



Συντελεστής τριβής παλετών και δοκών ραφιών για ολίσθηση κατά μήκος και εγκάρσια των δοκών Static friction coefficient between pallet and beam in both cross aisle and down aisle direction

Carlo CASTIGLIONI¹, Χάρης ΜΟΥΖΑΚΗΣ², Παναγιώτης ΚΑΡΥΔΗΣ³, Λουκία
ΚΑΡΑΠΙΤΤΑ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εύρεση του συντελεστή στατικής τριβής μεταξύ των παλετών και των δοκών πάνω στις οποίες τοποθετούνται τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια των δοκών. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, διεξάγεται ένας αριθμός πειραμάτων ολίσθησης διαφόρων τύπων παλετών (ευρωπαϊκή, ξύλινη, αμερικάνικη ξύλινη και πλαστική) επί διαφόρων τύπων δοκών. Οι παράμετροι που μελετώνται είναι το είδος των παλετών, το είδος των δοκών επί των οποίων αυτές τοποθετούνται, το μέγεθος της μάζας που φέρουν και η εκκεντρότητα της μάζας. Από τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίζεται ο συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ παλετών και δοκών τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια των δοκών και εξαγονται συμπεράσματα ως προς τους ασφαλέστερους τύπους παλετών και δοκών και συνδυασμούς αυτών

ABSTRACT : The aim of this study is the assessment of static friction coefficient developed between the pallet and the beam in both cross aisle and down aisle direction. Static tests were carried out in both down and cross aisle direction, by means of an "inclined plane" device, by slowly increasing the inclination of the plane, and measuring the sliding of the pallet on the rack steel beams. The influence of different parameters such as the type of pallet and beam, the stored mass and the mass eccentricity on the static friction factor is analysed.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τριβή ορίζεται ως η δύναμη, η οποία ανθίσταται στη σχετική κίνηση δύο στερεών σωμάτων ή υλικών. Η δύναμη τριβής δρα σε διεύθυνση επαπτόμενη ως προς τις επιφάνειες επαφής, ενώ η φορά της είναι πάντοτε αντίθετη της κίνησης ή της επιχειρούμενης κίνησης της μιας επιφάνειας ως προς την άλλη. Η δύναμη τριβής οφείλεται κυρίως στη συνοχή που αναπτύσσεται ανάμεσα σε τμήματα των δύο επιφανειών. Κατά την ολίσθηση των δύο σωμάτων, η συνοχή απομειώνεται με αποτέλεσμα την έναρξη της σχετικής κίνησης του ενός σώματος ως προς το άλλο. Η δύναμη της τριβής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η αλληλοεμπλοκή των επιφανειών, ο βαθμός συμπίεσης των δύο επιφανειών, η

¹ Καθηγητής, Πολυτεχνείο Μιλάνου.

² Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: harrismo@central.ntua.gr

³ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: pcaryd@central.ntua.gr

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, ΙΔΑΧ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: klucia@central.ntua.gr

ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ των επιφανειών κ.α. Το φαινόμενο της τριβής εισάγει την έννοια του συντελεστή τριβής. Συντελεστής τριβής ορίζεται ο λόγος της δύναμης τριβής η οποία δρα στην διεπιφάνεια των δύο σωμάτων τη στιγμή της ολίσθησης ως προς την κάθετη δύναμη στην διεπιφάνεια αυτή.

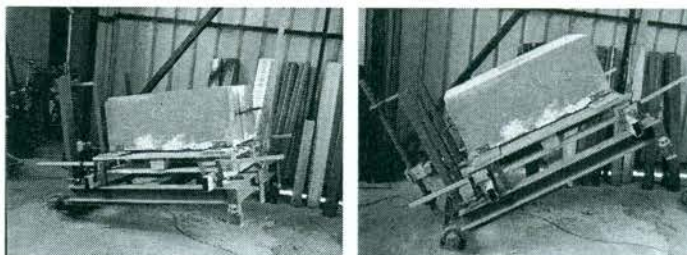
Η συστηματική μελέτη του φαινομένου της τριβής οδήγησε στην ανάπτυξη διαφορετικών προσομοιωμάτων τριβής τόσο για στατική φόρτιση (Coulomp (Armstrong, 1998), Karnopp (1985), Armstrong (1988)) όσο και δυναμική φόρτιση (Dahl (1968, 1975, 1976), Bliman και Sorine (1991,1993,1995)).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εύρεση του συντελεστή στατικής τριβής μεταξύ των παλετών και των δοκών πάνω στις οποίες τοποθετούνται τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια των δοκών. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, διεξάγεται ένας αριθμός πειραμάτων ολίσθησης διαφόρων τύπων παλετών (ευρωπαϊκή, ξύλινη, αμερικάνικη ξύλινη και πλαστική) επί διαφόρων τύπων δοκών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος «Storage racks in seismic areas» (LEE/NTUA, 2005). Οι παράμετροι που μελετώνται είναι το είδος των παλετών, το είδος των δοκών επί των οποίων αυτές τοποθετούνται, το μέγεθος της μάζας που φέρουν και η εκκεντρότητα της μάζας. Από τα πειραματικά αποτελέσματα υπολογίζεται ο συντελεστής στατικής τριβής μεταξύ παλετών και δοκών τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια των δοκών και εξάγονται συμπεράσματα ως προς τους ασφαλέστερους τύπους παλετών και δοκών και συνδυασμούς αυτών Αγραφιώτου (2005), Αγαδάκου (2005).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του στατικού συντελεστή τριβής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Δύο οριζόντια δοκάρια ραφιών, τοποθετούνται σε άκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο με αρθρωτές στηρίξεις. Το πλαίσιο είναι ελεύθερο να περιστρέφεται περί τον άξονα των αρθρώσεων. Η αξονική απόσταση μεταξύ του άξονα των αρθρώσεων και του σημείου περιστροφής είναι 1575mm. Η παλέτα μαζί με τη μάζα η οποία είναι ακλόνητα στερεωμένη σε αυτήν, τοποθετείται στα δοκάρια. Το σύστημα ανυψώνεται σταδιακά με αργό ρυθμό, με τη βοήθεια ενός γερανού. Ταυτόχρονη καταγράφεται η κατακόρυφη μετακίνηση και η σχετική μετακίνηση μεταξύ παλέτας και δοκών. Κάθε δοκιμή με διαφορετικό συνδυασμός παλέτας- δοκών επαναλαμβάνεται τριάντα φορές. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν για ολίσθηση τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια των δοκών.

