έλξης ήταν σχεδόν 25% για την ακαθάριστη απόδοση, 28% για την καθαρή απόδοση και 35% για την απόλυτη απόδοση, με την ακαθάριστη απόδοση να είναι η πιο ακριβής. Αν συμπεριληφθεί το ενεργειακό κόστος της μετατροπής της τροφής, η συνολική απόδοση των αλόγων μειώνεται στο 10 με 15% και των βοδιών στο 9 με 10%.
- Τα μικρά ζώα μπορούν να τραβήξουν ή να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία από τα μεγάλα ζώα, αναλογικά με το βάρος τους. Τα άλογα με βάρος 680 έως 862 kg είναι πιο αποδοτικά όταν εργάζονται με ρυθμό 1,0 hr, παράγοντας έλξη ισοδύναμη με το 10% του σωματικού τους βάρους, περπατώντας με ταχύτητα 3,5 έως 4 km/h για 32 km την ημέρα για μια περίοδο δύο ετών. Οι νεροβούβαλοι, τραβώντας φορτίο 80 έως 100 kg, επιτυγχάνουν μέγιστη ακαθάριστη απόδοση 23,5% και καθαρή απόδοση 28,5%, με ιπποδύναμη που κυμαίνεται από 0,8 έως 1,2 hr. Οι γάιδαροι μπορούν να τραβήξουν το 16 έως 20% του βάρους τους με ταχύτητα 2,5 έως 2,8 km/h για 3 έως 3,5 ώρες.
- Η χρήση ζώων σε ομάδες για την έλξη φορτίων οδηγεί σε απώλεια ενεργειακής απόδοσης ανά ζώο. Η απώλεια αυτή ανέρχεται σε 7,5% για δύο ζώα, 15% για τρία, 22% για τέσσερα, 30% για πέντε και 37% για έξι ζώα. Για παράδειγμα, αν ένα ζώο βάρους 450

kg μπορεί να παράγει έλξη ίση με το 10% του βάρους του (45 kg), ένα ζευγάρι ζώων της ίδιας δύναμης θα αναπτύξει συνολική έλξη 83 kg αντί για 90 kg.

- Η συνολική έλξη αυξάνεται με τη χρήση περισσότερων ζώων, αλλά η έλξη ανά ζώο μειώνεται. Η προσθήκη περισσότερων ζώων μπορεί να είναι απαραίτητη για την παροχή επαρκούς δύναμης για την ολοκλήρωση της εργασίας. Για παράδειγμα, τα εκτάρια που σβαρνίστηκαν από ομάδα έξι αλόγων ήταν 4% περισσότερα από αυτά που σβαρνίστηκαν από ομάδα τεσσάρων αλόγων, όταν τραβούσαν σβάρνες πλάτους 6,1 m, ενώ ήταν λιγότερα από την ομάδα πέντε αλόγων. Η διαφορά στα εκτάρια που σβαρνίστηκαν μεταξύ ομάδων τεσσάρων και πέντε αλόγων που τραβούσαν σβάρνες πλάτους 7,3 μέτρων ήταν μόνο 8%.
- Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα αποτελέσματα, όπως το βάρος των ζώων, η εμπειρία του οδηγού, η επιφάνεια και η κλίση του δρόμου ή της γης, η έλξη του εργαλείου, το φορτίο, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του κολάρου ή του ζυγού, το επίπεδο διατροφής, η υγεία και η εκπαίδευση του ζώου.

