

ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΩΝ ΠΡΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΑΡΟΥΛΚΩΝ¹

ΜΑΝΟΛΗΣ ΚΟΡΡΕΣ

ΔΡ. ΑΡΧΙΤΕΚΤΩΝ

Αν ήθελε κανείς να ξεχωρίσει ένα μόνον από τα μεγάλα επιτεύγματα της μεταφορικής, ανυψωτικής και μηχανικής γενικότερα τεχνολογίας ως το σπουδαιότερο, αυτό δεν θα ήταν ο γερανός, δεν θα ήταν το πολύσπαστον, ούτε ο μηχανικός ανυψωτήρας. Θα ήταν απλώς το σχοινί. Το έξοχο αυτό δημιουργήμα προηγείται των πιο πάνω μηχανών, όχι μόνον χρονικώς, αλλά και λ ο γ ι κ ώ ς . Προηγείται, ασφαλώς κατά τη σπουδαιότητα, αλλά και κατά τη δυσκολία συλλήψεως.

Οι δύο γενικές κατηγορίες σχοινιών, τα στρεπτά και τα πλεκτά, ήσαν σε γενική χρήση ήδη κατά την αρχαιότητα. Τούτο τεκμηριώνεται από φιλολογικές μαρτυρίες, από ευρήματα και εικαστικές παραστάσεις ή καλλιτεχνικές μιμήσεις αληθινών σχοινιών.

Η σχετική αρχαία ορολογία είναι εξόχως πλούσια² : 1) Στρεπτά σχοινία : στρέφειν (Όμηρος, Οδ., VIII, 438) συμβάλλειν, torqueere (Plin., XXXV 137), σχοινοστρόφος, καλωστρόφος, ιμονιοστρόφος 2) Πλεκτά σχοινία : πλοχμός, πλέκειν > plecto > plectura, nectere (nexus), πλοκεύς, λινόπλοκος, σχοινοπλόκος 3) Υλικά σχοινοποιίας: λίνος, σπάρτον, φοίνιξ, πάπυρος, βύβλος, κάνναβις, λευκέα (είδος καννάβεως), κάλαμος, πλόκαμος και, φυσικά σχοίνος, το αρχαιότερο ίσως στην Ελλάδα 4) Γενικά ονόματα: σχοινίον, σχοινοσυμβολεύς, σχοιουργός 5) Ειδικά ονόματα : τοπίον, κάλως, τόνος, όπλον.

Τα τελευταία αποτελούσαν ειδολογικές ή λειτουργικές διακρίσεις.

Τα καλύτερα δείγματα σχοινοπλοκής από την αρχαία Ελλάδα παρέχονται ασφαλώς από τις καλλιτεχνικές μιμήσεις της, κυρίως στις βάσεις των κίωνων ιωνικών κτηρίων της κλασικής εποχής.

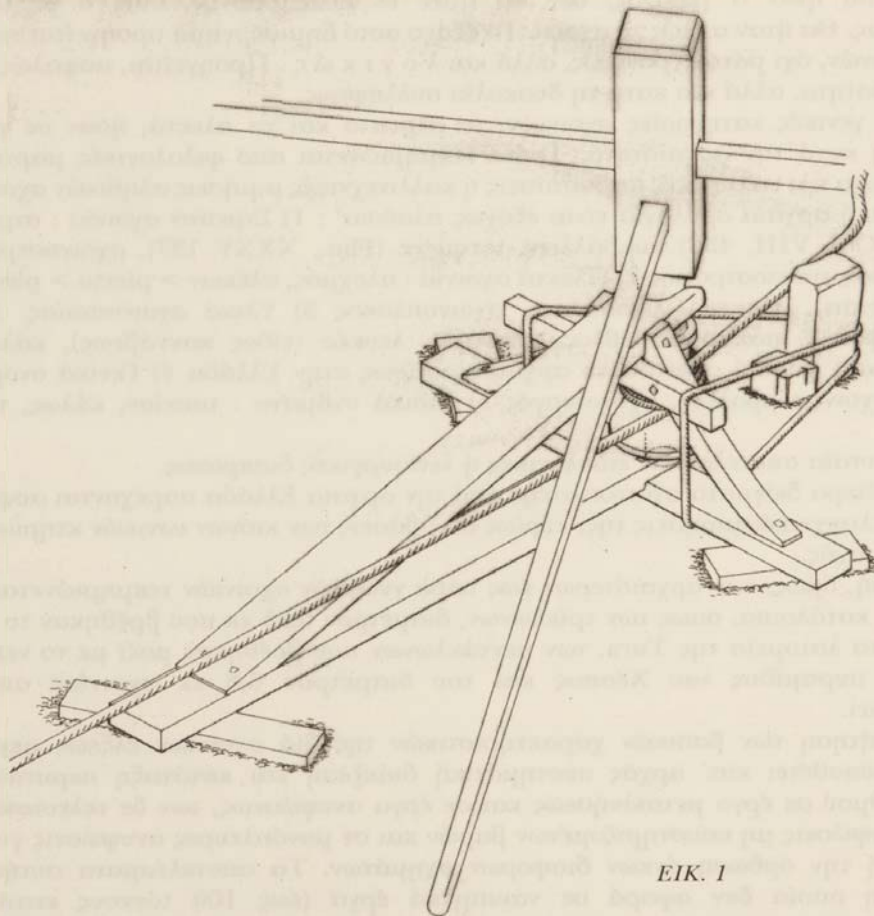
Η μορφή, όμως, των αρχαιότερων έως τώρα γνωστών σχοινιών τεκμηριώνεται από αιγυπτιακά κατάλοιπα, όπως των τρίκλωνων, διαμέτρου 6,35 εκ που βρέθηκαν το 1942 και 1944 στα λατομεία της Tura, των πεντάκλωνων που βρέθηκαν μαζί με το νεκρικό πλοίο της πυραμίδος του Χέοπος και του διαμέτρου 6,8 εκ σχοινίου από το Der el-Bahari.

Η αναζήτηση των βασικών χαρακτηριστικών της διά σχοινιών έλξεως μεγάλων βαρών προϋποθέτει κατ' αρχάς συστηματική διάκριση και κατάταξη περιπτώσεων ικανού αριθμού σε έργα μετακινήσεως και σε έργα ανυψώσεως, των δε τελευταίων σε πλήρεις ανυψώσεις μη υποστηριζομένων βαρών και σε μονόπλευρες ανυψώσεις για την ανατροπή ή την όρθωση όγκων διαφόρων σχημάτων. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, η οποία δεν αφορά σε ναυπηγικά έργα (έως 100 τόννους κατά την αρχαιότητα), αλλά, πλην μιας ειδικής περιπτώσεως, μόνον σε μεγάλα οικοδομικά, συνοψίζονται αντιστοίχως στους πίνακες I, II, III, όπου περιέχονται 60 διαφορετικές περιπτώσεις, ενώ σε έναν τέταρτο (Πίν. IV), εξετάζονται εκείνες οι περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για το είδος και τον αριθμό των ελκτικών ή ανυψωτικών μηχανών και τον αριθμό των ανά μηχανή ή επί του συνόλου ατόμων.