Διαφορετικού τύπου παλέτες και δοκοί εξετάστηκαν κατά τις δοκιμές. Επίσης εξετάστηκε διαφορετικό μέγεθος μαζών (251 kg, 785 kg, 1036 kg) καθώς και η θέση της μάζας ως προς την παλέτα (κεντρικά ή με εκκεντρότητα). Επτά διαφορετικοί τύποι παλετών και έξι τύποι δοκών επιλέχθηκαν, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1

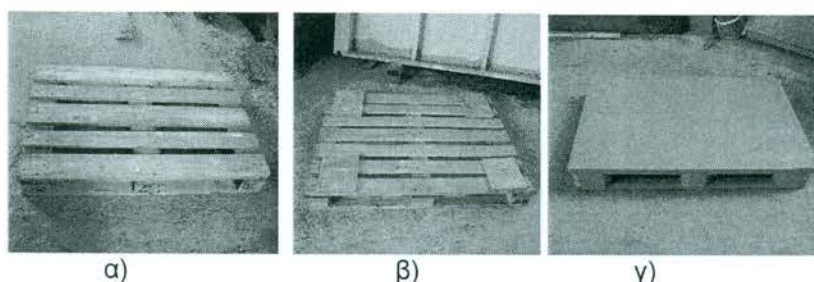


Σχήμα 1. Πειραματική και μετρητική διάταξη για τον προσδιορισμό του στατικού συντελεστή τριβής.

Πίνακας 1. Εξεταζόμενοι τύποι δοκών και παλετών.

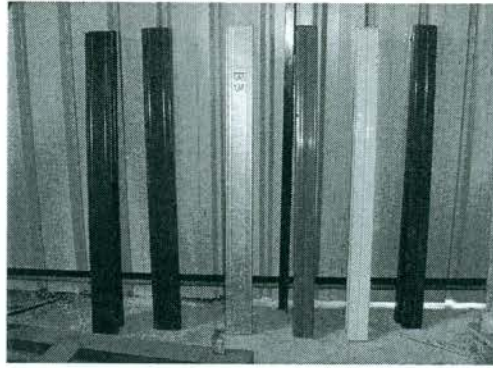
| Τύπος Παλέτας | Τύπος Δοκού |
|---|--|
| P1: Ξύλινη Ευρωπαϊκή παλέτα 800x1200, καινούργια, ξηρή | B1: Cold rolled, powder coated, new (Producer A) |
| P2: Ξύλινη Ευρωπαϊκή παλέτα 800x1200, χρησιμοποιημένη, ξηρή | B2: Cold rolled, hot dip coated, new (Producer A) |
| P3: Ξύλινη Ευρωπαϊκή παλέτα 800x1200, χρησιμοποιημένη, υγρή | B3: Cold rolled, hot zinc coated, new (Producer A) |
| P4: Ξύλινη Αμερικάνικη παλέτα, καινούργια, ξηρή | B4: Cold rolled, hot dip coated, new (Producer B) |
| P5: Ξύλινη Αμερικάνικη παλέτα, χρησιμοποιημένη, ξηρή | B5: Cold rolled, hot dip coated, new (Producer C) |
| P6: Ξύλινη Αμερικάνικη παλέτα, χρησιμοποιημένη, υγρή | B6: Cold rolled, hot dip coated, new (Producer C) |
| P7: Πλαστική Ευρωπαϊκή παλέτα | |

Η παλέτα P1, μετά από ένα μικρό αριθμό δοκιμών παρουσίαζε φθορά στην κάτω επιφάνεια της με αποτέλεσμα να αντιπροσωπεύει τον τύπο παλέτας P2. Η παλέτα P3, βρεχόταν λίγα λεπτά πριν τη δοκιμή της. Οι ίδιες συνθήκες εξετάστηκαν και για την Αμερικάνικη παλέτα (P4, P5, P6). Η παλέτα P7 επιλέχθηκε γιατί σήμερα παρουσιάζει ευρεία χρήση και είναι πιο ανθεκτική από τις ξύλινες. Η Ευρωπαϊκή, Αμερικάνικη και πλαστική Ευρωπαϊκή παλέτα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

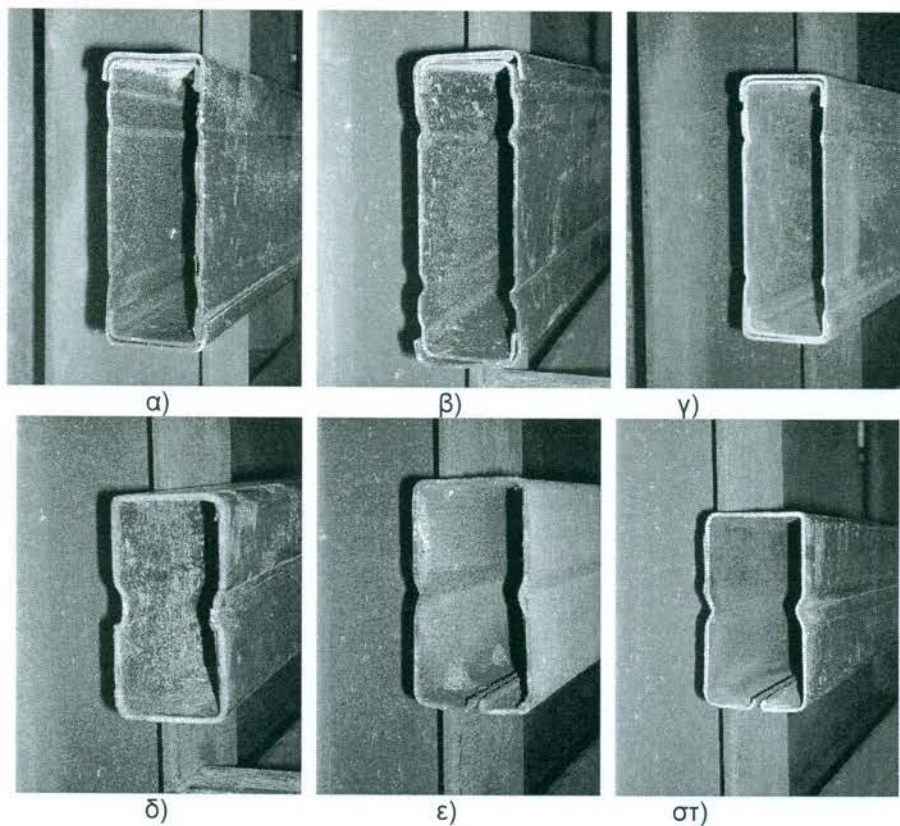


Σχήμα 2. Εξεταζόμενοι τύποι παλετών: α): Ευρωπαϊκή, β): Αμερικάνικη, γ): Πλαστική Ευρωπαϊκή.

