

**Κ.-Δ. Μπουζάκης¹, Δ. Παντερμαλής², Κ. Ευσταθίου¹, Ι. Τσιάφης¹, Ε. Βαρύτης¹,
Γ. Παραδεισιάδης³**

1. Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
2. Αρχαιολογικά Εργαστήρια Δίου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
3. Τμήμα Τεχνολογίας Οχημάτων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τη βοήθεια μετρήσεων τομογράφου ακτινών Roentgen βιομηχανικών χρήσεων, υποστηριζόμενου από ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y), γίνεται διερεύνηση μιας μεταλλικής κεφαλής ανάρτησης θαλάμου επιβατών ζύλινης ταξιδιωτικής άμαξας, που βρέθηκε κατά τη διάρκεια ανασκαφών στο Δίον. Μέσω των τομογραφιών μοντελοποιήθηκε η γεωμετρία της κεφαλής της ανάρτησης και έγινε έλεγχος της αντοχής της με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια διερευνήθηκε και σχεδιάστηκε το μοντέλο της άμαξας και του συστήματος ανάρτησής της, με σκοπό να υπολογιστούν οι ταλαντώσεις που δέχονται οι επιβαίνοντες από την διέγερση της οδού κατά την μετακίνησή τους, οι οποίες επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Αρχαιολογικά ευρήματα, βιομηχανικός τομογράφος με την βοήθεια H/Y, στερεά μοντελοποίηση, αντοχή, ταλαντώσεις,

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

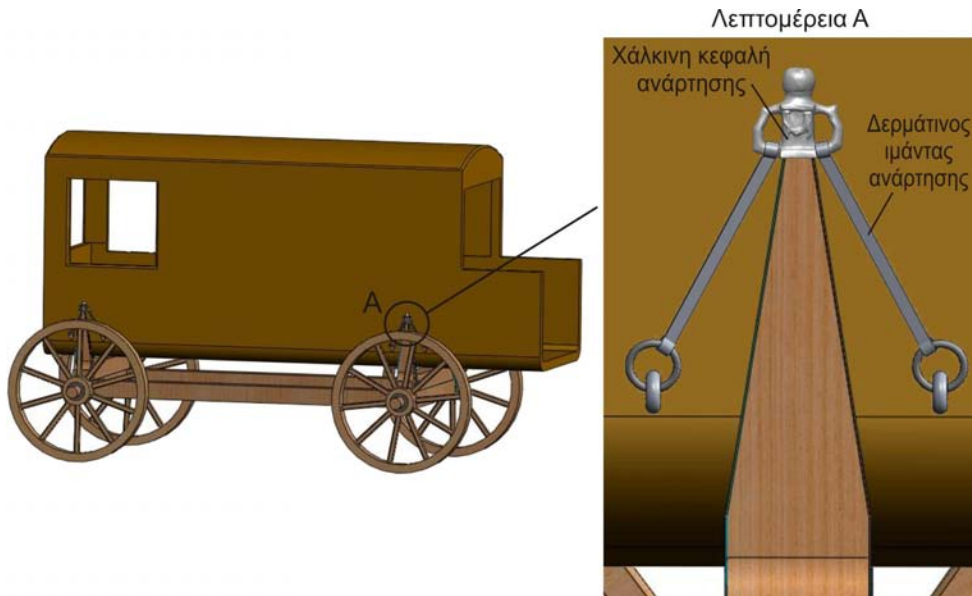
Ένα σημαντικό εύρημα που βρέθηκε κατά την διάρκεια ανασκαφών στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου, οι οποίες διεξήχθησαν από τον καθηγητή κ. Δ. Παντερμαλή, είναι μια ορειχάλκινη κεφαλή ανάρτησης άμαξας της Ρωμαϊκής εποχής. Το 3D μοντέλο της άμαξας καθώς και ο τρόπος ανάρτησης του θαλάμου των επιβατών σχεδιάστηκε, με βάση πληροφοριών που προέκυψαν από αρχαιολογικά ευρήματα /1,2,3/, στο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks /4/ και φαίνεται στο σχήμα 1. Σύμφωνα με το σχήμα η ανάρτηση του θαλάμου γινόταν μέσω δερμάτινων ιμάντων στο πλαίσιο της άμαξας. Οι ιστοί αυτοί ήταν ενισχυμένοι με μεταλλικά ελάσματα και στην κορυφή τους έφεραν τις χάλκινες κεφαλές, με εκατέρωθεν δακτυλίους, μορφής δακτύλων ανθρώπου. Οι δερμάτινοι ιμάντες αναρτούσαν το θαλαμίσκο στους δακτυλίους της κεφαλής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονταν σχετική απορρόφηση των δονήσεων για την άνεση των επιβατών.