Τα παραδείγματα των πινάκων II και III καταδεικνύουν τη γενική ισχύ μιας μόνον ανυψωτικής τεχνολογίας στη Δύση των ιστορικών χρόνων, εκείνης των ανυψωτικών μηχανών. Κεκλιμένα επίπεδα, βαθμικά υποθήματα και άλλα συναφή ήσαν, όπως και σήμερα, εν χρήσει μόνον στις καθελκύσεις (η συχνά υποστηριζόμενη εφαρμογή των σε μεγάλα οικοδομικά έργα είναι τελείως αντίθετη προς τις μαρτυρίες, τα έργα και το πνεύμα της Δυτικής τεχνολογίας).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο Πίν. IV, όπου πλην μιας περιπτώσεως (Παρίσι, 1834), διακρίνεται η γενική επικράτηση μιας περίπου διεθνούς νόρμας

εργασίας : η καθολική από την αρχαιότητα έως τη βιομηχανική εποχή χρήση ανυψωτικών μηχανών, ορισμένου τύπου και μεγέθους, ικανότητας ~10 τόννων, ανεξαρτήτως του προς ανύψωση βάρους ή της εθνότητας των διαφόρων έργων. Καθώς λοιπόν έμενε πάντα σταθερός ή περίπου σταθερός ο τύπος των μηχανών, το μόνον που κάθε φορά μετεβάλλετο ήταν ο αριθμός των, ώστε να ανταποκρίνεται στο προς μετακίνηση ή ανύψωση βάρος. Κατά την ανύψωση του μονολίθου της Ραβέννας (230 τόνν., ανηρημένοι από 24 τετράσπαστα) ή την ανόρθωση του κίονος του Αλεξάνδρου στην Αγία Πετρούπολη (700 τόνν., ανηρημένοι από 62 εξάσπαστα) χρησιμοποιήθηκαν ισάριθμα προς τα πολύσπαστα βαρούλκα, έλκοντα με δύναμη ~3 τόννων και 2,7 τόννων αντιστοίχως. Αλλά η χρήση ενός σταθερού τύπου βαρούλκου ελκτικής ικανότητας ~ 3 τόννων αποτελεί το κοινό συστατικό όχι μόνον ενός αρχαίου



EIK. 1

έργου στην Ιταλία και ενός νεότερου στη Ρωσία, αλλά και παντός άλλου. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ιστορία της τεχνολογίας επειδή αυτομάτως γεννά το εξής ερώτημα : ποίας φύσεως είναι τα αίτιά του, ιστορικής ή τεχνικής ;

Η μελέτη του ζητήματος απαιτεί κατ' αρχάς μια, έστω συνοπτική, διερεύνηση των αρχών λειτουργίας των παραδοσιακών βαρούλκων ως και των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών των αρχίζοντας φυσικά από τα βασικά περί καννάβινων σχοινιών, τα οποία συναψίζονται ως εξής :

Λόγω της κατασκευής των σχοινιών η ενεργός διατομή των 5 είναι μικρότερη της γενικής διατομής κατά το 1/3 αυτής. $S = \frac{2}{3} \pi d^2 / 4$ (όπου d η διάμετρος). Η τάση θραύσεως της ενεργού διατομής είναι ~1200-1350 χγρ/ εκ² για τα καινούργια ή ~500 χγρ/ εκ² για τα παλαιά σχοινιά. Αντιστοίχως η τάση θραύσεως της γενικής

διατομής είναι περίπου 800-900 για τα καινούργια και ~ 370 για τα παλαιά. Ο συντελεστής ασφαλείας είναι συνήθως ίσος προς 8. Η δυσκαμψία των σχοινιών εξαρτάται από το βήμα των, δηλαδή το μήκος μιας πλήρους περιόδου των κλώνων. Η ελαχίστη επιτρεπόμενη διάμετρος για τροχαλίες καννάβινων σχοινιών είναι ίση προς το δεκαπλάσιον της διαμέτρου του σχοινιού : $D \geq 10d$. Ο βαθμός αποδόσεως μιας τροχαλίας καννάβινου σχοινιού είναι : $\eta = \sim 90\%$. Συνεπώς, με ελκτική δύναμη 100 χγρ η δίσπαστος ανυψώνει 171 χγρ, η τρίσπαστος 244 χγρ, η τετράσπαστος 320 χγρ, η πεντάσπαστος 379 χγρ και η εξάσπαστος 432 χγρ. ή, κατ' άλλην διατύπωση, η ανύψωση ενός τόννου με τη δίσπαστον απαιτεί έλξη 615 χγρ, με τρίσπαστο απαιτεί έλξη 410 χγρ, με τετράσπαστο 310 χγρ, με πεντάσπαστο 264 χγρ και με εξάσπαστο 230 χγρ. Το δυσάρεστο λοιπόν συμπέρασμα είναι ότι η καθ' οδόν απώλεια της τανύσεως του σχοινιού είναι τόσο μεγάλη, ώστε στην περιοχή της έκτης τροχαλίας να απομένει μόνον η μισή από την αρχική τάνυση. Τελικώς η εξάσπαστος, ενώ επιμηκύνει κατά 50% το χρόνο εργασίας που θα αρκούσε με μια τετράσπαστο, προσφέρει, έναντι εκείνης, μηχανικό πλεονέκτημα όχι μεγαλύτερο του 35%.

Λόγω της αδυναμίας μειώσεως των ενεργειακών απωλειών ξύλινων πολυσπάστων και φυτικών σχοινιών οι αρχαίοι περιόριζαν τις επιλογές των μεταξύ τρισπάστου και πεντασπάστου και επιτύγγαναν την αναγκαία ελκτική δύναμη αυξάνοντας απλώς την ικανότητα των βαρούλκων με τον τεχνικώς ορθότερο τρόπο : μειώνοντας τον μοχλοβραχίονα της αντιστάσεως, δηλαδή την ακτίνα του κυλίνδρου στο ελάχιστον επιτρεπόμενο για την αφθαρσία του σχοινιού και αυξάνοντας τον μοχλοβραχίονα της δυνάμεως, δηλαδή τα μήκη των ακτινωτών λαβών στο μέγιστο ασφαλές όριο της αντοχής των. Τα καλώς σωζόμενα, σήμερα, αρχαίου τύπου βαρούλκα, των οποίων το εδώ εικονιζόμενο³ (Σχ. 1) αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα, είναι σχετικώς όψιμα, τις περισσότερες όμως φορές δεν διαφέρουν από τα εικονιζόμενα στις παλαιότερες σωζόμενες παραστάσεις ή από τα σχηματικώς εικονιζόμενα στη βάση του οβελίσκου του Θεοδοσίου. Γενικώς διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : σε εκείνα που περιελίσσουν όλο το σχοινί στον κύλινδρο και σε εκείνα που ως κωνικές τροχαλίες τριβής το έλκουν, αφήνοντάς το να αποθηκεύεται σε ικανή απόσταση από αυτά (Σχ. 2). Τα βαρούλκα της πρώτης κατηγορίας είχαν επί το πλείστον οριζόντιο άξονα περιστροφής και ευρύτατη χρήση στους γερανούς. Εκείνα της δεύτερης κατηγορίας, γνωστά από την αρχαία εποχή ως *εργάτες*⁴ ή *εργατοκύλινδροι*⁵, ή *ergata*⁶ είχαν σχεδόν πάντα κατακόρυφο τον άξονα και αποτελούσαν μόνιμο εξάρτημα κάθε πλοίου για την αναβίβαση της άγκυρας. Η χρήση των στα οικοδομικά έργα ήταν επίσης ευρεία.