Οι εξεταζόμενοι δοκοί κατασκευάστηκαν από τρεις διαφορετικές εταιρείες. Οι δοκοί B1, B2 και B3 είχαν κατασκευαστεί από την ίδια εταιρεία (A), είχαν την ίδια διατομή, αλλά διαφορετική τελική επιφάνεια. Η δοκός B4 είχε κατασκευαστεί από άλλη εταιρεία (B) και είχε διαφορετική διατομή και τελική επιφάνεια συγκρινόμενη με τις δοκούς B1, B2 και B3. Οι δοκοί B5 και B6, είχαν κατασκευαστεί από τρίτη εταιρεία (C), είχαν διαφορετική γεωμετρία αλλά ίδια τελική επιφάνεια. Τα εξεταζόμενα δοκάρια παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 και 4.

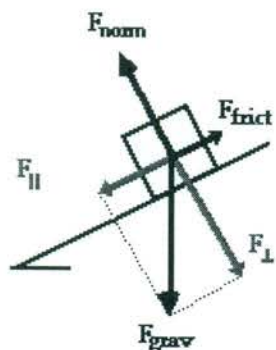


Σχήμα 3. Εξεταζόμενοι τύποι δοκών.



Σχήμα 4. Διατομές εξεταζόμενων δοκών: α): Διατομή δοκού B1, β): Διατομή δοκού B2, γ): Διατομή δοκού B3, δ): Διατομή δοκού B4, ε): Διατομή δοκού B5 και στ): Διατομή δοκού B6.

Οι στατικές δοκιμές βασίζονται στην αρχή του κεκλιμένου επιπέδου (the principle of the inclined plane) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Όταν η παλέτα αρχίζει να ολισθαίνει στη δοκό, η συνιστώσα της δύναμης της βαρύτητας κατά μήκος της δοκού (F_{\parallel}) είναι ίση με τη συνιστώσα της δύναμης της βαρύτητας κάθετα στη δοκό (F_{\perp}), πολλαπλασιασμένη με το στατικό συντελεστή τριβής.



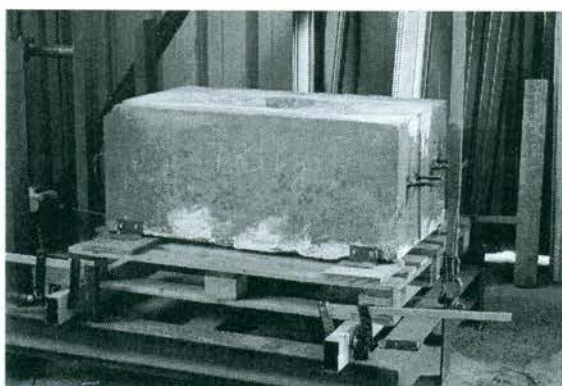
$$F_{\parallel} = F_{\text{grav}} \sin(a) = F_{\text{fric}} = \mu F_{\text{grav}} \cos(a)$$

$$\mu = \tan(a)$$

Σχήμα 5. Αρχή του κεκλιμένου επιπέδου.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΓΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

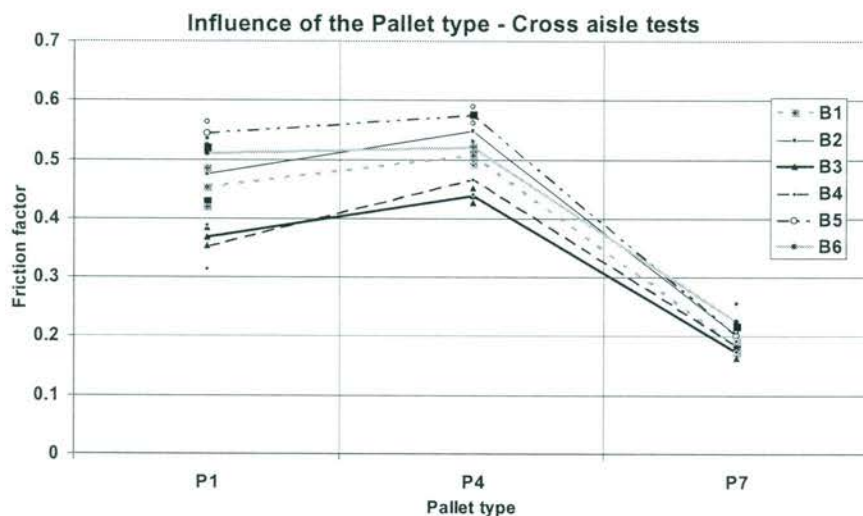
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής για ολίσθηση εγκάρσια των δοκών. Η ολίσθηση κατά τη διεύθυνση αυτή είναι επικίνδυνη γιατί το πλάτος της παλέτας είναι 1200 mm ενώ το πλάτος των ραφιών σε πραγματικές κατασκευές είναι 1100 mm. Έτσι, μερικά χιλιοστά μετακίνησης της παλέτας μπορούν να οδηγήσουν σε πτώση της. Στις επόμενες παραγράφους, τα σχήματα που παρουσιάζονται αναφέρονται στη μέση τιμή του συντελεστή τριβής. Κάθε δοκιμή με διαφορετικό συνδυασμό παλέτας- δοκού- μάζας επαναλήφθηκε τριάντα φορές.



Σχήμα 6. Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής για ολίσθηση εγκάρσια των δοκών.