Με στόχο τη διερεύνηση της ανάρτησης, ώστε να προκύψουν πληροφορίες που αφορούν την αντοχή της, καθώς και τις ταλαντώσεις που δέχονται οι επιβάτες της άμαξας, οι οποίες και επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης κατά την μετακίνησή τους, είναι αναγκαίο καταρχήν να καταγραφεί η στερεά γεωμετρία της κεφαλής της ανάρτησης.

Η γεωμετρία της κεφαλής της ανάρτησης καταγράφηκε με τη βοήθεια αξονικών τομογραφιών σε βιομηχανικό αξονικό τομογράφο, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε καταστροφή του πρωτοτύπου, και για να ερευνηθούν εσωτερικές μη ορατές λεπτομέρειες της γεωμετρίας της. Τα δεδομένα της μέτρησης που προέκυψαν από τον τομογράφο υποβλήθηκαν σε περαιτέρω επεξεργασία



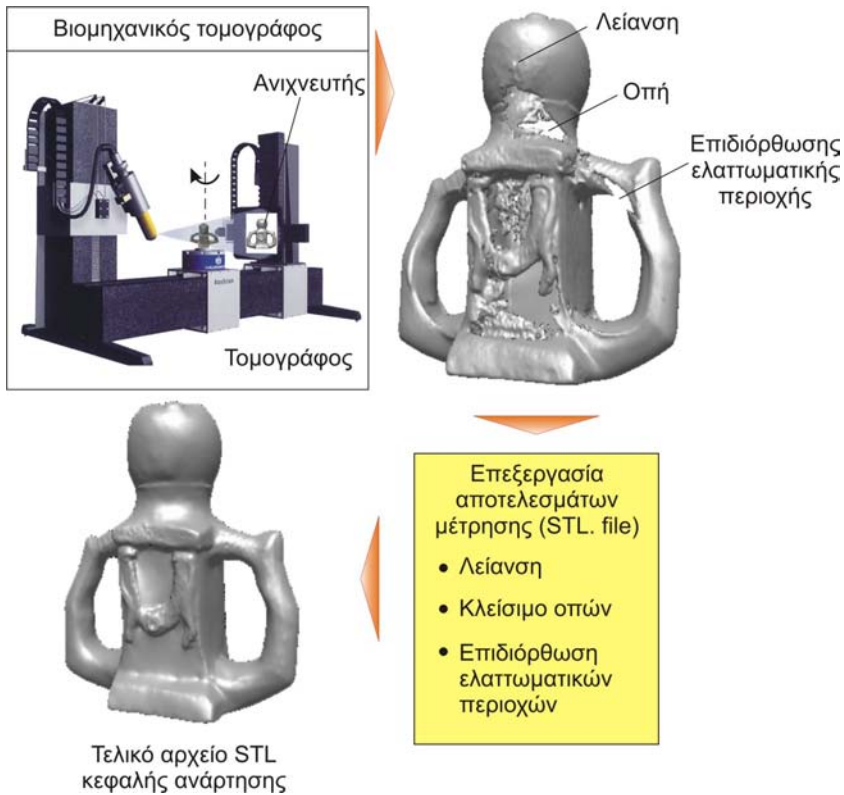
για την περιγραφή της γεωμετρίας της ανάρτησης και για την δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου για τον έλεγχο της αντοχής της με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 1. Τρισδιάστατο μοντέλο της άμαξας με το σύστημα ανάρτησής της