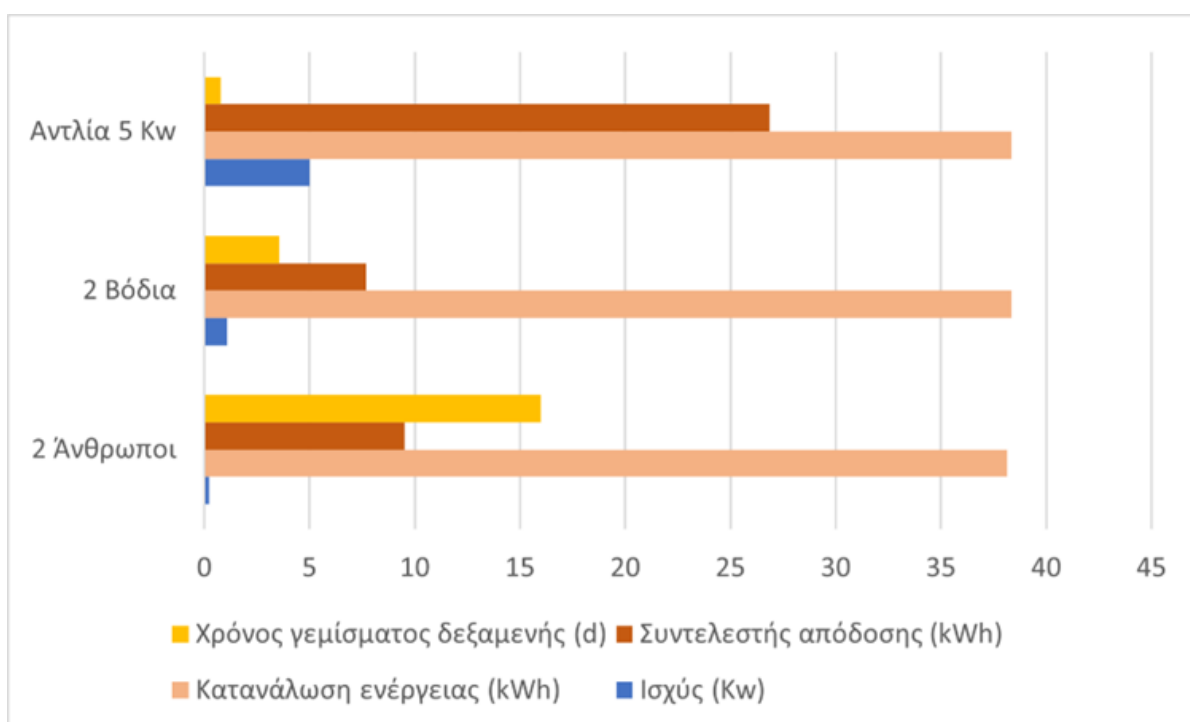
Συμπεράσματα Μέρος 2: Νερό και ενέργεια στα Ρωμαϊκά Υδραγωγεία

- Η αρχαία υδραυλική τεχνογνωσία, όπως περιγράφεται από τον Βιτρούβιο, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την επιλογή και τη διαχείριση πηγών νερού. Η αξιολόγηση της ποιότητας του νερού και της καταλληλότητας του εδάφους, καθώς και η σωστή συντήρηση των υδραγωγείων, είναι κρίσιμες για την υγεία και την ευημερία των κατοίκων. Οι αρχές αυτές παραμένουν επίκαιρες και μπορούν να εφαρμοστούν σε σύγχρονα συστήματα διαχείρισης υδάτων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας τους.
- Οι δεξαμενές καθίζησης ήταν μεγάλες στέρνες, πολλές φορές επενδυμένες με τσιμέντο, στις οποίες το νερό επιβραδυνόταν πριν συνεχίσει την πορεία του στο υδραγωγείο. Ο κύριος σκοπός αυτών των δεξαμενών ήταν η συγκέντρωση της άμμου και των βράχων στον πυθμένα, επιτρέποντας μόνο στο καθαρό νερό να προχωρήσει. Το υδραγωγείο της Σεγκόβιας χρησιμοποιούσε δεξαμενή καθίζησης βάθους 1 m, το υδραγωγείο της Μεριδά είχε δεξαμενή βάθους 0,70 m, ενώ το μικρότερο υδραγωγείο Realillo είχε δεξαμενή βάθους 1,70 m. Αυτό δείχνει την προσοχή και τη μελέτη που έδιναν οι Ρωμαίοι μηχανικοί σε κάθε υδραγωγείο.