Επίδραση του τύπου παλέτας

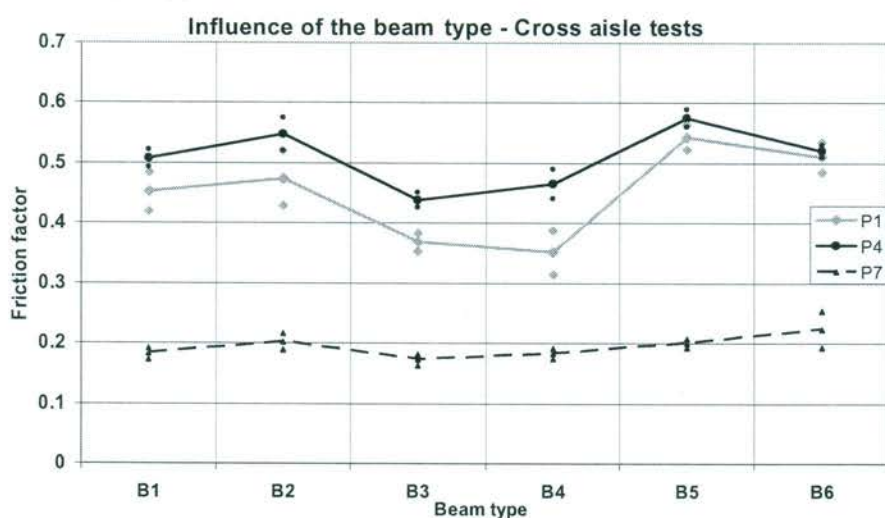
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου παλέτας στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπου δοκών. Σε όλες τις δοκιμές, μάζα των 785 kg ήταν τοποθετημένη κεντρικά στην παλέτα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την παλέτα P4 προκύπτει η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή τριβής (0.51), για την παλέτα P7 η μικρότερη, ενώ για τη παλέτα P1 υπολογίζεται ενδιάμεση τιμή του συντελεστή τριβής.



Σχήμα 7. Επίδραση τύπου παλέτας στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπου δοκών.

Επίδραση του τύπου δοκού

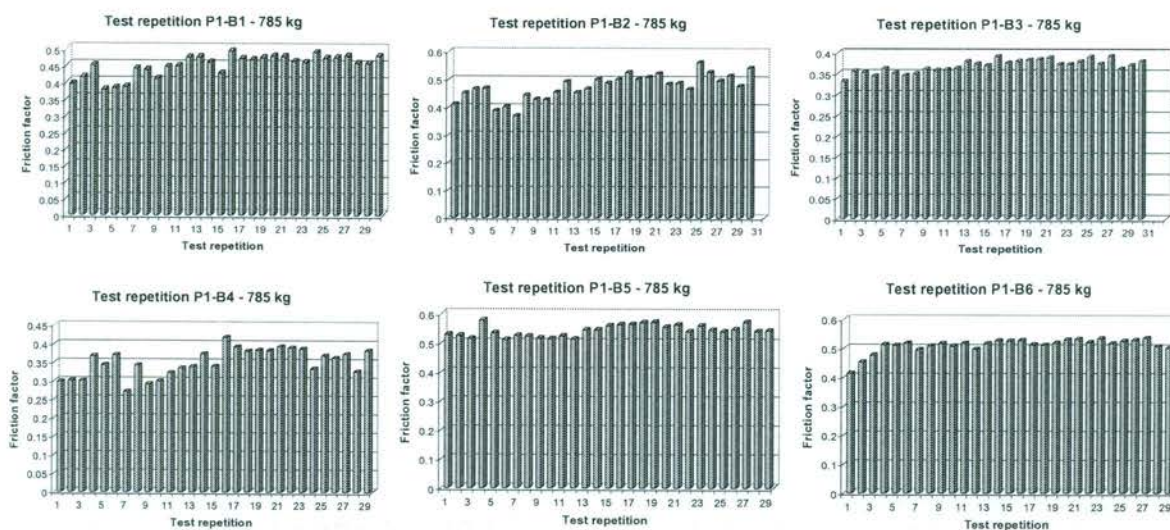
Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για τις παλέτες P1, P4 και P7. Σε όλες τις δοκιμές, μάζα των 785 kg ήταν τοποθετημένη κεντρικά στην παλέτα. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής τριβής παρατηρείται στις δοκιμές της παλέτα P4, ο μικρότερος στις δοκιμές της παλέτα P7, ενώ ο συντελεστής τριβής έχει ενδιάμεση τιμή στις δοκιμές της παλέτας P1. Ο συντελεστής τριβής ο οποίος υπολογίζεται για την παλέτα P7 είναι σχετικά σταθερός, ενώ ο συντελεστής τριβής για τις παλέτες P1 και P4 εξαρτάται από τον τύπο της δοκού.



Σχήμα 8. Επίδραση τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για τις παλέτες P1, P4 και P7.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται με τη μορφή ιστογράμματος, ο συντελεστής τριβής ο οποίος εκτιμάται σε κάθε δοκιμή (30 δοκιμές) για το συνδυασμό παλέτας P1 και όλων των τύπων των δοκών. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριβής αυξάνει κατά τις πρώτες 5- 10 δοκιμές, ενώ στη συνέχεια η τιμή του παραμένει πρακτικά σταθερή. Αυτό

οφείλεται στη φθορά της επιφάνειας της δοκού. Κατά τις πρώτες δοκιμές, η δοκός είναι λεία και η τιμή του συντελεστή τριβής είναι μικρή. Λόγω των επαναλαμβανόμενων δοκιμών, η επιφάνεια των δοκών φθείρεται, γίνεται τραχιά με αποτέλεσμα η τιμή του συντελεστή τριβής να αυξάνει μέχρι ένα επίπεδο, όπου η τιμή του παραμένει πρακτικά σταθερή.

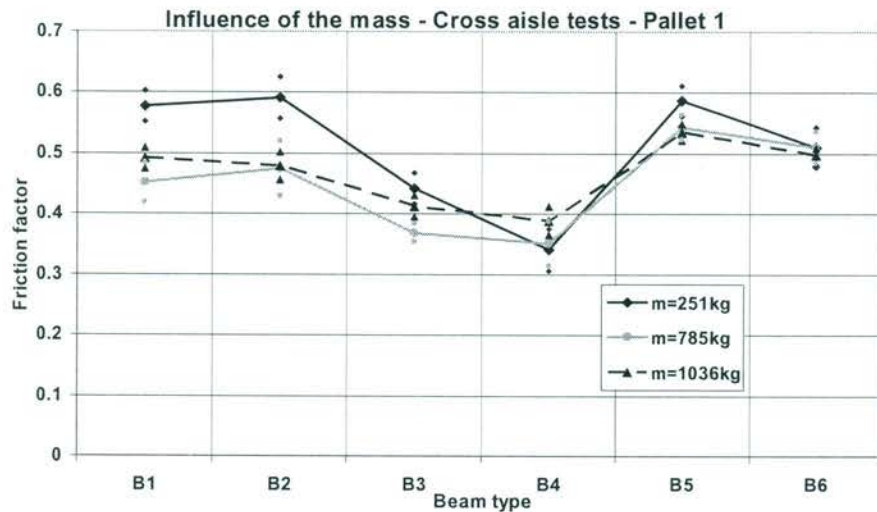


Σχήμα 9. Συντελεστής τριβής ανά δοκιμή για το συνδυασμό παλέτας P1- δοκών B1, B2, B3, B4, B5, B6 και μάζα 786kg.