Η αξονική τομογραφία είναι μια νέα καινοτομική μέθοδος, που χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλές βιομηχανικές, ιατρικές και άλλες εφαρμογές. Υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους σάρωσης, όπως με laser ή τρισδιάστατη μετρητική μηχανή ως προς το γεγονός ότι έχει την δυνατότητα καταγραφής τόσο της εξωτερικής όσο και της εσωτερικής γεωμετρίας του αντικειμένου. Ένας βιομηχανικός τομογράφος καθοδηγούμενος από Η/Υ καθώς και η αρχή λειτουργίας του παρουσιάζεται παραστατικά στο [σχήμα 2](#).

Τα κύρια μέρη του αξονικού τομογράφου είναι η πηγή ακτινοβολίας, η οποία παράγει ακτινοβολία Roentgen, και ο ανιχνευτής. Το αντικείμενο που πρόκειται να υποβληθεί σε τομογραφία τοποθετείται σε ειδική υποδοχή του τομογράφου και καταγράφονται διαδοχικές τομές του, σε μικρό σχετικά χρόνο, περιστρέφοντας το αντικείμενο. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικός τομογράφος ισχύος 250 KVA με ακρίβεια διακριτοποίησης της τάξης των 10 μm . Ωστόσο λόγω του μεγάλου πάχους που έχουν τα τοιχώματα της ανάρτησης δεν ήταν δυνατό οι ακτίνες να διαπεράσουν όλο το πάχος, με αποτέλεσμα να μην αποδοθεί στο αρχείο της μέτρησης σωστά η γεωμετρία του αντικειμένου. Όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος 2, στην επιφάνεια της ανάρτησης εμφανίζονται οπές και διάφορες ελαττωματικές περιοχές. Για την επιδιόρθωση των περιοχών αυτών, το αρχείο των μετρήσεων εισήχθη σε κατάλληλο λογισμικό, όπου και πραγματοποιήθηκαν ειδικές εργασίες όπως π.χ. λείανσης και συμπλήρωσης οπών. Η τελική μορφή του αρχείου (STL) που προέκυψε φαίνεται στο κάτω αριστερό μέρος του ίδιου σχήματος. Από τη στιγμή που μοντελοποιήθηκε η γεωμετρία της κεφαλής της ανάρτησης, είναι δυνατόν να αναπαραχθεί το αντικείμενο με χύτευση.



Σχήμα 2: Καταγραφή της γεωμετρίας της κεφαλής ανάρτησης με βιομηχανικό αξονικό τομογράφο.

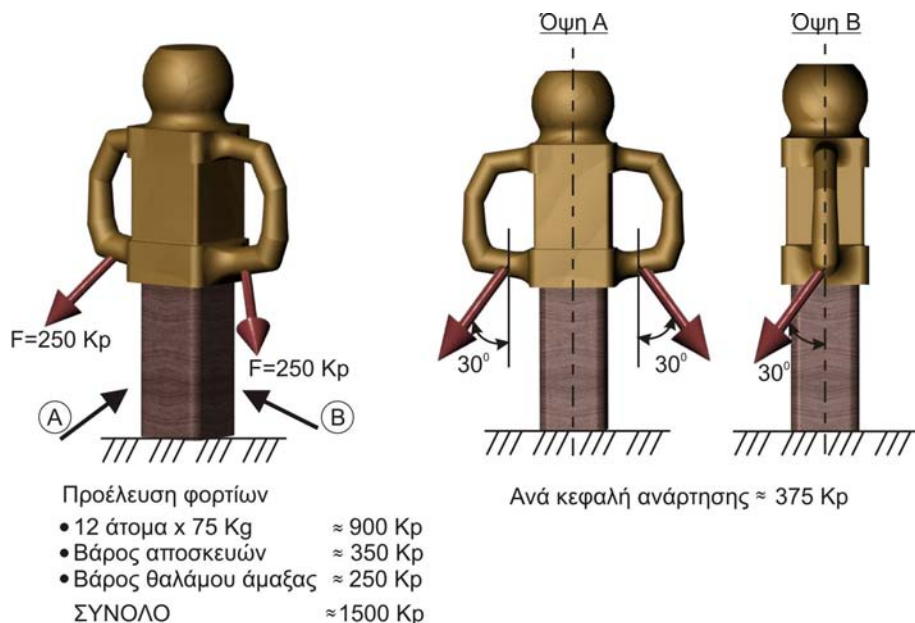
2. ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Στο σχήμα 1 παρουσιάστηκε ο τρόπος ανάρτησης θαλάμου επιβατών ξύλινης ταξιδιωτικής άμαξας της Ρωμαϊκής εποχής. Ο αιωρούμενος θάλαμος της άμαξας αναρτάται με τη βοήθεια 8 δερμάτινων ιμάντων στα τέσσερα σημεία της ανάρτησης, στις κατάλληλα διαμορφωμένες κεφαλές ανάρτησης. Μέσω προσομοίωσης με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε ο υπολογισμός της αντοχής της κεφαλής ανάρτησης.