Ό,τι ακολουθεί αφορά στη λειτουργία των αρχαίων βαρούλκων γενικώς. Χάρην ευκολίας, επειδή τα αυτά ισχύουν για όλα γενικώς τα βαρουλκοτύμπανα, αλλά και εξ αιτίας της αρχαίας συμβάσεως, χρησιμοποιώ τη λέξη κύλινδρος. Η αληθής μορφή του κυρίως λειτουργικού μέρους του κοινού εργατού είναι, βεβαίως κωδωνοειδής (μερικές φορές συγχεομένη προς τα κοινά κωνικά τύμπανα). Τα σχετικά με την ειδική λειτουργία αυτής της μορφής δεν περιλαμβάνονται στο παρόν.

Κατά τη λειτουργία του απλού βαρούλκου (Σχ. 3) ασκείται στους μοχλούς δύναμη F σε αξονική απόσταση R από τον κύλινδρο, ο οποίος στρεφόμενος έλκει το σχοινίον με δύναμη Z :

$$Z = 2 \cdot R \cdot F : (D+d), (1)$$

όπου D, d οι διάμετροι κυλίνδρου και σχοινιού αντιστοίχως.

Η αναπτυσσόμενη στον κύλινδρο στρεπτική ροπή M_T εισάγεται ως καμπτική ροπή M_F των μοχλών και εξάγεται ως ελκτική ροπή M_Z του βαρούλκου. Οι ως άνω ροπές συνδέονται μεταξύ των και με τα μετρικά και φυσικά μεγέθη του συστήματος ως εξής:

$$M_F = M_T = M_Z (2)$$

$$M_F = R \cdot F (3)$$

$$M_T = 1/16 \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \mu (4)$$

$$M_Z = 1/4 \cdot \sigma_z \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (D+d) (5)$$

όπου σ_k, σ_z η στρεπτική τάση του κυλίνδρου και η εφελκυστική τάση του σχοινιού και μ ο συντελεστής εξασθενίσεως του κυλίνδρου, λόγω της εις βάρος της διατομής του αναπτύξεως του πάχους των μοχλών. Για τον καλύτερο συμβιβασμό κυλίνδρου και μοχλού ο συντελεστής μ είναι συνήθως ~0,5.

Οι τύποι (3), (4) γράφονται και ως εξής :

$$M_T = 1/32 \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot d^3 \cdot v^3 \quad (6) \quad M_Z = 1/4 \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot d^3 \cdot (v+1) \quad (7),$$

όπου v η μεταξύ κυλίνδρου και σχοινίου σχέση διαμέτρων.

Για την αποφυγή βλαπτικής κάμψεως του σχοινίου $v \geq 10$ (8).

Άλλη μορφή του τύπου (4-6) είναι η εξής :

$$M_Z = 1/4 \cdot \tau \cdot \sigma_k \cdot \pi \cdot d^3 \cdot (v+1) \quad (9),$$

όπου τ η μεταξύ κυλίνδρου και σχοινίου σχέση τάσεων.

Κατά την ειδική περίπτωση οριακής επιτρεπομένης καταπόνησεως κυλίνδρου και σχοινίων : $\tau_{ειδ.} = \epsilon_{πιτρ\sigma_k} : \epsilon_{πιτρ\sigma_k} \quad (10)$

Για καινουργή καννάβινα σχοινιά ($\epsilon_{πιτρ\sigma_k} \approx 100$) και κυλίνδρους από σκληρά ξύλα ($\epsilon_{πιτρ\sigma_k} \approx 10-12$ λόγω της διάτμησης της διάτρητης κεφαλής παραλλήλως προς τις ίνες): $\tau_{ειδ.} \approx 8-10$ (11).