- Τα σιντριβάνια της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας έπαιζαν σημαντικό ρόλο, λειτουργώντας ως εξαερισμός των καναλιών. Ο αυτοκράτορας Αδριανός προσέθεσε περίτεχνες δεξαμενές στο Aqua Virgo κοντά στο τέρμα του, όπου το νερό περνούσε μέσα από θαλάμους σε δύο επίπεδα πριν συνεχίσει την πορεία του.
- Η κατασκευή υπόγειων καναλιών στα ρωμαϊκά υδραγωγεία ήταν μια στρατηγική επιλογή που μείωσε το κόστος και τους πόρους, ενώ παράλληλα εξασφάλιζε την ανθεκτικότητα των δομών στις καιρικές συνθήκες και τη διάβρωση. Η προσεκτική εκμετάλλευση της φυσικής κλίσης του εδάφους και η χρήση κατακόρυφων αξόνων για εξαερισμό και συντήρηση δείχνουν την τεχνική δεξιοτεχνία των Ρωμαίων μηχανικών. Το μέγεθος της διατομής των καναλιών διέφερε, αλλά ήταν περίπου 1 μέτρο πλάτος και 2 m ύψος.
- Η κατασκευή επιφανειακών δομών, όπως γέφυρες και αψίδες, στα ρωμαϊκά υδραγωγεία ήταν μια απαραίτητη διαδικασία για να διατηρηθεί η πορεία του νερού πάνω από δύσβατα εδάφη. Η χρήση τοπικών υλικών και η προσεκτική κατασκευή με πέτρα και ρωμαϊκό τσιμέντο εξασφάλιζαν την ανθεκτικότητα και την αποτελεσματικότητα των δομών αυτών. Για να διατηρηθεί η καθαρότητα του νερού, η επιφάνεια του καναλιού ήταν καλυμμένη με ορθογώνιες πέτρες που χρησίμευαν ως «καπάκι».
- Η χρήση μολύβδινων σωλήνων και αντεστραμμένων σιφώνων στα ρωμαϊκά υδραγωγεία δείχνει την προχωρημένη τεχνογνωσία και την ικανότητα των Ρωμαίων μηχανικών να αντιμετωπίζουν προκλήσεις στη διαχείριση του νερού. Παρά τα μεγάλα έξοδα και τη χρονοβόρα διαδικασία κατασκευής, οι τεχνικές αυτές εξασφάλιζαν την αποτελεσματική μεταφορά του νερού σε δύσβατες περιοχές. Όταν η κοιλάδα βρισκόταν 50 m κάτω από το επίπεδο του καναλιού, οι Ρωμαίοι εφάρμοζαν αντεστραμμένους σίφωνες.
- Η χρήση των δεξαμενών διανομής castellum στα ρωμαϊκά υδραγωγεία ήταν κρίσιμη για την αποτελεσματική διανομή του νερού στην πόλη. Το σύστημα αυτό επέτρεπε την αποφυγή λειψυδρίας και εξασφάλιζε την παροχή νερού σε ιδιωτικά και δημόσια κτίρια, όπως βίλες και λουτρά. Οι προσεκτικά σχεδιασμένες υποδομές και η χρήση μολύβδινων και σωλήνων δείχνουν την τεχνική δεξιοτεχνία των Ρωμαίων μηχανικών.
- Η κλίση των ρωμαϊκών υδραγωγείων κυμαινόταν γενικά μεταξύ 0,3% και 0,15%, με ακραίες τιμές 0,07% στο Nîmes και 3,0% στη Ρώμη. Μια υπερβολικά μικρή κλίση θα εμπόδιζε την κίνηση του νερού, ενώ μια απότομη κλίση θα προκαλούσε υπερβολική ταχύτητα και υπερχειλίση στις απολήξεις του υδραγωγείου. Η αργή ροή δεν θα προκαλούσε ζημιές στο κανάλι, αλλά θα αυξανόταν ο κίνδυνος καθίζησης ιζημάτων και

φραγής των αρτηριών. Αντίθετα, η ταχύτερη ροή νερού θα διατηρούσε το κανάλι καθαρότερο, αλλά θα απαιτούσε περισσότερες επισκευές.