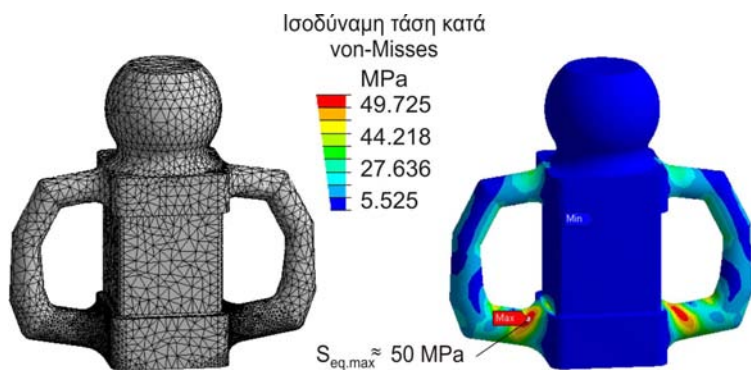
Στο σχήμα 3 φαίνεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς αυτούς. Εν προκειμένω θεωρήθηκε ότι το βάρος του θαλάμου επιβατών της άμαξας μαζί με τους επιβαίνοντες και αποσκευές τους ανέρχεται σε 1500 kg. Το βάρος αυτό εκτιμήθηκε όπως παρακάτω:

12 άτομα x75 Kg	=900 Kg (10 επιβάτες,2 οδηγοί)
βάρος αποσκευών	=350 Kg
<u>βάρος θαλάμου άμαξας</u>	<u>=250 Kg</u>
ΣΥΝΟΛΟ	1500 kg

Στο σχήμα 4 εμφανίζεται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων του χρησιμοποιηθέντος μοντέλου και στο δεξιό μέρος του σχήματος τα αποτελέσματα ανάλυσης των δημιουργούμενων τάσεων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 10.0./5/. Όπως αναμενόταν η μέγιστη τάση παρουσιάζεται στο σημείο ένωσης του δακτυλίου με τον



Σχήμα 3: Ανάλυση των καταπονήσεων στο στερεό μοντέλο της ανάρτησης.



Ενδεικτικές ιδιότητες μπρούντζου

Μέτρο ελαστικότητας	115 GPa
Πυκνότητα	8750 Kg/m ³
Όριο διαρροής	109 MPa
Όριο θραύσης	185 MPa

Σχήμα 4: Διακριτοποίηση της κεφαλής ανάρτησης σε πεπερασμένα στοιχεία και υπολογισμένη κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά von Mises.