Επίδραση μάζας

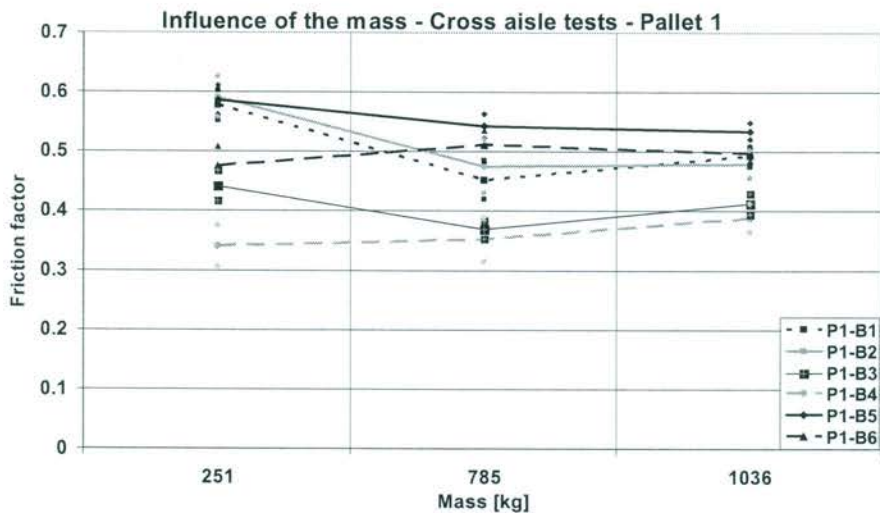
Η επίδραση της μάζας στο συντελεστή τριβής εξετάστηκε για μάζα 251kg, 785kg και 1036kg, για την παλέτα P1 και όλους τους τύπους δοκών. Η μάζα ήταν ακλόνητα τοποθετημένη στην παλέτα, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η σχετική μετακίνησή της. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για μάζα 251kg, 785kg και 1036kg. Από το σχήμα αυτό προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Οι δοκιμές με μάζα 251Kg οδήγησαν σε μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή τριβής για όλους τους τύπους των δοκών, με εξαίρεση τη δοκό B4. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στη γεωμετρία της μάζας που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία. Το κέντρο βάρους της μάζας αυτής είναι χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μάζας των 785Kg, το οποίο οδηγεί σε μικρότερη «ροπή ανατροπής» (το φαινόμενο αυτό εξετάζεται στις δοκιμές κατά μήκος των δοκών).
- Ο συντελεστής τριβής είναι ίδιας τάξης για τη μάζα των 785 kg και 1036 kg ειδικά για τις δοκούς B1, B2, B5 και B6. Για τις δοκούς B3 και B4 η τιμή του συντελεστή τριβής η οποία αντιστοιχεί στη μάζα των 1036Kg είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 10. Επίδραση τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για μάζα 251kg, 785Kg και 1036Kg.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η επίδραση της μάζας στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπους δοκών. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η μάζα επηρεάζει το συντελεστή τριβής των δοκών B1, B2 και B3, ενώ στην περίπτωση των δοκών B4, B5 και B6 ο συντελεστής τριβής είναι πρακτικά σταθερός. Επίσης, ο μεγαλύτερος συντελεστής παρατηρείται για τη μάζα των 251Kg, ανεξάρτητα από τον τύπο της δοκού. Γενικά, η επίδραση της μάζας στον συντελεστή τριβής είναι μικρότερη συγκρινόμενη με τις άλλες εξεταζόμενες παραμέτρους.



Σχήμα 11. Επίδραση της μάζας στον στατικό συντελεστή τριβής για διάφορους τύπους δοκών.

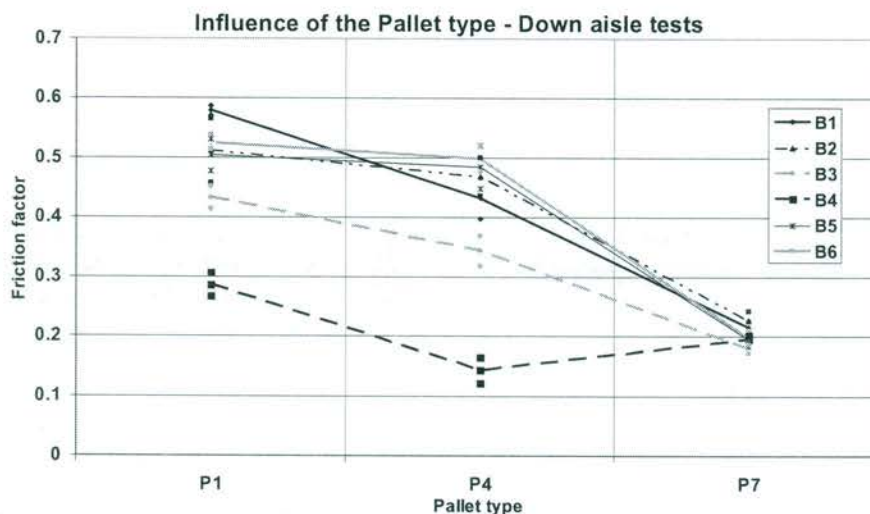
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΓΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

Η ολίσθηση κατά τη διεύθυνση αυτή, είναι λιγότερο επικίνδυνη συγκρινόμενη με την ολίσθηση εγκάρσια των δοκών. Οι ίδιες παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν στις προηγούμενες δοκιμές, θα εξεταστούν και σ' αυτή τη διεύθυνση. Τα σχήματα που

παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται στη μέση τιμή του συντελεστή τριβής. Κάθε δοκιμή με διαφορετικό συνδυασμό παλέτας- δοκού - μάζας επαναλήφθηκε τριάντα φορές.