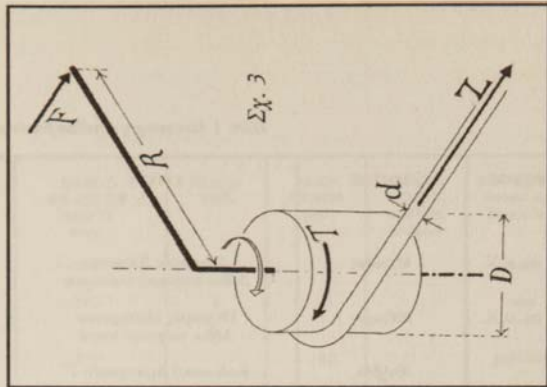
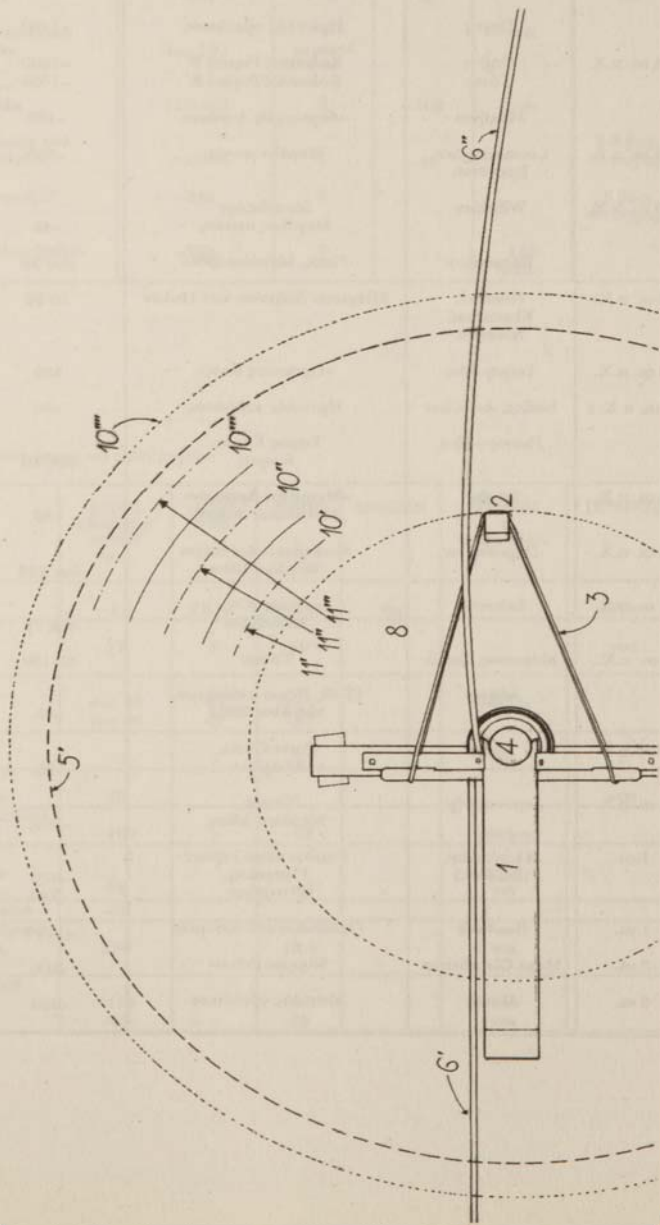
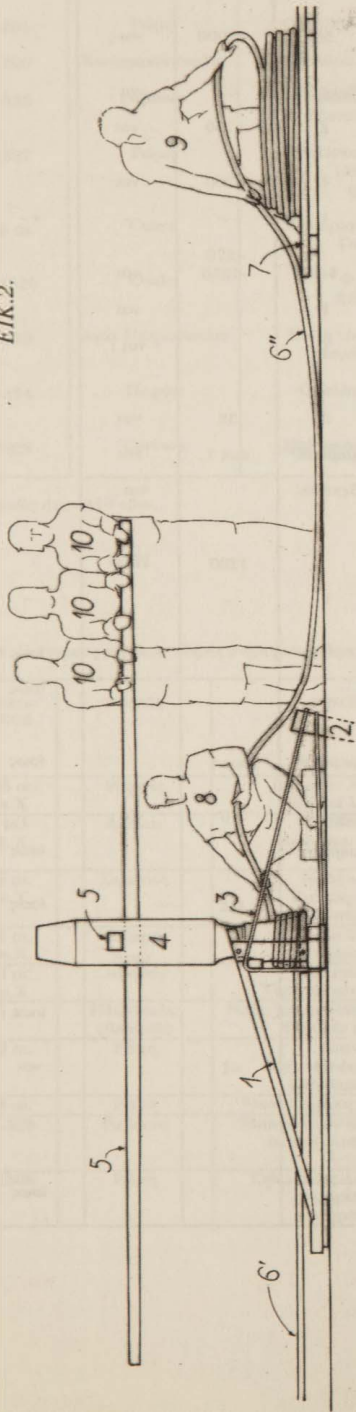
Από τις σχέσεις (1) και (8) προκύπτει ότι η ελκτική ικανότης ενός βαρούλκου ευνοείται από την αποφυγή κάθε περιττής αυξησεως της διαμέτρου του κυλίνδρου του. Υψηλή ευκαμψία σχοινιού και χαμηλή τιμή του v είναι ό,τι απαιτείται. Από τις σχέσεις (2), (6) και (9) προκύπτει ότι για τον πλήρη εναρμονισμό της ικανότητας των μερών ενός βαρούλκου θα έπρεπε : $\tau_{ειδ.} = v^3 / 8(v+1)$ (12).

Εάν, λοιπόν $v = 10$, τότε $\tau_{ειδ.} \approx 11,3$, εάν πάλιν $\tau_{ειδ.} = 8$ έως 10, τότε $v = 8,5$ έως 10,5. Τούτο σημαίνει ότι η σχέση $v = 10$, όχι μόνον εξασφαλίζει το σχοινί έναντι καμπτικής φθοράς, αλλά και τον κύλινδρο έναντι στρεπτικής διαρρήξεως του ασθενέστερου μέρους του, δηλ. της κεφαλής. Ωστόσο σε ορισμένα σχέδια παλαιών βαρούλκων φαίνεται ότι η τιμή του v , πολύ συχνά πλησίαζε τον αριθμό 8, ο οποίος είναι μεν οριακός, αλλά προσφέρει έναντι της τιμής 10, πρόσθετο μηχανικό πλεονέκτημα της τάξεως του 20%. Για την αντιμετώπιση, πάντως, οριακών καταστάσεων, χαλύβδινες στεφάνες όπλιζαν τις κεφαλές των βαρούλκων και κατάλληλοι υπολογισμοί του αριθμού των ατόμων ανά βαρούλκο απέκλειαν την περίπτωση υπερτάσεως του σχοινιού. Με αντιμετωπισμένο τον κίνδυνο λάθους και με μόνο κόστος την κάπως ταχύτερη φθορά του σχοινιού η τιμή $v=8$ παρείχε επί αιώνες ένα μηχανικό βέλτιστον. Το πρόβλημα της ασφαλείας της κεφαλής βρήκε τη ριζική λύση του στη δυτική Ευρώπη, από τον 18ο προς τον 19ο αι., όταν με τη συνεχή αύξηση του εκτοπίσματος των πλοίων έπρεπε να κατασκευάζονται πολύ ισχυρότερα βαρούλκα για την αναβίβαση των αγκυρών, αλλά και για τις εργασίες των ναυπηγείων. Τότε τα βαρούλκα απέκτησαν ειδικής μορφής ενισχυμένη κεφαλή για την άνετη τοποθέτηση περισσοτέρων ακτίνων, χωρίς να θίγεται ο ίδιος ο κύλινδρος.

Οι μοχλοί κινήσεως, οι σκυτάλες των αρχαίων, δεν θέτουν ιδιαίτερα προβλήματα. Το μήκος των ήταν έως δεκαέξι φορές μεγαλύτερο της ακτίνας του κυλίνδρου, επιτρέποντας μέγιστο μηχανικό πλεονέκτημα ίσον προς 15. Από σωζόμενες μαρτυρίες η δύναμη υπολογισμού κατά τον 16ο αι ήταν 18 χγρ για κάθε εργάτη, όση δηλαδή προβλέπεται και από συγχρόνους κανονισμούς για παρόμοιες χειρωνακτικές εργασίες! Όπως είναι φυσικό το μέγιστο μηχανικό πλεονέκτημα ήταν εφικτό μόνον με έναν εργάτη ανά μοχλό (Σχ.2, εργάτης 10"). Με περισσότερους εργάτες το πλεονέκτημα ήταν μικρότερο λόγω της αναγκαστικώς πλησιέστερης θέσεως των προς τον άξονα (Σχ.2, εργάτες 10" και 10"): ελκτική δύναμη με τέσσερεις εργάτες $Z \approx 850$ χγρ, με οκτώ εργάτες $Z \approx 850 + 700 = 1550$ χγρ (Σχ. 2, εργάτες 10" και 10"), με δώδεκα εργάτες $Z \approx 850 + 700 + 550 = 2100$ χγρ. Με τέτοιες τιμές ελκτικής δυνάμεως η ανυψωτική δύναμη ενός τετράσπαστου βαρούλκου (μεσολαβούσης και μιας ακόμης, κατευθυντηρίου τροχαλίας) ήταν $Z \times 90\% \times 320\% = 2500, 4.500$ και 6.000 χγρ αντιστοίχως. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τους υπολογισμούς του Domenico Fontana, η απαιτούμενη από κάθε τετράσπαστο δύναμη για την ανύψωση του βατικανού οβελίσκου ήταν 6.800 χγρ⁷. Για την παραγωγή αυτής της δυνάμεως εργάστηκαν σε κάθε βαρούλκο τουλάχιστον 16 άνδρες και δύο ίπποι (οι οποίοι όμως ήσαν υποβοηθητικοί, ανακούφιζαν δηλαδή τους εργάτες κατά τις φάσεις που δεν ήσαν αναγκαίοι ειδικοί χειρισμοί).

Η μακράιωνη διάρκεια του βαρέως τύπου βαρούλκου (ικανότητας $\approx 2,5-3,5$ τόνν.) αποτελεί όπως είδαμε ένα αξιοπρόσεκτο φαινόμενο τυποποιήσεως. Σε αυτό φαίνεται ότι συνέβαλαν ποικίλοι λόγοι. Κατ' αρχάς η τυποποίηση των σχοινιών. Η τυποποίηση αυτή εξασφάλιζε συμβατότητα των εκάστοτε παραγομένων νέων σχοινιών προς τα

EIK.2.



ΠΙΝ. 1 Μετακίνηση μεγάλων βαρών με μινική δύναμη και απλές μηχανές

ΧΡΟΝΟΣ	ΤΟΠΟΣ	ΕΡΓΟΝ	ΒΑΡΟΣ ΕΚΑΣΤΟΥ ΛΙΘΟΥ τονν.	ΠΟΣΟ- ΤΗΣ	ΑΠΟ- ΣΤΑΣΗ χλμ.	ΑΜΕΣΗ ΕΛΞΗ αριθμός ατόμων	ΒΑΡΟΥΛΑΚΑ Άτομα ανά βαρούλκο
25 αι. π.Χ.	Μέμφις	Πυραμίδα Χέοπος, Λίθοι ταφικού θαλάμου	50-60	56	>1000	ναί ;	
25 αι. π.Χ.	Μέμφις	Πυραμίδα Μυκερίνου Λίθοι ταφικού ναού	100-220	δεκάδες	0.2	ναί ;	
	Θήβαι	Κολοσσοί Αμενχοτέπ Γ'	-700	2	-700	ναί	
15 αι. π.Χ.	Καρνάκ	Οβελίσκος Θουθμωση Γ' (σήμερα στο Λατερανό)	-510	1	-260	ναί	
	Συήνη	Ημιτελής οβελίσκος	-1400	1	-	-	-
14 αι. π.Χ.	Θήβαι Τάνις	Κολοσσοί Ραμοσή Β' Κολοσσοί Ραμοσή Β'	-1000 -1000	4-5	-270 -1250	ναί	
	Μυκήναι	-Θησαυρός Ατρέως-	-100	1		ναί	
16 αι. π.Χ.	Locmariaquer, Βρετανία	Μεγάλο μενχίρ	-300	1		ναί ;	
16 αι. π.Χ.	Wiltshire	Stonchenge Μεγάλος πεσσός	-45	2	32	ναί	
	Bogazekoy	Ναός, Μεγάλοι λίθοι	έως 36	μερικοί	έως 1	ναί	
8 αι. π.Χ.	Nimrud, Khorsabad Nineveh	Πτερωτοί δαίμονες των Πυλών	10-30	δεκάδες		ναί ;	
6 αι. π.Χ.	Συήνη-Σάις	-Πράσινοι ναός-	580		1200	2000	
6 αι. π.Χ. ;	Νάξος, Απόλλων	Ημιτελής κολοσσός	-80	1	-	-	-
	Πασαργάδαι	Τάφος Κύρου, Κρημιάς	έως 40	ολίγοι			ίσως
6 αι. π.Χ.	Ξάνθος	-Μνημείον Αρπιυών- Μονόλιθος πεσσός	-80	1			ίσως
5 αι. π.Χ.	Περσέπολις	Αναλημματικοί τοίχοι Μεγάλοι λίθοι	έως 110	μερικοί	έως 1		ίσως
5 αι. π.Χ.	Σελινόες	Ναός «G», Σπόνδυλοι	έως 70	μερικοί	-6	ναί	
4 αι. π.Χ. ;	Μάραθος, Συρία	Τάφος	50-100	μερικοί			ίσως
	Αθήναι	Πνός, Νότιο ανάλημμα, Μεγάλος λίθος	-65	1	0.2		ίσως
3 αι. π.Χ.	Alatri	Porta Civita, Ανώφλιον	-30	1		ίσως	
1 αι. π.Χ.	Ιερουσαλήμ	Τείχος, Μεγάλος λίθος	-300;	1			ίσως
1 αι.	Ηλιοπόλις (Baalbek)	Βάρθον ναού Jupiter 1 ^η στρώση, 2 ^η στρώση	-400 -740	>25 3	-1		ναί
1 αι.	Baalbeck	Ογκόλιθος στο λατομείο	-1200	1			
2 αι.	Mons Claudianus	Κορμοί κτινίων	-200	2	-	-	-
3 αι.	Aksum	Μεγάλος οβελίσκος	-350	1			ίσως

ΠΙΝ. 1 Συνέχεια

ΧΡΟΝΟΣ	ΤΟΠΟΣ	ΕΡΓΟΝ	ΒΑΡΟΣ ΕΚΑΣΤΟΥ ΛΙΘΟΥ τόνν.	ΠΟΣΟ- ΤΗΣ	ΛΙΠΟ- ΣΤΑΣΗ χλμ.	ΑΜΕΣΗ ΕΛΞΗ αριθμός ατόμων	ΒΑΡΟΥΛΑΚΑ Άτομα ανά βαρούλκο
-355	Ρώμη	Οβελίσκος Θουθμωση Γ'	-510	1			ναι
-390	Κωνσταντινούπολις	Οβελίσκος Θουθμωση Γ'	-210 *	1			ναι
-525	Ραβέννα	Μαυωλεϊόν Θεουδερτίχου Μονολιθική θάλας	230	1	-180		μάλλον
1587	Ρώμη	Οβελίσκος Θουθμωση Γ' (Λατερανός), τμήμα Α'	-300	1	-2		ναι
15 αι.	Cuzco	Φρούριον Saksahuaman Γωνιόλιθοι	έως 150	μερικοί		ναι	
-1620	Osaka	Φρούριον, Κόρια πόλη	110-140	2	-100	ναι	
1770	Αγία Πετρούπολις	Βάση του μνημείου του Μεγάλου Πέτρου	>1500	1	-30		2-6 βαρ. 36 ατ/βαρ.
1834	Παρίσι	Οβελίσκος Ραμσή Β'	-240	1			5 βαρ. 48 ατ/βαρ.
1928	Carrara	Οβελίσκος του Foro Italico	-220	1		120 βόδια	

* αρχικώς ήταν 410 τόνν.