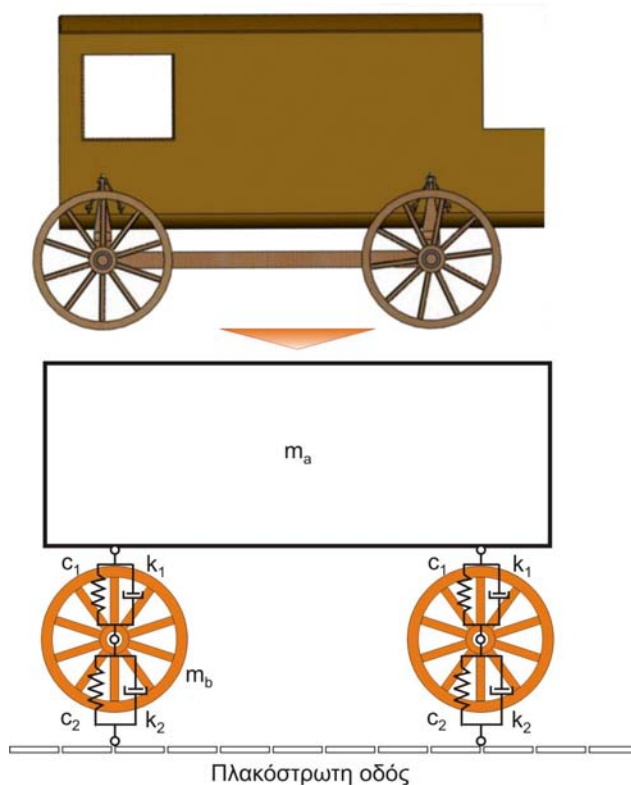
κορμό. Η μέγιστη αυτή τάση ανέρχεται σε περίπου 50 Mpa. Το όριο θραύσης του αμμοχτυεμένου κράματος χαλκού, που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς, εκτιμάται σε 185 Mpa (βλέπε σχετικό πίνακα καταχωρημένο στο σχήμα 23). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει για την κεφαλή της ανάρτησης υπολογίζεται από τη σχέση $1/\delta$:

$$S = \sigma_B / (\sigma_{\max} \cdot C)$$

C είναι ο συντελεστής λειτουργίας που εκτιμάται σε $C=1.5$. Ο συντελεστής ασφαλείας, που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση είναι ίσος με $S=2.48$, αρκετά ικανοποιητικός και για θραύση λόγω κόπωσης ($1.5 \div 3$), σύμφωνα με /6/.

3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΕΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΜΑΞΑΣ

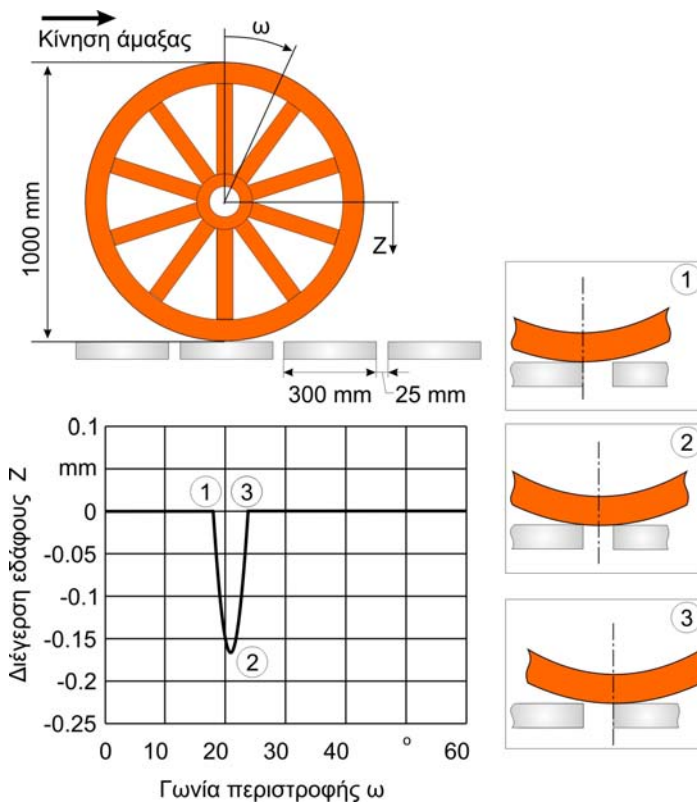
Στο πάνω μέρος του σχήματος 5 εικονίζεται το μοντέλο της άμαξας όπως έχει σχεδιαστεί στο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks 2008. Για τη διερεύνηση των ταλαντώσεων που αναπτύσσονται στην άμαξα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της άμαξας που φαίνεται στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η άμαξα αποτελείται από τη μάζα $m_a=1500$ Kg που αντιπροσωπεύει το βάρος του θαλάμου μαζί με τους επιβαίνοντες και τις αποσκευές (όπως προσδιορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο), τη μάζα $m_b=350$ Kg που αντιπροσωπεύει το βάρος των τροχών και του πλαισίου της άμαξας, την σταθερά ελατηρίου $c_1=6.2 \cdot 10^6$ N/m και την σταθερά απόσβεσης $k_1=1240$ Nm/sec που προσδιορίζεται με βάση το μέτρο ελαστικότητας και απόσβεσης των δερμάτινων ιμάντων αντίστοιχα /7/, και τις σταθερές $c_2=1.6 \cdot 10^7$ N/m, $k_2=3200$ Nm/sec το μέτρο ελαστικότητας και απόσβεσης αντίστοιχα του ξύλινου τροχού /8/ και της μεταλλικής στεφάνης που τον περιβάλλει.