Επίδραση του τύπου παλέτας

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου παλέτας στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπου δοκών. Σε όλες τις δοκιμές, μάζα των 785 kg ήταν τοποθετημένη κεντρικά στην παλέτα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την παλέτα P1 προκύπτει η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή τριβής και για την παλέτα P7 η μικρότερη, η οποία είναι ανεξάρτητη από τον τύπο της δοκού. Για τη παλέτα P4 υπολογίζεται ενδιάμεση τιμή του συντελεστή τριβής, με εξαίρεση τη δοκό B4.



Σχήμα 12. Επίδραση τύπου παλέτας στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπους δοκών.

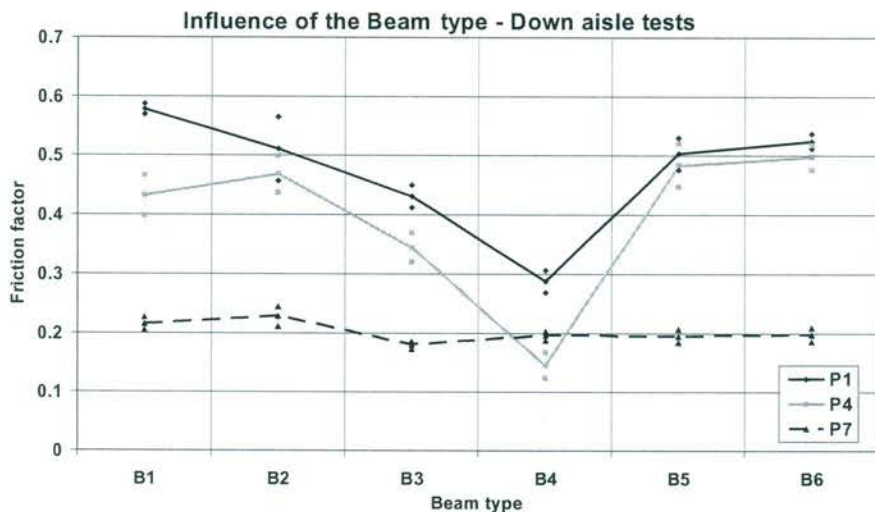
Επίδραση του τύπου δοκού

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για τις παλέτες P1, P4 και P7. Σε όλες τις δοκιμές, μάζα των 785 kg ήταν τοποθετημένη κεντρικά στην παλέτα. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής τριβής παρατηρείται στις δοκιμές της παλέτα P1, ο μικρότερος στις δοκιμές της παλέτα P7, ενώ ο συντελεστής τριβής έχει ενδιάμεση τιμή στις δοκιμές της παλέτας P4. Ο συντελεστής τριβής ο οποίος υπολογίζεται για την παλέτα P7 είναι σχετικά σταθερός, ενώ ο συντελεστής τριβής για τις παλέτες P1 και P4 εξαρτάται από τον τύπο της δοκού.

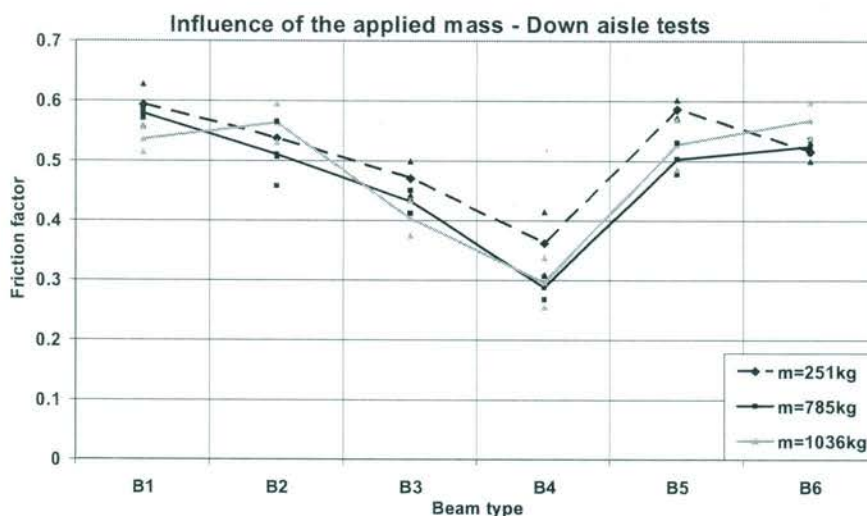
Επίδραση μάζας

Η επίδραση της μάζας στο συντελεστή τριβής εξετάστηκε για μάζα 251kg, 785kg και 1036kg, για την παλέτα P1 και όλους των τύπων δοκών. Η μάζα ήταν ακλόνητα τοποθετημένη στο μέσο της παλέτας, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η σχετική μετακίνησης της. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η επίδραση του τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για μάζα 251kg, 785kg και 1036kg, ενώ στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η επίδραση της μάζας για διαφορετικό

τύπο δοκού. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι για κάθε τύπο δοκού, ο συντελεστής τριβής δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μάζα. Επίσης ανεξάρτητα από τη μάζα που τοποθετείται στη παλέτα, ο συντελεστής τιμής για τη δοκό B4 έχει τη μικρότερη τιμή.



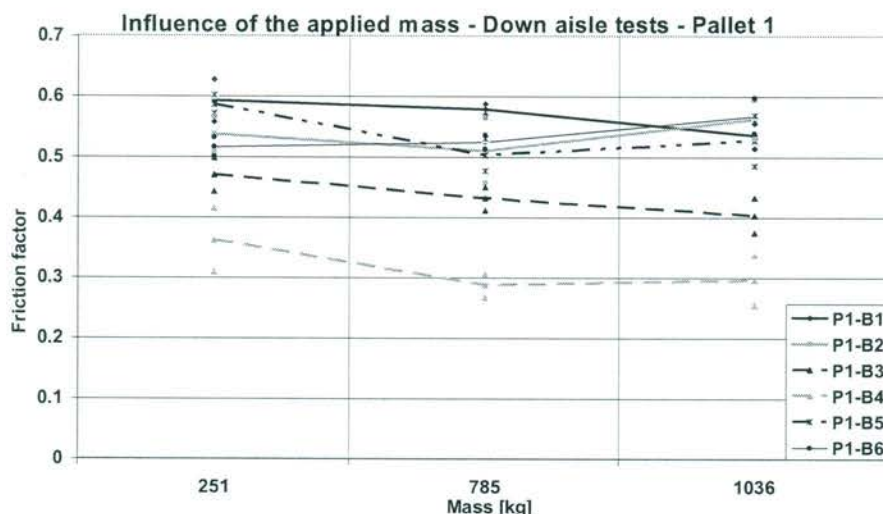
Σχήμα 13. Επίδραση τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για τους διάφορους τύπους παλέτας.