ΠΙΝ. II Ανόρθωση μεγάλων, πλήρως ανηρτημένων βαρών με μινική δύναμη και απλές μηχανές

ΧΡΟ- ΝΟΣ	ΤΟΠΟΣ	ΕΡΓΟΝ	ΒΑΡΟΣ ΕΚΑΣΤΟΥ ΛΙΘΟΥ τόνν.	ΠΟΣΟ- ΤΗΣ	ΥΨΟΣ μ	ΜΟΧΛΟΙ	ΙΚΡΙΩΜΑ + ΒΑΡΟΥΛΑΚΑ	ΓΕΡΑΝΟΣ
25 αι. π.Χ.	Μέμφις	Πυραμίδες Χέοπος Κοινοί λίθοι	-2,5	2X10 ⁶	2-140	ναι		μάλλον
443 π.Χ.	Αθήναι	Παρθενών Ανώφλιοι λίθοι	13	8	10			ναι
5 αι. π.Χ.	Σελινούς	Ναός «G» Κιονόκρανα Επιστάλια	έως 39 έως 40	46 46	-15 -17		μάλλον	
2 αι. π.Χ.	Δίδυμα	Ναός Απόλλωνος Ανώφλιοι	-50	1	-15		ναι	2
2 αι. π.Χ.	Αθήναι	Όλυμπεϊόν Γωνιατό επιστάλιον	26					ναι
1 αι.	Ηλιοπούλις (Baalbek)	Ναός Jupiter Heliorolitanus Γωνιατά γείσα	-100	4	-38		μάλλον	
2 αι.	Ρώμη	Κίον Μάρκου Αυρηλίου Κιονόκρανον	72		-39		ναι	
3 αι. -525	Ρώμη Ραβέννα	Ναός Σάραπη, επίκρανα Μαυωλεϊόν Θεουδερτίχου Μονολιθική θάλας	-95 230		12,5		ναι	
1586	Ρώμη	Οβελίσκος Λατερανός τμήμα Β τμήμα Γ	-135 -50		33,5 33		ναι ναι	

ΠΙΝ. III Ανύψωση μεγάλων, μερικώς ανηχημένων βαρών με μινική δύναμη και απλές μηχανές

ΧΡΟ- ΝΟΣ	ΤΟΠΟΣ	ΕΡΓΟΝ	ΒΑΡΟΣ ΕΚΑΣΤΟΥ ΛΙΘΟΥ τόνν.	ΠΟΣΟ- ΤΗΣ	ΥΨΟΣ μ	ΜΟΧΛΟΙ	ΙΚΡΙΩΜΑ + ΒΑΡΟΥΛΑΚΑ	ΓΕΡΑΝΟΣ
15 αι. π.Χ.	Αίγυπτος	Οβελίσκος Θουθμωση Γ' (σήμερα στο Λατερανό)	510			ίσως		όχι
2 αι.	Ρώμη	Ναός Τραϊανού, Κίονες	-100	26			ναι	
2 αι.	Ρώμη	Πάνθεον, Πρόστασις						
3 αι.	Ρώμη	Ναός Σεράπιδος	-170	>48				
3 αι.	Αλεξάνδρεια	«Κίων Πομπηίου»	300	1			ναι	όχι
355	Ρώμη	Μέγας Ιππόδρομος Οβελίσκος Θουθμωση Γ'	510	1				
-390	Κωνσταν/πολις	Οβελίσκος Θεοδοσίου	-210*				ναι	όχι
1586	Ρώμη	Οβελίσκος Βατικανού	-350				ναι	όχι
1586	Ρώμη (Λατερανό)	Οβελίσκος Θουθμωση Γ' Τμήμα Α	-300				ναι	όχι
1770	Karelia	Μονόλιθος μνημείου Μεγάλου Πέτρου Αγίας Πετρούπολης	>1500	1	4	12	16	όχι
1834	Παρίσι	Οβελίσκος Ραμσή Β'	-250				ναι	όχι
1828	Αγία Πετρούπολη	Ναός Αγίου Ισαάκ Κίονες προστάσεων	-114	48			ναι	όχι
1830	Αγία Πετρούπολη	Κίων Αλεξάνδρου	-700	1			ναι	όχι

* αρχικώς ήταν 410 τόνν.

ΠΙΝ. IV Ανύψωση μεγάλων βαρών με πολύσπαστα και βαρούλκα.
Γενικά μετρικά στοιχεία

ΧΡΟ- ΝΟΣ	ΤΟΠΟΣ	ΕΡΓΟΝ	ΒΑΡΟΣ τόνν.	ΠΟΛΥ- ΣΠΑΣΤΑ	ΒΑΡΟΣ ΑΝΑ ΠΟΛΥ- ΣΠΑΣΤΟΝ τόνν.	ΒΑΡΟΥΛΑΚ Α	ΕΞΕΗ ΑΝΑ ΒΑΡΟΥΛΑ- ΚΟΝ τόνν.	ΑΤΟΜΑ ΑΝΑ ΒΑΡΟΥΛΑ- ΚΟΝ	ΑΤΟΜΑ ΑΝΑ ΑΝΥΨ. ΤΟΝΝΟ
-536	Ραβέννα	Μαυσωλείον Θευδερύχου Μονολιθική θόλος	230	24	-10	24	-3	16;	-1,6;
1586	Ρώμη	Οβελίσκος Βατικανού	350	44	-8	44	-2,5	-20+2 ίπποι	-3
1587	Ρώμη (Λατερανό)	Οβελίσκος Θουθμωση Γ' Τμήμα Β	135	24;					
1705	Ρώμη	Colonna Antonina	110	12	-10	12	-3	16	-1,8
1786	Βενετία	Ανέλκυση του ναυαγείου La Fenice	>600	48	-12,5	48	-3,5	12-16	-1,2
1828	Βερολίνο	Grantschale	-60	6		6		12	-1,2
1828	Αγία Πετρούπολη	Ναός Αγίου Ισαάκ Κίονες προστάσεων	-114	16	-8	16	-2	8	-1,2
1836	Αγία Πετρούπολη	Κίων Αλεξάνδρου	-700	62	-11	62	-2,5	12	-1,2
1834	Παρίσι	Οβελίσκος Ραμσή Β'	-250	10	-25	10	-7	48	-2

παλαιότερα που μετά από ορισμένη χρήση και φθορά έπρεπε να αντικαθίστανται.

Χωρίς αυτή την προϋπόθεση η συχνή, αλλά επί το πλείστον μερική, αντικατάσταση των φθειρομένων σχοινιών ενός πλοίου θα οδηγούσε ταχέως σε πλήρη παραμόρφωση του εξαρτισμού του (από την άλλη πλευρά η πλήρης, κάθε φορά, αντικατάστασή του θα ήταν ασύμφορη και παράλογη). Η τυποποίηση των σχοινιών, λοιπόν, η τήρηση δηλαδή μιας σταθερής κλίμακος διαμέτρων και άλλων χαρακτηριστικών, προσδιόριζε μέσω της διαμέτρου του κυλίνδρου των τις διάφορες κλάσεις βαρούλκων (εν προκειμένω ενδιαφέρουν μόνον τα μεγαλύτερα). Ειδικότερα, η αποκρυστάλλωση και μέσω πολλών αιώνων σταθερή παράδοση του βαρέως τύπου βαρούλκου πρέπει να συνδέεται με τη ναυτιλία. Η επικράτηση ενός ορισμένου ανωτέρου μεγέθους πλοίου με ορισμένο μέγεθος άγκυρας και ορισμένη επιφάνεια εργασίας στην πλώρη πρέπει να είχε μεγάλη επίδραση στην αποκρυστάλλωση της μορφής των μεγαλύτερων βαρούλκων. Είναι επίσης πολύ πιθανόν ότι κάποια από αυτά τα βαρούλκα, λαμβανόμενα προσωρινώς από ελλιμενιζόμενα πλοία, απάρτιζαν ή συμπλήρωναν τον μηχανικό εξοπλισμό ορισμένων μεγάλου όγκου, αλλά όχι μεγάλης διάρκειας ανυψωτικών επιχειρήσεων. Είναι εύλογον ότι στις επιχειρήσεις αυτές είχαν μια θέση όχι μόνον οι διαθέσιμες ναυτικές μηχανές, αλλά και εκείνοι που περισσότερο από κάθε άλλον ήσαν εξοικειωμένοι με μεγάλους ιστούς, με σχοινιά, με πολύσπαστα και με βαρούλκα : οι ναυτικοί.

Οι τεχνικοί, ωστόσο, λόγοι της τυποποίησης των βαρούλκων φαίνεται ότι είναι ακόμη σπουδαιότεροι από τους ιστορικούς : επί αναλογικής αυξήσεως όλων των μερών ενός βαρούλκου η αύξηση της ικανότητας του σχοινίου είναι εκθετική (δευτέρου βαθμού), ενώ εκείνη της στροφικής ροπής που δέχεται ο κύλινδρος από τους εργάτες είναι πρακτικώς γραμμική εξαρτώμενη μόνον από την αύξηση του αριθμού των εργατών. Η αναλογική αύξηση των μοχλών καθ' αυτή δεν προσθέτει μηχανικό πλεονέκτημα καθ' όσον η ίδια αναλογεί απλώς προς την αύξηση της διαμέτρου του κυλίνδρου (σχ.2). Για την πρόσθετη αύξηση αυτής της ροπής θα ήταν αναγκαία πολύ μεγαλύτερη επιμήκυνση των μοχλών, ώστε να χωρούν ακόμη περισσότεροι εργάτες, θα απαιτούσε, όμως, συνεχώς περισσότερο χώρο και θα εμείωνε την ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά, αύξηση της ροπής με πολλαπλασιασμό του αριθμού των μοχλών δεν θα ήταν δυνατή πριν από την επινόηση της ειδικής διευρυμένης κεφαλής. Το ζήτημα αυτό τεκμηριώνεται καλύτερα με τη βοήθεια συγκριτικών υπολογισμών*. Η μαθηματική έκφραση των ανωτέρω, για ένα απλό τετράκτινο βαρούλκο έχει τη μορφή παραμετρικών εξισώσεων, οι οποίες, εκτός από καλή εποπτεία, επιτρέπουν και την αναζήτηση του υπό όρους βελτίστου. Οι όροι αυτοί (όπως και σήμερα), δεν προσεγγίζονται με μαθηματικές μεθόδους, αλλά διαμορφώνονται από το πείραμα και τον ανθρώπινο χαρακτήρα: ωφέλιμη δύναμη ενός ατόμου, όρια θραύσεως και συντελεστές ασφαλείας για ξύλα, σχοινιά κ.τ.λ. Η ως άνω ανάλυση επιβεβαιώνει την βάσει φυσικών παραγόντων νομοτελειακή αποκρυστάλλωση της μορφής και του μεγέθους των προβιομηχανικών βαρούλκων.

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

1. Έργα με πολύτιμες πληροφορίες ή απόψεις για το θέμα του παρόντος είναι τα εξής:
Die Alexander-Säule in St. Petersburg, Unterfangen von Säulen, Allgemeine Bauzeitung 1, 1836, 403-404 Bl. 86.88.
Arnold, D., *Building in Egypt*, Oxford 1991.
Bailey, D., «Honorific Columns, Cranes, and the Tuna Epitaph», *Journal of Roman Archaeology Supplement* 19, 1993, 155-168.
Bruno, G., «Der Obelisk und seine Basis auf dem Hippodrom zu Konstantinopol», *Ist. Forsch.* 7, 1935
Burford, A., «Heavy Transport in Classical Greece», *The Economic History Review* 13, 1960, 1-18
Carburi, de Ceffalonie, M., (Chevalier de Lascary), *Monument élevé à la gloire de Pierre-le Grand, etc.*, Παρίσι 1777.

- Engelbach, C.R., *Ancient Egyptian Construction and Architecture*, 1930.
- Coulton, J.J., «Lifting in early greek Architecture», *Journal of Hellenic Studies* 94, 1974, 1-19.
- Dibner, B., *Moving the Obelisks*, Norwalk, Conn. 1952
- Fontana, D., *Della trasportatione dell' obelisco vaticano, et delle fabriche di nostro signore Papa Sisto V*, Libro primo, Roma 1590, Faksimile, hrsg by A. Carugo, Milano 1978, με εκτενή πραγματεία του επιμελητού : Gli Obelischi e le machine nel Rinascimento, σελ. xxi-lxiv.
- Κοτσοβίλλης, Γ., *Περί εξαρτισμού των πλοίων*, Σύρος 1919.
- Landers, J.G., *Engineering in the Ancient World*, London 1980, 93.
- Lattermann, H., *Griechische Bauinschriften*, Strassburg 1908.
- de Monteferrand, A.R., *Église cathédrale de Saint-Isaac*, St. Petersburg 1845.
- d' Onofrio, C. , *Gli Obelischi di Roma*, Ρώμη 1965.
- Proust, J., *Il mestiere e il sapere duecento anni fa* (Οι πίνακες εικόνων της Encyclopédie του D. Diderot), Μιλάνο 1983, 100-122, 128, 165, 166, 366-369 379, 793
- Rehm, A., *Didyma 2*, Berlin 1958.
- Scherhag, L., «Die Granitschale im ehemaligen Lustgarten», *Naturstein* 5, Mai 1978, 349-357
- Treu, W., (εκδ.), *Achse, Rad und Wagen*, (Vandenhoeck und Ruprecht) Göttingen, 1988.
2. Blümner, H., *Technologie und Terminologie der Gewerbe und Künste bei Griechen und Römern* I, 1875, 288-303.
3. Αυτό ήταν το κοινότερο είδος βαρούλκου της Βενετίας κατά τον 18ο αι.
4. Ορλάνδου, Α.Κ. - Τραυλού, Ι., *Λεξικό Αρχαίων Αρχιτεκτονικών Όρων*, 1986, λ.
5. Ορλάνδου, Α.Κ., *τα Υλικά Δομής των Αρχαίων Ελλήνων*, Β', 1959-60, 113.
6. Vitruvius, X, 16, 12.
7. Fontana (βλ. σημ. 1), σελ. 10V.
8. Με τους υπολογισμούς που ακολουθούν συγκρίνεται το εικονιζόμενο στα Σχ. 1 και 2 κοινό τετράκτινο βαρούλκο («Α») με ένα υποθετικό ομοίωμά του («Β») μεγεθυμένο κατά 50%.

Α. Κοινό τετράκτινο βαρούλκο για σχοινί 39 χιλ. Διάμετρος κυλίνδρου ~36,5 εκ.
 Τάση σχοινιού ~ 175 χγρ/ εκ², επομένως :
 Έλξη = 2100 χγρ. ,
 Ροπή 2100 χγρ x ~20 εκ = 0,42 tm
 R. μ.ο. (για τρεις σειρές εργατών) = ~2.00 μ,
 Μέση ολική δύναμη = 0,42tm : 2.00 μ = 210 χγρ = 3 X 4 άτομα X 17,5 χγρ/άτ.

Β. Υποθετικό βαρούλκο για σχοινί 60 χιλ. - τάση σχοινιού όπως και στο βαρούλκο Α, επομένως : Έλξη 4900 χγρ.,
 Διάμετρος κυλίνδρου = ~54,5 εκ,
 Μεγίστη ροπή 4.900χγρ X ~30 εκ = 1,47 tm
 R. μ.ο. (για πέντε σειρές εργατών) = 2.60 μ,
 Μέση ολική δύναμη = 1,47tm : 2.60 μ = ~570 χγρ.
 Ελάχιστος αριθμός εργατών = 570χγρ : ~18 χγρ/άτ. = 32
 Όμως το μήκος των μοχλών αρκεί μόνον για 20 εργάτες και επομένως η ελκτική δύναμη του υποθετικού βαρούλκου Β περιορίζεται σε 3100 χγρ.
 Με άλλες λέξεις, η κατά 50% υποθετική αύξηση των διαστάσεων του βαρούλκου Α (ή η κατά 125% αύξηση της εκτάσεώς του και η κατά ~ 180% αύξηση του όγκου και του βάρους του), προκάλεσε αύξηση της ικανότητας του σχοινιού κατά 125%, επέτρεψε αύξηση του αριθμού των εργατών κατά 67%, όμως δεν αύξησε την ικανότητα του βαρούλκου παρά μόνον κατά 47,5%. Η σύγκριση αυτού του ποσοστού με τη διόγκωση της μηχανής και του πληρώματος, καταδεικνύει το ασύμφορο του υποθετικού βαρούλκου Β.

Για τη διόρθωση του υποθετικού βαρούλκου Β προσφέρονται οι εξής δύο τρόποι :

Τρόπος 1 : να μειωθεί η διάμετρος του κυλίνδρου και συνεπώς του σχοινιού του.

Διορθωμένη διάμετρος σχοινιού : 52 χιλ.

Διορθωμένη διάμετρος κυλίνδρου : 47 εκ.

Επομένως : Μεγίστη έλξη = 3.700 χγρ.,

Ροπή = 3.700 χιλ. X ~ 26 μ = 0,96 tm.,

Μέση ολική δύναμη = 0,96 tm : 2.60 μ = ~370 χγρ = 4 X 5 άτομα X 18,5 χγρ/άτ.

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι με τη μείωση κυλίνδρου και σχοινιού η ικανότης του υποθετικού βαρούλκου Β αυξήθηκε κατά ~19%.

Τρόπος 2 : να αυξηθεί το πλήρωμα με προσθήκη άλλων τεσσάρων μοχλών, πράγμα που, όμως, προϋποθέτει την (όχι δεδομένη) δυνατότητα μορφώσεως κατάλληλης κεφαλής.

R. μ.ο. (για τέσσερεις σειρές εργατών) = 2.80 μ

Μέση ολική δύναμη = 1,68 : 2.80 = ~600 = 8x4 άτομα x 18,7 χγρ/άτ.

SUMMARY

NATURAL ELEMENTS OF PREINDUSTRIAL CAPSTANS

MANOLIS KORRES

Material remains, pictorial representations, textual evidence, and objects that have been lifted show that the technology of tackles and capstans was in general use throughout the Western world from antiquity to the present day. Inclined planes, additive superimposed low supports and fulcrums (for subsequent lifts) and other related devices were, as today, only employed in shipyards and slipways for launchings (the frequent assertion that they were employed in large building constructions is completely contrary to the written evidence, the works and the spirit of Western hoisting techniques).

Among the components of hoisting technology the most important was, as always, rope-making and not machinery. A comparison of many different cases leads to the conclusion that for thousands of years one set system of models and norms existed. The continual replication and the reappearance after long interludes of more or less the same designs is a striking phenomenon. The timelessness of the system of windlasses and tackles is simply due to the persistence of ancient tradition. The technical tradition was in fact interrupted during the 7th c. in virtually every field, except on ships, where it continued in simplified form. Other factors, however, unrelated to man's history, were more cogent: the natural properties of the materials and the laws of mechanics. The way in which these factors almost automatically determined structural principles, shapes of parts, functional ratios and dimensions of the devices made from organic materials is easily explained;

The minimum permitted radius of traction and consequently the minimum diameter of a suitable capstan depends on the material, thickness and lay of a rope. And this diameter depends on the torsional strength of the capstan drum, which in turn must be compatible with the strength of the rope. Increasing the number or the length of the capstan bars allows more men to operate and thus increases the momentum of rotation (which must not exceed the strength of the head of the drum) but this requires space and reduces speed. The mathematical expression of the above takes the form of parametric equations, which, in addition to giving a good control, make possible the optimization of these factors under given conditions. These (and this still applies today) cannot be found by merely mathematical means but are result of experimentation and man's character.