Σχήμα 5: Τρισδιάστατο και απλοποιημένο μοντέλο της άμαξας.

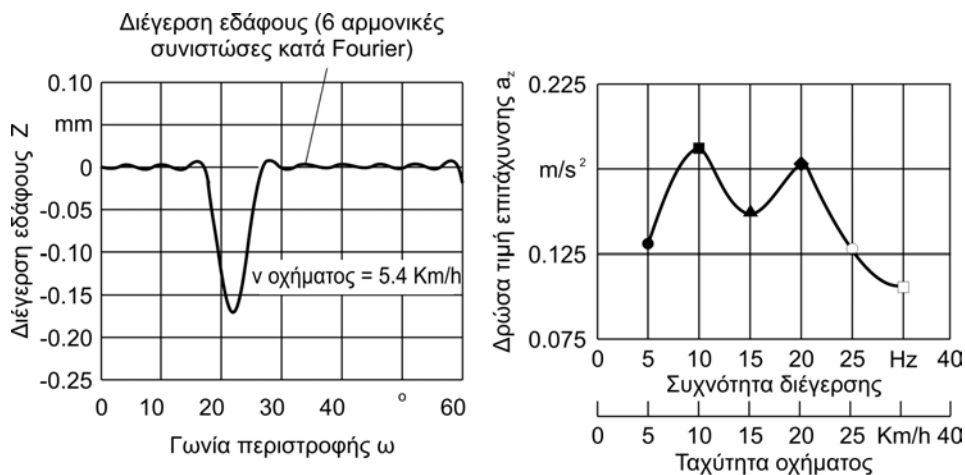
Όπως είναι γνωστό ο θάλαμος των επιβατών αναρτάται από δύο στρώσεις δερμάτινων ιμάντων σε κάθε τροχό. Για να μπορέσει η ανάρτηση να αντέξει όλο το βάρος του φορτίου της άμαξας υπολογίστηκε ότι κάθε στρώση αποτελείται από 4 επιμέρους δερμάτινους ιμάντες πάχους 2 mm.