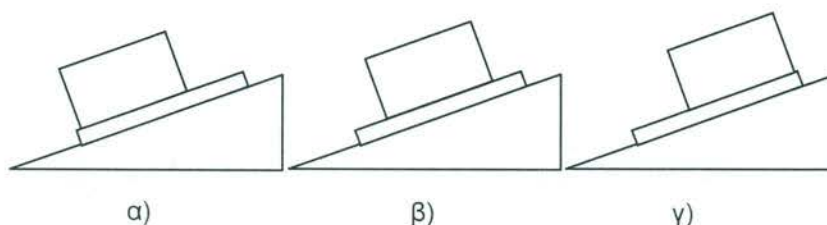
Σχήμα 14. Επίδραση τύπου δοκού στον στατικό συντελεστή τριβής για μάζα 251Kg, 785Kg και 1036Kg.

Επίδραση της εκκεντρότητας της μάζας

Η επίδραση της εκκεντρότητας της μάζας εξετάστηκε μόνο κατά την ολίσθηση κατά μήκος των δοκών. Η διαφορετική θέση της μάζας στην παλέτα (κεντρικά, έκκεντρα προς τα πάνω ή προς τα κάτω) οδηγεί σε διαφορετική κατανομή δυνάμεων στις δοκούς και ενδέχεται να επηρεάζει την τιμή του συντελεστή τριβής. Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται οι τρεις θέσεις της μάζας οι οποίες εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα.



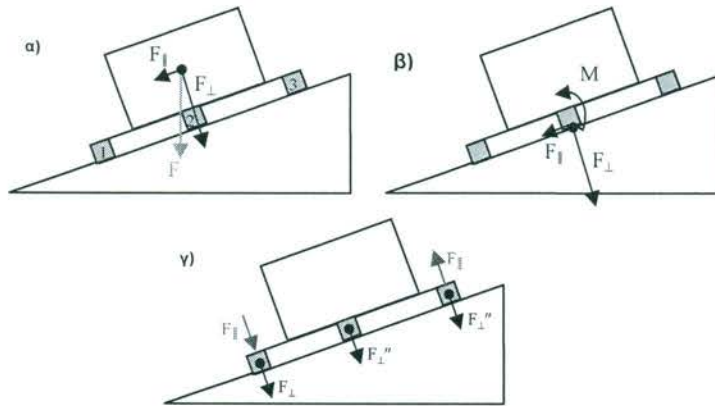
Σχήμα 15. Επίδραση μάζας στον στατικό συντελεστή τριβής για διάφορους τύπους δοκών.



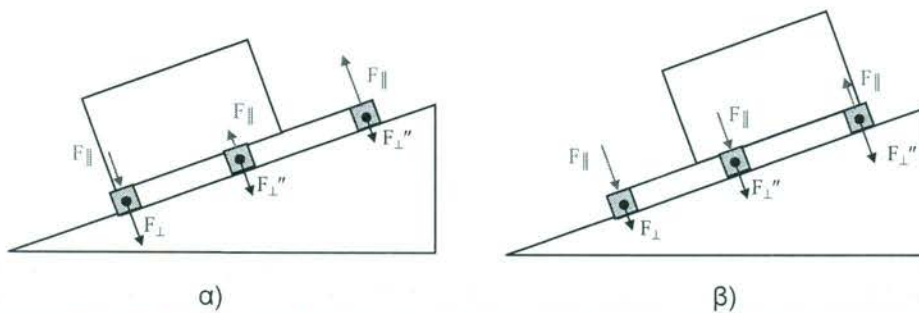
Σχήμα 16. Διαφορετικές θέσεις μάζας στην παλέτα: α): έκκεντρα προς τα κάτω, β): κεντρικά και γ): έκκεντρα προς τα πάνω

Το βάρος της μάζας αναλύεται σε δύο συνιστώσες F_{\perp} και F_{\parallel} στο κεκλιμένο επίπεδο. Η κάθετη συνιστώσα μειώνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής με την αύξηση της γωνίας α του επιπέδου. Η συνιστώσα F_{\perp} μπορεί να θεωρηθεί ότι ασκείται σε τρία σημεία F_{\perp} (1), F_{\perp}'' (2) και F_{\perp}''' (3) όπως φαίνεται στο Σχήμα 17α. Η συνιστώσα F_{\parallel} η οποία ασκείται στο κέντρο βάρους της μάζας, μεταφέρεται ως οριζόντια δύναμη (δύναμη τριβής) στο επίπεδο ολίσθησης στη διεπιφάνεια δοκού- παλέτας. Επίσης η δύναμη αυτή, δημιουργεί μια ροπή (ροπή ανατροπής) στο επίπεδο ολίσθησης (Σχήμα 17β). Η ροπή αυτή αυξάνει την αντίδραση F_{\parallel} στο σημείο 1 και μειώνει F_{\parallel}'' στο σημείο 3, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17γ.

Όταν η μάζα τοποθετείται προς το κάτω τμήμα της παλέτας (έκκεντρα προς τα κάτω), η κατακόρυφη αντίδραση στο σημείο 3 είναι μικρότερη από αυτήν των σημείων 1 και 2. Επιπλέον, η ροπή ανατροπής αυξάνει την αντίδραση στο σημείο 1 και μειώνει αυτή στο σημείο 3. Αυτό οδηγεί στο «ανασήκωμα» του σημείου 3 (σχήμα 18α), στη μείωση δηλαδή της επιφάνειας επαφής δοκού-παλέτας. Όταν η μάζα τοποθετείται στο κέντρο της παλέτας, το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο έντονο. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η μάζα τοποθετείται προς το άνω τμήμα της παλέτας (έκκεντρα προς τα πάνω), η ροπή δημιουργεί μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων στα σημεία 1, 2 και 3 και η επιφάνεια επαφής δοκού- παλέτας γίνεται «μέγιστη» (Σχήμα 18β).