- Η σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής πορτα και της σύγχρονης αντλίας για την ανύψωση νερού δείχνει σημαντικές διαφορές στον χρόνο και την απόδοση. Ας υποθέσουμε ότι ο σωλήνας έχει διάμετρο 10 cm, ο ρυθμός ροής είναι 16 L/s (0,016 m³/s) και η χωρητικότητα της δεξαμενής «Ω» είναι 320 m³. Η ενέργεια που χρειάζεται για να ανεβεί το νερό με βάρος 320.000 kg σε ύψος 44 m για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής είναι 138.124.800 J ή 38,37 kWh.
- Όπως συνοψίζεται και στην εικόνα 6.1, με τη χρήση δύο βοδιών που παρέχουν ισχύ 1,08 kW, θα απαιτούνταν 35,52 ώρες για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής, που αντιστοιχεί σε περίπου 3,55 ημέρες με 10 ώρες εργασίας την ημέρα, καταναλώνοντας 38,34 kWh, με συντελεστή απόδοσης 20%, 7,68 kWh. Ένα ζευγάρι ανθρώπων με ισχύ 0,24 Kw, θα χρειάζονταν 15,98 ημέρες και θα κατανάλωναν 35,14 kWh με συντελεστή απόδοσης 25%, 9,53 kWh. Αντίθετα, μια σύγχρονη αντλία με ισχύ 5 kW θα ανυψώσει το νερό σε 7,67 ώρες, καταναλώνοντας 38,35 kWh με συντελεστή απόδοσης 70%, 26,84 kWh.



Εικόνα 6.1 Σύνοψη απόδοσης για το γέμισμα της δεξαμενής Ω ανάμεσα στον άνθρωπο, το βόδι και την αντλία

- Κατά τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία, ένας λεγεωνάριος λάμβανε ημερομίσθιο 13,2 ασσάρια, με τα οποία μπορούσε να αγοράσει 7,6 kg σιταριού. Ένα βόδι 500 kg καταναλώνει 8 kg σιταριού την ημέρα. Για να σιτίσει κανείς ένα ζεύγος βοδιών εκείνη την εποχή, χρειαζόταν 16 kg σιταριού ανά ημέρα, το οποίο μεταφράζεται σε ημερομίσθιο 2,1 λεγεωνάριων. Συνεπώς, για να γεμίσει μια δεξαμενή σε σχήμα «Ω» με τη χρήση της πορτία θα χρειαζόνταν 3,55 ημέρες και θα κόστιζε 98,4 ασσάρια, δηλαδή τα ημερομίσθια 6,3 λεγεωνάριων.
- Στη σύγχρονη Ελλάδα, η τιμή της kWh είναι 0,11 €/kWh. Για ένα πλήρες γέμισμα της δεξαμενής σε σχήμα «Ω» με ηλεκτρική αντλία, θα κόστιζε 4,22 €. Το κατώτατο ημερομίσθιο στην Ελλάδα είναι 37,07 €, οπότε η αντλία θα γέμιζε τη δεξαμενή με κόστος 4,22 €, το οποίο αντιστοιχεί στο 11,38% του σύγχρονου ημερομισθίου ενός εργάτη.

7 Βιβλιογραφία

- Abel, Emily K. "Toynbee Hall, 1884-1914." *Social service review* 53.4 (1979): 606-632.
- Aicher, Peter J. *Guide to the aqueducts of ancient Rome*. Bolchazy-Carducci Publishers, 1995.
- Ashton, Julia. "Camels, sand, and pyramids: Struggles with tourism in the golden land of the pharaohs." 2013 NCUR (2013).
- Ayres, Robert U. "Industrial metabolism." *Technology and environment* 1989 (1989): 23-49.
- Barnes, Jonathan, ed. *The Complete Works of Aristotle: Volume 2*. Princeton University Press, 1995.
- Bell, Nikki, and Faith A. Burden. "17 Feeding the Donkey." *Evidence Based Equine Nutrition: A Practical Approach For Professionals* (2023): 420.
- Borau, Laetitia. "WATER MANAGEMENT AND CHALLENGING TOPOGRAPHIES: THE AQUEDUCTS SUPPLYING THE ROMAN CITY OF BAELO CLAUDIA (SPAIN)." (2019).
- British Society of Animal Science. Meeting. *Proceedings of the British Society of Animal Science*. The Society, 2004
- Brody, S., H. H. Kibler, and E. A. Trowbridge. "Growth and development. LVIII. Resting energy metabolism and pulmonary ventilation in growing horses." *Missouri Agric. Exp. Sta. Res. Bull* 368 (1943).
- Brody, Samuel. "Science and dietary wisdom." *The Scientific Monthly* 61.3 (1945): 213-225.
- Bruun, C. F. M. "The water supply of ancient Rome: A study of Roman imperial administration." (1993): 0415-0415.
- Bunsen, Jonas, Markus Berger, and Matthias Finkbeiner. "Planetary boundaries for water—A review." *Ecological Indicators* 121 (2021): 107022.
- Burford, Alison. "Notes on the Epidaurian building inscriptions." *Annual of the British School at Athens* 61 (1966): 254-334.
- Campbell, Joseph K. "Selecting field machinery." *Ag. Eng. Bui* 395 (1973).
- Carcopino, Jerome. *Daily life in ancient Rome: the people and the city at the height of the empire*. Yale University Press, 2003.
- Cary, Earnest. "The Roman antiquities of Dionysius of Halicarnassus: in 7 volumes." (1937).
- CASADO, FERNANDEZ. "Tratado de Derecho Notarial." Tomo I (1985).
- Chanson, Hubert. "Forum article. Hydraulics of stepped spillways: current status." *Journal of hydraulic engineering* 126.9 (2000): 636-637.
- Chiotis, E. D., and P. G. Marinos. "Geological aspects on the sustainability of ancient aqueducts of Athens." *Bulletin of the Geological Society of Greece* 46 (2012): 16-38.
- Christiani, David C., Ramesh Durvasula, and Jonathan Myers. "Occupational health in developing countries: review of research needs." *American journal of industrial medicine* 17.3 (1990): 393-401.
- Clayton, Peter A. "The pharos at alexandria." *Seven Wonders Ancient World*. Routledge, 2013. 138-157.

- Collins, Edgar Vermont, and A. B. Caine. Testing draft horses. Agricultural Experiment Station, Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, 1926.
- Dembskey, Evan James. The aqueducts of ancient Rome. Diss. University of South Africa, Pretoria, 2009.
- Deming, David. "The aqueducts and water supply of Ancient Rome." *Ground water* 58.1 (2020): 152.
- Demirag, Istemi, and Andrew Tylecote. "The effects of organizational culture, structure and market expectations on technological innovation: a hypothesis." *British Journal of Management* 3.1 (1992)
- Diamond, Robert Steven, and Brian Garret Kassel. "A history of the urban underground tunnel (4000 BCE-1900 CE)." *Journal of Transportation Technologies* 8.01 (2017): 11.
- Dufaut, Annie. "Women carrying water: how it affects their health." *Waterlines* (1988): 23-25.
- Duff, Tim. "Plutarch's Lives-B. Scardigli (ed.): Essays on Plutarch's Lives. Pp. 403. Oxford: Clarendon Press, 1995. " *The Classical Review* 46.2 (1996): 231-233.
- Eldridge, Frank R. Wind machines: report. Vol. 75. No. 51. The Foundation, 1975.
- Ellis, L. W., and E. A. Rumley. "Power and the Plow. Double Day Page and Co." Garden City, New York (1911).
- Erdkamp, Paul, ed. The Cambridge companion to ancient Rome. Cambridge University Press, 2013.
- Evans, Harry B. Water distribution in ancient Rome: The evidence of Frontinus. University of Michigan Press, 1997.
- Fales, Frederick Mario, and Roswitha Del Fabbro. "Back to Sennacherib's aqueduct at Jerwan: A reassessment of the textual evidence." *Iraq* 76 (2014): 65-98.
- Fall, Abdou, et al. Feeding and working strategies for oxen used for draft purposes in semi-arid West Africa. 1997.
- Freivalds, Andris, et al. "A dynamic biomechanical evaluation of lifting maximum acceptable loads." *Journal of biomechanics* 17.4 (1984): 251-262.
- Frontinus, Sextus Julius. The two books on the water supply of the city of Rome. Longmans, Green, and Company, 1913.
- Gagarin, Michael. "Legal procedure in Gortyn." *Symposion* (2009): 127-145.
- García-Bellido, Paz. "Coinage and ethnicity in Celtic Spain." *Zeitschrift für celtische Philologie (ZcP)* 49.1 (1997): 219-242.
- García-Merino, Jose Domingo, Lidia García-Zambrano, and Arturo Rodriguez-Castellanos. "Impact of relational capital on business value." *Journal of Information & Knowledge Management* 13.01 (2014): 1450002.
- Gillani, Giacomo. "The Roman city of Uxama Argaela (Soria, Spain) & its study by means of remote sensing & digital cartography." *Proceedings of the XXI International CIPA Symposium*. 2007.
- Gite, L. P. "Optimum handle height for animal-drawn mould board plough." *Applied Ergonomics* 22.1 (1991): 21-28.

- Goe, Michael Roderick, and R. E. MacDowell. "Animal traction: guidelines for utilization." (1980).
- Harrigan, Timothy M., and Richard J. Roosenberg. "Evaluation of a Nylon Towrope for Buffering Pulling Forces of Animal-drawn Utility Wagons." *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America* 11.2 (2009): 22.
- Hosseiny, Seyedeh Habibbeh, Omid Bozorg-Haddad, and Daniele Bocchiola. "Water, culture, civilization, and history." *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources*. Elsevier, 2021. 189-216.
- Hounshell, David. *From the American system to mass production, 1800-1932: The development of manufacturing technology in the United States*. No. 4. JHU Press, 1984.
- Jacobsen, Thorkild, and Seton Lloyd. "Sennacherib's aqueduct at Jerwan." *Oriental Institute publications* (1935).
- Katzenstein, Hannah, Aharôn Qempînsqî, and Ìmmānû'ēl Dûnayevsqî. "Glossary of Architectural Terms." *The architecture of ancient Israel* (1992): 311-322.
- King, Franklin Hiram. *A text book of the physics of agriculture*. The author, 1907.
- Korobkova, G. F. "Ancient reaping tools and their productivity in the light of experimental tracewear analysis." *Soviet Anthropology and Archeology* 19.3-4 (1981): 325-349.
- Landels, John Gray. *Engineering in the Ancient World, Revised Edition: With a Revised Preface, a New Appendix, and a New Bibliography*. Univ of California Press, 2000.
- Lewis, Nicola Denzey. "Death on the Nile: Egyptian codices, Gnosticism, and Early Christian books of the dead." *Practicing Gnosis*. Brill, 2013. 161-180.
- Liddell, Henry George, and Robert Scott. *A lexicon*. Harper, 1889.
- Matthews, Kenneth D. "Roman Aqueducts: Technical Aspects of their Construction." *Expedition* 13.1 (1970): 2.
- Merino, Carmen García. "Las cisternas y la elevación de agua del acueducto en Uxama." *Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana*, Madrid (2010): 283-298.
- Merino, Martín. "Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence." *Journal of Marine systems* 13.1-4 (1997): 101-121.
- Middleton, John Henry. *The remains of ancient Rome*. Vol. 2. A. and C. Black, 1892.
- Moritz, L. A. "Vitruvius' water-mill." *The Classical Review* 6.3-4 (1956): 193-196.
- Mourant, Arthur Ernest, and Frederick Everard Zeuner. "Man and cattle. Proceedings of a Symposium on Domestication at the Royal Anthropological Institute, 24-26 May 1960." (1963): 166-pp.
- Nag, P. K., N. C. Sebastian, and M. G. Mavlankar. "Occupational workload of Indian agricultural workers." *Ergonomics* 23.2 (1980): 91-102.
- Nag, P. K., N. C. Sebastian, and M. G. Mavlankar. "Occupational workload of Indian agricultural workers." *Ergonomics* 23.2 (1980): 91-102.
- Nir, Yaacov. "Middle and late Holocene sea-levels along the Israel Mediterranean coast—evidence from ancient water wells." *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association* 12.2 (1997): 143-151.

- Oleson, J. P., & Rihll, T. E. (2008). The Oxford handbook of engineering and technology in the classical world. *Aestimatio: Sources and Studies in the History of Science*, 5, 93-132.
- Oleson, John Peter. Greek and Roman mechanical water-lifting devices: the history of a technology. Vol. 16. Springer Science & Business Media, 1984.
- Ozis, Unal, Ahmet Alkan, and Yalcin Ozdemir. "Water Works of Ancient Civilizations." *Water Resources of Turkey* (2020): 11-59.
- Parsons, Arthur W. "A Roman water-mill in the Athenian Agora." *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 5.1 (1936): 70-90.
- Peltenburg, Edgar. "Text Meets Material in Late Bronze Age Cyprus." *Cyprus: an island culture. Society and social relations from the Bronze Age to the Venetian period* (2012): 1-23.
- Perlin, John. *Let it shine: the 6,000-year story of solar energy*. New World Library, 2022.
- Pollio, Vitruvius. *Vitruvius, the ten books on architecture*. Harvard University Press, 1914.
- Price, R. "Samuel Lilley: Technological Progress and the Industrial Revolution 1700-1914 (Book Review)." *Journal of European Studies* 1.2 (1971): 175.
- Proctor, R. D., et al. "Growth and development XXXIII: Efficiency of work in horses of different ages and body weights." *Missouri Exp. Sta. Res. Bull* 209 (1934).
- Prsper, Blanca. "The instrumental case in the thematic noun inflection of Continental Celtic." *Historische sprachforschung* 124.1 (2011): 250-267.
- Rawlinson, Henry Creswicke, and John Gardner Wilkinson. *The history of Herodotus*. Vol. 1. 1861.
- Ridruejo, Clemente Sáenz, Eugenio Sanz Pérez, and Laura Catalá Ribero. "Descripción de algunas fuentes romanas de la vía de Numancia a Augustóbriga." *Revista de Obras Públicas* 3.465 (2006).
- Ritti, Tullia, Klaus Grewe, and Paul Kessener. "A relief of a water-powered stone saw mill on a sarcophagus at Hierapolis and its implications." *Journal of Roman Archaeology* 20 (2007): 139-163.
- Rodrigues, João B., et al. "May the force be with you: an investigation into logging methods using donkeys." *Austral journal of veterinary sciences* 55.1 (2023): 23-33.
- Rogers, Dylan Kelby. "Water culture in Roman society." *Brill Research Perspectives in Ancient History* 1.1 (2018): 1-118.
- Rowlandson, Jane. "Dissing the Egyptians: legal, ethnic, and cultural identities in Roman Egypt." *Bulletin of the Institute of Classical Studies. Supplement* (2013): 213-247.
- Sargentis, G-Fivos, et al. "Stratification: An entropic view of society's structure." *World* 2.2 (2021): 153-174.
- Sargentis, G-Fivos, et al. "Values and Costs in History: A Case Study on Estimating the Cost of Hadrianic Aqueduct's Construction." *World* 3.2 (2022): 260-286.
- Schwabe, Calvin W. "Animals in the ancient world." *Animals and human society*. Routledge, 2002. 48-70.
- Shetto, R. M., S. Mkomwa, and T. E. Simalenga. "Entrepreneurship in animal traction: empowering rural initiatives." *Empowering farmers with animal traction. Animal Traction*

- Network for Eastern and Southern Africa (ATNESA) workshop. 1999.
- Shikdar, Ashraf A. "Identification of ergonomic issues that affect workers in oilrigs in desert environments." *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 10.2 (2004): 169-177.
- Sims, B. G., and D. H. O'Neill. "Aspects of work animal use in semi-arid farming systems." *Working animals in agriculture and transport*. Wageningen Academic, 2003. 39-50.
- Singer, Charles Joseph. *A History of Technology*, vol. 1. Oxford University Press, 1954.
- Smil, Vaclav. "Conversion of energy: People and animals." (2004): 697-705.
- Steffen, Will, et al. "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet." *science* 347.6223 (2015): 1259855.
- Sterns, Fred H. "A stratification of cultures in eastern Nebraska." *American Anthropologist* 17.1 (1915): 121-127.
- Taillet, Richard, Loïc Villain, and Pascal Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck Supérieur, 2018.
- Taylor, David, and David Taylor. "Britain 1951–86." *Mastering Economic and Social History* (1988): 647-695.
- Van Deman, Esther Boise. "The building of the Roman aqueducts." (No Title) (1934).
- Vuorinen, Heikki S., Petri S. Juuti, and Tapio S. Katko. "History of water and health from ancient civilizations to modern times." *Water Science and Technology: Water Supply* 7.1 (2007): 49-57.
- Washburn, Raymond Secord, and Della E. Merrick. *Tillage, Planting, and Harvesting Equipment on Grain Farms and Rates of Doing Field Work with These Implements when Drawn with Horse and with Tractor Power:(northern Great Plains and Pacific Northwest)*. Bureau of Agricultural Economics, 1936.
- Wooley, John Cochran, and Mack Marquis Jones. *The draft of farm wagons as affected by height of wheel and width of tire*. University of Missouri, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, 1926.
- Zeng, Hongyun, et al. "Spatiotemporal characteristics of the ancient water wells for the past 3,000 a in Zhejiang Province, China: a perspective of geography." *Annals of GIS* 29.2 (2023): 307-318.

Λιαδίκτυο

- <http://www.electrummagazine.com>
- <http://www.romanaqueducts.info>
- <https://airesdemonda.blogspot.com>
- <https://algargosarte.blogspot.com>
- <https://catalogue.museogalileo.it/indepth/Diopter.html>
- <https://colitetechnology.com>
- <https://de.wikipedia.org>

<https://education.nationalgeographic.org>

<https://education.nationalgeographic.org/resource/groundwater/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CF%81%CE%B5%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Dibber>

<https://heritagesciencejournal.springeropen.com>

<https://jenikirbyhistory.getarchive.net>

<https://journals.ub.uni-heidelberg.de>

<https://smania.store/gr/proion/>

<https://terziszootrofes.gr>

<https://www.archaiologia.gr/blog/photo/75230-2/>

<https://www.fallbrookhistoricalsociety.org/fallbrook-historical-society-home/museums/the-heritage-center/barn/farming-equipment/12-disk-harrow/>

<https://www.flickr.com>

<https://www.mediastorehouse.com>

<https://www.michanikos.gr>

<https://www.newsbeast.gr>

<https://www.pinterest.com>

<https://www.pir.gr/timi-kilovatorias>

https://www.prohistoire.fr/1458642_les-panemones-de-la-perse-antique-sont-toujours-dans-le-vent

<https://www.quora.com>

https://www.reddit.com/r/Kerala/comments/113dt0k/the_roman_impluvium_could_it_have_be_en_influenced/

<https://www.tourismegard.com>

<https://www.traianvs.net>

www.kepea.gr/katotatos-apo-1-apriliou-2024#