Η διέγερση του εδάφους προκύπτει από την μελέτη των ρωμαϊκών δρόμων που αναφέρεται στο /9/ καθώς και από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στους πλακόστρωτους δρόμους στην περιοχή του Δίου όπου και βρέθηκε η συγκεκριμένη κεφαλή ανάρτησης. Σύμφωνα με τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ότι οι πλάκες έχουν μέσο μήκος 300 mm ενώ το ενδιάμεσο κενό μεταξύ τους είναι περίπου 25 mm. Στο πάνω μέρος του σχήματος 6 έχει σχεδιαστεί ο τροχός της άμαξας και οι πλάκες του δρόμου. Κατά την κίνηση του τροχού σύμφωνα με την φορά που δηλώνεται στο σχήμα ο τροχός περνάει διαδοχικά από τις τρεις θέσεις που σημειώνονται στο δεξί μέρος του σχήματος. Στη θέση 1 η αξονική που διέρχεται από το κέντρο του τροχού είναι ακριβώς στο δεξί άκρο της αριστερής πλάκας, στη θέση 2 η αξονική βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του κενού μεταξύ των δύο πλακών ενώ στη θέση 3 ο τροχός έχει ανέβει πάνω στην δεξιά πλάκα και η αξονική βρίσκεται στο αριστερό της άκρο. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται κατά την κίνηση της άμαξας. Η διαδικασία αυτή διεγείρει την άμαξα σύμφωνα με την καμπύλη που έχει υπολογιστεί στο αριστερά κάτω μέρος του ίδιου σχήματος. Στο διάγραμμα αυτό έχει υπολογιστεί η διέγερση του εδάφους [mm] συναρτήσει της γωνίας περιστροφής ω [°]. Σαν μηδενικό επίπεδο έχει οριστεί το κέντρο του τροχού. Στο διάγραμμα έχουν σημειωθεί οι 3 φάσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως. Έτσι σύμφωνα με το σχήμα στα σημεία 1 και 3 η διέγερση έχει την οριακή τιμή μηδέν ενώ στο σημείο 2 η διέγερση έχει την μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 6: Διέγερση εδάφους συναρτήσει της γωνίας περιστροφής της ρόδας.

Το παραπάνω σήμα αποτελεί το θεωρητικό σήμα της διέγερσης του εδάφους. Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η καμπύλη της διέγερσης εδάφους συναρτήσει της γωνίας περιστροφής που προκύπτει από την ανάλυση κατά Fourier 6 αρμονικών όρων. Η ταχύτητα της άμαξας έχει οριστεί σε $v_{\text{οχήματος}} = 5.4 \text{ Km/h}$. Στη συνέχεια υπολογίζεται η δρώσα τιμή της επιτάχυνσης a_z ως επαλληλία των 6 πρώτων αρμονικών όρων της ανάλυσης κατά Fourier χρησιμοποιώντας ως βασική συχνότητα την συχνότητα του πρώτου αρμονικού όρου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας ως βασική συχνότητα την συχνότητα των άλλων 5 αρμονικών όρων και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το αριστερό διάγραμμα του σχήματος 7.



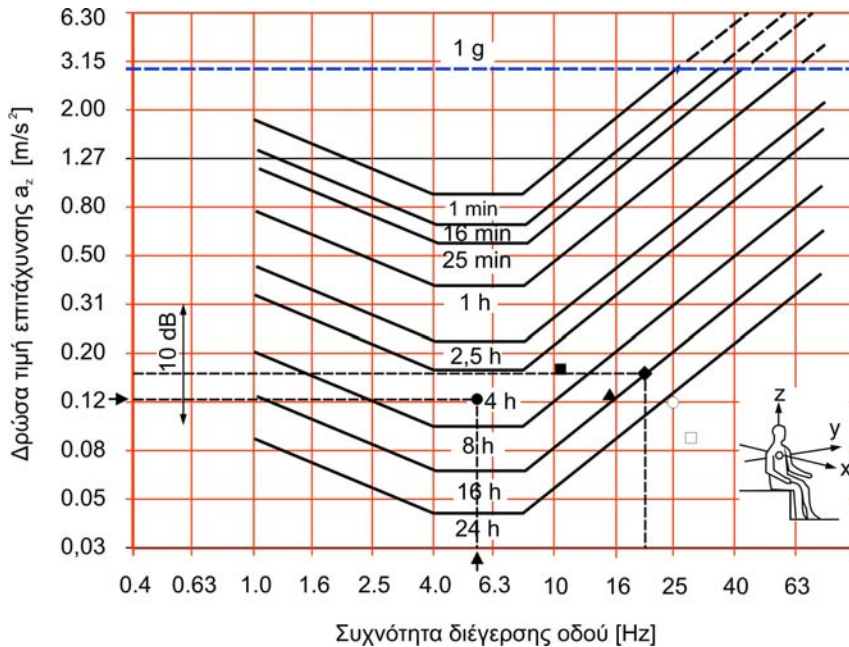
Σχήμα 7: Διάγραμμα διέγερσης εδάφους 6 αρμονικών συνιστωσών κατά Fourier συναρτήσεως της γωνίας περιστροφής του τροχού και διάγραμμα δρώσας τιμής επιτάχυνσης συναρτήσεως της βασικής συχνότητας διέγερσης.

Για τον προσδιορισμό της άνεσης των επιβατών της άμαξας σύμφωνα με το ISO 2631 χρησιμοποιείται το διάγραμμα του σχήματος 8. Στο διάγραμμα αυτό έχουν σημειωθεί τα ζεύγη της δρώσας τιμής της επιτάχυνσης a_z ως επαλληλία των 6 πρώτων αρμονικών όρων με τις βασικές συχνότητες. Από το διάγραμμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι δυσμενέστερη επίπτωση στην άνεση των επιβατών προκαλείται στην βασική συχνότητα του δεύτερου αρμονικού όρου όπου η δρώσα τιμή της επιτάχυνσης είναι 0.185 m/s^2 και η άνεση των επιβατών χάνετε έπειτα από 4 ώρες ταξιδιού με την άμαξα. Στις άλλες βασικές συχνότητες (τρίτη έως έκτη) είναι εμφανές ότι η άνεση χάνετε έπειτα από περισσότερες ώρες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καινοτομικές τεχνολογίες όπως η τομογραφία ακτινών Roentgen, υποστηριζόμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή, επιτρέπουν την ακριβή καταγραφή της γεωμετρίας αρχαίων αντικειμένων και διευκολύνουν την κατανόηση του τρόπου μορφοποίησης και λειτουργίας τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε μέσω Η/Υ τομογραφιών, μια κεφαλή ανάρτησης θαλάμου επιβατών, ξύλινης ταξιδιωτικής άμαξας της ρωμαϊκής εποχής. Η τρισδιάστατη ηλεκτρονική αναπαράσταση της κεφαλής της ανάρτησης επέτρεψε τον έλεγχο της αντοχής της ανάρτησης κατά την πλήρη φόρτιση της άμαξας μέσω προσομοίωσης με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία έδειξε την ικανοποιητική αντοχή της. Επίσης κατέστη δυνατόν να αξιολογηθούν κάποια βασικά μεγέθη της άμαξας οι οποίες σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά

των οδών της εποχής εκείνης να οδηγήσουν στον υπολογισμό των συνθηκών άνεσης των επιβαίνοντων. Τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής υποδηλώνουν την υψηλή στάθμη τεχνικής κατά την αρχαιότητα.



Σχήμα 8: Υπολογισμός του ανεκτού χρόνου ταξιδιού από τους επιβάτες της άμαξας κατά ISO 2631.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pantermalis, D., In the streets and workshops of Dion, 1999, ed. Pref. of Pieria, Greece.
2. Triandafyllos, D., Terzopoulou, D., Carts and cremations in the mound between Mikri Doxipara and Zoni, Archaeological Work in Macedonia and Thrace, ed. Aristoteles University of Thessaloniki, 2005
3. Tziafalias, A., Excavations in St. Georgios of Larissa, Athens Annals of Archaeology, 1980, bd. XI, issue 1
4. SOLIDWORKS 2006 User's Guide, Solidworks Corporation, Concord, MA, USA
5. ANSYS 10.0 Structural Analysis Guide, 2005, ANSYS, Inc., USA
6. Niemann G. Maschinenelemente, Bd. I, 1975, Springer Verlag
7. Niemann G. Maschinenelemente, Bd. II, 1965, Springer Verlag
8. Athanasiadis G., Strength of materials, 2006
9. Corradi, L., Rasimelli, I., Marchetti, M.I., Corradi, S., Batino S., Corradi, M., The building techniques of the Roman roads: The Via Flaminia from Narni to Forum Flaminium in Umbria, Extraordinary Machines and Structures in Antiquity, pg. 194+205, 2003, ed. Paipetis, Peri Technon