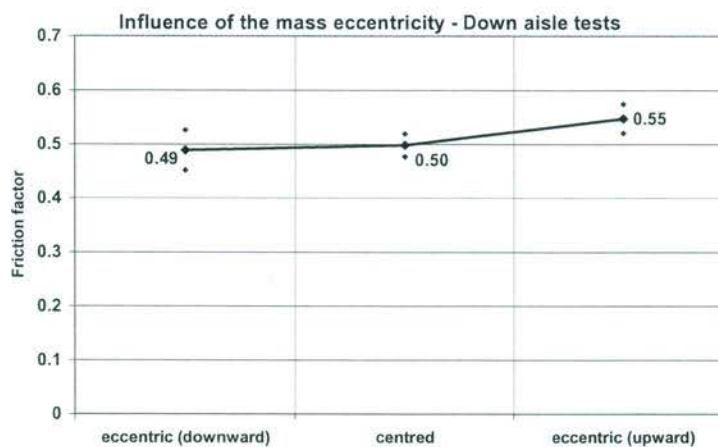


Σχήμα 17. Κατανομή κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας βάρους κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 18. Κατακόρυφες συνιστώσες δοκού στο επίπεδο ολίσθησης, λόγω κατακόρυφης συνιστώσας βάρους και ροπής: α) η μάζα τοποθετείται έκκεντρα προς τα κάτω, β): η μάζα τοποθετείται έκκεντρα προς τα πάνω.

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για το συνδυασμό παλέτας P4 και δοκού B6. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πιο πάνω θεωρητική ανάλυση. Όταν η μάζα τοποθετείται έκκεντρα προς τα πάνω, ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίζεται όταν η μάζα τοποθετείται έκκεντρα προς τα κάτω, ενώ η τοποθέτηση της μάζας στο κέντρο της παλέτας οδηγεί σε ενδιάμεση τιμή του συντελεστή τριβής. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 19, η μεταβολή στην τιμή του συντελεστή τριβής λόγω της διαφορετικής θέσης της μάζας είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 19. Επίδραση της θέσης της μάζας στο συντελεστή τριβής για το συνδυασμό P4-B6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα στατικών δοκιμών για την εκτίμηση του συντελεστή τριβής μεταξύ παλετών και δοκών μεταλλικών ραφιών αποθήκευσης για ολίσθηση κατά μήκος και εγκάρσια των δοκών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Storage racks in seismic areas». Η επίδραση του τύπου των μεταλλικών δοκών, του τύπου των παλετών, της γεωμετρίας και του βάρους της μάζας, στην εκτίμηση του συντελεστή τριβής εξετάστηκαν κατά τις δοκιμές.

Η επίδραση των δοκών εξετάστηκε μέσω έξι διαφορετικών τύπων δοκών, οι οποίες είχαν διαφορετική διατομή και τελική επιφάνεια. Τόσο στις δοκιμές κατά μήκος των δοκών όσο και κατά τις δοκιμές εγκάρσια των δοκών, η τελική επιφάνεια των δοκών επηρεάζει σημαντικά το στατικό συντελεστή τριβής. Στην περίπτωση της ξύλινης παλέτας (Ευρωπαϊκής και Αμερικάνικης) οι διαφορές στην τιμή του συντελεστή τριβής κυμαίνονται μεταξύ 20-30% για διαφορετικό τύπο δοκού.

Η επίδραση των παλετών εξετάστηκε μέσω τριών διαφορετικών τύπων παλετών: τη ξύλινη Ευρωπαϊκή παλέτα, τη ξύλινη Αμερικάνικη παλέτα και την Πλαστική Ευρωπαϊκή παλέτα. Τόσο στις δοκιμές κατά μήκος των δοκών όσο και κατά τις δοκιμές εγκάρσια των δοκών, η πλαστική παλέτα οδηγεί σε μικρό συντελεστή τριβής (της τάξης του 0.2) ο οποίος πρακτικά δεν επηρεάζεται από τον τύπο της δοκού. Ο συντελεστής τριβής, ο οποίος υπολογίζεται για τις ξύλινες παλέτες (Ευρωπαϊκή και Αμερικάνικη) είναι της τάξης του 0.5 και η τελική επιφάνεια των δοκών επηρεάζει την τιμή του.

Στις δοκιμές για ολίσθηση κατά μήκος και εγκάρσια των δοκών, το βάρος της μάζας δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Επίσης, η θέση της μάζας στην παλέτα (κεντρικά, έκκεντρα προς τα πάνω, έκκεντρα προς τα κάτω), η οποία εξετάστηκε στις δοκιμές για ολίσθηση κατά μήκος των δοκών, έδειξε μικρή διαφορά στην τιμή του συντελεστή τριβής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο αυτό χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή ένωση με το πρόγραμμα «Storage racks in seismic areas».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Armstrong B., Dupont P., Canudas de Wit C., (1994), "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction", *Automatica*, 30 (7), pp.1083–1138.
- Armstrong B., (1988), "Friction: Experimental determination, modelling and compensation", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3(1), pp. 422–1427.
- Bliman, PA., Sorine, M., (1991), "Friction modelling by hysteresis operators. application to Dahl, sticktion and Stribeck effects". *In Proceedings of the Conference "Models of Hysteresis"*, Trento, Italy.
- Bliman, PA., Sorine, M., (1993), "A system-theoretic approach of systems with hysteresis". Application to friction modelling and compensation. *In Proceedings of the second European Control Conference*, Groningen, TheNetherlands, pp. 1844–49.

- Bliman, PA., Sorine M., (1995), "Easy-to-use Realistic Dry Friction Models for Automatic Control", in *Proceedings of the 3rd European Control Conference, ECC'95*, Rome, Italy, pp. 3788-3794.
- Dahl, PR., (1968), A Solid Friction Model, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, Tech. Rep. TOR- 0158(3107-18).
- Dahl, PR., (1975), "Solid friction damping of spacecraft oscillations", AIAA Paper No.75-1104, AIAA Guidance and Control Conference, Boston, USA
- Dahl, PR., (1976), "Solid friction damping of mechanical vibrations", *AIAA Journal*, 14(12), pp.1675–82
- Karnopp, D. (1985), "Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems", *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 107(1), pp. 100–103.
- LEE/NTUA, (2005), "Storage racks in seismic areas, Contribution of LEE/NTUA", *Technical Report*, Laboratory for Earthquake Engineering, National Technical University of Athens.
- Αγραφιώτου Ε. (2005) «Συντελεστής τριβής μεταξύ παλετών και δοκών ραφιών παράλληλα προς τις δοκούς». Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας.
- Αγαδάκου Α. (2005) «Συντελεστής τριβής μεταξύ παλετών και δοκών ραφιών κάθετα προς τις δοκούς». Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας.