



**Πανεπιστήμιο  
Κύπρου**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ**

**ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ  
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΔΑΣΜΟΥΣ ΚΑΙ  
ΠΟΣΟΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ**

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΒΑΖΟΥΡΑΣ**

**Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση διδακτορικού  
τίτλου σπουδών στο Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Ιανουάριος, 2015**

Το θέμα της Διατριβής αυτής επιλέχθηκε για βελτίωση των επιπέδων ασφάλειας και υγείας στην Κύπρο, ως μέρος της συμφωνίας συνεργασίας του Τμήματος Επιθεώρησης Εργασίας με το Πανεπιστήμιο Κύπρου.

# ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

Υποψήφιος Διδάκτορας: **Αθανάσιος Βαζούρας**

Τίτλος Διατριβής: **Ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση της επαγγελματικής έκθεσης σε κραδασμούς και ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας**

*Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στο **Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Κατασκευαστικής** και εγκρίθηκε στις ..... από τα μέλη της **Εξεταστικής Επιτροπής**.*

Ερευνητικός Σύμβουλος \_\_\_\_\_

Δρ Ανδρέας Κυπριανού, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα ΜΜΜΚ, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής \_\_\_\_\_

Δρ Claus Rebholz, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα ΜΜΜΚ, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής \_\_\_\_\_

Δρ Βασίλης Γεροδήμος, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΤΕΦΑΑ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος Επιτροπής \_\_\_\_\_

Δρ Λουκάς Λουκά, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα ΜΜΜΚ, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής \_\_\_\_\_

Δρ Δήμος Χαρμπίης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα ΠΜΜΠ, Πανεπιστήμιο Κύπρου

# ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ

Η παρούσα Διατριβή υποβάλλεται προς συμπλήρωση των απαιτήσεων για απονομή Διδακτορικού Τίτλου του Πανεπιστημίου Κύπρου. Είναι προϊόν πρωτότυπης εργασίας αποκλειστικά δικής μου, εκτός των περιπτώσεων που ρητώς αναφέρονται μέσω βιβλιογραφικών αναφορών, σημειώσεων ή και άλλων δηλώσεων.

Αθανάσιος Βαζούρας

.....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κραδασμοί αποτελούν φυσικό παράγοντα επαγγελματικής έκθεσης με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων που έχουν αποτυπωθεί σε Διεθνή Πρότυπα και Ευρωπαϊκή Οδηγία. Η απόκριση του καθημένου ανθρώπινου σώματος χαρακτηρίστηκε από μοντέλα για περιγραφή της απόκρισης που προέκυψαν από μέσες τιμές βιοδυναμικών συναρτήσεων. Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή συνδυάζει την επίδραση των κραδασμών στην ανθρώπινη υγεία και αντιπαραβάλλει τη μελέτη της βιοδυναμικής απόκρισης με την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων, διατηρώντας εξατομικευμένες πληροφορίες που σχετίζονται με τους εργαζόμενους και παρουσιάζει στατιστικές συσχετίσεις και ένα νέο τρόπο υπολογισμού της αβεβαιότητας.

Η μελέτη έγινε σε δείγμα 53 χειριστών μηχανημάτων για τους οποίους μετρήθηκε η οκτάωρη έκθεση και η ημερήσια δόση σε κραδασμούς στο χώρο εργασίας, η φαινόμενη μάζα στο εργαστήριο και οι επιπτώσεις στην υγεία μέσω ερωτηματολογίου. Η θεωρητική μελέτη έδειξε την ευαισθησία του μέτρου των βιοδυναμικών συναρτήσεων στην απόσβεση και την αδυναμία του να καταδείξει τους πραγματικούς συντονισμούς του σώματος. Αποδεικνύεται ότι τόσο το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της βιοδυναμικά ορισμένης φαινόμενης μάζας, όσο και το μέγεθος και το εμβαδό αυτής παρέχουν πληροφορίες για την απόκριση και την κατάσταση του ανθρώπινου σώματος. Η ανάλυση των δεδομένων από τα ερωτηματολόγια έδωσε πληροφορίες για την επαγγελματική έκθεση στην Κύπρο. Οι συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων σε διάφορα σημεία του σώματος, που προέκυψαν από εξαναγκασμένη τυχαία και ημιτονοειδή διέγερση των χειριστών σε εργαστηριακό περιβάλλον, έδειξαν την ύπαρξη υψηλών συντελεστών απόσβεσης και υπεραποσβεσμένων ιδιομορφών. Για τον υπολογισμό των ιδιομορφών, το σώμα του κάθε χειριστή μοντελοποιήθηκε λαμβάνοντας το μοντέλο του προτύπου ISO 5982: 2001 ως δεδομένο και με τη χρήση αλγόριθμου διαφορικής εξέλιξης προσδιορίστηκαν οι παράμετροι που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση σφάλματος στο χώρο των φάσεων. Η διασπορά των παραμέτρων συνδυασμένη με παράγοντες που σχετίζονται με την τυχαία και επιστημική αβεβαιότητα του ανθρώπινου σώματος αντιμετωπίστηκε μέσω του υπολογισμού των αναμενόμενων τιμών των φυσικών παρατηρήσιμων μεγεθών του συστήματος από τελεστές πυκνότητας που επιδρούν στους πίνακες της μάζας, των συντελεστών απόσβεσης και των συντελεστών δυσκαμψίας.

# SUMMARY

Occupational exposure to vibrations has adverse health effects to workers, therefore there is a need to regulate the exposure and this is done through a European Directive relying on international standards. The response of the seated human body is simulated by models obtained from the averages of biodynamic functions. This thesis studies the effect of vibration on human health and contrasts the biodynamic responses as derived by the relevant subject with the frequencies of the experimental resonances. In this work the information for each subject is maintained and is statistically correlated with the results of experimental vibration analysis. In addition a new way of quantifying uncertainty is applied to the data.

The experimental investigations were conducted both in the field and the laboratory using a sample of 53 machinery operators. The daily exposure limit value standardized to an eight-hour reference period and the vibration dose value were measured in the field, whereas in the laboratory the biodynamic apparent mass was measured. The health effects were quantified using a questionnaire. The theoretical study showed that the biodynamic functions are very sensitive to the damping ratios and the biodynamic apparent mass is not the appropriate quantity to be used to identify the resonances of the human body. It turns out that both the real and the imaginary part of the biodynamic apparent mass and its magnitude and area provide information about the response and condition of the human body. The analysis of data from the questionnaires also provided information about the occupational exposure in Cyprus. The frequency response functions of different parts of the body, resulting from forced random and sinusoidal excitation of operators in the lab, showed the presence of high damping ratios and overdamped modes. To calculate the eigenmodes, the body of each operator was modeled using the standard ISO 5982:2001. Then the differential evolution optimization algorithm was used to calculate the parameters by minimizing the error function in the phase space. The calculated parameters exhibit variability, which is attributed to the aleatoric and epistemic uncertainty of the human body. The quantification of this uncertainty yielded results that are able to compute expected value of the natural frequencies and decay ratios of the system.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ τη σύζυγό μου Κυπούλα και τα παιδιά μας Άντρια, Χρίστο και Αιμιλία για την υπομονή τους τα χρόνια που ασχολήθηκα για την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Ειλικρινείς ευχαριστίες θέλω να εκφράσω για τον ερευνητικό μου σύμβουλο, Δρ. Ανδρέα Κυπριανού, ο οποίος μου παρείχε απλόχερα πρόσβαση στο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτούνταν για την ολοκλήρωση της παρούσης Διατριβής.

Οι μετρήσεις στο εργαστήριο δεν θα ήταν δυνατό να γίνουν αν ο Λειτουργός Πανεπιστημίου κ. Γεώργιος Βεσσιάρης δεν είχε φροντίσει όλα τα βήματα δημιουργώντας το εργαστήριο για τη μέτρηση των κραδασμών με επιμέλεια και φροντίδα.

Επίσης, ευχαριστώ το Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας για τη δυνατότητα που μου έδωσε, μέσω της κανονικής μου άδειας και της πρόσβασης σε εξοπλισμό του Τμήματος για τη διενέργεια μετρήσεων στο πεδίο.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1.....	1
Εισαγωγή - αρχικός προβληματισμός.....	1
Κεφάλαιο 2.....	3
Περιγραφή υφιστάμενης γνώσης και βιβλιογραφίας.....	3
2.1 Γενική περιγραφή.....	3
2.2 Νομικό καθεστώς.....	6
2.3 Κατάσταση στην Κύπρο.....	6
2.4 Παράγοντες που σχετίζονται με τον άνθρωπο.....	7
2.5 Παράγοντες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό.....	8
2.6 Επιπτώσεις στο ανθρώπινο σώμα.....	9
2.7 Η βιοδυναμική ανάλυση του καθημένου ανθρώπου.....	11
2.8 Απόκριση του σώματος καθημένου ατόμου.....	13
2.9 Μοντελοποίηση και ανάλυση ιδιομορφών (Modal analysis).....	17
Κεφάλαιο 3.....	20
Στόχοι, επιλογή υποκειμένων και μέθοδος ερευνητικής προσέγγισης.....	20
3.1 Στόχοι της ερευνητικής προσέγγισης.....	20
3.2 Επιλογή υποκειμένων.....	21
3.3 Μεθοδολογία.....	22
Κεφάλαιο 4.....	24
Υπολογιστικά αποτελέσματα.....	24
4.1 Γενικά.....	24
4.2 Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.....	24
4.3 Υπολογισμός εξαναγκασμένης απόκρισης (φαινόμενη μάζα).....	27
4.4 Διαφορές μεταξύ συντονισμών της φαινόμενης μάζας και των ιδιοσυχνοτήτων.....	29
4.4.1 Σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας.....	31
4.4.2 Σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας.....	32
4.5 Συμπεράσματα υπολογιστικής παρουσίασης.....	33
Κεφάλαιο 5.....	36
Επιρροή στην υγεία και ευημερία των χειριστών.....	36
5.1 Γενικά.....	36
5.2 Δομή ερωτηματολογίου.....	37
5.3 Ανθρωπομετρικά στοιχεία.....	38
5.3.1 Σωματομετρικά στοιχεία.....	38
5.3.2 Προσωπικές δραστηριότητες.....	39



5.4	Επαγγελματική έκθεση .....	40
5.4.1	Γενικά.....	40
5.4.2	Κάθισμα χειριστή.....	42
5.4.3	Θέση χειριστή .....	43
5.4.4	Άλλοι συνηγορούντες παράγοντες σχετιζόμενοι με το χειρισμό του μηχανήματος.....	43
5.4.5	Άλλοι συνηγορούντες παράγοντες μη σχετιζόμενοι με το χειρισμό του μηχανήματος.....	45
5.4.6	Παλαιότερη καταπόνηση .....	46
5.5	Ιατρικό ιστορικό των χειριστών .....	47
5.5.1	Ενοχλήσεις στη μέση .....	47
5.5.2	Ενοχλήσεις στον αυχένα .....	50
5.5.3	Ενοχλήσεις στους ώμους.....	52
5.5.4	Συσχέτιση των ενοχλήσεων στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους κατά το τελευταίο έτος.....	55
5.5.5	Ενοχλήσεις στο υπόλοιπο σώμα κατά το τελευταίο έτος.....	56
5.5.6	Ένταση ενοχλήσεων και επιρροή στην υγεία και ευημερία των χειριστών.....	57
5.6	Συμπεράσματα επιρροής στην υγεία και ευημερία των χειριστών .....	60
Κεφάλαιο 6.....		62
Πειραματικά αποτελέσματα – μετρήσεις στο πεδίο και στο εργαστήριο .....		62
6.1	Γενικά.....	62
6.2	Μετρήσεις στο πεδίο της επαγγελματικής έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 .....	63
6.2.1	Οκτάωρη έκθεση σε επιτάχυνση $r.m.s$ .....	63
6.2.2	Δόση κραδασμών .....	65
6.2.3	Τιμή αιχμής (crest factor).....	67
6.2.4	Επαγγελματική έκθεση – ανάληψη δράσης .....	67
6.3	Μετρήσεις στο εργαστήριο .....	68
6.3.1	Πειραματική Διάταξη.....	68
6.3.2	Αποτελέσματα.....	71
6.4	Συμπεράσματα μετρήσεων στο πεδίο και στο εργαστήριο .....	75
Κεφάλαιο 7.....		77
Μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος.....		77
7.1	Υπολογισμός των παραμέτρων (m, c, k) του μοντέλου βασισμένου στο ISO 5982: 2001 .....	77
7.1.1	Καθορισμός δυναμικού συστήματος.....	77
7.1.2	Μεθοδολογία δυναμικής βελτιστοποίησης συστημάτων .....	79

7.1.3	Μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων.....	80
7.1.4	Ορισμός του σφάλματος .....	82
7.1.5	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της μέσης τιμής των τετραγώνων του σφάλματος .....	83
7.1.6	Διαφορική εξέλιξη .....	85
7.1.7	Παράμετροι ελέγχου της διαφορικής εξέλιξης .....	89
7.1.8	Στρατηγική για την εφαρμογή της διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του ανθρώπου .....	90
7.2	Αποτελέσματα μοντελοποίησης.....	92
7.3	Χαρακτηρισμός απόκρισης σε ελεύθερη ταλάντωση (περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές).....	94
7.3.1	Περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές – τυπική απόκριση ανθρώπινου σώματος .....	95
7.3.2	Παράδειγμα απόκρισης ανθρώπινου σώματος - υπεραποσβεσμένη ιδιομορφή .....	96
7.4	Χαρακτηρισμός απόκρισης σε ελεύθερη ταλάντωση (περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές).....	98
7.5	Συμπεράσματα μοντελοποίησης - βελτιστοποίησης.....	100
Κεφάλαιο 8.....		102
Συσχέτιση επαγγελματικής έκθεσης, συχνοτήτων συντονισμού και ιατρικού ιστορικού .....		102
8.1	Εισαγωγή.....	102
8.2	Συσχέτιση των συχνοτήτων συντονισμού με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση).....	103
8.3	Συσχέτιση του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση) .....	104
8.4	Συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση) .....	106
8.5	Συσχέτιση άλλων παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση) .....	108
8.6	Συσχέτιση παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στον αυχένα) .....	108
8.7	Συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στους ώμους).....	108
8.8	Συσχέτιση παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (πόνος στους ώμους).....	109
8.9	Συμπεράσματα συσχετίσεων.....	109
Κεφάλαιο 9.....		111
Υπολογισμός της αβεβαιότητας μεταβλητού συστήματος σε σύγκριση με τιμές που προκύπτουν από το ονομαστικό μοντέλο της ανθρώπινης απόκρισης .....		111
9.1	Γενικά.....	111

9.1.1	Αξία του πίνακα πυκνότητας .....	112
9.1.2	Εναλλακτικές μεθοδολογίες.....	114
9.1.3	Περιγραφή της θεωρητικής προσέγγισης.....	115
9.2	Ο πίνακας πυκνότητας στη δυναμική των κατασκευών .....	115
9.2.1	Το κίνητρο από την κβαντομηχανική.....	115
9.2.2	Πίνακες πυκνότητας: ορισμός και ιδιότητες.....	117
9.3	Θεωρία στοχαστικής δυναμικής κατασκευών με τη χρήση του πίνακα πυκνότητας.....	123
9.3.1	Μέσες τιμές.....	123
9.3.2	Σχετική εντροπία και πίνακες πυκνότητας.....	129
9.3.3	Παράδειγμα με σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας.....	132
9.4	Ιδιότητες διασποράς συστήματος χωρίς απόσβεση με ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα.....	134
9.5	Η διασπορά του συστήματος χωρίς απόσβεση: τυχαίος πίνακας μάζας.....	137
9.6	Αβέβαιο σύστημα με απόσβεση: ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα .....	139
9.7	Ανθρώπινο σώμα: Αβέβαιο σύστημα με απόσβεση και τυχαία μάζα.....	141
9.8	Συμπεράσματα .....	143
Κεφάλαιο 10.....		145
Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία .....		145
10.1	Γενικά.....	145
10.2	Μετρήσεις στο πεδίο.....	146
10.3	Ερωτηματολόγια .....	146
10.4	Συσχετίσεις.....	147
10.5	Μοντελοποίηση- βελτιστοποίηση.....	147
10.6	Υπολογισμός της αβεβαιότητας.....	147
10.7	Πρωτοτυπία της Διατριβής και συνεισφορά στη γνώση.....	147
10.8	Μελλοντική εργασία .....	149
Βιβλιογραφία.....		151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....		159

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΜΕ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1:	Ποσοστό εργοδοτούμενων, οι οποίοι υπόκεινται σε κραδασμούς ανάλογα με τον τύπο της έκθεσης σε διαφορετικές χώρες .....	5
Πίνακας 2:	Αριθμός χειριστών με ενοχλήσεις σε άλλα μέρη του σώματος κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους.....	56
Πίνακας 3:	Παράμετροι που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε σύστημα 3 <sup>ων</sup> βαθμών ελευθερίας (ISO 5982: 2001 [25]) με τυχαία διέγερση.....	93
Πίνακας 4:	Παράμετροι που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε σύστημα 3 <sup>ων</sup> βαθμών ελευθερίας (ISO 5982: 2001 [25]) με ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.....	93
Πίνακας 5:	Οι μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης όπως προέκυψαν από την μοντελοποίηση του σώματος των χειριστών, ανάλογα με τον αριθμό των υποαποσβεσμένων ιδιομορφών για τυχαία διέγερση.....	98
Πίνακας 6:	Οι μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης προέκυψαν από την μοντελοποίηση του σώματος των χειριστών, ανάλογα με τον αριθμό των ιδιομορφών για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” .....	98
Πίνακας 7:	Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους των συχνοτήτων συντονισμού για μια ομάδα 43ων χειριστών μηχανημάτων που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” σε σχέση με τον 1 <sup>ο</sup> συντονισμό χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση.....	104
Πίνακας 8:	Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση που υποβλήθηκαν σε τυχαία και ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.....	105
Πίνακας 9:	Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα 43 <sup>ων</sup> χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.....	107

Πίνακας 10: Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα 43ων χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στους ώμους που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”..... 109

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΒΑΖΟΥΡΑΣ

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΜΕ ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1:	Ενδεικτικά μεγέθη κραδασμών συνήθων μηχανημάτων. Δειγματοληπτικά στοιχεία βασισμένα σε μετρήσεις κραδασμών στο χώρο εργασίας βάσει των υψηλότερων τιμών κατά τους τρεις άξονες από INRS, HSL και RMS Vibration Test Laboratory μεταξύ των ετών 1997 και 2005. Το 25ο και το 75ο εκατοστημόριο δείχνουν το μέγεθος κραδασμών με το οποίο ισούται ή το οποίο δεν υπερβαίνει ποσοστό 25% και 75% των δειγμάτων αντίστοιχα.....	9
Σχήμα 2:	Άξονες καταπόνησης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1 .....	14
Σχήμα 3:	Επιλεγμένα μοντέλα της βιοδυναμικής απόκρισης. Όπου $m_i$ , $k_i$ και $c_i$ ( $i=1,2,3...$ ) είναι αντίστοιχα οι μάζες, σταθερές ελατηρίου και συντελεστές απόσβεσης .....	19
Σχήμα 4:	Γραφική απεικόνιση της ερευνητικής προσέγγισης .....	22
Σχήμα 5:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 100% του συνόλου .....	31
Σχήμα 6:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 50% του συνόλου .....	31
Σχήμα 7:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 1% του συνόλου .....	32
Σχήμα 8:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3ων βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 100% του συνόλου .....	32
Σχήμα 9:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3ων βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 50% του συνόλου .....	32
Σχήμα 10:	Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3ων βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 1% του συνόλου .....	33
Σχήμα 11:	Ιστόγραμμα με τη συμμετοχή σε δραστηριότητες σωματικής άσκησης .....	39
Σχήμα 12:	Ιστόγραμμα με τη συχνότητα συμμετοχής σε ασκήσεις γυμναστικής .....	39

Σχήμα 13:	Ιστόγραμμα με τα χιλιόμετρα ανά έτος σε προσωπικό όχημα για λόγους που δεν σχετίζονται με την εργασία.....	40
Σχήμα 14:	Ιστόγραμμα με τις ώρες οδήγησης στον ελεύθερο χρόνο κάθε μέρα.....	40
Σχήμα 15:	Ιστόγραμμα με το χρόνο ημερήσιας οδήγησης για πρόσβαση στην εργασία.....	41
Σχήμα 16:	Ιστόγραμμα με την κατανομή της ημερήσιας εργασίας (χρόνος χειρισμού μηχανήματος ανά ημέρα).....	41
Σχήμα 17:	Κυκλικό διάγραμμα με το ποσοστό του τύπου καθίσματος που χρησιμοποιούσαν οι χειριστές.....	42
Σχήμα 18:	Κυκλικά διαγράμματα με την κλίση του σώματος κατά τη διάρκεια της οδήγησης.....	44
Σχήμα 19:	Ιστόγραμμα με τη συχνότητα με την οποία τραντάζεται το σώμα κατά τη διάρκεια χειρισμού του μηχανήματος.....	44
Σχήμα 20:	Κυκλικά διαγράμματα με παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη εργασία που εκτελείται με την πλάτη.....	45
Σχήμα 21:	Κυκλικά διαγράμματα με την καταπόνηση από τις προηγούμενες εργασίες.....	46
Σχήμα 22:	Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα.....	47
Σχήμα 23:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα.....	48
Σχήμα 24:	Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα.....	48
Σχήμα 25:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα.....	48
Σχήμα 26:	Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	49
Σχήμα 27:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	49
Σχήμα 28:	Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	49
Σχήμα 29:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	49

Σχήμα 30:	Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα .....	50
Σχήμα 31:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα .....	50
Σχήμα 32:	Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα.....	51
Σχήμα 33:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα .....	51
Σχήμα 34:	Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος .....	51
Σχήμα 35:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος .....	52
Σχήμα 36:	Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	52
Σχήμα 37:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	52
Σχήμα 38:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στους ώμους των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα .....	53
Σχήμα 39:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα .....	53
Σχήμα 40:	Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος .....	53
Σχήμα 41:	Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος .....	54
Σχήμα 42:	Ιστόγραμμα με τον αριθμό των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	54
Σχήμα 43:	Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος.....	54
Σχήμα 44:	Ιστόγραμμα με το ποσοστό των συνολικών ενοχλήσεων στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους ανά χειριστή .....	55
Σχήμα 45:	Ιστόγραμμα που συσχετίζει τον αριθμό χειριστών με την ένταση του πόνου προερχόμενων από ενοχλήσεις που αισθάνονται οι χειριστές κατά τις τελευταίες 7 ημέρες.....	57



Σχήμα 46:	Ιστόγραμμα που συσχετίζει τον αριθμό των υποκειμένων με την ένταση του πόνου προερχόμενου από ενοχλήσεις που αισθάνονται οι χειριστές κατά το τελευταίο έτος.....	58
Σχήμα 47:	Ιστόγραμμα που απεικονίζει τη διάρκεια αποχής των χειριστών από δραστηριότητες (εργασία ή δουλειές του σπιτιού).....	58
Σχήμα 48:	Ιστόγραμμα στο οποίο συσχετίζεται ο αριθμός των χειριστών με την επιρροή των ενοχλήσεων (πόνου) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους στην ικανότητα στην εργασία κατά το τελευταίο έτος .....	59
Σχήμα 49:	Ιστόγραμμα στο οποίο συσχετίζεται ο αριθμός των χειριστών με την επιρροή των ενοχλήσεων (πόνου) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους στην συμμετοχή σε κοινωνικές δραστηριότητες κατά το τελευταίο έτος .....	60
Σχήμα 50:	Ιστόγραμμα οκτάωρης επαγγελματικής έκθεσης για κραδασμούς ολόκληρου σώματος σε επιτάχυνση r.m.s.....	65
Σχήμα 51:	Ιστόγραμμα οκτάωρης επαγγελματικής έκθεσης για κραδασμούς ολόκληρου σώματος μετρημένη σε δόση κραδασμών.....	66
Σχήμα 52:	Ιστόγραμμα αιχμής επιταχύνσεως – Crest factor .....	67
Σχήμα 53:	Σχέδιο πειραματικής διάταξης μαζί με τον δονητή .....	68
Σχήμα 54:	Η ερευνητική διάταξη με τη θέση των επιταχυνσιμέτρων .....	69
Σχήμα 55:	Ζώνες πιθανής επίπτωσης των κραδασμών στην υγεία.....	70
Σχήμα 56:	Μοντέλο του ISO 5982: 2001 με επιπλέον μάζα.....	71
Σχήμα 57:	Η φαινόμενη μάζα 43 χειριστών μηχανημάτων από 0 έως 20 Hz.....	72
Σχήμα 58:	Μέσος όρος του μέτρου της φαινόμενης μάζας και της φάσης της για ομάδα 43 χειριστών που εκτέθηκε σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος στο εργαστήριο.....	73
Σχήμα 59 :	Διάγραμμα σταθερότητας για τον χειριστή 52 με τυχαία διέγερση.....	74
Σχήμα 60:	Μεθοδολογία δυναμικής βελτιστοποίησης συστημάτων.....	79
Σχήμα 61:	Καθορισμός των παραμέτρων για το μοντέλο των τριών βαθμών ελευθερίας .....	80
Σχήμα 62:	Σχηματική παρουσίαση της διαφορικής εξέλιξης.....	86
Σχήμα 63:	Διαδικασία μετάλλαξης στη διαφορική εξέλιξη.....	87
Σχήμα 64:	Η διαδικασία διασταύρωσης της διαφορικής εξέλιξης.....	88

Σχήμα 65:	Ενδεικτική σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματική απόκριση για τον χειριστή 29 για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.....	92
Σχήμα 66:	Ελεύθερη απόκριση του συστήματος τριών βαθμών ελευθερίας που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 από αρχικές συνθήκες της πρώτης πραγματικής ιδιομορφής .....	97
Σχήμα 67:	Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης ως προς τον συνολικό αριθμό των ιδιομορφών ανά χειριστή, το είδος της διέγερσης και το μέγεθος της ιδιοσυχνότητας εκφρασμένης σε Hz.....	99
Σχήμα 68:	Γραφική απεικόνιση της μέσης τιμής του φανταστικού μέρους της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για (α) τυχαία διέγερση και (β) ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.....	106
Σχήμα 69:	Παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας σε σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας .....	132
Σχήμα 70:	Γραφική απεικόνιση πιθανοτήτων των τετραγώνων των τριών ιδιοσυχνοτήτων σε συστήματα χωρίς απόσβεση.....	138
Σχήμα 71:	Γραφική απεικόνιση πιθανοτήτων για τα τετράγωνα της πρώτης και δεύτερης ιδιοσυχνότητας μετά τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος (συστήματα με σημαντική απόσβεση) .....	142

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή - αρχικός προβληματισμός

Η επίδραση των κραδασμών στο ανθρώπινο σώμα είναι ένα ερευνητικό πεδίο με πολλά χρόνια έρευνας, κυρίως διότι οι κραδασμοί προκαλούν επαγγελματικές ασθένειες, οι οποίες εκτός από τη μείωση της ποιότητας ζωής των εργαζομένων προκαλούν και οικονομικές συνέπειες τόσο στους ίδιους τους εργαζομένους, στους εργοδότες και στο κράτος όσο και σε ασφαλιστικά ταμεία. Επίσης, η βιομηχανία κατασκευής μηχανημάτων ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για το συγκεκριμένο θέμα διότι η μείωση της έκθεσης των εργαζομένων σε κραδασμούς εκτός από ηθική και νομική υποχρέωση που πηγάζει από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/44/EC [1] και τη Σύμβαση του ILO 148 [2], συνεπάγεται και αύξηση της παραγωγικότητας για τον συνδυασμό ανθρώπου και μηχανής.

Μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί αρκετή πρόοδος ώστε μέσα από επιδημιολογικές μελέτες να βρεθεί η συσχέτιση της επαγγελματικής έκθεσης σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία [3]. Παράλληλα, σε άλλο επίπεδο καταβάλλεται προσπάθεια να μελετηθεί η βιολογία των δομικών στοιχείων του ανθρώπινου σώματος και να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν τη φυσιολογία του ανθρώπου σε σχέση με τους κραδασμούς [4]. Σε τρίτο ερευνητικό επίπεδο διερευνώνται οι μηχανισμοί με τους οποίους οι κραδασμοί που δημιουργούν επαγγελματική έκθεση περνάνε μέσα από το ανθρώπινο σώμα [5]. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται μοντέλα [6], τα οποία αναπαράγουν την απόκριση του ανθρώπινου σώματος στις συχνότητες και εντάσεις που προβλέπεται ότι είναι σημαντικές για την πρόκληση επαγγελματικών ασθενειών (για κραδασμούς ολόκληρου του σώματος 0-30 Hz και 1,0-5,0 m/s<sup>2</sup>).

Σε ότι αφορά τους μηχανισμούς με τους οποίους περνάνε οι κραδασμοί μέσα από το ανθρώπινο σώμα, αυτοί σχετίζονται κυρίως με τα δομικά στοιχεία του σώματος, την κατάσταση του σώματος (π.χ. μυϊκή ένταση και στάση του σώματος), με τη μορφή των κραδασμών (ένταση, κατεύθυνση, συχνότητα) και το σημείο εισόδου το σώμα. Ιδιαίτερα για τους κραδασμούς του καθημένου ανθρώπου οι κραδασμοί αυτοί διαπερνούν το σώμα μέσω της σπονδυλικής στήλης (σπονδύλων και δίσκων) και μεταδίδονται στα υπόλοιπα όργανα και στο κεφάλι.

Αυτό που απουσιάζει όμως μέχρι σήμερα είναι μια μελέτη που να προσεγγίζει το θέμα της επαγγελματικής έκθεσης, της επίπτωσης της έκθεσης στην υγεία μαζί με τους υπόλοιπους συνηγορούντες παράγοντες και της συσχέτισης της υγείας με την απόκριση του σώματος, μελετώντας τις ιδιομορφές και συγκρίνοντάς τις με το θεωρητικό υπόβαθρο των υφιστάμενων μελετών του ανθρώπινου σώματος. Η πιο πάνω προσέγγιση μέσω των ιδιομορφών δίνει το πλεονέκτημα του υπολογισμού της αβεβαιότητας.

Επίσης, υπάρχει μια γενική τάση ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων που αφορούν τόσο την απόκριση του ανθρώπινου σώματος, όσο και των παραγόντων που προκαλούν επαγγελματικές ασθένειες. Μέσα όμως από τις μέσες τιμές, χάνονται πληροφορίες που θα μπορούσαν να σχετίζονται με τη μοναδικότητα και πολυπλοκότητα του κάθε ανθρώπου και οι οποίες ενδεχόμενα να σχετίζονται με την κατάσταση της υγείας και επαγγελματικής έκθεσης.

Ακόμα και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η περιγραφή του ανθρώπινου σώματος χρήζει κριτικής μελέτης. Συγκεκριμένα, στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μια συστηματική καταγραφή της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος μέσω των αντίστροφων συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων (inverse FRF). Συστηματικά αναφέρεται μάλιστα ότι τα μέγιστα του μέτρου της φαινόμενης μάζας (peaks of apparent mass), δηλαδή οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας, είναι και οι συχνότητες συντονισμού του ανθρώπινου σώματος (resonant frequencies). Αυτή η υπόθεση ενδεχομένως δεν συνάδει με τη θεωρία της ανάλυσης ιδιομορφών επειδή τα μέγιστα των χρησιμοποιούμενων βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς δεν συνάδουν κατ' ανάγκη με τις ιδιοσυχνότητες (natural frequencies) του ανθρώπινου σώματος.

Επίσης, στην Κύπρο υπάρχει ένα σημαντικό κενό σε ότι αφορά στοιχεία σχετικά με την καταπόνηση των εργαζομένων σε κραδασμούς και τη συσχέτισή τους με την υγεία. Κάθε χώρα έχει πάντα ορισμένες ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με την εξάπλωση της τεχνολογικής εξέλιξης, το έδαφος, το σωματότυπο των κατοίκων, την κατανομή των εργαζομένων ανά φύλο, την ποιότητα και το επίπεδο συντήρησης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, το είδος των εργασιών που επιτελούνται καθώς και με άλλους ατομικούς παράγοντες όπως το κάπνισμα, η διατροφή και η σωματική άσκηση.

## Κεφάλαιο 2

### Περιγραφή υφιστάμενης γνώσης και βιβλιογραφίας

#### 2.1 Γενική περιγραφή

Η εξέλιξη της ανθρώπινης τεχνολογίας μετά τη βιομηχανική επανάσταση είχε ως αποτέλεσμα την κατάργηση ολοένα και περισσότερο παραδοσιακών τρόπων και μεθόδων παραγωγής και την αντικατάστασή τους με μηχανήματα. Η αλληλεπίδραση του ανθρώπου με τις μηχανές όμως δεν έρχεται χωρίς προβλήματα. Καθώς ο άνθρωπος καταφέρνει να επιλύει όλο και περισσότερα προβλήματα με τη χρήση των μηχανών, χρησιμοποιεί όλο και περισσότερη ενέργεια και ως αποτέλεσμα η ενέργεια αυτή διαχέεται στο περιβάλλον μεταξύ άλλων με τη μορφή κραδασμών, μερικοί από τους οποίους μεταφέρονται στο ανθρώπινο σώμα [7].

Οι κραδασμοί όταν μεταφέρονται στο ανθρώπινο σώμα αλληλεπιδρούν με αυτό. Η ποικιλομορφία των κραδασμών και διαφορετικότητα τόσο της έντασης όσο και του τρόπου αντίδρασης του ανθρώπινου σώματος αποτελούν ένα πολύ ενδιαφέρον πρόβλημα για τον ερευνητή που προσπαθεί να καθορίσει τη σχέση μεταξύ της ύπαρξης των κραδασμών και των αποτελεσμάτων τους [8]. Η εκτίμηση των κραδασμών πρέπει να προβληματίζει ως προς το φάσμα συχνοτήτων, την κατεύθυνση, το μέγεθος και το πώς μεταβάλλεται με το χρόνο. Ιδιαίτερα σε ότι αφορά το φάσμα συχνοτήτων το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζει φαινόμενα συντονισμού σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή του ανθρώπινου σώματος και στον τρόπο που είναι συνδεδεμένα τα όργανα και οι ιστοί. Για παράδειγμα, ο καθημέρος άνθρωπος μπορεί να παρουσιάζει μέχρι και 8 συντονισμούς σε συχνότητες από 0 μέχρι 10 Hz [5].

Η απόκριση στους κραδασμούς είναι πολύ διαφορετική ως συνάρτηση του χρόνου αλλά και μεταξύ διαφορετικών ανθρώπων. Είναι λοιπόν προφανές ότι δεν μπορούν να τεθούν χωρίς προβληματισμό και μελέτη μονοσήμαντα όρια που να προσδιορίζουν τον κίνδυνο έκθεσης του ανθρώπου σε κραδασμούς εξαιτίας κυρίως της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται μέσα στα μοντέλα, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στη διαφορετικότητα του ανθρώπου, είτε στον τρόπο μέτρησης, είτε σε παράγοντες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των κραδασμών και τον τρόπο που αυτοί εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα [9]. Οι κραδασμοί ούτως ή άλλως βρίσκονται παντού στη ζωή του σύγχρονου ανθρώπου, είτε βρίσκεται στη θέση εργασίας, είτε μετακινείται με το λεωφορείο ή με οποιοδήποτε άλλο μέσο μεταφοράς, είτε ακόμα και όταν γυμνάζεται.

Ακόμα ο τρόπος που αντιμετωπίζει κάθε επιστήμη το πρόβλημα της μεταφοράς κραδασμών στο ανθρώπινο σώμα είναι διαφορετικός. Ο μηχανικός τείνει να ασχοληθεί περισσότερο με τη μηχανική της δόνησης, ο ιατρός με την επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό και ο εργονόμος επικεντρώνεται στην αλληλεπίδραση της μηχανής με τον άνθρωπο. Η κυριότερη όμως κατηγοριοποίηση που έχει γίνει με καθολική παραδοχή είναι η διαφοροποίηση ως προς τις επιπτώσεις των κραδασμών στο ανθρώπινο σώμα με το διαχωρισμό στους κραδασμούς ολόκληρου του σώματος και στους κραδασμούς του συστήματος χεριού βραχίονα.

Σε ότι αφορά τους κραδασμούς ολόκληρου του σώματος σημαντικό ρόλο επέχει η στάση του σώματος. Ο βασικός διαχωρισμός γίνεται μεταξύ όρθιας, καθιστής και ξαπλωμένης στάσης. Συνήθως, τα πρότυπα μέτρησης των κραδασμών ολόκληρου του σώματος βασίζονται σ' αυτό το διαχωρισμό. Το πιο σημαντικό πρότυπο είναι το ISO 2631-1: 1997 [10] σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Το πρότυπο BS 6841 [11] χρησιμοποιείται αρκετά κυρίως στη Μεγάλη Βρετανία. Τα πρότυπα αυτά λαμβάνουν υπόψη τη γενική στάση του σώματος, τη διάρκεια και το μέγεθος της ταλάντωσης και την απόκριση στο εύρος των συχνοτήτων για να υπολογίσουν μέσω σταθμισμένων καμπυλών συχνότητας την καταπόνηση του ανθρώπινου σώματος σε κραδασμούς. Η μέτρηση γίνεται κατά προτίμηση στο σημείο επαφής του ανθρώπινου σώματος με τη δονούμενη επιφάνεια. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η επιτάχυνση το οποίο είναι και το πιο εύκολο να μετρηθεί. Τα δύο πιο πάνω πρότυπα δεν λαμβάνουν υπόψη σημαντικές παραμέτρους όπως τη μυϊκή ένταση και την ακριβή στάση του σώματος που μπορεί να επηρεάσουν την επίπτωση των κραδασμών στον άνθρωπο. Ακόμα βασίζονται κυρίως σε δεδομένα που έχουν ληφθεί από μελέτες σε σχέση με την ανεκτικότητα των ανθρώπων στους κραδασμούς και προβάλλουν την υπόθεση μιας σταθερής σχέσης μεταξύ του γινομένου του τετραγώνου της επιτάχυνσης και του χρόνου για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία [12].

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος των υποθέσεων των επιπτώσεων στην υγεία από τους βλαπτικούς παράγοντες όπως οι κραδασμοί είναι μέσω επιδημιολογικών μελετών, οι οποίες εξετάζουν την ορθότητα των υποθέσεων σε σχέση με την επίπτωση των βλαπτικών παραγόντων

στην υγεία ενός πληθυσμού ο οποίος είχε εκτεθεί στους παράγοντες αυτούς. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν αρκετά επιδημιολογικά δεδομένα για να υποστηρίξουν την πιο πάνω ενεργειακά ισοδύναμη χρονική εξάρτηση [13].

Παρόλο που το αντικείμενο χρειάζεται αρκετή μελέτη, η σημασία των κραδασμών στην υγεία των εργαζομένων είναι πρόδηλη αν αναλογιστεί κάποιος το ποσοστό των εργαζομένων στην Ευρώπη που υπόκεινται στα διάφορα είδη των κραδασμών. Ο Πίνακας 1 [14] παρουσιάζει τα ποσοστά σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες (για την Κύπρο δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία). Γενικά, η έκθεση σε κραδασμούς μηχανημάτων έργων αφορά περισσότερο τους άνδρες, καθώς τα ποσοστά των γυναικών χειριστών είναι μικρά. Το ίδιο ισχύει και για την Κύπρο καθώς στο επάγγελμα του χειριστή μηχανημάτων δεν δραστηριοποιούνται σχεδόν καθόλου οι γυναίκες (~1%).

Πίνακας 1: Ποσοστό εργοδοτούμενων, οι οποίοι υπόκεινται σε κραδασμούς ανάλογα με τον τύπο της έκθεσης σε διαφορετικές χώρες

	Γερμανία	Ισπανία	Γαλλία	Φινλανδία
Μηχανήματα έργων	5%	10%	10,6%	25%
Εργαλεία χειρός	4,6%	5,6%	10,9%	8,3%
Στατικές μηχανές	1-2%	2,6%	1,5%	

Για παράδειγμα στη Γαλλία υπάρχουν περίπου 200.000 περνοφόρα οχήματα με 700.000 οδηγούς περίπου [15]. Στην μεγάλη Βρετανία εκτιμάται ότι 7,2 εκατομμύρια άντρες και 1,8 εκατομμύρια γυναίκες περίπου εκτίθενται στους κραδασμούς σε εβδομαδιαία βάση. Περίπου 374.000 άντρες και 9.000 γυναίκες λαμβάνουν δόση μεγαλύτερη από αυτή που τίθεται ως όριο στο βρετανικό πρότυπο BS 6841 [16]. Αναμένεται ότι και στην Κύπρο γίνεται ευρεία χρήση όχι μόνο των περνοφόρων αλλά και των υπόλοιπων προαναφερθέντων οχημάτων που εκθέτουν το ανθρώπινο σώμα σε κραδασμούς.

Η παρούσα εργασία περιορίζεται στη μελέτη συγκεκριμένων μερών της επίπτωσης των κραδασμών και των δονήσεων σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα χωρίς να προσεγγίσει τις περιπτώσεις της έκθεσης του συστήματος χεριού - βραχίονα. Ο λόγος είναι γιατί η φυσιολογία, οι επιπτώσεις στον άνθρωπο και τα χαρακτηριστικά των επιβλαβών κραδασμών στην περίπτωση ολόκληρου του σώματος είναι πολύ διαφορετικά από αυτά που αναμένονται στα χέρια αλλά και ο τρόπος μέτρησης και ανάλυσης είναι διαφορετικός [7].

## 2.2 Νομικό καθεστώς

Παρόλο που είναι γνωστό ότι οι κραδασμοί και οι δονήσεις προκαλούν προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου, τα κατώτερα όρια στα οποία μπορεί να εκτεθεί ο ανθρώπινος οργανισμός δεν είναι αποτυπωμένα με καθολικά αποδεκτό τρόπο. Το σημαντικότερο βήμα εντός των συνόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης έγινε με την υιοθέτηση της Οδηγίας 2002/44/EC [1] για την προστασία των εργαζομένων από τους κραδασμούς. Στο πλαίσιο αυτής της Οδηγίας τίθενται για πρώτη φορά σαφή όρια για την επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος. Τα όρια για την έκθεση σε κραδασμούς σε ολόκληρο το σώμα είναι τα εξής:

- α) Η ημερήσια οριακή τιμή έκθεσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε  $1,15 \frac{m}{s^2}$  rms ή, κατ' επιλογήν του κράτους μέλους, σε τιμή δόσης κραδασμών  $21 \frac{m}{s^{1,75}}$ .
- β) Η ημερήσια τιμή έκθεσης για την ανάληψη δράσης, η οποία ανάγεται σε περίοδο αναφοράς 8 ωρών, καθορίζεται σε  $0,5 \frac{m}{s^2}$  rms ή, κατ' επιλογήν του κράτους μέλους, σε τιμή δόσης κραδασμών  $9,1 \frac{m}{s^{1,75}}$ .

Η έκθεση των εργαζομένων στους κραδασμούς σε ολόκληρο το σώμα μετριέται σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10].

## 2.3 Κατάσταση στην Κύπρο

Μετά την εισαγωγή στην Κύπρο της πιο πάνω Νομοθεσίας το 2005 υπάρχει έντονος προβληματισμός σχετικά με την καταπόνηση των εργαζομένων σε επίπεδα κραδασμών που ξεπερνούν τα όρια επαγγελματικής έκθεσης που καθορίζονται στην Οδηγία 2002/44/EC [1]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν ιδιαίτεροι παράγοντες και παράμετροι που αφορούν τον πληθυσμό της Κύπρου, οι οποίοι ενδέχεται να συνηγορούν στις αρνητικές επιπτώσεις ή και να μην συνηγορούν. Σήμερα τα δεδομένα που αφορούν μετρήσεις και έκθεση σε κραδασμούς στην Κύπρο είναι φτωχά και δεν υπάρχουν δεδομένα για την επίδραση των κραδασμών στον πληθυσμό. Επίσης, δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για το πόσοι εργαζόμενοι στην Κύπρο εκτίθενται σε κραδασμούς.

Σε πολλούς χώρους εργασίας στην Κύπρο εκτίθενται οι εργαζόμενοι σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος. Εργασία που μπορεί να εκθέσει το ανθρώπινο σώμα σε κραδασμούς



είναι για παράδειγμα εργασία σε γεωργικά μηχανήματα, σε μηχανήματα έργων μηχανικών κατασκευών, σε εξοπλισμό μεταλλείων και λατομείων, σε φορτηγά αυτοκίνητα, σε περονοφόρα, σε πλοία και σε ελικόπτερα. Η επίδραση όμως των κραδασμών δεν είναι η ίδια σε κάθε τύπο μηχανήματος. Για παράδειγμα υπάρχει διαφορά ανάμεσα σε χειριστές βιομηχανικών οχημάτων / μηχανημάτων και οδηγούς οχημάτων (ταξί / λεωφορείων κ.ά. παρόμοιων μέσων) σε ότι αφορά τη στάση του σώματος, το φάσμα συχνοτήτων των κραδασμών και τις μέσες και μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης [17].

#### **2.4 Παράγοντες που σχετίζονται με τον άνθρωπο**

Η στάση του σώματος των εργαζομένων που υπόκεινται σε κραδασμούς από μηχανήματα είναι συνήθως η καθήμενη σε κάθισμα με πλάτη ενώ σπανιότερα μπορεί οι εργαζόμενοι να εκτεθούν και σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος σε όρθια θέση όπως π.χ. κατά το χειρισμό σκυροθραυστικών μηχανών. Συνήθως όμως οι κραδασμοί ολόκληρου του σώματος σχετίζονται με την καθήμενη στάση, διότι είναι η στάση που έχει η μεγάλη πλειοψηφία των χειριστών μηχανημάτων που παράγουν κραδασμούς.

Η καθήμενη στάση είναι μια άβολη στάση για την πλάτη του ανθρώπου. Πρώτα διότι η γεωμετρία της σπονδυλικής στήλης αλλάζει τη στιγμή όταν ο άνθρωπος κάθεται επειδή η λόρδωση, η οποία χαρακτηρίζει την όρθια στάση εξαφανίζεται κατά την καθιστική στάση [18]. Ακόμα κατά την καθιστική στάση οι οπίσθιοι δίσκοι εφελκούνται ενώ κατά την ταυτόχρονη κάμψη του σώματος προς τα μπροστά παρουσιάζονται πρόσθετες τάσεις στους δίσκους. Επίσης, οι πιέσεις στους οσφυϊκούς μεσοσπονδύλιους δίσκους είναι αρκετά υψηλότερες σε καθήμενη στάση.

Σε ότι αφορά τις ιδιότητες των ιστών του ανθρώπου, είναι γενικά αποδεκτό ότι αυτοί διαθέτουν βισκοελαστικές ιδιότητες (δηλαδή ελαστικότητα και απόσβεση) [19]. Εκτός από αλλαγές που έχουν σχέση με τη γεωμετρία του σώματος, οι κραδασμοί επιδρούν και στη φυσιολογία των ιστών αλλάζοντας τις βισκοελαστικές τους ιδιότητες. Έρευνες σε ανθρώπους, και σε ζώα έχουν δείξει ότι η ελαστικότητα των δίσκων μεταβάλλεται λόγω της επίδρασης των κραδασμών. Μάλιστα έρευνες *in vitro* και *in vivo* έδειξαν μεταβολή της δυσκαμψίας των μεσοσπονδύλιων δίσκων που σχετίζεται με την ύπαρξη τραύματος ή αποδόμησής τους [20]. Ακόμα έχει αποδειχθεί ότι η έκθεση σε κυκλικές εναλλασσόμενες δονήσεις και κραδασμούς μπορεί να προκαλέσει αλλαγές των φυσικών ιδιοτήτων, αποδόμηση των ιστών και πρόπτωση των δίσκων, [21], [8].

Η επίδραση των κραδασμών στο σώμα μπορεί να επιφέρει και αρκετές θετικές αλλαγές όπως βελτίωση των αθλητικών επιδόσεων. Άσκηση με αμφίπλευρη ολόσωμη δόνηση σε συχνότητες από 15 έως 30 Hz φάνηκε ότι βελτιώνει την κινητικότητα των οπίσθιων μηριαίων και

της οσφυϊκής μοίρας για τουλάχιστον 15 λεπτά [22]. Ακόμη, μετά την εφαρμογή 16 προπονητικών μονάδων άσκησης με αμφίπλευρη ολόσωμη δόνηση παρατηρήθηκε αύξηση της κινητικότητας των οπίσθιων μηριαίων και της οσφυϊκής μοίρας και της ισοκινητικής και ισομετρικής ροπής δύναμης των καμπτήρων μυών της άρθρωσης του γόνατος, ενώ δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στην ισοκινητική και ισομετρική ροπή δύναμης των εκτεινόμενων μυών της άρθρωσης του γόνατος και στην κατακόρυφη αλτικότητα. [23].

Επίσης, από άνθρωπο σε άνθρωπο η απόκριση διαφέρει σε μεγάλο βαθμό [24] και εξαρτάται από τα ακριβή χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του σώματος του κάθε υποκειμένου. Θα αποτελούσε ενδιαφέρουσα πρόκληση η εύρεση χαρακτηριστικών μεγεθών που να συσχετίζουν την απόκριση της δόνησης με τη διαφορετικότητα του κάθε ανθρώπου.

## 2.5 Παράγοντες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό

Ακόμα όπως σχολιάζεται παρακάτω η συχνότητα συντονισμού του ανθρώπινου σώματος σε καθήμενη στάση είναι πολύ κοντά στις συχνότητες λειτουργίας των μηχανημάτων, στα οποία ο άνθρωπος κάθεται όταν εργάζεται. Μάλιστα η μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου (driving point mechanical impedance) – η έννοια αναλύεται παρακάτω- παρουσιάζεται ως μέγιστη στα 5 Hz περίπου [25]. Η συχνότητα λειτουργίας πολλών οχημάτων περιλαμβάνει και την πιο πάνω συχνότητα ενώ οι συνήθεις επιταχύνσεις σε οχήματα όπως οι εκσκαφείς, τα περονοφόρα και οι εκλυστήρες (τρακτέρ κυμαίνονται μεταξύ των 0,2 και 2,0  $\frac{m}{s^2}$  [26]. Στο Σχήμα 1 [26] φαίνονται τα επίπεδα των μετρούμενων κραδασμών για διάφορα είδη εξοπλισμού.

Εκτός όμως από το ίδιο το μηχάνημα υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράμετροι όπως η ποιότητα των ελαστικών του οχήματος, ο τύπος των ελαστικών (πνευματικά ή με αφρό), ο τύπος του οδοστρώματος και ο τύπος του καθίσματος [15].

Γενικά σε ότι αφορά τα οχήματα η στρατηγική που ακολουθείται συνήθως από τους κατασκευαστές για τη μείωση των κραδασμών που μεταφέρονται στον άνθρωπο είναι οι υψηλές συχνότητες να αποκόπτονται συνήθως στην έδραση του αμαξώματος, οι μεσαίες συχνότητες να αποκόπτονται στην έδραση της καμπίνας και οι χαμηλές συχνότητες να αποκόπτονται στο κάθισμα του οδηγού με τη χρήση αποσβεστήρων, οι οποίοι ρυθμίζονται ανάλογα με το βάρος του οδηγού [14].

Είδος μηχανήματος	Όρια Επιτάχυνσης (m/s <sup>2</sup> )		Παράδειγμα
	Από (25%)	Έως (75%)	
Τροχοφόρος εκσκαφέας	0,5	1	
Οδοστρωτήρας μονού τυμπάνου	0,4	0,6	
Οδοστρωτήρας διπλού τυμπάνου	0,3	0,9	
Προωθητής γαιών	0,8	1,1	
Ανατρεπόμενο όχημα	0,7	1,1	
Εκσκαφέας μεγαλύτερος των 25 τόνων	0,6	1,1	
Εκσκαφέας μικρότερος των 25 τόνων	0,4	0,6	
Περονοφόρο αντίβαρου	0,6	1,0	
Γκρέϊντερ (ισοπεδοτήρας δρόμων)	0,4	0,6	
Τροχοφόρος φορτωτής	0,8	1,1	

Σχήμα 1: Ενδεικτικά μεγέθη κραδασμών συνήθων μηχανημάτων. Δειγματοληπτικά στοιχεία βασισμένα σε μετρήσεις κραδασμών στο χώρο εργασίας βάσει των υψηλότερων τιμών κατά τους τρεις άξονες από INRS<sup>1</sup>, HSL και RMS Vibration Test Laboratory μεταξύ των ετών 1997 και 2005. Το 25<sup>ο</sup> και το 75<sup>ο</sup> εκατοστημόριο δείχνουν το μέγεθος κραδασμών με το οποίο ισούται ή το οποίο δεν υπερβαίνει ποσοστό 25% και 75% των δειγμάτων αντίστοιχα

## 2.6 Επιπτώσεις στο ανθρώπινο σώμα

Οι επιπτώσεις των κραδασμών σε ολόκληρο το σώμα δεν είναι μονοσήμαντες [27] αλλά εξαρτώνται από παράγοντες που διαφέρουν από άνθρωπο σε άνθρωπο. Οι κυριότερες και οι πιο γνωστές επιπτώσεις σχετίζονται με τη μέση, τον αυχένα και τους ώμους. Μεταξύ άλλων

<sup>1</sup> με τη βοήθεια των CRAM και Prevenchem

εκφυλιστικές ασθένειες της σπονδυλικής στήλης είναι πιο συχνές σε άτομα που εκτίθενται σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος.

Επιπρόσθετα, διαταραχές στο νευρικό, κυκλοφοριακό και πεπτικό σύστημα σχετίζονται με κραδασμούς, παρόλο που δεν οφείλονται αποκλειστικά σ' αυτούς αλλά συνδέονται με το σύνολο των επιπτώσεων των εργασιακών παραγόντων στο ανθρώπινο σώμα. Μακροχρόνια έκθεση στους κραδασμούς μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές επιδράσεις και ανωμαλίες στα όργανα αναπαραγωγής της γυναίκας (ανωμαλίες στην περίοδο) και στην εγκυμοσύνη (αποβολές και γέννηση νεκρών νεογνών). Πειράματα σε ζώα έχουν καταδείξει ότι οι κραδασμοί βλάπτουν την υγεία του εμβρύου. Ακόμα οι δονήσεις ολόκληρου του σώματος συνηγορούν στην απώλεια της ανθρώπινης ακοής λόγω της έκθεσης στο θόρυβο.

Σύγκριση γίνεται συχνά με κραδασμούς που δημιουργεί ο άνθρωπος κατά τη φυσιολογική του ζωή, όπως το περπάτημα και το τρέξιμο, χωρίς την επίδραση μηχανημάτων, κυρίως για να καθοριστούν τα κατώτερα «φυσιολογικά» όρια της επίδρασης των κραδασμών [18]. Άλλωστε ακόμα και το περπάτημα ή το τρέξιμο δημιουργεί στο κεφάλι επιταχύνσεις της τάξης των  $30 \text{ m/s}^2$ . Παρόλα αυτά οι δρομείς μπορούν και αντέχουν αυτές τις υψηλές επιταχύνσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς προβλήματα [6]. Η πλειοψηφία των ανθρώπων δεν θα μπορούσε να δεχτεί κραδασμούς από μηχανήματα που να προκαλούν τόσο μεγάλες επιταχύνσεις στο κεφάλι για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η απάντηση στην ερώτηση πώς ο ανθρώπινος οργανισμός αντιμετωπίζει διαφορετικά δύο παρόμοιες φυσικές επιδράσεις έρχεται εάν συγκρίνουμε τον τρόπο κατά τον οποίο η ενέργεια εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση των κραδασμών που δημιουργεί ο ίδιος ο άνθρωπος συνήθως αυτοί συμβαίνουν σε όρθια και όχι καθήμενα άτομα, ενώ όταν κάποιος κάθεται η γεωμετρία της σπονδυλικής του στήλης αλλάζει. Η λόρδωση της οσφυϊκής χώρας εξαφανίζεται ενώ οι οπίσθιες ομάδες των μυών που σε όρθια θέση είναι ενεργές, σε καθήμενη θέση καθίστανται ανενεργές. Η αντίδραση των μυών μετρείται με ηλεκτρομυογραφήματα και τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά ανάλογα με τον τρόπο που κάθεται κάποιος (χαλαρά, τεντωμένα ή γυρτά προς τα μπροστά). Στην περίπτωση της καθήμενης στάσης, ιδιαίτερα όταν το σώμα γέρνει προς τα μπροστά, παρατηρείται αδράνεια των μυών της μέσης που επιτείνεται από την κάμψη του σώματος προς τα μπροστά. Αυτή η αδράνεια πιθανώς να οδηγεί στην αποσταθεροποίηση της σπονδυλικής στήλης υπό την επίδραση των κραδασμών ολόκληρου του σώματος. Ακόμα η συχνότητα των κραδασμών ολόκληρου του σώματος που δημιουργεί ο άνθρωπος από μόνος του είναι της τάξης των  $4^{ov} \text{ Hz}$  που είναι από τις πιο χαμηλές συχνότητες που παράγουν τα μηχανήματα. Η λειτουργία των μυών της σπονδυλικής στήλης είναι εξαιρετικά συγχρονισμένη με περιόδους ηρεμίας και έντασης. Όταν όμως το σώμα υπόκειται σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος από μηχανήματα, οι ίδιοι μύες που σταθεροποιούσαν τη σπονδυλική στήλη και απόσβεναν τους κραδασμούς, λόγω κυρίως της διαφορετικής συχνότητας αλλά και της εισόδου στο σώμα με τρόπο που ο άνθρωπος δεν έχει τους μηχανισμούς να προβλέψει,

λειτουργούν αναποτελεσματικά, δεν προστατεύουν τη σπονδυλική στήλη και οδηγούνται σε κόπωση.

Η μελέτη της επίδρασης των κραδασμών στη σπονδυλική στήλη γίνεται πολλές φορές σε υποκείμενα που βρίσκονται εν ζωή (in vivo) ενώ σε μερικές περιπτώσεις συλλέγονται στοιχεία στο δοκιμαστικό σωλήνα (in vitro).

## 2.7 Η βιοδυναμική ανάλυση του καθήμενου ανθρώπου

Για τη βιοδυναμική ανάλυση του ανθρώπινου σώματος που υπόκειται σε κραδασμούς χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις διαφορετικές βιοδυναμικές συναρτήσεις μεταφοράς. Οι δύο από αυτές χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για να περιγράψουν τη σχέση της διέγερσης με την απόκριση «στο σώμα» ως συνάρτηση της συχνότητας στη διεπιφάνεια του καθίσματος, δηλαδή η φαινόμενη μάζα και η μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου [28]. Η μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου  $Z(i\omega)$  συσχετίζει το πλάτος της δύναμης διέγερσης με το πλάτος της ταχύτητας απόκρισης, δηλαδή η σχέση στη διεπιφάνεια καθίσματος-ισχιακής χώρας δίνεται από τη σχέση

$$Z(i\omega) = \frac{F(i\omega)}{v(i\omega)} \quad Z(i\omega) = \frac{F(i\omega)}{v(i\omega)} \quad (1)$$

όπου  $Z(i\omega)$  είναι η μιγαδική μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου,  $v(i\omega)$  είναι η ταχύτητα του οδηγητικού σημείου,  $F(i\omega)$  είναι η δύναμη διέγερσης και  $\omega$  είναι η συχνότητα διέγερσης σε rad/s. Η φαινόμενη μάζα  $M(i\omega)$  σχετίζεται με τη δύναμη διέγερσης και την επιτάχυνση απόκρισης με τη σχέση:

$$M(i\omega) = \frac{F(i\omega)}{a(i\omega)} = \frac{Z(i\omega)}{i\omega} \quad (2)$$

όπου  $M(i\omega)$  είναι η φαινόμενη μάζα και  $a(i\omega)$  είναι η απόκριση επιτάχυνσης. Το φυσικό μέγεθος που αναπαριστά η φαινόμενη μάζα είναι ισοδύναμο με τη στατική μάζα του ανθρώπινου σώματος, το οποίο υποστηρίζεται από το κάθισμα σε πολύ χαμηλές συχνότητες όταν το ανθρώπινο σώμα ενεργεί ως μια συμπαγής μάζα γι' αυτό προτιμάται και από ερευνητές σαν το μέγεθος αναφοράς [29]. Η απόκριση της επιτάχυνσης και η δύναμη διέγερσης παραμένουν σε φάση σε χαμηλές συχνότητες. Το μέτρο της φαινόμενης μάζας μπορεί να υπολογιστεί από τη διαίρεση της μηχανικής εμπέδησης του οδηγητικού σημείου με τη γωνιακή συχνότητα. Μ' αυτό τον τρόπο η μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου τείνει να τονίσει την απόκριση σε υψηλότερες συχνότητες διέγερσης ενώ η φαινόμενη μάζα δίνει πιο χαρακτηριστικές μέγιστες αποκρίσεις σε πιο χαμηλές

συχνότητες. Από τον ορισμό της μηχανικής εμπέδησης του οδηγητικού σημείου και της φαινόμενης μάζας προκύπτει ότι η πρώτη προηγείται της δεύτερης με διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Η φαινόμενη μάζα θεωρείται ένας καταξιωμένος τρόπος για να περιγραφεί η βιοδυναμική απόκριση του ανθρώπινου σώματος στη μελέτη της επίπτωσης των κραδασμών στον άνθρωπο [30].

Η τρίτη βιοδυναμική συνάρτηση απόκρισης αποτελεί μια συνάρτηση «μέσα από το σώμα» και ονομάζεται ως μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής  $Y(i\omega)$  επειδή περιγράφει τη μετάδοση της δόνησης μέσα από το σώμα με τον εξής τρόπο:

$$Y(i\omega) = \frac{\alpha_H(i\omega)}{a(i\omega)} \quad (3)$$

όπου  $Y(i\omega)$  είναι η μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής<sup>2</sup>,  $\alpha_H(i\omega)$  είναι το πλάτος της επιτάχυνσης απόκρισης της κεφαλής και  $a(i\omega)$  είναι το πλάτος της επιτάχυνσης στο σημείο διέγερσης. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες η κίνηση της διεπιφάνειας ανθρώπινου σώματος και καθίσματος  $a(i\omega)$  μεταδίδεται κατευθείαν στο κεφάλι εξαιτίας της συμπεριφοράς του σώματος ως συμπαγής μάζα και οδηγεί σε σχεδόν μοναδιαίες τιμές της μεταβιβαστικότητας και μικρές σχετικά διαφορές φάσης (δεδομένης της ύπαρξης αντίστοιχης ικανότητας του εξοπλισμού μέτρησης να μετρά σε πολύ χαμηλές συχνότητες).

Οι παραπάνω τρεις συναρτήσεις μεταφοράς έχουν χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσουν τη βιοδυναμική απόκριση του ανθρώπινου σώματος και έχουν γίνει μετρήσεις από διάφορους ερευνητές κάτω από ποικίλες συνθήκες που περιελάμβαναν διαφορές στις μάζες των ανθρώπων, επίπεδα κραδασμών και στάσεις σώματος. Σε ότι αφορά ποια από τις πιο πάνω συναρτήσεις μεταφοράς πρέπει να χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, συγκριτική έρευνα έχει καταδείξει [28] ότι η μέθοδος που βασίζεται στο πλάτος απόκρισης της φαινόμενης μάζας δίνει λιγότερες αποκλίσεις στη συχνότητα που το μέτρο της παρουσιάζεται ως μέγιστο, η οποία υπολογίζεται από διαφορετικές σειρές τιμών (που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς ανθρώπους ή ομάδες ανθρώπων) σε σχέση με την μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου. Η σύγκριση με ανάλυση στοιχείων από σειρές δεδομένων που περιελάμβαναν και τη μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής έδειξε σχετική σύγκλιση με τα δεδομένα της κανονικοποιημένης<sup>3</sup> φαινόμενης μάζας.

---

<sup>2</sup> Ο ορισμός της μεταβιβαστικότητας καθίσματος κεφαλής που δίνεται δεν είναι μοναδικός. Το μέγεθος μπορεί να εκφραστεί όχι μόνο με το λόγο των επιταχύνσεων αλλά και με το λόγο των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων [25].

<sup>3</sup> Η κανονικοποίηση προκύπτει από τη διαίρεση της φαινόμενης μάζας με την πραγματική μάζα του υποκειμένου.

Ακόμα η αύξηση της σωματικής μάζας τείνει να μειώσει τη συχνότητα στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο του μέτρου της φαινόμενης μάζας και να αυξήσει την τιμή της [31]. Σε συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας που εμφανίζεται το μέγιστο, φαίνεται ότι η μάζα δεν επηρεάζει το πλάτος της ταλάντωσης μέχρι περίπου τα 80 χιλιόγραμμα, από εκεί και πάνω όμως το πλάτος της ταλάντωσης φαίνεται να αυξάνει με τη μάζα.

Γενικά οι πιο πάνω τρεις βιοδυναμικές συναρτήσεις μεταφοράς είναι αυτές που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη σχέση της διέγερσης με την απόκριση «στο σώμα» και «μέσα από το σώμα».

Συχνά συναντάται και η συνάρτηση της απορροφούμενης ισχύος. Αυτή είναι το εσωτερικό γινόμενο της δύναμης επί την ταχύτητα. Το πραγματικό μέρος της απορροφούμενης ισχύος αντιπροσωπεύει την ισχύ που απορροφάται από το σώμα ενώ το φανταστικό μέρος τη δυναμική ενέργεια που αποθηκεύεται για να αποδοθεί ολόκληρη από τα ελαστικά στοιχεία του συστήματος [32]. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την επίδραση των κραδασμών στον άνθρωπο με τη χρήση της απορροφούμενης ισχύος διαφέρουν ουσιαστικά από αυτά της φαινόμενης μάζας (και κατ' επέκτασης της μηχανικής εμπέδησης οδηγητικού σημείου) και η διαφορά πηγάζει από τη στάθμιση των πιο πάνω μεγεθών πριν την εξαγωγή χαρακτηριστικών μεγεθών για την επίπτωση των κραδασμών στον άνθρωπο [33]. Για τον πιο πάνω λόγο και επειδή η απορροφημένη ισχύς δεν χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία, δεν λήφθηκε περαιτέρω υπόψη.

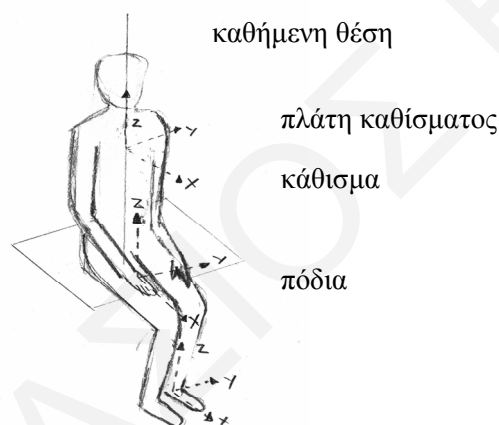
## **2.8 Απόκριση του σώματος καθήμενου ατόμου**

Όπως προαναφέρθηκε η βιοδυναμική απόκριση καθήμενων ατόμων εξαρτάται από παράγοντες όπως η στάση του σώματος, το βάρος του σώματος, ο τρόπος και το πλάτος της διέγερσης πιθανώς αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες επιρροής της απόκρισης και αποτελούν πηγές αβεβαιότητας που σχετίζονται με τον άνθρωπο. Τα δεδομένα που αφορούν τη μηχανική εμπέδηση του οδηγητικού σημείου, τη φαινόμενη μάζα και τη μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής, τα οποία δημοσιεύονται κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές, παρουσιάζουν συχνά πολύ μεγάλες αποκλίσεις, οι οποίες είναι ενδεικτικές των επιδράσεων των πιο πάνω παραγόντων. Εάν οι παράγοντες που αναμένεται να επηρεάσουν τις μετρήσεις όμως παραμείνουν εντός ορισμένων προδιαγεγραμμένων ορίων, τότε τα αποτελέσματα των διαφόρων ερευνών συγκλίνουν προς κάποιες κοινά αποδεκτές τιμές [34]. Προς την κατεύθυνση της υποστήριξης της ομαδοποίησης γίνεται η προσπάθεια της ανάπτυξης και βελτίωσης διεθνώς αναγνωρισμένων προτύπων.

Γενικά τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή των χαρακτηριστικών της βιοδυναμικής απόκρισης του σώματος ήταν ιδιαίτερα συχνή στο πεδίο ελέγχου των καθισμάτων για κραδασμούς. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα χαρακτηριστικά του σώματος του καθήμενου ανθρώπου επηρεάζουν την απόσβεση του συστήματος καθίσματος-ανθρώπου. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την αξιολόγηση της απόδοσης του καθίσματος περιλαμβάνουν τη χρήση εθελοντών με κάποιο συγκεκριμένο σωματότυπο για να χρησιμοποιηθούν ως πειραματόζωα. Βέβαια, η χρήση των ανθρώπων για τον έλεγχο των καθισμάτων παρουσιάζει κάποιες επιπρόσθετες δυσκολίες όπως η έλλειψη της ακριβούς επαναληψιμότητας του πειράματος εξαιτίας της κινητικότητας του ανθρώπινου σώματος, η δυσκολία εύρεσης ανθρώπων με τον ιδεατό σωματότυπο και διάφοροι άλλοι ηθικής φύσεως ενδοιασμοί που σχετίζονται με την εμπλοκή ανθρώπων στα πειράματα.

#### **A. Η επίδραση της έντασης των κραδασμών**

Για τη μελέτη των κραδασμών στο ανθρώπινο σώμα ακολουθείται η τυποποίηση των αξόνων καταπόνησης που φαίνονται στο Σχήμα 2 και προκύπτουν από το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10].



Σχήμα 2: Άξονες καταπόνησης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1

#### **B. Η επίδραση στον άξονα z (μονοαξονική καταπόνηση)**

Πολλές μελέτες της φαινόμενης μάζας και μηχανικής εμπέδησης έχουν δημοσιευτεί για την έκθεση του σώματος στους κραδασμούς στον άξονα z [35] ερευνώντας για ημιτονοειδείς και τυχαίους κραδασμούς το πεδίο μεταξύ των 0,2 Hz έως 30 Hz, με ένταση μεταξύ 0,25 και  $3^{ov}$  m/s<sup>2</sup>. Τα αποτελέσματα δείχνουν την κύρια συχνότητα συντονισμού<sup>4</sup> της φαινόμενης μάζας να είναι στα

<sup>4</sup> Ο συντονισμός όπως παρουσιάζεται από τις συχνότητες στις οποίες το μέτρο της φαινόμενης μάζας παρουσιάζει κορυφή / τοπικό μέγιστο.



4-5 Hz και μια δευτερεύουσα συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας στα 8-13 Hz. Σε ότι αφορά την επίδραση της έντασης των κραδασμών, αυτή φαίνεται να μειώνει τη συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας με την αύξησή της. Η μη γραμμική σχέση γίνεται αντιληπτή ως ένα φαινόμενο χαλάρωσης [36]. Η αλλαγή των χαρακτηριστικών απόκρισης συχνότητας με την αλλαγή έντασης της διέγερσης υποδηλώνει μη γραμμική σχέση. Κλασσικά συστήματα χαλάρωσης, στα οποία η δυσκαμψία είναι αντιστρόφως ανάλογη της παραμόρφωσης δοκιμίων, χαρακτηρίζονται από μια ιδιοσυχνότητα η οποία μειώνεται σε αναλογία του τετραγώνου της έντασης των κραδασμών [37].

Σε μελέτες που έγιναν λαμβάνοντας υπόψη τις επιταχύνσεις σε διάφορα όργανα του σώματος με τη χρήση επιταχυνσιομέτρων στην κοιλιακή χώρα και στην πλάτη βρέθηκε ότι υπάρχει σημαντική μείωση στις συχνότητες συντονισμού τόσο για τη φαινόμενη μάζα όσο και για τη μεταβιβασιμότητα στη χαμηλότερη κοιλιακή χώρα με την αύξηση της έντασης των κραδασμών. Η συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας μειώθηκε από 5,4 σε 4,2 Hz καθώς η ένταση των κραδασμών αυξήθηκε από 0,25 σε 2,5  $m/s^{-2}$  rms συμπεραίνοντας ότι όταν το σώμα εκτίθεται σε κατακόρυφους κραδασμούς παρουσιάζει σημαντικές μη γραμμικότητες στη βιοδυναμική του συμπεριφορά [37].

Η μη γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται και σε παράγοντες όπως η στάση του σώματος όπου φαίνεται ότι όσο πιο άκαμπτη και «σκληρή» η στάση του καθήμενου, τόσο πιο γραμμικό είναι το σύστημα [36], από το γεγονός ότι η διέγερση στον άξονα Z στο κάθισμα, προκαλεί κίνηση και στον άξονα X στο σώμα (στήθος, κεφάλι) και στο ότι ανάλογα με τη συχνότητα διέγερσης μεταβάλλονται και οι συχνότητες συντονισμού της φαινόμενης μάζας, δηλαδή χαμηλές συχνότητες διέγερσης συνεπάγονται χαμηλές συχνότητες συντονισμού της φαινόμενης μάζας [38].

Στην περίπτωση των κραδασμών που εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα σε μορφή επαναλαμβανόμενων σοκ, δηλαδή κραδασμών με υψηλές εντάσεις και μικρή διάρκεια, παρατηρείται το φαινόμενο της αύξησης της δυσκαμψίας του σώματος κατά τη διάρκεια των σοκ και επομένως αύξηση των παρατηρούμενων συχνοτήτων συντονισμού της φαινόμενης μάζας του σώματος [39].

Μάλιστα έχει βρεθεί ότι με την χρήση πλάτης στο κάθισμα, με την όρθια θέση και γενικότερα με αυξημένη την μυϊκή ένταση, η πρωτεύουσα συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας γενικά αυξάνει, αν και το φαινόμενο διαφέρει πολύ σε κάθε υποκείμενο [29]. Ακόμα και η επιφάνεια του καθίσματος παίζει διαδραματίζει ρόλο και μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά την λήψη κραδασμών από το σώμα [35].

### ***Γ. Η επίδραση στον άξονα x (μονοαξονική καταπόνηση)***

Μερικά βασικά δεδομένα στη βιοδυναμική απόκριση στην κατεύθυνση του άξονα x έχουν δημοσιευτεί από το 1990 ερευνώντας για ημιτονοειδής και τυχαίους κραδασμούς το πεδίο μεταξύ 0,25 Hz και 20 Hz, με ένταση από 0,125 μέχρι 2 m/s<sup>2</sup>. Υπάρχει μια ασυνέχεια στις συχνότητες συντονισμού που αναφέρουν οι διάφοροι συγγραφείς [40]. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επίδραση της επαφής της πλάτης, της μυϊκής έντασης (στάση διέγερσης ή χαλαρή), στην υποστήριξη των ποδιών και στην επαφή των μοιρών. Υπάρχει μια τάση να εμφανίζονται κυρίως τρεις συχνότητες συντονισμού της φαινόμενης μάζας, η μία γύρω στο 1 Hz, η δεύτερη μεταξύ 1 και 3 Hz και η τρίτη μεταξύ 3 και 5 Hz. Ακόμα αύξηση της έντασης των κραδασμών τείνει να μειώσει την πρώτη συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας.

### ***Δ. Η επίδραση στον άξονα y (μονοαξονική καταπόνηση)***

Στον άξονα y στα πλαίσια λίγων σχετικά μελετών έχουν καταγραφεί για τη φαινόμενη μάζα μέγιστα (κορυφές) στα 0,7 Hz και στα 1,5 ή 2 Hz ανάλογα με τις διάφορες στάσεις του σώματος. Μάλιστα όταν αυξάνει η ένταση των κραδασμών, η δεύτερη κορυφή εμφανίζεται μικρότερη [41].

### ***Ε. Πολλαπλοί άξονες***

Επειδή το ανθρώπινο σώμα είναι πολύπλοκο βιομετρικό σύστημα, η συμπεριφορά του δεν μπορεί να καταγραφεί πλήρως λαμβάνοντας υπόψη μόνο την κίνηση σε ένα άξονα. Παρόλα αυτά η μονοαξονική καταπόνηση χρησιμοποιείται συχνά ως εργαλείο για μοντελοποίηση. Αυτό οφείλεται σε περιορισμούς που υπάρχουν στη διαθεσιμότητα εξοπλισμού (όπως για παράδειγμα δονητές πολλαπλών αξόνων), λογισμικού και μηχανογραφικών συστημάτων κατάλληλων να εκτελούν υπολογισμούς σε πολυδιάστατα μοντέλα [42]. Παρόλο που η διέγερση του σώματος σε έναν άξονα έχει ως συνέπεια την απόκριση σε όλους τους άξονες, η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνών βασίζεται σε μονοαξονικά μοντέλα με ιδιαίτερη έμφαση στον άξονα Z.

### ***ΣΤ. Άλλοι παράγοντες***

Ακόμα ένας παράγοντας που σχετίζεται με τη μάζα του καθήμενου ανθρώπου είναι η μορφή του καθίσματος κυρίως όταν το υλικό της θέσης είναι πολυμερισμένος αφρός, κυρίως επειδή οι ιδιότητες αυτού του υλικού να απορροφά και να διαχέει ενέργεια εξαρτώνται από τη φόρτιση του με το βάρος του επιβάτη.

Επίσης, η σχετική κίνηση μεταξύ ποδιών και καθίσματος βρέθηκε να επηρεάζει την φαινόμενη μάζα σε συχνότητες μικρότερες της συχνότητας συντονισμού της και ειδικότερα πλησίον της μηδενικής συχνότητας. Μάλιστα σε περίπτωση που το υποπόδιο δεν δονείται, το φαινόμενο σχετίζεται και με την ακαμψία των ποδιών που έρχονται σε επαφή με το κάθισμα και κατά συνέπεια με το ύψος του υποπόδιου και το σχετικό πλάτος της δόνησης μεταξύ του υποπόδιου και του καθίσματος [29].

### ***Z. Η επίδραση της αθροιστικής προσέγγισης***

Τα βιοδυναμικά μοντέλα καθημένων ανθρώπων προκύπτουν συνήθως (όπως και στο προαναφερθέν πρότυπο ISO 5982: 2001 [25]) βασισμένα στη μέση απόκριση ενός πληθυσμού υποκειμένων των οποίων οι μάζες κυμαίνονται μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Τα μοντέλα αυτά λοιπόν δίνουν μια πρόβλεψη της μέσης απόκρισης των ανθρώπων, των οποίων η σωματική μάζα προσεγγίζει την μάζα των ανθρώπων που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε έλεγχο.

Όταν ληφθούν μέσες τιμές όμως από μία ομάδα πληθυσμού τότε αγνοείται στο τελικό αποτέλεσμα ότι οι βιοδυναμικές αποκρίσεις που μετρώνται ατομικά σε διάφορα πρόσωπα μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλες αποκλίσεις από το αποτέλεσμα της μελέτης στο σύνολο [43]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν συναθροίζονται δεδομένα για να προκύψει η βιοδυναμική απόκριση χρησιμοποιώντας τη μέση ή τη μεσαία τιμή από μετρήσεις που λήφθηκαν από πολλά άτομα τότε η σειρά δεδομένων που προκύπτει έχει μία μορφή χωρίς έντονες κορυφές και έτσι εξαφανίζονται δεδομένα που σχετίζονται με τη διαφορά από άτομο σε άτομο. Αν μάλιστα συναθροιστούν και δεδομένα από πολλές μελέτες τότε η βιοδυναμική απόκριση εμφανίζεται έντονα εξομαλυσμένη, σε βαθμό που η τελική της μορφή να μην έχει κάποια ιδιαίτερη χρησιμότητα. Από επιστημονικής απόψεως η μορφή και οι αιτίες που δίνουν τη διαφορετικότητα της μορφής της βιοδυναμικής απόκρισης σε κάθε άτομο ξεχωριστά είναι πιο σημαντικά από τον τελικό μέσο όρο. Είναι ίσως ορθότερο να μελετηθεί η κατανομή ενός δείγματος από υποκείμενα και να εκτιμηθεί πως αυτή μεταφράζεται σε κατανομή βιοδυναμικών χαρακτηριστικών.

### **2.9 Μοντελοποίηση και ανάλυση ιδιομορφών (Modal analysis)**

Για τη μοντελοποίηση της βιοδυναμικής απόκρισης του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα για να την περιγράψουν με τρόπο όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικό, σε σχέση πάντα με στοιχεία που λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για να περιγράψουν την απόκριση για τον καθημένο άνθρωπο που υπόκειται σε κατακόρυφες δονήσεις.

Σε πολλές περιπτώσεις τα βιοδυναμικά μοντέλα προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη μόνο μία από τις τρεις βιοδυναμικές συναρτήσεις μεταφοράς, κυρίως τη φαινόμενη μάζα. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται η μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής για να εξαχθεί το βιοδυναμικό μοντέλο. Εάν λοιπόν χρησιμοποιηθεί μόνο μια βιοδυναμική συνάρτηση μεταφοράς για την παραγωγή του βιοδυναμικού μοντέλου και λαμβάνοντας υπόψη ότι το μοντέλο συνήθως προκύπτει από προσαρμογή μαθηματικών συναρτήσεων σε αριθμητικά πειραματικά δεδομένα (curve fitting) τότε μπορούν περισσότερα από ένα μοντέλα να περιγράψουν την απόκριση που προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα, κυρίως όταν τα μοντέλα υποθέτουν δομές πολλών βαθμών ελευθερίας.

Αυτό συμβαίνει επειδή τα αποτελέσματα των βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς δεν είναι πάντα απόλυτα συμβατά μεταξύ τους [44]. Σε συγκριτικές μετρήσεις που έγιναν και λάμβαναν υπόψη τη φαινόμενη μάζα και τη μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής και για διαφορετικές επιταχύνσεις με ποικιλία στάσεων της πλάτης και θέσης των χεριών, έδειξαν ότι τα αποτελέσματα για τα βιοδυναμικά μοντέλα «στο σώμα» και «μέσα από το σώμα» συμφωνούν πολύ καλά στην πρωτεύουσα συχνότητα συντονισμού<sup>5</sup> των βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς. Στη δευτερεύουσα συχνότητα συντονισμού όμως υπάρχει μια μεγάλη απόκλιση κυρίως λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της μεταβιβαστικότητας καθίσματος κεφαλής στις στάσεις της πλάτης. Ακόμα φαίνεται ότι η μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής εξαρτάται πολύ και από τη θέση των χεριών. Γενικά η μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής μπορεί να περιγράψει με περισσότερη ακρίβεια την απόκριση του καθημένου σώματος σε υψηλότερες συχνότητες.

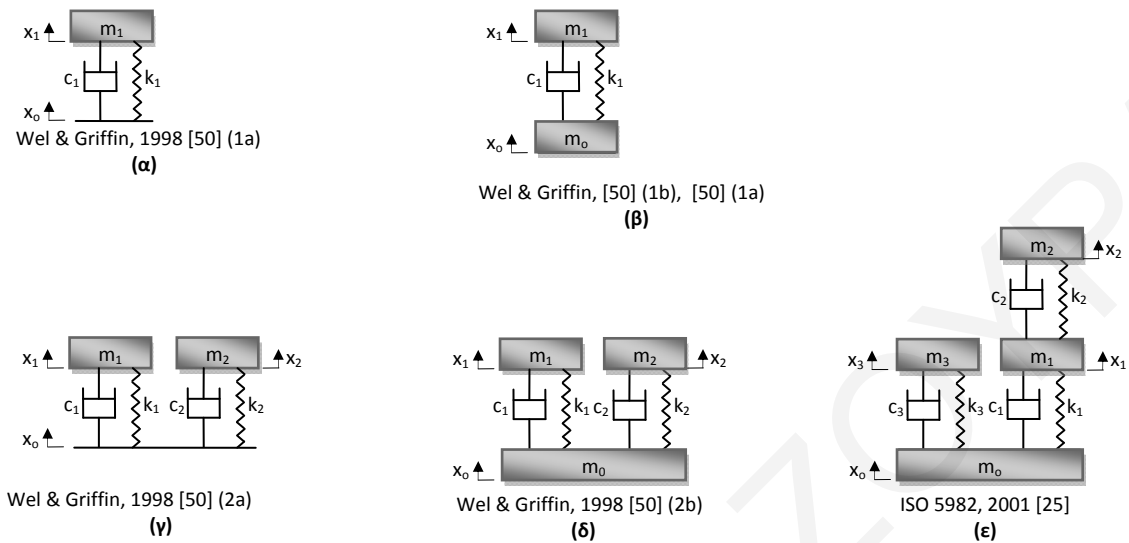
Ακόμα σε σύγκριση των τριών βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς μεταξύ τους φαίνεται ότι συγκριτικά πιο κοντά στα αποτελέσματα βρίσκονται η φαινόμενη μάζα και η μεταβιβαστικότητα καθίσματος κεφαλής ενώ η μηχανική εμπέδηση οδηγητικού σημείου παρουσιάζει αποκλίσεις από τις προηγούμενες δύο συναρτήσεις μεταφοράς τόσο σε ότι αφορά την πρώτη συχνότητα συντονισμού όσο και το πλάτος της απόκρισης [28].

Κάποια επιλεγμένα μοντέλα παρουσιάζονται παρακάτω [45] στο Σχήμα 3. Από τα μοντέλα το πιο αναγνωρισμένο είναι αυτό του ISO 5982: 2001 [25] που αντικατοπτρίζει ένα μοντέλο τριών βαθμών ελευθερίας για να αποδώσει τη βιοδυναμική απόκριση του σώματος. Σε γενικές γραμμές το πιο πάνω μοντέλο κρίνεται από τους συγγραφείς του προτύπου ως επαρκές για να αποδώσει τη φαινόμενη μάζα, τη μεταβιβαστικότητα καθίσματος-κεφαλής και τη μηχανική εμπέδηση οδηγητικού σημείου. Το μοντέλο αυτό ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα διότι η δομή του είναι τέτοια που μπορεί ταυτόχρονα να αποδίδει τις τρεις παραμέτρους που αναφέρονται παραπάνω και

---

<sup>5</sup> Ως συχνότητα συντονισμού μιας βιοδυναμικής συνάρτησης μεταφοράς νοείται η συχνότητα στην οποία το μέτρο της βιοδυναμικής συνάρτησης μεταφοράς γίνεται μέγιστο.

ταυτόχρονα περιορίζει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας που είναι απαραίτητοι για να περιγραφεί το σώμα του καθήμενου ανθρώπου [45].



Σχήμα 3: Επιλεγμένα μοντέλα της βιοδυναμικής απόκρισης. Όπου  $m_i$ ,  $k_i$ , και  $c_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) είναι αντίστοιχα οι μάζες, σταθερές ελατηρίου και συντελεστές απόσβεσης

Η μάζα  $m_0$  εισάγεται για να προσθέσει ελαστικότητα στο μοντέλο χωρίς να αυξηθεί ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου μιας και η επίδρασή της εμφανίζεται κυρίως στην φαινόμενη μάζα. Οι μάζες  $m_1$  και  $m_2$  εισάγονται για να αποδώσουν την μετάδοση των κραδασμών μέσα από το σώμα. Παρόλο που το μοντέλο δεν έχει κατασκευαστεί έχοντας κάποια αναλογία με την ανατομία του ανθρώπινου σώματος, η μάζα  $m_2$  μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει το κεφάλι για την μεταβιβαστικότητα καθίσματος - κεφαλής. Το σύνολο των μαζών όμως λαμβάνεται ώστε να αντιστοιχεί με την μάζα του σώματος που κάθετοι στο κάθισμα (διορθωμένη όμως για την περίπτωση που τα πόδια δεν συμμετέχουν στην μέτρηση της δύναμης).

Οι ιδεατές τιμές της απόκρισης θεωρούνται ότι είναι αντιπροσωπευτικές για πληθυσμό του οποίου η μάζα κυμαίνεται μεταξύ 49 kg και 93 kg ενώ ο μέσος όρος τίθενται τα 75 kg. Τα δεδομένα του προτύπου προκύπτουν από καθήμενα πρόσωπα, με τα πόδια υποστηριζόμενα και την πλάτη ελεύθερη πάνω σε εξέδρα που δονείται.

Οι τιμές που προκύπτουν από αυτό το πρότυπο θεωρούνται τυπικές για συχνότητες από 0,5 Hz έως 20 Hz και για υποκειμένα που υπόκεινται σε ημιτονοειδή ή τυχαία ταλάντωση ευρέως φάσματος με αστάθμιστη επιτάχυνση μικρότερη από  $5 \text{ m/s}^2$ . Σύμφωνα με τους συγγραφείς του προτύπου αυτά τα μεγέθη των κραδασμών είναι χαρακτηριστικά για αγροτικά μηχανήματα, εκσκαφείς και περνοφόρα οχήματα αλλά όχι για οχήματα ιδιωτικής χρήσης.

## Κεφάλαιο 3

### Στόχοι, επιλογή υποκειμένων και μέθοδος ερευνητικής προσέγγισης

#### 3.1 Στόχοι της ερευνητικής προσέγγισης

Στόχος της ερευνητικής προσέγγισης είναι η διερεύνησης της πιο κάτω υπόθεσης:

*Υπάρχει τουλάχιστο μια επαγγελματική ομάδα στην Κύπρο η οποία εκτίθεται επαγγελματικά σε κραδασμούς όλου του σώματος που επηρεάζουν την υγεία και ότι η απόκριση του σώματος των μελών της όταν εκφραστεί και αναλυθεί εξατομικευμένα μέσω της ανάλυσης των ιδιομορφών δίνει δεδομένα που σχετίζονται με την κατάσταση του σώματος και μπορούν να οδηγήσουν σε ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας. Η χρήση των βιοδυναμικών συναρτήσεων δεν οδηγεί σε υπολογισμό των συντονισμών του σώματος, όμως περιέχει πληροφορίες που σχετίζονται με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιομορφών.*

Για το σκοπό αυτό θα επιβεβαιωθεί με επιστημονικό τρόπο η συσχέτιση ή μη:

- α) της επαγγελματικής έκθεσης σε κραδασμούς και των υπολοίπων σχετιζομένων επιβαρυντικών παραγόντων,
- β) της κατάστασης της υγείας,
- γ) της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος και
- δ) του υπολογισμού της αβεβαιότητας που προκύπτει για το ανθρώπινο σώμα

για τη συγκεκριμένη ομάδα των χειριστών (υποκειμένων) μηχανημάτων έργων μηχανικών κατασκευών για κραδασμούς ολόκληρου του σώματος στον κατακόρυφο άξονα. Η προσέγγιση περιλαμβάνει την παραδοχή της γραμμικότητας του ανθρώπινου σώματος σε συγκεκριμένα όρια συχνοτήτων καθώς και την ικανότητα απλών μοντέλων 2 έως 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας να περιγράφουν την απόκριση σε συχνότητες που έχουν επίπτωση στην υγεία. Επίσης, γίνεται συσχετισμός των πιο πάνω τριών παραμέτρων για κάθε άνθρωπο ξεχωριστά με σκοπό την ανάδειξη της αβεβαιότητας που πηγάζει από τη διαφορετικότητα των χειριστών μέσω του πίνακα πυκνότητας. Για το σκοπό αυτό ακολουθείται η θεωρία της ανάλυσης των ιδιομορφών (Modal analysis) χωρίς να αγνοείται η υφιστάμενη προσέγγιση της βιβλιογραφίας μέσω των βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς.

### 3.2 Επιλογή υποκειμένων

Η επιλογή των υποκειμένων έγινε από εργαζόμενους στην κατασκευαστική βιομηχανία της Κύπρου και πιο συγκεκριμένα από άρρενες χειριστές μηχανημάτων έργων μηχανικών κατασκευών. Ο λόγος της επιλογής αυτής της επαγγελματικής ομάδας είναι διότι:

- α) Η παρούσα ερευνητική συνεργασία διενεργήθηκε μαζί με το Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας το οποίο είχε καθορίσει τον τομέα κατασκευών ως τομέα προτεραιότητας για την προαγωγή της ασφάλειας και υγείας στην Κύπρο.
- β) Στην Κύπρο υπάρχουν αρκετές μεγάλες για το μέγεθος της χώρας κατασκευαστικές εταιρείες με επαρκή οργάνωση σε θέματα ασφάλειας και υγείας και με Λειτουργούς Ασφάλειας που σύμφωνα με την τρέχουσα νομοθεσία πρέπει να εργοδοτούνται σε όλες τις επιχειρήσεις με περισσότερους από 200 εργαζόμενους οι οποίοι απασχολούνται στο σύνολο του χρόνου εργασίας τους με τα θέματα της ασφάλειας και υγείας στην εργασία.
- γ) Τα δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαραγωγή του προτύπου ISO 5982: 2001<sup>6</sup> [25], το οποίο δίνει τις εξιδανικευμένες τιμές απόκρισης σε κραδασμούς σώματος, σύμφωνα με τους συγγραφείς του, περιγράφουν την καταπόνηση σε οχήματα του ίδιου τύπου με τους εκσκαφείς και τα περνοφόρα οχήματα.
- δ) Υπάρχουν αρκετοί χειριστές μηχανημάτων έργων μηχανικών κατασκευών στην Κύπρο χωρίς να έχει γίνει ποτέ στο παρελθόν κάποια συντονισμένη προσπάθεια μελέτης για την ενδεχόμενη επιβάρυνση της υγείας τους από τους κραδασμούς.

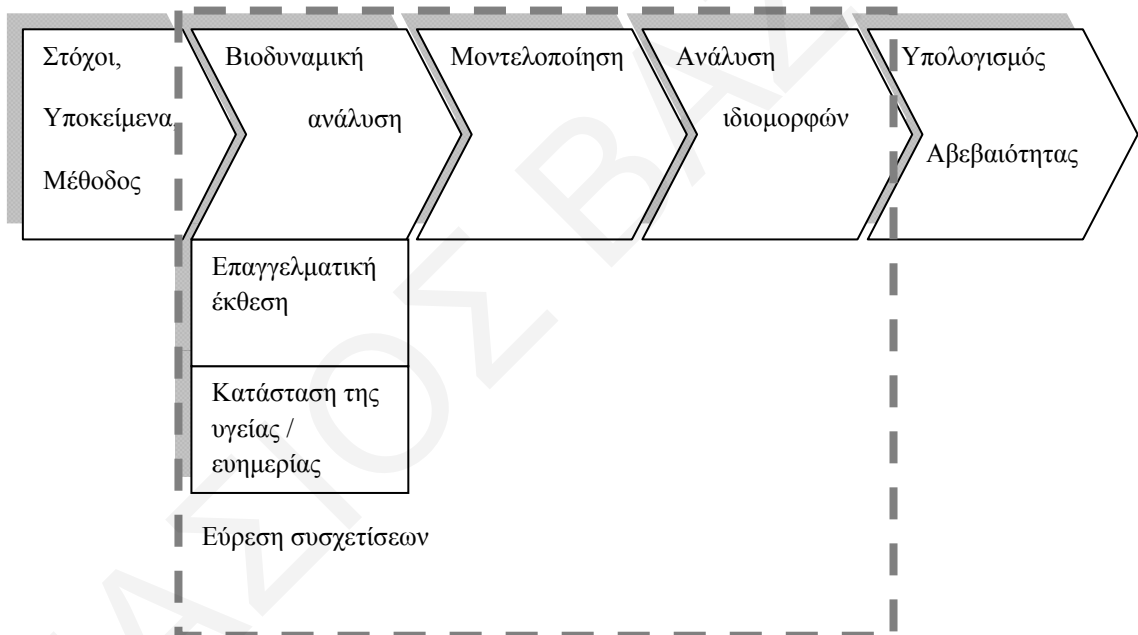
---

<sup>6</sup> Το πρότυπο ISO 5982: 2001 στην τελευταία σύνοδο της τεχνικής επιτροπής ISO/TC 108/SC 4 στις 10/5/2014 κρίθηκε ως επαρκές και ισχύον για τα επόμενα 4 χρόνια.

### 3.3 Μεθοδολογία

Η μέθοδος για την προσέγγιση του αποτελέσματος είναι η εξής:

- α) Συλλογή στοιχείων για την επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς καθώς και για την κατάσταση της υγείας μέσω ερωτηματολογίου.
- β) Μέτρηση της πραγματικής επαγγελματικής έκθεσης σε κάθε χειριστή στον χώρο εργασίας.
- γ) Μέτρηση της απόκρισης του σώματος του κάθε χειριστή μέσω έκθεσης σε κραδασμούς σε ελεγχόμενο περιβάλλον στο εργαστήριο. Η απόκριση μετρήθηκε σε τρία σημεία ώστε να μπορεί να γίνει συσχέτιση με αντίστοιχα μοντέλα της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση της ερευνητικής προσέγγισης

Ακολούθησε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε να:

- α) υπολογιστούν οι στατιστικές συσχετίσεις μεταξύ των παραγόντων σχετικά με την υγεία, επαγγελματική έκθεση και απόκριση του σώματος και να τονιστεί η ποικιλομορφία του ανθρώπινου σώματος,
- β) γίνει μοντελοποίηση του κάθε ανθρώπου ξεχωριστά με βάση το μοντέλο ISO 5982 :2001 [25],
- γ) χρησιμοποιηθεί η θεωρία ανάλυσης ιδιομορφών (modal analysis) για να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες του κάθε ανθρώπου και τα αντίστοιχα



ιδιοδιανύσματα από τα οποία υπολογίστηκε και ο αντίστοιχος πίνακας - πυκνότητας πιθανότητας,

- δ) προταθεί τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας που προκύπτει από την έλλειψη γνώσης των παραμέτρων του μοντέλου που αποτυπώνεται με τη διασπορά των παραμέτρων της μοντελοποίησης.

Η γραφική απεικόνιση της προσέγγισης φαίνεται στο Σχήμα 4.

## Κεφάλαιο 4

### Υπολογιστικά αποτελέσματα

#### 4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αρχικά υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών όπως αυτές προκύπτουν από το πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] (Σχήμα 3, (ε)). Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος του πιο πάνω προτύπου σε εξαναγκασμένη ταλάντωση της βάσης στη θέση  $x_0$ . Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των ιδιοσυχνοτήτων με τις συχνότητες συντονισμού της φαινόμενης μάζας. Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας που φαίνεται η επίδραση της μείωση της απόσβεσης πάνω στο μέτρο της φαινόμενης μάζας.

#### 4.2 Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών

Υποθέτουμε σε πρώτο στάδιο ότι στη μάζα  $m_0$  δεν ασκείται κάποια δύναμη, οι εξισώσεις ελεύθερης κίνησης του μοντέλου του ISO 5982: 2001 [25] που απεικονίζεται πιο πάνω στο Σχήμα 3, (ε) μπορούν να διατυπωθούν χρησιμοποιώντας τους νόμους της κίνησης του Newton ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{x}_0 + c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + c_3(\dot{x}_0 - \dot{x}_3) + k_1(x_0 - x_1) + k_3(x_0 - x_3) &= 0 \\ m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_0) + k_2(x_1 - x_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) &= 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) + k_3(x_3 - x_0) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ή σε πιο περιεκτική γραφή:

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{C}\{\dot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = \{0\} \quad (5)$$

Όπου

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_3 & -c_1 & 0 & -c_3 \\ -c_1 & c_2 + c_1 & -c_2 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 & 0 \\ -c_3 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_3 & -k_1 & 0 & -k_3 \\ -k_1 & k_2 + k_1 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ -k_3 & 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

και

$$\mathbf{X} = \{X_0 \quad X_1 \quad X_2 \quad X_3\}^T \quad (9)$$

Με βάση τα στοιχεία του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] και τα στοιχεία που δίνονται στο Παράρτημα Β αυτού σε ότι αφορά τις μάζες, τις σταθερές ελατηρίων και των στοιχείων απόσβεσης 1 έως 4, υπολογίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες και ιδιοδιανύσματα του συστήματος. Είναι σύνηθες οι ιδιοτιμές να παρουσιάζονται στην μορφή [46].

$$S_r = \omega_r \left( -\zeta_r + i\sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \quad (10)$$

όπου  $\omega_r$  είναι η ιδιοσυχνότητα και  $\zeta_r$  ο λόγος απόσβεσης.

Οι πιο πάνω ιδιοτιμές είναι είτε πραγματικές, είτε συζυγείς μιγαδικές και προκύπτουν αν υποθέσουμε ότι η εξίσωση (68) έχει λύση της μορφής

$$\{x\} = X e^{st} \quad (11)$$

και αντίστοιχα η εξίσωση της κίνησης λαμβάνει τη μορφή:

$$(s^2 M + sC + K)X = \{0\} \quad (12)$$

Οι ιδιοτιμές για το πιο πάνω σύστημα παρουσιάζονται κάτωθι:

$$\{s\} = \begin{pmatrix} -26,77 \\ -900,8 \\ -22,09 + 25,95i \\ -84,07 + 124,7i \\ -84,07 - 124,7i \\ -22,09 - 25,95i \end{pmatrix} \quad (13)$$

Η ύπαρξη ιδιοτιμών οι οποίες δεν εμφανίζονται σαν συζυγείς μιγαδικές υποδηλώνει ότι υπάρχει πολύ υψηλή απόσβεση που οδηγεί σε υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές (overdamped modes) [47]. Από τη στιγμή που το σύστημα είναι ελεύθερο, η δυναμική ανάλυση δίνει δύο ιδιοσυχνότητες στη συχνότητα μηδέν, οι οποίες δεν εμφανίζονται πιο πάνω.

Αντίστοιχα από την εξίσωση (10) προκύπτει για τις ιδιοσυχνότητες και τον λόγο απόσβεσης:

$$\{\omega\} = \begin{pmatrix} 26,77 \\ 900,8 \\ 34,08 \\ 150,40 \\ 150,40 \\ 34,08 \end{pmatrix} \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad \text{ή} \quad \begin{pmatrix} 4,26 \\ 143,37 \\ 5,42 \\ 23,94 \\ 23,94 \\ 5,42 \end{pmatrix} \text{ Hz}, \quad \{\zeta\} = \begin{pmatrix} \text{υπεραποσβεσμένο} \\ \text{υπεραποσβεσμένο} \\ 0,6481 \\ 0,5590 \\ 0,5590 \\ 0,6481 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Υπολογίζοντας τα ιδιοδιανύσματα προκύπτει ο κάτωθι πίνακας:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0,07 & -0,078 & 12,681 + 0,157i & 4,44 + 1,25i & 4,44 - 1,25i & 12,681 - 0,157i \\ -0,066 & 0,01 & 12,96 + 1,13i & -11,637 + 0,221i & -11,637 - 0,221i & 12,96 - 1,13i \\ -0,032 & -0,034 & -2,311 - 0,071i & -0,119 - 0,176i & -0,119 + 0,176i & -2,311 + 0,071i \end{pmatrix} \quad (15)$$

Από τον πιο πάνω υπολογισμό ξεχωρίζει η ύπαρξη πολύ υψηλών συντελεστών απόσβεσης και η ύπαρξη υπεραποσβεσμένης ιδιομορφής.

#### 4.3 Υπολογισμός εξαναγκασμένης απόκρισης (φαινόμενη μάζα)

Υποθέτουμε ότι η βάση διεγείρεται με δύναμη  $\mathbf{F}$ .

$$\mathbf{F} = \{F_0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \quad (16)$$

Η διέγερση χαρακτηρίζεται από την εξίσωση:

$$\{f\} = \mathbf{F}e^{i\omega t} \text{ όπου } i = \sqrt{-1} \quad (17)$$

Επίσης, για όλο το σύστημα ισχύει η εξίσωση:

$$f_0 = m_0\ddot{x}_0 + m_1\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 + m_3\ddot{x}_3 \quad (18)$$

Η φαινόμενη μάζα (apparent mass) στη θέση  $x_0$  είναι:

$$\frac{f_0}{\ddot{x}_0} = m_0 + m_1 \frac{\ddot{x}_1}{\ddot{x}_0} + m_2 \frac{\ddot{x}_2}{\ddot{x}_0} + m_3 \frac{\ddot{x}_3}{\ddot{x}_0} \quad (19)$$

Από τις εξισώσεις (4) και αν υποθέσουμε λύση της μορφής  $\{x\} = \mathbf{X}e^{i\omega t}$  προκύπτει ότι:

$$\frac{\ddot{x}_1}{\ddot{x}_0} = \frac{(k_1 + i\omega c_1)(\omega^2 m_2 - i\omega c_2 - k_2)}{k_1 k_2 - \omega^2(m_2 k_1 + m_1 k_2 + m_2 k_2 + c_1 c_2) + \omega^4 m_2 m_1 + i\omega(c_1 k_2 + c_2 k_1) - i\omega^3(c_1 m_2 + c_2 m_1 + c_2 m_2)} \quad (20)$$

$$\frac{\ddot{x}_2}{\ddot{x}_0} = \frac{(k_1 + i\omega c_1)(k_2 + i\omega c_2)}{k_1 k_2 - \omega^2(m_2 k_1 + m_1 k_2 + m_2 k_2 + c_1 c_2) + \omega^4 m_2 m_1 + i\omega(c_1 k_2 + c_2 k_1) - i\omega^3(c_1 m_2 + c_2 m_1 + c_2 m_2)} \quad (21)$$

$$\frac{\ddot{x}_3}{\ddot{x}_0} = \frac{k_3 + i\omega c_3}{k_3 - \omega^2 m_3 + i\omega c_3} \quad (22)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις τιμές για την ελαστικότητα των ελατηρίων, την απόσβεση και τη μάζα που δίνονται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 [25], προκύπτει

$$\frac{\ddot{x}_1}{\ddot{x}_0} = \frac{9(1110 + 43i\omega)(\omega^2 - 117i\omega + 17200)}{6\omega^4 - 1323i\omega^3 - 192869\omega^2 + 7825230i\omega + 171828000} \quad (23)$$

$$\frac{\ddot{x}_2}{\ddot{x}_0} = \frac{(387i\omega + 9990)(234i\omega + 34400)}{2(6\omega^4 - 1323i\omega^3 - 192869\omega^2 + 7825230i\omega + 171828000)} \quad (24)$$

$$\frac{\ddot{x}_3}{\ddot{x}_0} = \frac{5(139i\omega + 3620)}{695i\omega - 2\omega^2 + 18100} \quad (25)$$

Από την εξίσωση (19) προκύπτει:

$$\frac{f_0}{\ddot{x}_0} = \frac{2,72\omega^4 \cdot 10^7 - 108\omega^6 - 3,8i\omega^3 \cdot 10^9 - 2,03\omega^2 \cdot 10^{11} + 6,84 \cdot 10^{13} + 5,74i\omega \cdot 10^{12} + 1,23i\omega^5 \cdot 10^5}{2,14\omega^4 \cdot 10^6 - 54\omega^6 - 1,33i\omega^3 \cdot 10^8 - 5,11\omega^2 \cdot 10^9 + 1,24 \cdot 10^{12} + 1,04i\omega \cdot 10^9 + 1,35i\omega^5 \cdot 10^4} \quad (26)$$

Η εξίσωση (26) περιγράφει την φαινόμενη μάζα και αντιστοιχεί στην εξίσωση (3) και η εξίσωση (24) περιγράφει τη μεταβιβαστικότητα καθίσματος- κεφαλής και αντιστοιχεί στην εξίσωση (4).

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να διερευνήσουμε τη σχέση της φαινόμενης μάζας με την απόκριση συχνοτήτων στη θέση  $x_0$ .

Εάν λάβουμε την εξίσωση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}\} + \mathbf{C}\{\dot{x}\} + \mathbf{K}\{x\} = \mathbf{F} \quad (27)$$

και υποθέσουμε εκ νέου τη λύση  $\{x\} = \mathbf{X}e^{i\omega t}$

τότε η εξίσωση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης λαμβάνει τη μορφή:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (28)$$

ή

$$\Omega(i\omega)X = F \quad (29)$$

όπου

$$\Omega(i\omega)^{-1} = R(i\omega) \quad (30)$$

και  $\Omega(i\omega)$  είναι γνωστή ως “dynamic stiffness”, ενώ  $R(i\omega)$  είναι γνωστή ως “receptance” ή “mechanical impedance” ή “dynamic compliance” ή “dynamic flexibility”.  $R(i\omega)$  είναι ο πίνακας απόκρισης συχνοτήτων. Η φαινόμενη μάζα  $M_{11}(i\omega)$  στη θέση  $x_0$  σχετίζεται με το στοιχείο  $R(i\omega)_{11}$  του πίνακα απόκρισης συχνοτήτων με τη σχέση:

$$M_{11}(i\omega) = \frac{f_0}{\ddot{x}_0} = \frac{1}{-\omega^2 R_{11}(i\omega)} \quad (31)$$

Η συσχέτιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι μάζες στα σημεία  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  είναι ελεύθερες. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της σημειακής φαινόμενης μάζας με απλή αντιστροφή του αντίστοιχου σημείου του πίνακα απόκρισης συχνοτήτων [48].

Από την πιο πάνω σχέση γίνεται εμφανές ο λόγος για τον οποίο η φαινόμενη μάζα έχει χρησιμοποιηθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό στον τομέα της μελέτης των κραδασμών στον άνθρωπο. Αν ληφθεί υπόψη ο παράγοντας του τετραγώνου της συχνότητας τότε φαίνεται ότι ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία υπάρχει μια μεγέθυνση της φαινόμενης μάζας που συντείνει ώστε να δημιουργούνται καμπύλες με μεγάλη έμφαση στις χαμηλές συχνότητες, οι οποίες μειώνονται σε πλάτος με την αύξηση της συχνότητας λόγω του παράγοντα  $\frac{1}{-\omega^2}$ .

#### 4.4 Διαφορές μεταξύ συντονισμών της φαινόμενης μάζας και των ιδιοσυχνοτήτων

Οι βιοδυναμικές συναρτήσεις μεταφοράς είναι εξ ορισμού τα αντίστροφα στοιχεία του πίνακα συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων (FRF - matrix) του συστήματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ο συνήθης ορισμός της φαινόμενης μάζας και της μηχανικής εμπέδησης στη βιβλιογραφία απαιτεί οι μάζες να είναι μπλοκαρισμένες στα σημεία όπου δεν υπάρχει διέγερση. Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή όταν οι μάζες είναι μπλοκαρισμένες, η φαινόμενη μάζα και η μηχανική εμπέδηση είναι στοιχεία του αντιστρόφου πίνακα συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων (FRF - matrix) του συστήματος. Όμως για λόγους συνέχειας με τον συνήθη ορισμό των μελετητών της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος για τις βιοδυναμικές συναρτήσεις,

διατηρήθηκε ο ορισμός της φαινόμενης μάζας και μηχανικής εμπέδησης με τις μάζες του μοντέλου ελεύθερες παρόλο που διαφοροποιείται από τον συνήθη ορισμό της βιβλιογραφίας.

Ένα ακόμη σημείο που θα πρέπει να διερευνηθεί είναι το θεωρητικό υπόβαθρο των συντονισμών της φαινόμενης μάζας. Οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας συχνά χαρακτηρίζονται ως συντονισμοί (resonance) του ανθρώπινου σώματος [49]. Αν και οι κορυφές των μέτρων των βιοδυναμικών συναρτήσεων μεταφοράς κατέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την απόκριση του ανθρώπινου σώματος, οι συχνότητες συντονισμού του σώματος μπορεί να προσδιοριστούν κυρίως από πειραματικά δεδομένα που υπολογίζουν τους συντονισμούς με βάση τις συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας (inertance ή accelerance). Μολονότι για ένα συγκεκριμένο μοντέλο έχει αποδειχθεί ότι, η πρώτη ιδιοσυχνότητα που προέρχεται λύνοντας το πρόβλημα των ιδιοτιμών είναι κοντά στην πρώτη κορυφή της φαινόμενης μάζας, όπως αυτή υπολογίζεται από τα πειραματικά δεδομένα [34], αυτό δεν μπορεί να είναι ένα γενικό συμπέρασμα. Η απεικόνιση των αποκρίσεων περιορίζεται συνήθως στην περιοχή των 0 έως 20 Hz, μερικές φορές έως τα 30 Hz.

Προκειμένου να γίνει η απεικόνιση των διαφορών μεταξύ των κορυφών της φαινόμενης μάζας και των ιδιοσυχνοτήτων του ανθρώπινου σώματος, επιλέγηκαν δύο μοντέλα από τη βιβλιογραφία, το ένα που έχει δύο βαθμούς ελευθερίας και το άλλο τρεις. Αμφότερα ελήφθησαν επειδή παρέχουν πολύ καλή σύγκλιση με πειραματικά δεδομένα που λήφθηκαν από ομάδες υποκειμένων και περιγράφουν τη φαινόμενη μάζα. Το πρώτο μοντέλο έχει προταθεί από Wei & Griffin, 1998 [50], ενώ το δεύτερο μοντέλο προέρχεται από το πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] (βλέπε Σχήμα 3 (δ) και (ε) αντίστοιχα). Το δεύτερο, όπως έχει ήδη αναφερθεί ισχυρίζεται ότι παρέχει σύγκλιση όχι μόνο με την φαινόμενη μάζα, αλλά επίσης και με τη μεταβιαστικότητα καθίσματος κεφαλής. Και τα δύο μοντέλα έχουν, όπως το ανθρώπινο σώμα, σημαντική απόσβεση. Ο τύπος της απόσβεσης που έχει επιλεγεί είναι η ιξώδης απόσβεση, ο οποίος, αν και γενικά δεν έχει επιβεβαιωθεί [5], είναι μια υπόθεση που οδηγεί σε πιο γενικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η απόκριση του ανθρώπινου σώματος έχει αποδειχθεί ότι είναι μη γραμμική [29], αλλά μπορεί να θεωρείται ότι είναι σχεδόν γραμμική μέσα στο περιορισμένο εύρος των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη. Επίσης, παρόλο που η συμπεριφορά των ανθρώπινων ιστών είναι βισκοελαστική και μη γραμμική, μπορεί να προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σταθερούς συντελεστές δυσκαμψίας [51].

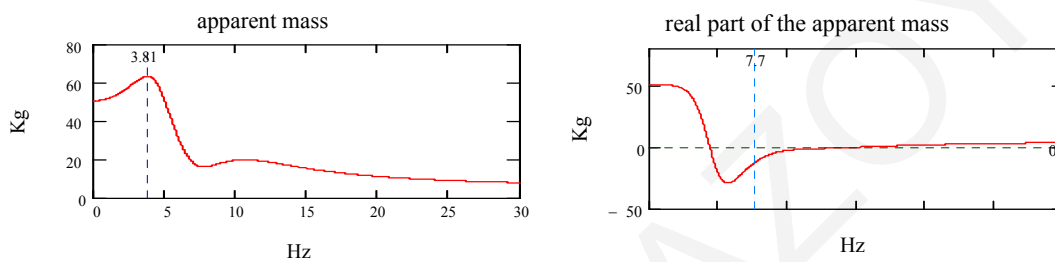
Με τη βοήθεια των πιο πάνω μοντέλων έγινε η σύγκριση που περιελάμβανε ανάλυση ευαισθησίας με σταδιακή μείωση των συντελεστών ιξώδους απόσβεσης από το 100% στο 50 % και στη συνέχεια στο 1 % της τιμής τους. Η θέση των συντονισμών της φαινόμενης μάζας ερευνηθήκε και οι ιδιοσυχνότητες υπολογίστηκαν με την επίλυση του προβλήματος ιδιοτιμών. Μαζί με το μέτρο της φαινόμενης μάζας, απεικονίζεται το πραγματικό μέρος της φαινόμενης μάζας για κάθε συνδυασμό μοντέλου και απόσβεσης. Σύμφωνα με τη θεωρία [46], το πραγματικό μέρος της



φαινόμενης μάζας αναμένεται να τέμνει τον οριζόντιο άξονα στα σημεία όπου η συχνότητα είναι ίση με τις ιδιοσυχνότητες του μη αποσβεσμένου συστήματος.

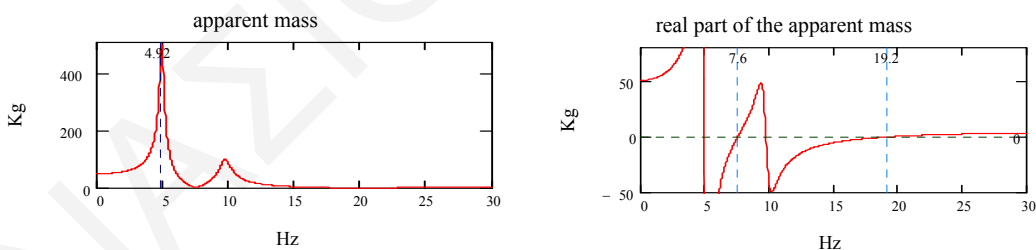
#### 4.4.1 Σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας

Η επίδραση της απόσβεσης στο σύστημα με δύο βαθμούς ελευθερίας για τις τρεις διαφορετικές τιμές απόσβεσης φαίνεται στα πιο κάτω σχήματα. Στο Σχήμα 5 μπορεί να φανεί ότι η πρώτη κορυφή είναι στα 3,81 Hz και οι ιδιοσυχνότητες και ο συντελεστής απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1 = 7,7$  Hz,  $\zeta_1 = 0,46$ .



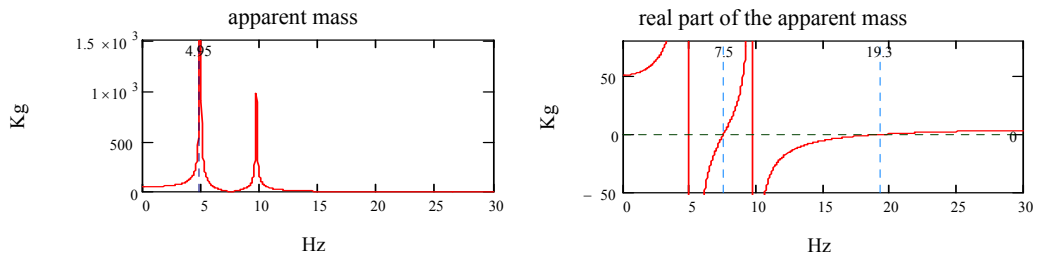
Σχήμα 5: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 100% του συνόλου

Όταν η απόσβεση μειωθεί στο 50% της αρχικής, η πρώτη κορυφή τη φαινόμενης μάζας είναι στα 4,92 Hz και οι ιδιοσυχνότητες και οι λόγοι απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1=7,6$  Hz,  $\zeta_1=0,23$ ,  $\omega_2=19,2$  Hz,  $\zeta_2=0,55$  (βλέπε Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 50% του συνόλου

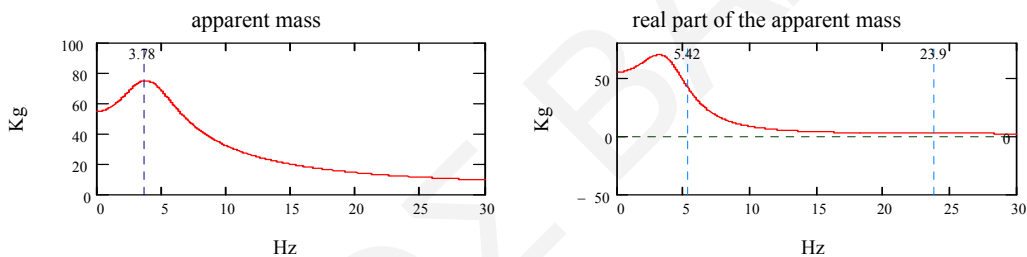
Όταν η απόσβεση μειωθεί στο 1% της αρχικής, η πρώτη κορυφή τη φαινόμενης μάζας είναι στα 4,95 Hz και οι ιδιοσυχνότητες και οι λόγοι απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1=7,51$  Hz,  $\zeta_1=0,005$ ,  $\omega_2=19,3$  Hz,  $\zeta_2=0,01$  (βλέπε Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 2 βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 1% του συνόλου

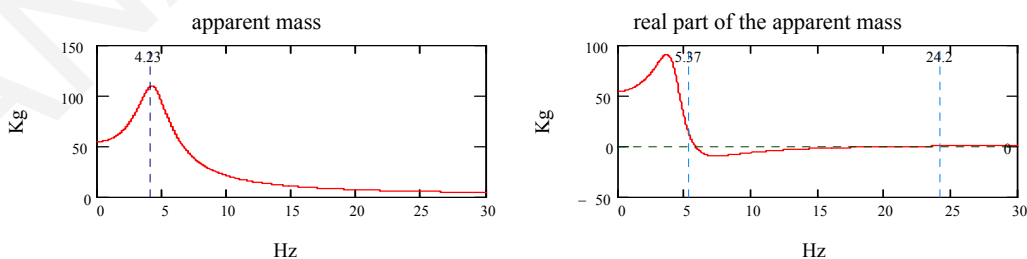
#### 4.4.2 Σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας

Η επίδραση της απόσβεσης στο σύστημα με τρεις βαθμούς ελευθερίας για τις τρεις διαφορετικές τιμές απόσβεσης φαίνεται στα πιο κάτω σχήματα. Στο Σχήμα 8 μπορεί να φανεί ότι η πρώτη κορυφή είναι στα 3,78 Hz και οι ιδιοσυχνότητες και ο λόγος απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1=5,42$  Hz,  $\zeta_1=0,65$ ,  $\omega_2=23,94$  Hz,  $\zeta_2=0,56$ .



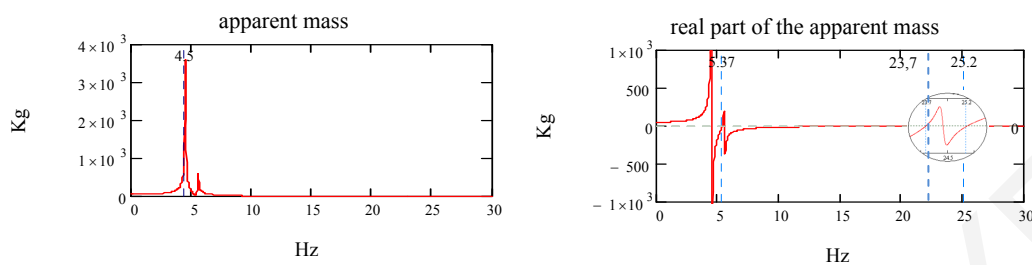
Σχήμα 8: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 100% του συνόλου

Όταν η απόσβεση μειωθεί στο 50% της αρχικής, η πρώτη κορυφή τη φαινόμενης μάζας είναι στα 4,23 Hz και οι ιδιοσυχνότητες και οι λόγοι απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1=5,37$  Hz,  $\zeta_1=0,28$ ,  $\omega_2=24,2$  Hz,  $\zeta_2=0,32$  (βλέπε Σχήμα 9).



Σχήμα 9: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 50% του συνόλου

Όταν η απόσβεση μειωθεί στο 1% της αρχικής, η πρώτη κορυφή της φαινόμενης μάζας είναι στα 4,5 Hz, και οι ιδιοσυχνότητες και οι λόγοι απόσβεσης είναι αντίστοιχα  $\omega_1=5,36$  Hz,  $\zeta_1=0,01$ ,  $\omega_2=23,7$  Hz,  $\zeta_2=0,01$ ,  $\omega_3=25,2$  Hz,  $\zeta_3=0,02$  (βλέπε Σχήμα 10).



Σχήμα 10: Το μέτρο της φαινόμενης μάζας και το πραγματικό της μέρος στο σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας. Η απόσβεση του συστήματος είναι στο 1% του συνόλου

Να σημειωθεί ότι μετά από τη μείωση της απόσβεσης στο 50%, σε όλες τις πιο πάνω περιπτώσεις το πραγματικό μέρος της φαινόμενης μάζας τέμνει κατά κανόνα τον οριζόντιο άξονα στα σημεία των ιδιοσυχνοτήτων.

#### 4.5 Συμπεράσματα υπολογιστικής παρουσίασης

Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγήθηκε ότι το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης των κραδασμών του ανθρωπίνου σώματος παρουσιάζει διαφοροποίηση στον τρόπο που ορίζονται οι συντονισμοί και η φαινόμενη μάζα σε σχέση με τη θεωρία της δυναμικής των κατασκευών. Επιπρόσθετα, μέσα από την ανάλυση ιδιομορφών υπολογίστηκαν οι ιδιομορφές του ανθρώπινου σώματος και διαφάνηκε η μεγάλη σημασία της απόσβεσης, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ανθρώπινου σώματος.

Συγκεκριμένα για τον θεωρητικό υπολογισμό, η χρήση του μοντέλου του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] κρίθηκε ως η καλύτερη προσέγγιση, κυρίως λόγω της εφαρμογής που βρίσκει αυτό το μοντέλο στην περιγραφή της βιοδυναμικής απόκρισης του ανθρώπινου σώματος. Ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών που προκύπτουν από το μοντέλο του προτύπου και τα στοιχεία για τις μάζες, σταθερές ελαστικότητας και αποσβέσεις που εμφανίζονται σε αυτό, έδωσε μια υπεραποσβεσμένη ιδιομορφή και δύο υποαποσβεσμένες ιδιομορφές με συχνότητες συντονισμού 5,4 Hz και 23,9 Hz και συντελεστές απόσβεσης 0,65 και 0,56 αντίστοιχα.

Δύο βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση είναι τα εξής:

- α) Η φαινόμενη μάζα των βιοδυναμικών συναρτήσεων (και αντίστοιχα η μηχανική εμπέδηση) δεν συμβαδίζει με τον συνήθη ορισμό της φαινόμενης μάζας που

απαντάται στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, επειδή κατά τον έλεγχο της φαινόμενης μάζας του ανθρώπινου σώματος, οι μάζες που δεν διεγείρονται παραμένουν ελεύθερες και όχι μπλοκαρισμένες, το υπολογισμένο μέγεθος δεν είναι στοιχείο του αντίστροφου πίνακα απόκρισης συχνοτήτων αλλά το αντίστροφο της συνάρτησης απόκρισης συχνοτήτων FRF της επιτάχυνσης (accelerance) στο συγκεκριμένο σημείο. Επομένως, οι πραγματικοί συντονισμοί εμφανίζονται στα σημεία στα οποία η συνάρτηση απόκρισης συχνοτήτων παρουσιάζεται ως μέγιστη και όχι η αντίστροφη της συνάρτησης που είναι η φαινόμενη μάζα.

- β) Για να τονιστεί περαιτέρω η πιο πάνω διαφορά, έγινε ανάλυση ευαισθησίας τόσο του υπό διερεύνηση μοντέλου του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] όσο και ενός πιο απλού μοντέλου δύο βαθμών ελευθερίας. Η ανάλυση έδειξε ότι οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας δεν είναι, όπως άλλωστε αναμενόταν, συντονισμοί του ανθρώπινου σώματος. Οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας είναι σημεία όπου η φαινόμενη μάζα παρουσιάζει ένα ή περισσότερα τοπικά μέγιστα. Οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε σχέση με την απόσβεση του ανθρώπινου σώματος, η οποία όμως προαναφέρθηκε έχει ιδιαίτερα υψηλές τιμές και παρουσιάζει μεγάλη διασπορά όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το μέγιστο της φαινόμενης μάζας (δηλαδή ο συντονισμός της φαινόμενης μάζας) για έκαστο χειριστή, εξαρτάται εξαιρετικά από την απόσβεση του σώματός του και δεν σχετίζεται με τις συχνότητες συντονισμού του σώματος.

Τα πιο πάνω συμπεράσματα φάνηκαν και μετά τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών του ανθρώπινου σώματος. Μόνο το πραγματικό μέρος της φαινόμενης μάζας περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον συντονισμό του ανθρώπινου σώματος και μάλιστα στα σημεία που τέμνει τον οριζόντιο άξονα. Η πιο πάνω διαπίστωση δεν είναι ακριβής για υψηλούς συντελεστές απόσβεσης.

Επίσης, οι βιοδυναμικές συναρτήσεις σε ότι αφορά τη φαινόμενη μάζα μπορούν να αποκαλύψουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του ανθρώπινου σώματος (δηλαδή τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές) αν αντιστραφούν. Αυτή ακριβώς η αντιστροφή είναι που διαφοροποιεί τον τρόπο που εμφανίζεται το μέτρο της φαινόμενης μάζας στις χαμηλές συχνότητες και είναι ίσως ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν σε πολύ μεγάλο βαθμό για την περιγραφή των κραδασμών ολόκληρου του σώματος. Η μηχανική εμπέδηση σχετίζεται με τη φαινόμενη μάζα με τον παράγοντα  $i\omega$  και αποτελεί στην ουσία το ίδιο μέγεθος εκφρασμένο με άλλο τρόπο.

Επομένως, ιδιοσυχνότητες που προκύπτουν από τη θεωρία της ανάλυσης ιδιομορφών ως συντονισμοί του ανθρώπινου σώματος δεν είναι οι ίδιες με τις συχνότητες συντονισμού της φαινόμενης μάζας όπως προκύπτει από τα ερευνητικά αποτελέσματα. Αυτό είναι το σημαντικότερο συμπέρασμα που δικαιολογεί και την αναγκαιότητα προσέγγισης του προβλήματος της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος με τη θεωρία των ιδιομορφών και όχι αποκλειστικά με τους συντονισμούς της φαινόμενης μάζας. Οι συντονισμοί της φαινόμενης μάζας δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε ιδιοσυχνότητες του σώματος παρόλο που στη βιβλιογραφία των κραδασμών του ανθρώπινου σώματος αυτός ο διαχωρισμός δεν είναι ξεκάθαρος.

## **Κεφάλαιο 5**

### **Επιρροή στην υγεία και ευημερία των χειριστών**

#### **5.1 Γενικά**

Στη μελέτη συμμετείχαν 53 υποκείμενα, όλοι άρρενες (συμπληρώθηκαν 52 ερωτηματολόγια και 43 προσήλθαν εθελοντικά στο εργαστήριο). Η έρευνα επικεντρώθηκε σε χειριστές μηχανημάτων Έργων Μηχανικών Κατασκευών που υπόκεινται σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος (π.χ. μηχανήματα οδοποιίας, περονοφόρα οχήματα, εκσκαφείς κ.ά.), οι οποίοι επιλέχθηκαν μετά από συνεργασία του Τμήματος Επιθεώρησης Εργασίας και του Πανεπιστημίου Κύπρου με μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες της Κύπρου.

Μετά την απόφαση για οριοθέτηση αυτής της επαγγελματικής ομάδας και της μελέτης της σε σχέση με την επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς αποστάληκαν επιστολές σε αριθμό κατασκευαστικών εταιρειών με τις οποίες τους εξηγούνταν ο σκοπός της ερευνητικής προσπάθειας, εγγυόταν την ανωνυμία των επιχειρήσεων και των συμμετεχόντων στη μελέτη και ζητούνταν η συνδρομή των εργαζομένων για συμμετοχή απαντώντας ερωτηματολόγια, συμμετέχοντας σε μέτρηση της επαγγελματικής τους έκθεσης καθώς και της απόκρισης του σώματος στο εργαστήριο.

Η συγκεκριμένη περιπτωσιακή μελέτη με χειριστές οχημάτων έδωσε σημαντικές πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης στην Κύπρο. Για την εξαγωγή στοιχείων που αφορούν τόσο την κατάσταση της υγείας όσο και την ευημερία της ομάδος των χειριστών χρησιμοποιήθηκε ειδικό ερωτηματολόγιο (Προσάρτημα Ι) [13]. Το ερωτηματολόγιο βασίστηκε

κυρίως στο ερωτηματολόγιο που προέκυψε από την ερευνητική συνεργασία “Research Network on Detection and Prevention of Injuries due to Occupational Vibration Exposures EC Biomed II project no. BMH4-CT98-3251 April 1988 to March 2001”. Οι ερωτήσεις επεκτάθηκαν τόσο σε θέματα που αφορούσαν την παρούσα εργασία του χειριστή, όσο και σε προσωπικές συνήθειες ή δραστηριότητες εκτός εργασίας που θα μπορούσαν να επιβαρύνουν την επίπτωση των κραδασμών στο σώμα.

Το ερωτηματολόγιο απαντήθηκε σε μορφή προσωπικής συνέντευξης στο χώρο εργασίας. Η συνέντευξη έλαβε χώρα σε χώρο χωρίς παρεμβολές τρίτων προσώπων με την εγγύηση ότι τα προσωπικά στοιχεία του κάθε συμμετέχοντα δεν πρόκειται να δοθούν σε τρίτα πρόσωπα. Τα συμπληρωμένα ερωτηματολόγια παρέμειναν στο Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας για πιθανή αξιοποίηση, αν απαιτηθεί, σε προσωπικό επίπεδο.

Από τα συμπληρωμένα ερωτηματολόγια προήλθαν συμπεράσματα που σχετίζονται με την επίπτωση των κραδασμών στην υγεία των χειριστών. Επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα για εξατομικευμένες ιατρικές εξετάσεις, η κατάσταση της υγείας λήφθηκε από τις απαντήσεις σε σχετικές ερωτήσεις του ερωτηματολογίου.

Σε ότι αφορά τη συλλογή των δεδομένων, επειδή αυτή έγινε με αναδρομική μελέτη κοορτής (retrospective cohort study) αναμένεται ότι υπάρχει κάποια άγνωστη απώλεια σε ότι αφορά τα δεδομένα που σχετίζεται με το γεγονός ότι ορισμένοι χειριστές που ασθένησαν κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής τους ζωής εξαιτίας των κραδασμών μπορεί να αποχώρησαν από το επάγγελμα του χειριστή μηχανημάτων. Αυτό το γεγονός θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί αν διεξαγόταν προοπτική μελέτη κοορτής (prospective cohort study), δεν έγινε όμως λόγω χρονικών περιορισμών.

## **5.2 Δομή ερωτηματολογίου**

Με το ερωτηματολόγιο συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με τα ανθρωπομετρικά στοιχεία, την ηλικία, την εργασία, την έκθεση σε κραδασμούς ολόκληρου του σώματος καθώς και άλλα στοιχεία των χειριστών. Από τους χειριστές ορισμένοι είχαν πρόβλημα πόνου στη μέση και στα πόδια (π.χ. οσφυαλγία ή/και ισχιαλγία) ή στον αυχένα, ή στους ώμους χωρίς όμως επιβαρυνόμενο ιατρικό ιστορικό ή αναγνωρισμένη επαγγελματική ασθένεια. Δεν θα ήταν άλλωστε ηθικά ορθό να περιληφθεί χειριστής με ενεργή επαγγελματική ασθένεια σε αυτή τη μελέτη, η οποία περιλάμβανε και έκθεση σε κραδασμούς στο εργαστήριο. Επομένως, η πλήρης επαγγελματική ικανότητα και η απουσία οποιασδήποτε μόνιμης επαγγελματικής ή άλλης ασθένειας που οδηγεί σε ανικανότητα να εκτελέσει τα καθήκοντά του ως εργαζόμενος, ήταν απαίτηση για τη συμμετοχή των υποκειμένων στη μελέτη. Γι'αυτό υπάρχει και σχετική αναφορά στο πρωτόκολλο ελέγχου (Παράρτημα Ι).

Πάντως, δεν χρειάστηκε να αποκλειστεί κάποιος υποψήφιος χειριστής από αυτούς που επιλέχθηκαν αρχικά με αιτιολογικό την υγεία.

Κατά τη συμπλήρωση του ερωτηματολογίου ήταν παρόν και ο ερευνητικός συνεργάτης ο οποίος φρόντιζε να επεξηγεί τις ερωτήσεις του ερωτηματολογίου ώστε οι απαντήσεις να είναι απαλλαγμένες από την υποκειμενική προκατάληψη της ερμηνείας του κειμένου.

Με τη βοήθεια του ερωτηματολογίου τέθηκαν ερωτήσεις που προσδιορίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο παράγοντες που μπορεί να σχετίζονται με την επίπτωση των κραδασμών στην υγεία και είναι διαφορετικοί από άτομο σε άτομο. Η προσπάθεια είναι να αποφευχθεί η απλοϊκή συσχέτιση που παρέχει το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] μεταξύ αιτίου και αιτιατού και δεν λαμβάνει υπόψη του τους παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία των υποκειμένων και σχετίζονται με τους κραδασμούς. Έχει βρεθεί ότι για παράδειγμα βαριά άτομα με υψηλό BMI (body mass index) έχουν αυξημένους δείκτες επικινδυνότητας για παθήσεις που σχετίζονται με τους κραδασμούς [52]. Αυτός ο έλεγχος έγινε αλλά δεν επιβεβαιώθηκε στην παρούσα μελέτη (βλέπε κεφάλαιο 8).

### **5.3 Ανθρωπομετρικά στοιχεία**

Τα υποκείμενα που επιλέχθηκαν ήταν συνολικά 53 εργαζόμενοι άρρενες εκ των οποίων 4 εργάζονταν στο Δημόσιο Τομέα, ενώ οι υπόλοιποι ήταν εργαζόμενοι του ιδιωτικού τομέα. Από αυτούς 52 δέχτηκαν να απαντήσουν το ερωτηματολόγιο. Από τους 52 συμμετέχοντες 1 ήταν Ρουμάνος, 2 Έλληνες ομογενείς και οι υπόλοιποι 49 ήταν Κύπριοι.

#### **5.3.1 Σωματομετρικά στοιχεία**

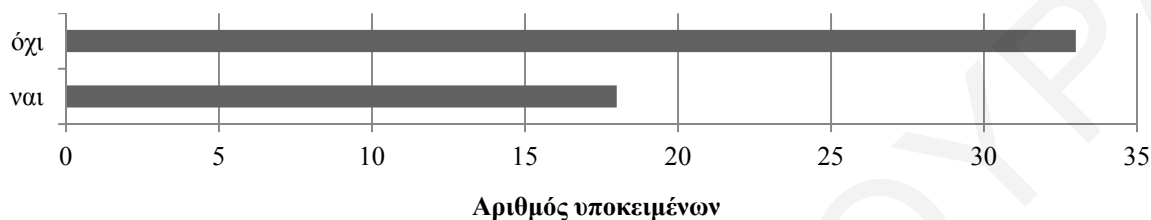
Ο μέσος όρος της ηλικίας ήταν 41 έτη και κυμαινόταν μεταξύ 23,5 ετών ο μικρότερος και 64 ετών ο μεγαλύτερος (τυπική απόκλιση 11,2 έτη). Ο μέσος όρος του ύψους ήταν 173 εκ. και κυμαινόταν μεταξύ 160 εκ. ο κοντότερος και 187 ο ψηλότερος (τυπική απόκλιση 6,7 εκ.). Ο μέσος όρος του βάρους ήταν 82 κιλά και κυμαινόταν μεταξύ 44 ο ελαφρύτερος με 102 κιλά ο βαρύτερος (τυπική απόκλιση 9,2 κιλά).

Από τα πιο πάνω είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη επαγγελματική ομάδα αποτελείται κυρίως από άτομα με σημαντική διασπορά σε ότι αφορά την ηλικία τους. Σε γενικές γραμμές ο χειρισμός μηχανημάτων συνεπάγεται αυξημένη ευθύνη και εμπειρία, η οποία αποκτάται με την πάροδο του χρόνου. Το ύψος των εργαζομένων ήταν χαμηλότερο από τον μέσο όρο στην Ευρώπη [53] (μέσος όρος 176,2 εκ.). Ο μέσος όρος του βάρους τους βρίσκεται πάνω από τον μέσο όρο στην Ευρώπη (μέσος όρος 78,9 κιλά).

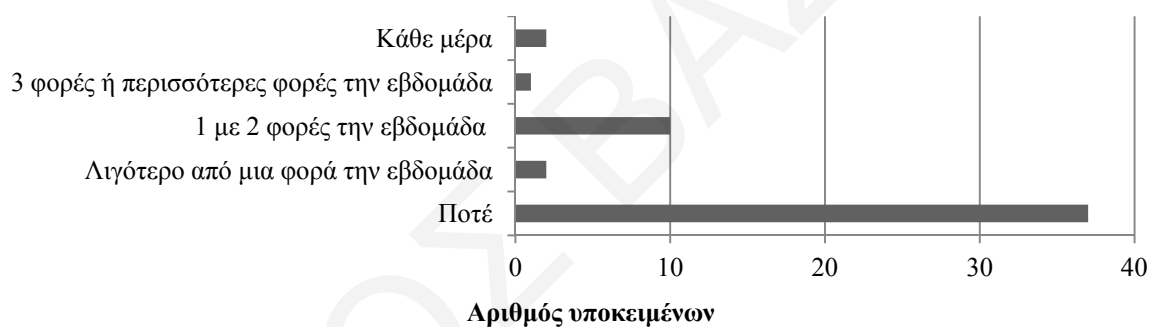


### 5.3.2 Προσωπικές δραστηριότητες

Σε ότι αφορά τη συμμετοχή σε δραστηριότητες σωματικής άσκησης δόθηκαν οι απαντήσεις που φαίνονται στο ιστόγραμμα στο Σχήμα 11, ενώ οι απαντήσεις σχετικά με τη συχνότητα συμμετοχής σε ασκήσεις γυμναστικής φαίνονται στο Σχήμα 12:



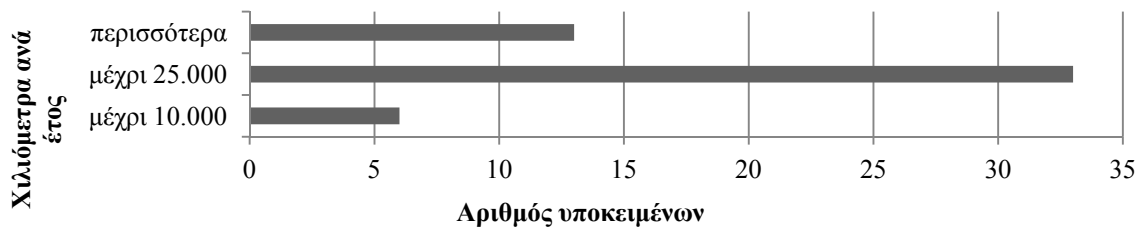
Σχήμα 11: Ιστόγραμμα με τη συμμετοχή σε δραστηριότητες σωματικής άσκησης



Σχήμα 12: Ιστόγραμμα με τη συχνότητα συμμετοχής σε ασκήσεις γυμναστικής

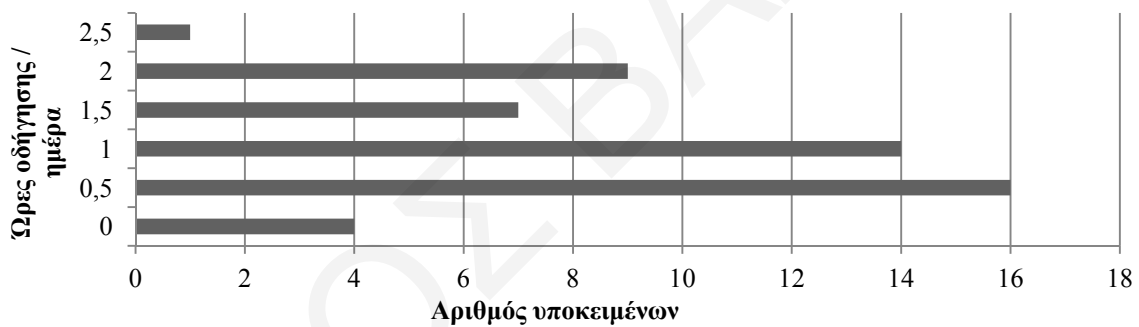
Φαίνεται ότι οι χειριστές των μηχανημάτων δεν συμμετέχουν ιδιαίτερα σε αθλήματα ή άλλες δραστηριότητες οι οποίες θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη σωματική τους κατάσταση και υπό προϋποθέσεις να μειώσουν την επίπτωση των κραδασμών στο σώμα. Παρόλο που 17 (33%) χειριστές δήλωσαν ότι συμμετέχουν σε αθλήματα, μόνο 3 (6%) ασχολούνται συστηματικά (δηλαδή τρεις ή περισσότερες φορές την εβδομάδα). Θετικό γεγονός πάντως αποτελεί ότι σε παρόμοιου τύπου ερώτηση, 24 υποκείμενα (46%) δήλωσαν ότι συμμετέχουν σε δραστηριότητες κυνηγίου και περπατήματος, χωρίς όμως να δηλώσουν συχνότητα.

Ποσοστό 88% των χειριστών δηλώνουν ότι οδηγούν περισσότερα από 10.000 χιλιόμετρα το έτος για προσωπικούς λόγους (βλέπε Σχήμα 13).



Σχήμα 13: Ιστόγραμμα με τα χιλιόμετρα ανά έτος σε προσωπικό όχημα για λόγους που δεν σχετίζονται με την εργασία

Η έκθεση αυτή στον επιβαρυντικό παράγοντα της οδήγησης σε προσωπικό όχημα δεν περιλαμβάνει το χρονικό διάστημα που οι χειριστές οδηγούν όχημα για μετακίνηση προς και από την εργασία (το θέμα τέθηκε με ξεχωριστή ερώτηση). Σε σχετική ερώτηση σχετικά με το χρόνο που δαπανάται για προσωπική οδήγηση λήφθηκαν οι απαντήσεις που αποτυπώνονται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Ιστόγραμμα με τις ώρες οδήγησης στον ελεύθερο χρόνο κάθε μέρα

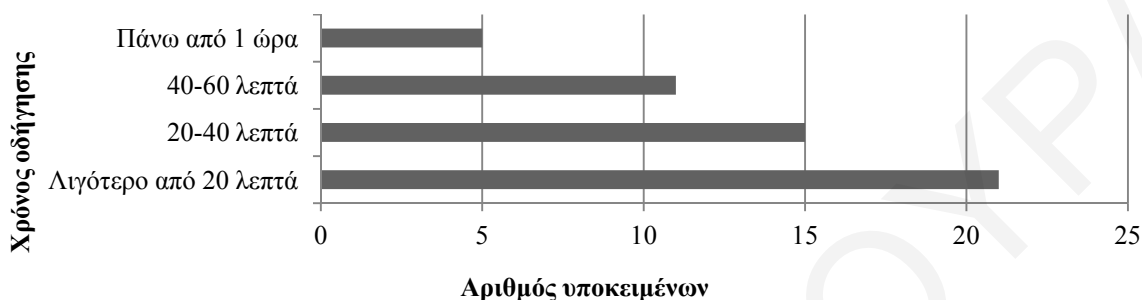
Από τα πιο πάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει γενικά επιβάρυνση των εργαζομένων από την οδήγηση για προσωπική χρήση, η οποία όμως δεν διερευνήθηκε περαιτέρω.

## 5.4 Επαγγελματική έκθεση

### 5.4.1 Γενικά

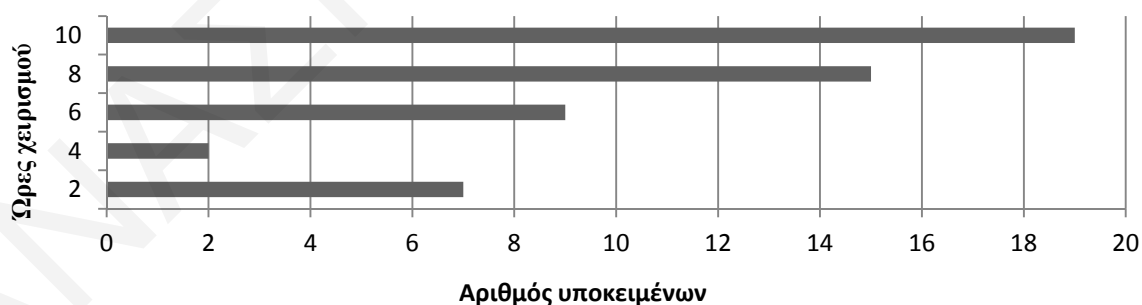
Κατά την περίοδο της συμπλήρωσης των ερωτηματολογίων 28 (54%) χειριστές εργάζονταν στον κατασκευαστικό τομέα, 20 (38%) στον εξορυκτικό τομέα και 4 στα Δημόσια Έργα (8%). Για την πρόσβασή τους στην εργασία, όλοι οι χειριστές οδηγούσαν ιδιωτικά οχήματα με μέσο ημερήσιο χρόνο οδήγησης 30 λεπτά περίπου. Όμως στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω της φύσης των έργων (εργασία σε κατασκευαστικές εταιρείες), η τοποθεσία του χώρου εργασίας

μεταβαλλόταν συχνά, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η απόσταση που έπρεπε να οδηγούν οι χειριστές για πρόσβαση στην εργασία. Η κατανομή του χρόνου οδήγησης φαίνεται στο Σχήμα 15, όπου γίνεται αντιληπτό ότι μερικοί χειριστές χρειάζονταν σημαντικό χρόνο ημερήσιας οδήγησης για πρόσβαση στην εργασία (πάνω από μία ώρα). Αυτό οφειλόταν μερικώς και στην ιδιαιτερότητα της Κύπρου σε ότι αφορά την έλλειψη δημόσιων μέσων μαζικής μεταφοράς.



Σχήμα 15: Ιστόγραμμα με το χρόνο ημερήσιας οδήγησης για πρόσβαση στην εργασία

Η απασχόληση των χειριστών στη θέση εργασίας, την οποία κατείχαν κατά την περίοδο της συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου, ήταν κατά μέσο όρο 14 έτη με έκαστη διάρκεια από 2 έως 42 έτη (5,7 έτη τυπική απόκλιση). Κάθε εβδομάδα εργάζονταν κατά μέσο όρο 5,4 ημέρες και η εργάσιμη εβδομάδα περιελάμβανε από 1 μέχρι 6 ημέρες (τυπική απόκλιση 0,05 ημέρες). Στα συγκεκριμένα μηχανήματα που χειριζόταν την ημέρα συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου εργαζόταν κατά μέσο όρο 7 ώρες την ημέρα, μεταξύ 1 και 10 ωρών (τυπική απόκλιση 0,4 ώρες). Η κατανομή της ημερήσιας εργασίας στην ομάδα των χειριστών φαίνεται στο Σχήμα 16.



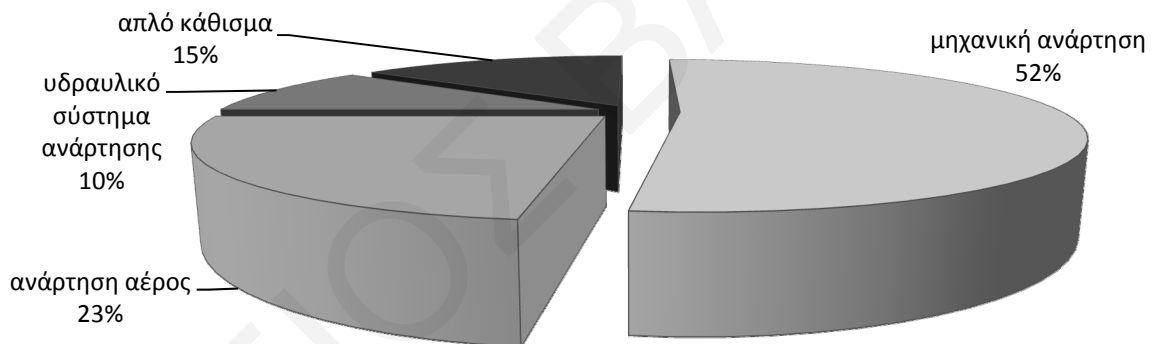
Σχήμα 16: Ιστόγραμμα με την κατανομή της ημερήσιας εργασίας (χρόνος χειρισμού μηχανήματος ανά ημέρα)

Οι χειριστές δήλωσαν επίσης τον τύπο των μηχανημάτων που χρησιμοποιούσαν στις προηγούμενες εργασίες τους.

Από τους χειριστές 37 (71%) χειριζόταν μηχανήματα κυρίως σε χωμάτινο υπόστρωμα ενώ οι υπόλοιποι 15 (29%) χειριστές κινούνταν κυρίως σε ασφαλτικό υπόστρωμα. Η κατάσταση του υποστρώματος δηλώθηκε σε 20 περιπτώσεις (38%) ως καλή ενώ σε 32 (62%) περιπτώσεις ως κακή. Ο τρόπος χειρισμού σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις γινόταν με σταθερή ταχύτητα, ενώ μόνο σε μια περίπτωση (2%) γινόταν γρήγορα.

#### 5.4.2 Κάθισμα χειριστή

Ο τύπος του καθίσματος θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός για τη μείωση των κραδασμών που μεταδίδονται από το μηχάνημα στο σώμα του χειριστή. Σε ότι αφορά τον τύπο του καθίσματος 41 (79%) χειριστές δήλωσαν ότι ήταν αναρτώμενο (ειδικό για κραδασμούς), ενώ 11 (21%) δήλωσαν ότι πρόκειται για απλό κάθισμα χωρίς ανάρτηση. Από τα αναρτώμενα καθίσματα 25 (61%) διέθεταν μηχανική ανάρτηση παλαιότερου τύπου, 5 (12%) διέθεταν ανάρτηση υδραυλικού τύπου ενώ 11 (27%) διέθεταν πνευματική ανάρτηση. Παραστατικά ο τύπος του καθίσματος απεικονίζεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17: Κυκλικό διάγραμμα με το ποσοστό του τύπου καθίσματος που χρησιμοποιούσαν οι χειριστές

Εξίσου σημαντική με τον τύπο του καθίσματος είναι και η δυνατότητα του καθίσματος να αποσβαίνει κραδασμούς, χαμηλών κυρίως συχνοτήτων, πριν περάσουν στο ανθρώπινο σώμα. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλο σύστημα ανάρτησης, το οποίο στην ιδανική περίπτωση είναι ρυθμιζόμενο ανάλογα με το βάρος του χειριστή. Για το σκοπό αυτό οι εργαζόμενοι πρέπει να λαμβάνουν οδηγίες από τους εργοδότες τους για να γνωρίζουν τον τρόπο ρύθμισης του καθίσματος αλλά και την υποχρέωσή τους να ελέγχουν την ορθή ρύθμιση πριν χρησιμοποιήσουν το μηχάνημα, ιδιαίτερα αν υπάρχουν πολλοί χειριστές για το ίδιο μηχάνημα.

Από τους χειριστές που απάντησαν ότι είχαν κάθισμα ειδικό για κραδασμούς, 41 (98%) δήλωσαν ότι η θέση του καθίσματος ήταν ρυθμιζόμενη. Από αυτούς 32 (78%) ρύθμιζαν τη θέση,

ενώ 9 (22%) δεν άλλαξαν ποτέ τη ρύθμιση της θέσης. Επίσης, 18 (44%) δήλωσαν ότι έλαβαν οδηγίες για το πώς να ρυθμίζουν τη θέση τους, ενώ οι υπόλοιποι 23 (56%), δεν έλαβαν οποιαδήποτε οδηγία. Σε όλες τις περιπτώσεις οι οδηγίες ήταν προφορικές. Από τα πιο πάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός καθισμάτων που δεν είναι αναρτώμενα. Από τα αναρτώμενα καθίσματα υπάρχουν αρκετά μηχανικού τύπου, τα οποία παρέχουν περιορισμένη προστασία. Επίσης, οι χειριστές δεν έχουν επαρκείς πληροφορίες για τη σημασία και χρήση του καθίσματος καθώς δεν τους δόθηκαν γραπτές οδηγίες. Ακόμα στο περιθώριο του ερωτηματολογίου αναφέρθηκε ότι τα καθίσματα των χειριστών δεν συντηρούνται με αποτέλεσμα να μη γνωρίζουν αν είναι ελαττωματικά ή αν λειτουργούν κανονικά.

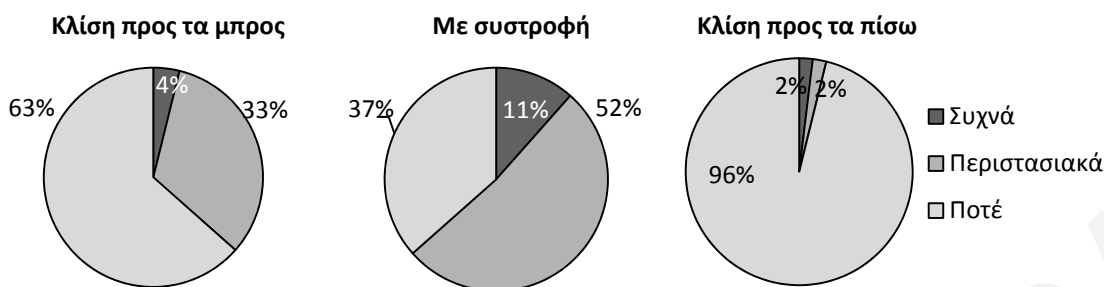
#### **5.4.3 Θέση χειριστή**

Σε συνάρτηση με το κάθισμα, ο χειρισμός οργάνων όπως οι ταχυτήτες, παράλληλα με το χειρισμό του μηχανήματος μπορεί να επιβαρύνουν τη σωματική υγεία των χειριστών. Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά το χειρισμό των ταχυτήτων, 20 (40%) χειριστές δήλωσαν ότι το μηχανήμα ήταν αυτόματο, ενώ 31 (60%) χειριστές εργαζόταν σε μηχανήμα, στο οποίο οι αλλαγές ταχυτήτων γινόταν χειροκίνητα.

Επίσης, ανάλογα με την ποιότητα του καθίσματος παρέχεται στο χειριστή ικανοποιητική επιφάνεια για στήριξη της πλάτης και των χεριών, μειώνοντας τη σωματική προσπάθεια και κόπωση για τη διατήρηση της στάσης κατά τη χρήση του μηχανήματος. Η ποιότητα του καθίσματος σχετίζεται με την ύπαρξη και την ποιότητα των στηριγμάτων της μέσης και των χεριών. Σε ότι αφορά την πλάτη, όλα τα καθίσματα είχαν στήριγμα, ενώ μόνο 6 (12%) χειριστές χρησιμοποιούσαν επιπρόσθετο στήριγμα για την πλάτη (π.χ. μαξιλαράκι), ενώ οι υπόλοιποι 46 (88%) ήταν ικανοποιημένοι με την πλάτη του καθίσματος που διέθεταν. Επομένως, η ποιότητα των της θέσης του χειριστή να ήταν ικανοποιητική.

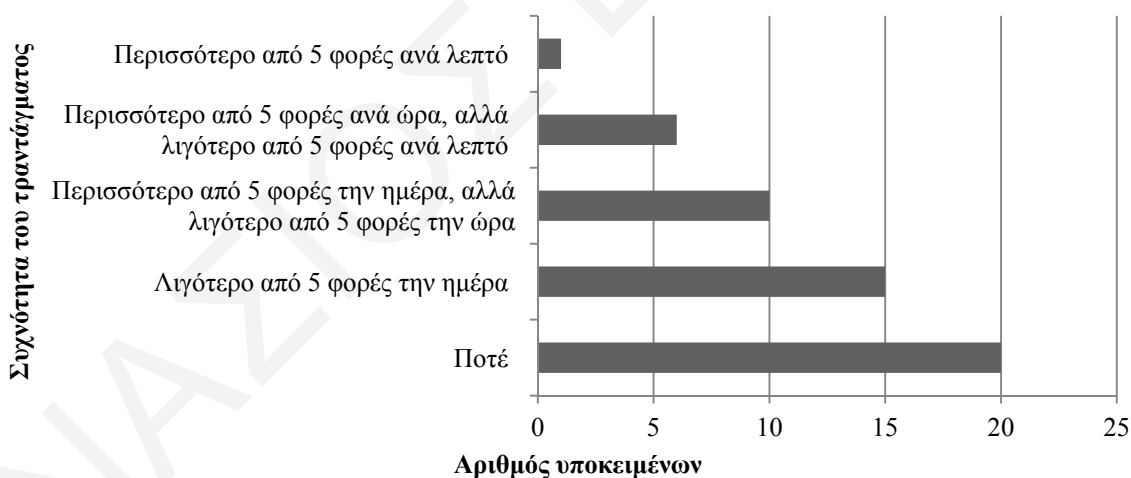
#### **5.4.4 Άλλοι συνηγορούντες παράγοντες σχετιζόμενοι με το χειρισμό του μηχανήματος**

Η θέση του σώματος κατά το χειρισμό του μηχανήματος μπορεί να επιβαρύνει την επίδραση των κραδασμών στο σώμα, γιατί μεταβάλλει την κλίση και τη θέση της σπονδυλικής στήλης. Σε περιγραφή του τρόπου με τον οποίο εκτελείται η εργασία, οι χειριστές ερωτήθηκαν για τη στάση του σώματος. Σε γενικές γραμμές και όπως φαίνεται στο Σχήμα 18, το σώμα δεν άλλαζε θέση εκτός από τη συστροφή. Αυτό συμβαίνει επειδή οι χειριστές χρειάζεται να ελέγχουν περιμετρικά το χώρο εργασίας τους, ο οποίος λόγω της φύσης της εργασίας μεταβάλλεται συνεχώς, με σκοπό να διαφυλάσσεται η ασφάλεια των χειριστών αλλά και η ασφάλεια των συναδέλφων τους και τρίτων προσώπων. Να σημειωθεί ότι σε κανένα όχημα δεν υπήρχε εγκατεστημένη κάμερα για περιμετρικό έλεγχο των σημείων με περιορισμένη ορατότητα.



Σχήμα 18: Κυκλικά διαγράμματα με την κλίση του σώματος κατά τη διάρκεια της οδήγησης

Σε ερώτηση κατά πόσο τραντάζεται το σώμα σε σχέση με το κάθισμα (δηλαδή αν χάνεται η επαφή σώματος καθίσματος), διαφάνηκε ότι οι περισσότεροι χειριστές είχαν αυτό το αίσθημα κατά τη διάρκεια της ημερήσιας εργασίας τους χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα έντονο. Απομάκρυνση του σώματος από το κάθισμα θα μπορούσε να επιφέρει και τον άμεσο τραυματισμό του χειριστή. Γενικά οι χειριστές δεν ήταν απόλυτα σίγουροι για τη συχνότητα με την οποία τραντάζονταν το σώμα. Στο Σχήμα 19 φαίνεται ιστόγραμμα με τη συχνότητα με την οποία τραντάζεται το σώμα κατά τη διάρκεια χειρισμού του μηχανήματος.



Σχήμα 19: Ιστόγραμμα με τη συχνότητα με την οποία τραντάζεται το σώμα κατά τη διάρκεια χειρισμού του μηχανήματος

Επίσης, 5 (10%) χειριστές δήλωσαν ότι αισθάνονται δυσφορία στην εργασία από τη μηχανική δόνηση. Το ποσοστό αυτό παρόλο που είναι μικρό δείχνει ότι ορισμένοι χειριστές δεν αισθάνονται καλά κατά την άσκηση του επαγγέλματός τους εξ' αιτίας των κραδασμών. Όμως παρόλο που δεν περιλαμβανόταν σχετική ερώτηση στο ερωτηματολόγιο, οι περισσότεροι χειριστές ανέφεραν ότι η ζέστη του καλοκαιριού ή η σκόνη στα εργοτάξια αποτελούν τους κύριους

παράγοντες δυσφορίας στο επάγγελμα τους, ενώ λίγα μηχανήματα, κυρίως εκσκαφείς ή ανατρεπόμενα φορτηγά τύπου “Dumper” διέθεταν πλήρως κλιματιζόμενη καμπίνα χειρισμού.

Θετική επίδραση σε ότι αφορά την έκθεση σε κραδασμούς έχει το γεγονός ότι λόγω της φύσης της εργασίας των χειριστών, η οποία διασυνδέεται με άλλες εργασίες που δεν γίνονται παράλληλα αλλά μόνο διαδοχικά, υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία δεν παράγεται έργο από το μηχάνημα και επομένως οι χειριστές δεν εκτίθενται σε κραδασμούς. Το συνολικό χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι εργαζόμενοι, παρόλο που χειρίζονται το μηχάνημα, δεν εκτίθενται σε κραδασμούς, έχει μέσο όρο 1,5 ώρες την ημέρα, μεταξύ 0 και 7 ωρών (2,14 ώρες τυπική απόκλιση).

#### 5.4.5 Άλλοι συνηγορούντες παράγοντες μη σχετιζόμενοι με το χειρισμό του μηχανήματος

Εκτός από το χειρισμό των μηχανημάτων, οι χειριστές μπορεί να εκτελούν και άλλα καθήκοντα τα οποία δύνανται να επιβαρύνουν τη σωματική υγεία, σε ότι αφορά τη μέση, τον αυχένα και τους ώμους, επιτείνοντας την κόπωση αλλά και εντείνοντας τις συνέπειες των κραδασμών στο σώμα [54].

Συγκεκριμένα, 9 χειριστές δήλωσαν ότι σήκωναν χειρωνακτικά κατά μέσο όρο 4 φορές έκαστος βάρους μικρότερο από 5 kg, 12 χειριστές σήκωναν χειρωνακτικά κατά μέσο όρο 6 φορές έκαστος βάρους από 5 έως 10 kg και 13 χειριστές σήκωναν χειρωνακτικά κατά μέσο όρο 5 φορές έκαστος βάρους μεγαλύτερο από 10 kg.

Επίσης, σε ότι αφορά δραστηριότητες που δεν σχετίζονται με το χειρισμό του μηχανήματος, οι χειριστές ανέφεραν μικρό αριθμό δραστηριοτήτων οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με επαναλαμβανόμενη ή παρατεταμένη μυοσκελετική καταπόνηση που εκτελείται με την πλάτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Κυκλικά διαγράμματα με παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη εργασία που εκτελείται με την πλάτη

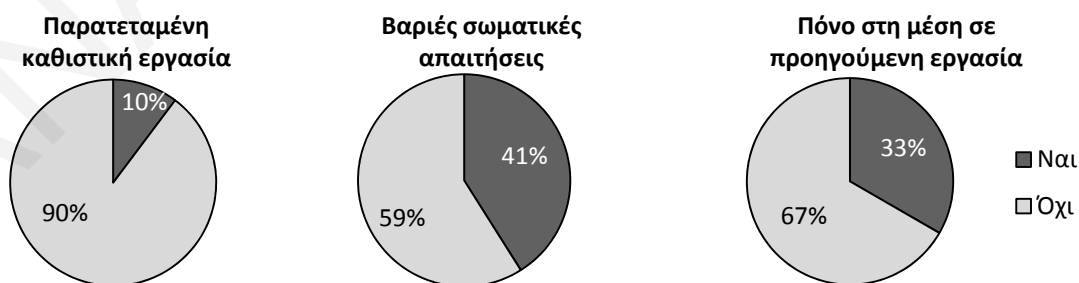
Σε ερώτηση αν η εργασία τους περιλαμβάνει δύσκολη μεταφορά, ώθηση ή έλξη φορτίων, 8 (16%) απάντησαν θετικά, ενώ οι υπόλοιποι 44 (84%) αρνητικά. Επίσης, μόνο 4 (8%) δήλωσαν ότι ανυψώνουν συχνά, αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος βάρη (π.χ. για να αλλάξουν κάποιο προσάρτημα του εκσκαφέα), ενώ 7 (14%) ανέφεραν ότι σπάνια διακόπτουν το χειρισμό για να σηκώνουν βάρη αμέσως μετά και οι υπόλοιποι 40 (78%) δεν διέκοπταν καθόλου το χειρισμό του μηχανήματος.

Επίσης, 2 χειριστές (4%) δήλωσαν ότι ασκούν και άλλα καθήκοντα που μπορεί να επηρεάζαν την πλάτη ή τον αυχένα.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι οι χειριστές μηχανημάτων εξειδικεύονται στο χειρισμό των μηχανημάτων και το ποσοστό που ασκεί άλλα καθήκοντα στην εργασία του που μπορεί να επηρεάσουν το μυοσκελετικό σύστημα περιορίζεται σε ποσοστό μικρότερο του 10%. Αυτό συμβαίνει γιατί οι χειριστές μηχανημάτων είναι εξειδικευμένοι εργαζόμενοι που λόγω της σημασίας της εργασίας αλλά και της αυξημένης ευθύνης των καθηκόντων τους δεν εκτελούν άλλα καθήκοντα που δεν σχετίζονται με το χειρισμό του μηχανήματος. Επίσης, στους χώρους εργασίας χρησιμοποιούνται μηχανήματα, η μεγάλη πλειοψηφία των οποίων κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές της εργονομίας και της άνεσης του χειριστή στον βασικό σχεδιασμό. Είναι γενικά παραδεκτό ότι όταν ο χειριστής αισθάνεται άνετα αυξάνεται η παραγωγικότητά του και μειώνεται ο αριθμός των διαλειμμάτων ανάπαυσης.

#### 5.4.6 Παλαιότερη καταπόνηση

Ζητήθηκε από τους χειριστές να αναφέρουν την παλαιότερη τους καταπόνηση στην εργασία. Στο Σχήμα 21 φαίνονται οι απαντήσεις τους.



Σχήμα 21: Κυκλικά διαγράμματα με την καταπόνηση από τις προηγούμενες εργασίες

Κατά τη συμπλήρωση του ερωτηματολογίου διαφάνηκε ότι οι χειριστές μηχανημάτων έκαναν και άλλες δραστηριότητες στο παρελθόν, οι οποίες είχαν βαριές σωματικές απαιτήσεις και



οι οποίες τους προκαλούσαν πόνο στη μέση. Για το λόγο αυτό το 1/3 περίπου των χειριστών δήλωσαν ότι είχαν πόνο στη μέση από προηγούμενη εργασία.

## 5.5 Ιατρικό ιστορικό των χειριστών

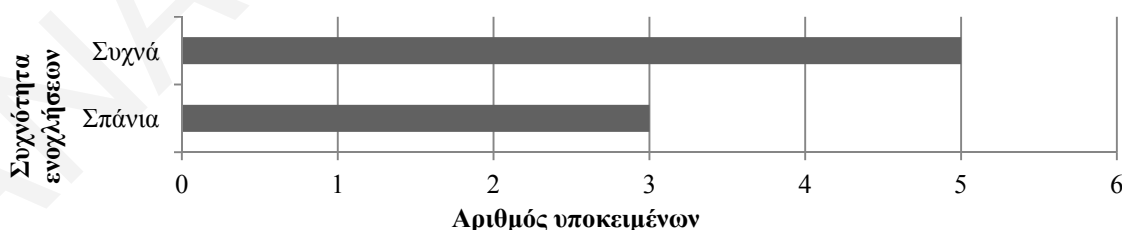
Για τον καθορισμό του ιατρικού ιστορικού των χειριστών, ερωτήθηκαν εάν είχαν ενοχλήσεις σε μέρη του σώματος και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους και περιελάμβανε χρονικό διάστημα μιας εβδομάδος και ενός έτους. Νοείται ότι όλοι οι χειριστές που είχαν ενοχλήσεις την περίοδο της τελευταίας εβδομάδας, ήταν υποσύνολο των χειριστών που είχαν ενοχλήσεις τον τελευταίο χρόνο. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις οι χειριστές που είχαν πρόβλημα στον αυχένα ή στους ώμους είχαν και πρόβλημα στη μέση.

### 5.5.1 Ενοχλήσεις στη μέση

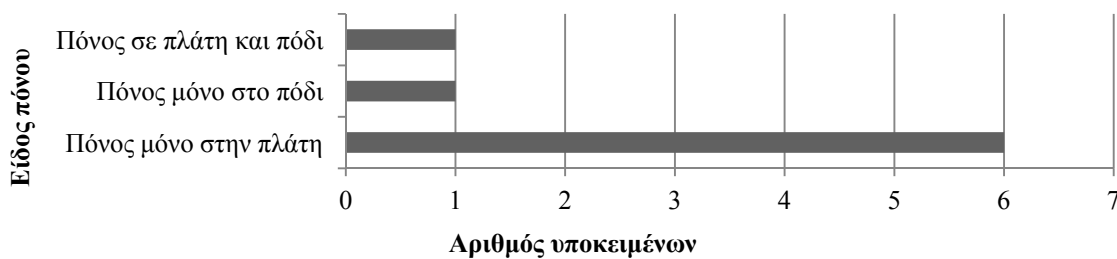
#### A. Τελευταίες 7 ημέρες

Στο Σχήμα 22 πιο κάτω φαίνεται ότι 8 (15%) χειριστές είχαν ενοχλήσεις (πόνο) στη μέση ή στο πόδι (που σχετίζονται με τη μέση) κατά την τελευταία εβδομάδα. Το είδος του πόνου που ένιωσαν οι χειριστές παρουσιάζεται στο Σχήμα 23 όπου φαίνεται ότι οι ενοχλήσεις επικεντρώνονταν σχεδόν αποκλειστικά στη μέση, ο αριθμός των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 24 και η διάρκειά τους στο Σχήμα 25. Τρεις χειριστές δήλωσαν ότι ο πόνος επέστρεφε αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.

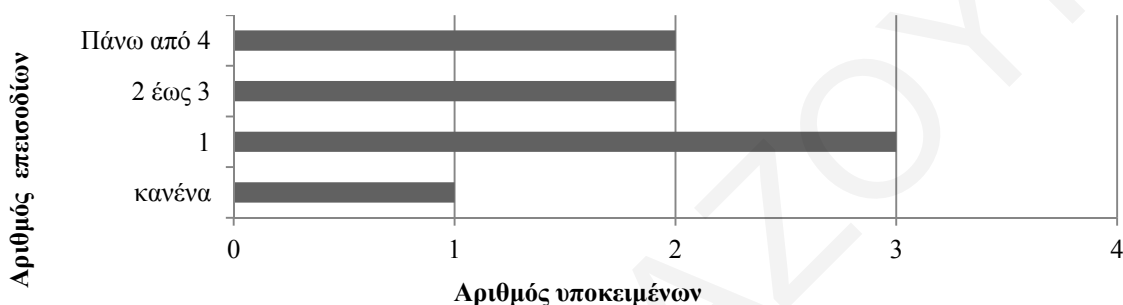
Οι χειριστές δεν είχαν επισκεφθεί ιατρό κατά την τελευταία εβδομάδα



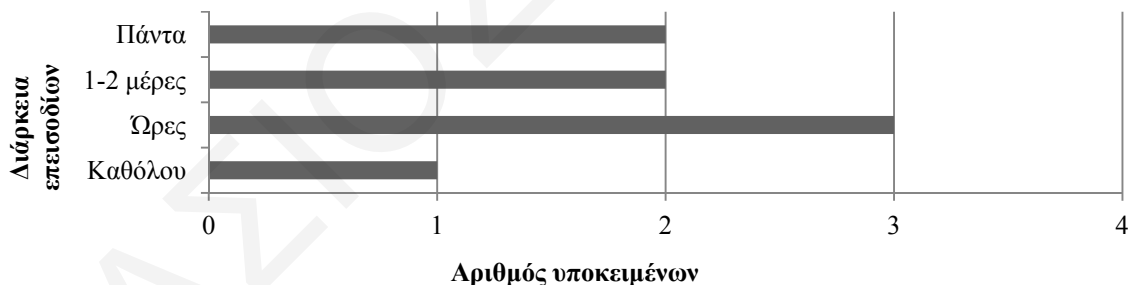
Σχήμα 22: Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



Σχήμα 23: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



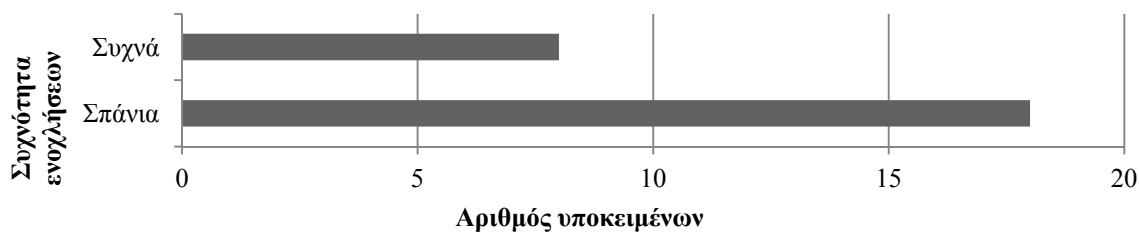
Σχήμα 24: Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



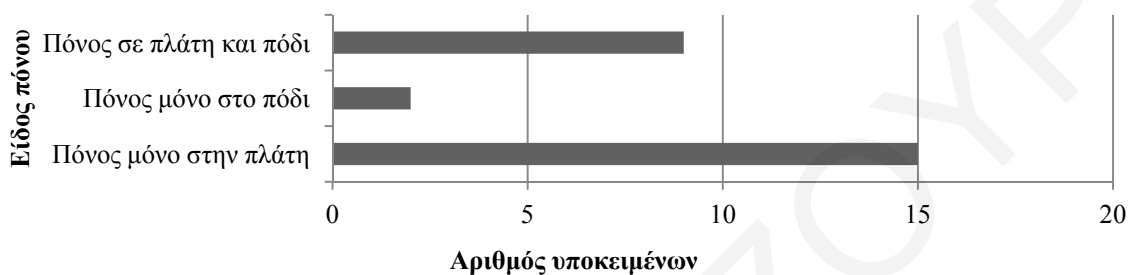
Σχήμα 25: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα

### **B. Τελευταίο έτος**

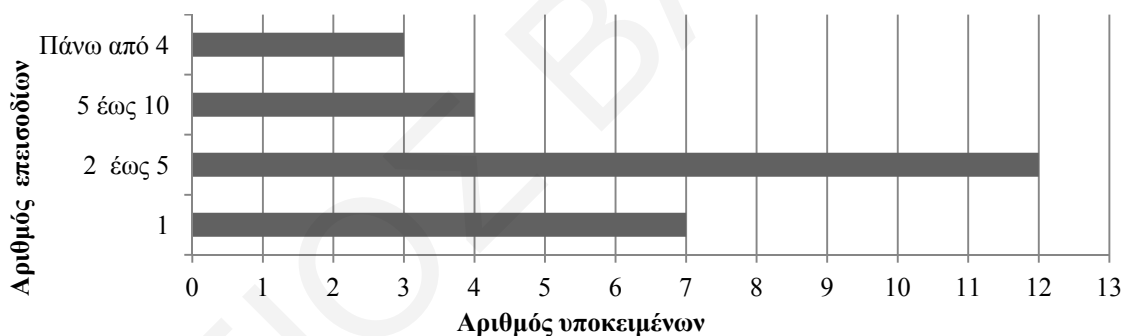
Στο Σχήμα 26, πιο κάτω φαίνεται ότι 26 (50%) χειριστές είχαν ενοχλήσεις (πόνος) στη μέση ή στο πόδι (που σχετίζονταν με τη μέση) κατά το τελευταίο έτος. Το είδος του πόνου που ένιωσαν οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 27, ο αριθμός των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 28 και η διάρκεια τους στο Σχήμα 29. Οκτώ χειριστές δήλωσαν ότι ο πόνος επιστρέφει αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.



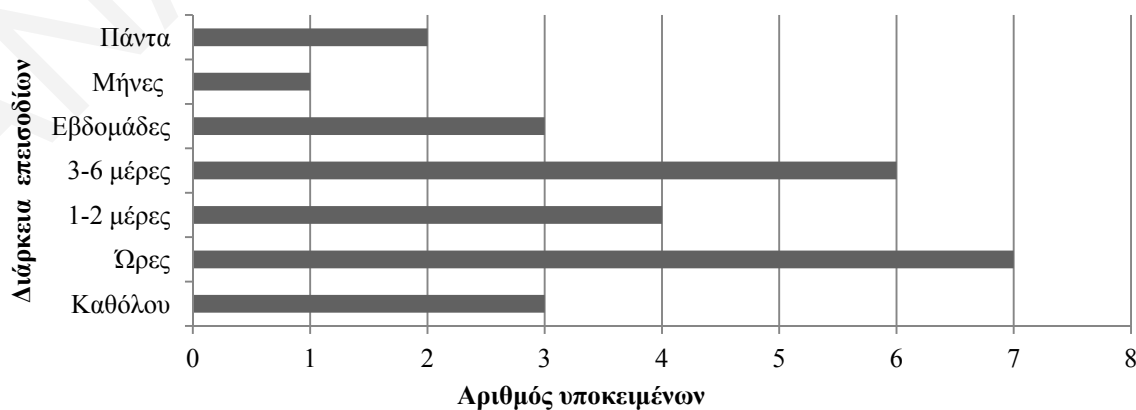
Σχήμα 26: Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 27: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 28: Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 29: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στη μέση των χειριστών κατά το τελευταίο έτος

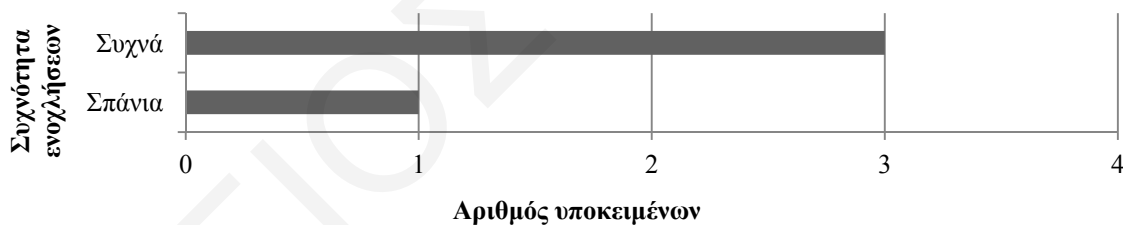
Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι η ενόχληση των χειριστών στη μέση ήταν σημαντική, καθώς περίπου οι μισοί δήλωσαν προβλήματα σημαντικού πόνου κατά το τελευταίο έτος, ενώ το 15% των χειριστών περίπου είχαν προβλήματα την προηγούμενη εβδομάδα. Για ορισμένους χειριστές ο πόνος δεν περιοριζόταν σε σύντομα επεισόδια αλλά ήταν διαρκής.

### 5.5.2 Ενοχλήσεις στον αυχένα

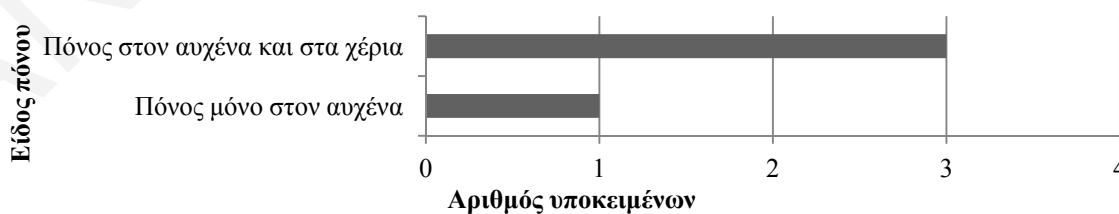
#### A. Τελευταίες 7 ημέρες

Στο Σχήμα 30 φαίνεται ότι 4 (7,5%) χειριστές είχαν ενοχλήσεις (πόνος) στον αυχένα ή στο χέρι (που σχετίζεται με τον αυχένα) κατά την τελευταία εβδομάδα. Το είδος του πόνου που ένιωσαν οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 31, ο αριθμός των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 32 και η διάρκειά τους στο Σχήμα 33. Δύο χειριστές δήλωσαν ότι ο πόνος επιστρέφει αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.

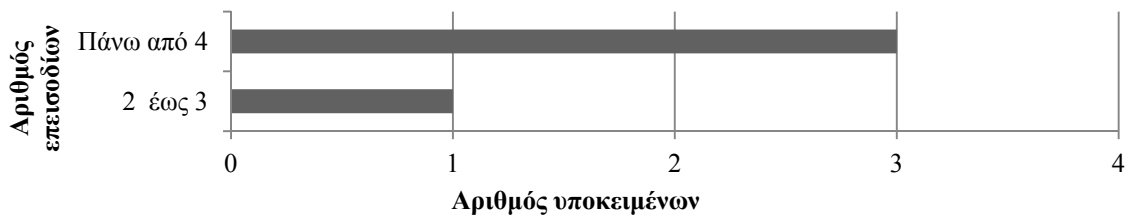
Δύο χειριστές είχαν επισκεφθεί ιατρό κατά την τελευταία εβδομάδα και ένας δέχτηκε θεραπεία.



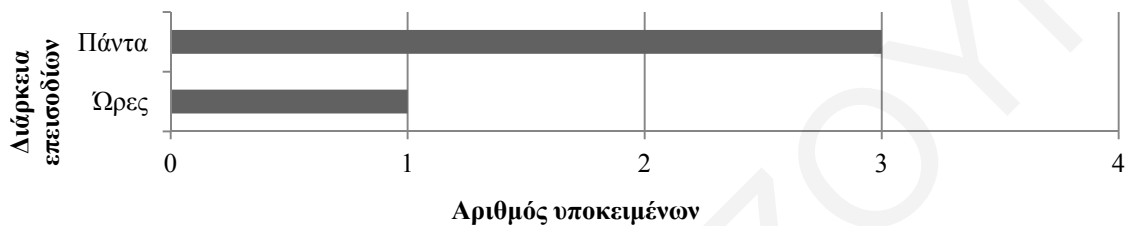
Σχήμα 30: Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



Σχήμα 31: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



Σχήμα 32: Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα

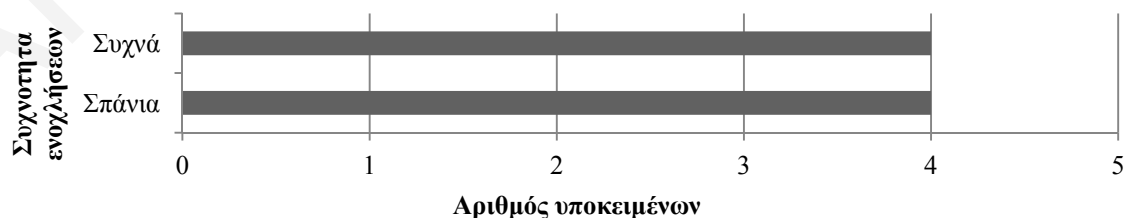


Σχήμα 33: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα

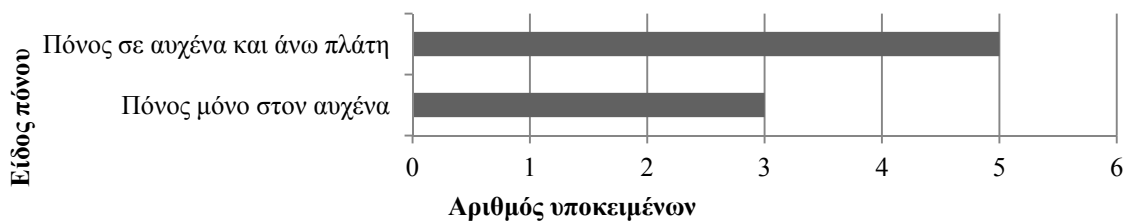
### **B. Τελευταίο έτος**

Στο Σχήμα 34 πιο κάτω φαίνεται ότι 8 (15%) χειριστές είχαν ενοχλήσεις (πόνος) στον αυχένα ή στην άνω πλάτη (που σχετίζεται με τον αυχένα) κατά το τελευταίο έτος. Το είδος του πόνου που ένιωσαν οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 35, ο αριθμός των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 36 και η διάρκειά τους στο Σχήμα 37. Τρεις χειριστές δήλωσαν ότι ο πόνος επιστρέφει αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.

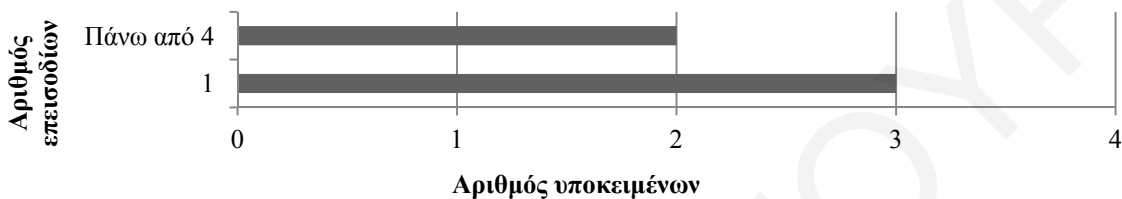
Τέσσερις χειριστές επισκέφτηκαν ιατρό και δέχτηκαν θεραπεία κατά το τελευταίο έτος και ένας χειριστής έλαβε αναρρωτική άδεια.



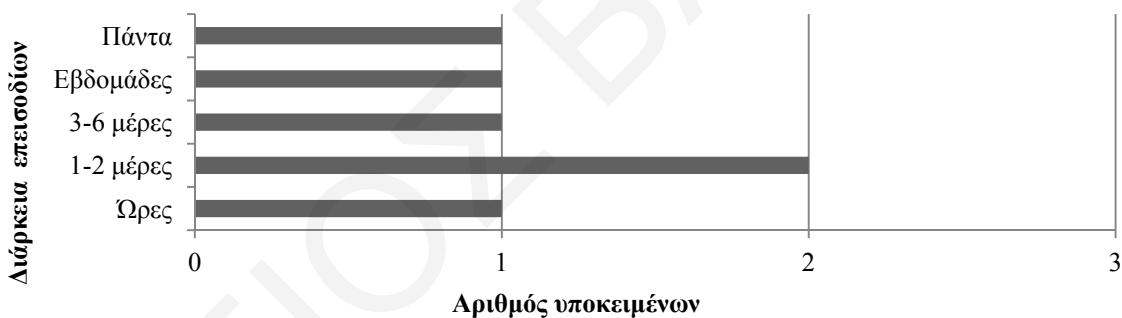
Σχήμα 34: Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 35: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 36: Ιστόγραμμα με τον αριθμό επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 37: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στον αυχένα των χειριστών κατά το τελευταίο έτος

Από τις απαντήσεις των χειριστών γενικά εντοπίζεται ότι η ενόχληση (πόνος) των χειριστών στον αυχένα δεν ήταν τόσο σημαντική όσο στη μέση.

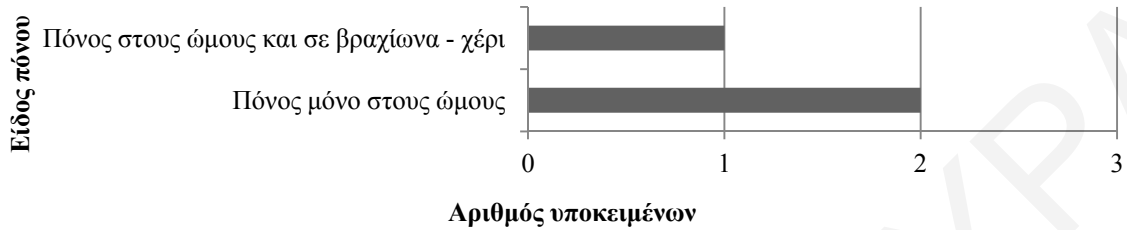
### 5.5.3 Ενοχλήσεις στους ώμους

#### A. Τελευταίες 7 ημέρες

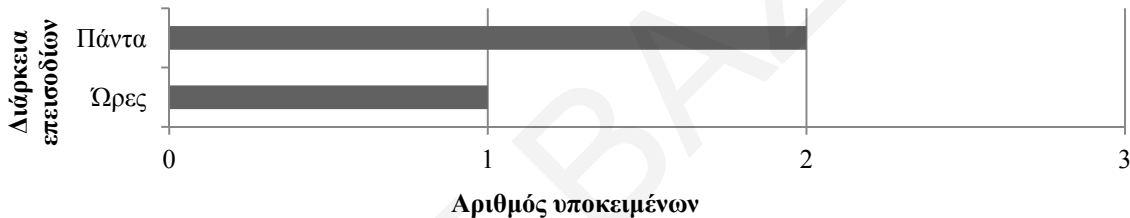
Τρεις (6%) χειριστές δήλωσαν ότι ένιωθαν συχνά ενοχλήσεις (πόνος) στους ώμους και στο χέρι (που σχετίζονται με τους ώμους) κατά την τελευταία εβδομάδα. Το είδος του πόνου που ένιωθαν οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 38, ο αριθμός των επεισοδίων ήταν πάνω από 4 την

εβδομάδα και η διάρκεια των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 39. Ένας χειριστής δήλωσε ότι ο πόνος επιστρέφει αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.

Δύο χειριστές επισκέφτηκαν ιατρό κατά την τελευταία εβδομάδα και δέχτηκαν θεραπεία.



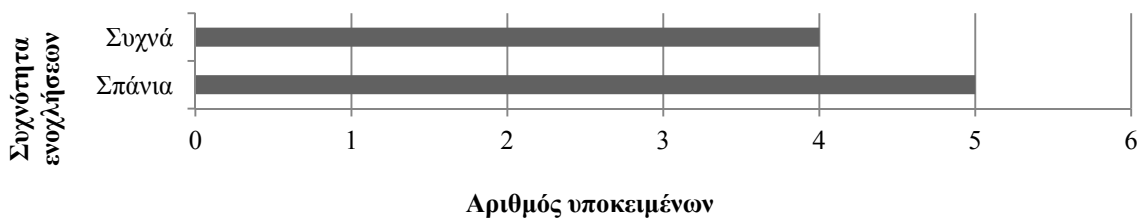
Σχήμα 38: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στους ώμους των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα



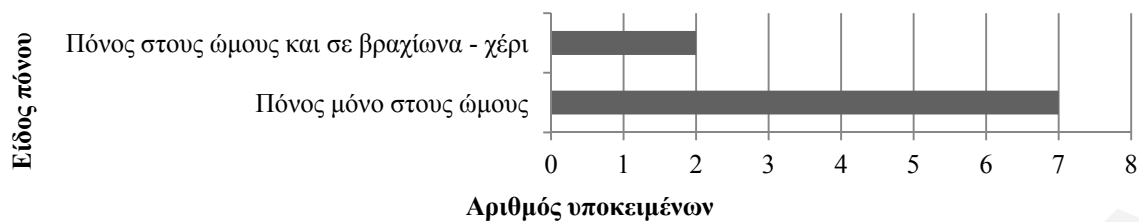
Σχήμα 39: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά την τελευταία εβδομάδα

### B. Τελευταίο έτος

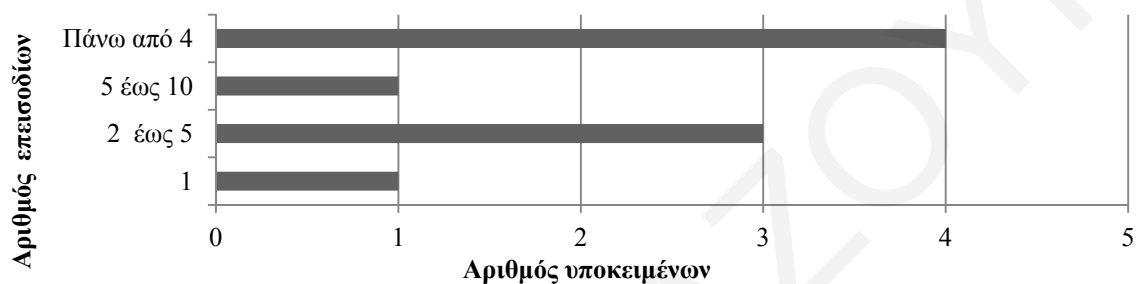
Στο Σχήμα 40 πιο κάτω φαίνεται ότι 9 (17%) χειριστές είχαν ενοχλήσεις (πόνος) στους ώμους και στο χέρι (που σχετίζονται με τους ώμους) κατά το τελευταίο έτος. Το είδος του πόνου που ένιωσαν οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 41, ο αριθμός των επεισοδίων φαίνεται στο Σχήμα 42 και η διάρκειά τους στο Σχήμα 43. Ένας χειριστής δήλωσε ότι ο πόνος επιστρέφει αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος.



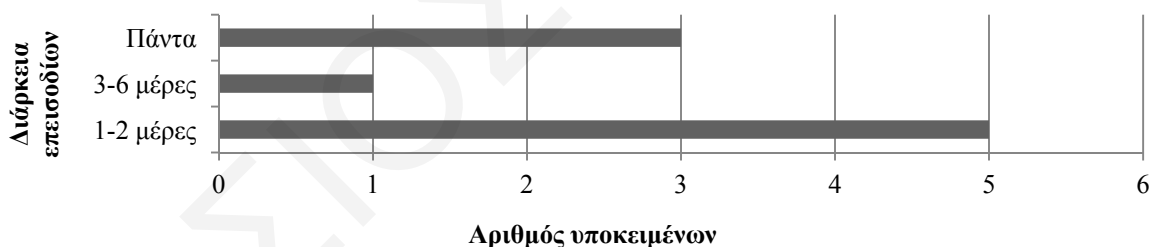
Σχήμα 40: Ιστόγραμμα με τις ενοχλήσεις στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 41: Ιστόγραμμα με το είδος του πόνου στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 42: Ιστόγραμμα με τον αριθμό των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος



Σχήμα 43: Ιστόγραμμα με τη διάρκεια των επεισοδίων στους ώμους των χειριστών κατά το τελευταίο έτος

Τέσσερις χειριστές επισκέφτηκαν ιατρό και τρεις δέχτηκαν θεραπεία κατά το τελευταίο έτος.

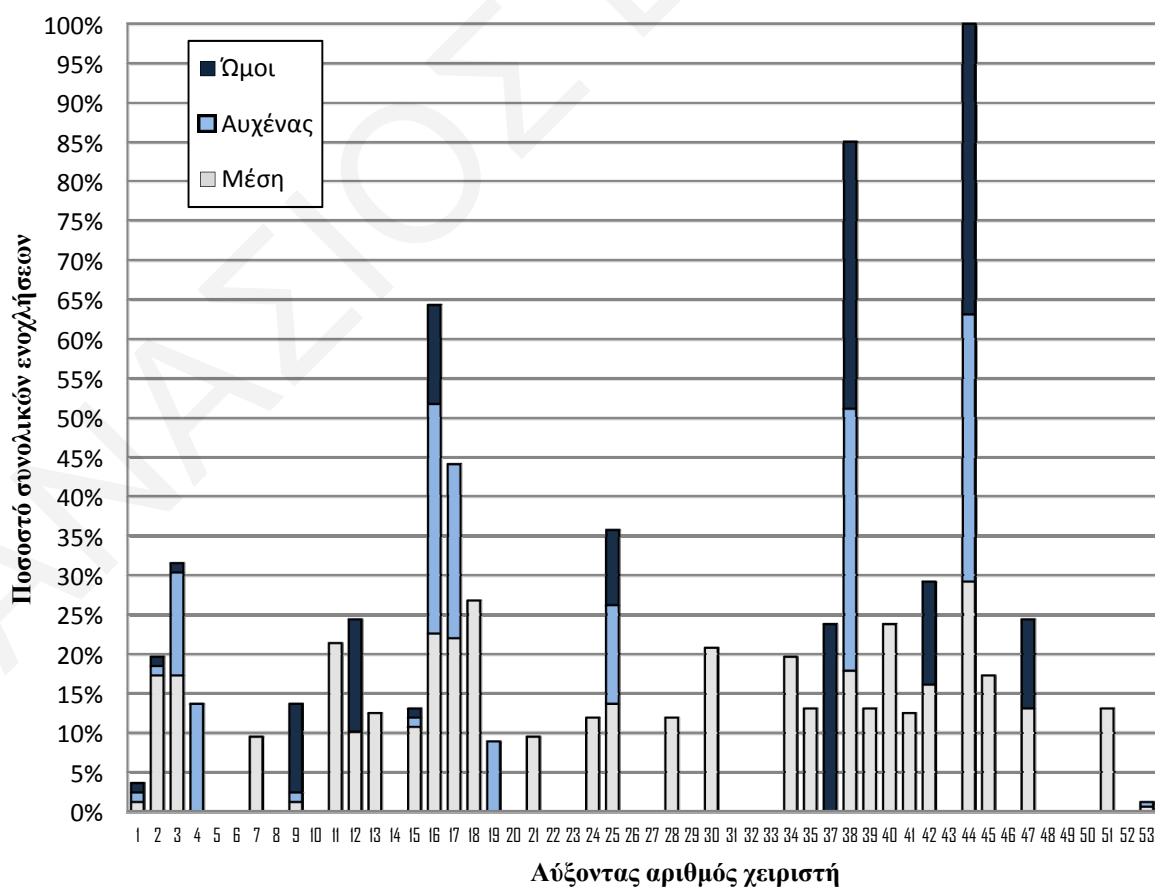
Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι παρά την ύπαρξη ενόχλησης των χειριστών στους ώμους, αυτή δεν ήταν τόσο σημαντική όσο στη μέση και ήταν στα ίδια επίπεδα με αυτή του αυχένα.



### 5.5.4 Συσχέτιση των ενοχλήσεων στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους κατά το τελευταίο έτος

Επειδή συνήθως οι χειριστές που είχαν ενοχλήσεις στον αυχένα ή στους ώμους, είχαν και ενοχλήσεις σε άλλα μέρη του σώματος, στο Σχήμα 44 απεικονίζεται ιστόγραμμα με την συνολική κατάσταση της υγείας του κάθε χειριστή. Το ιστόγραμμα έγινε με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν από το ερωτηματολόγιο βαθμολογώντας την κάθε επιβάρυνση αναλογικά, ανάλογα με τη συχνότητα και διάρκεια των επεισοδίων για κάθε είδος ενοχλήσης και αθροίζοντας τις επιμέρους επιβαρύνσεις, ορίζοντας στο μέγιστο της κλίμακας το χειριστή με τις περισσότερες ενοχλήσεις. Σημειώνεται ότι ο χειριστής με αρ. 36 δεν απάντησε στις ερωτήσεις. Σημειώνεται περαιτέρω ότι οι χειριστές που ξεπέρασαν το 5% ανά κατηγορία, θεωρήθηκαν ως οι χειριστές που αισθάνονταν έντονες ενοχλήσεις επειδή έχουν πρόβλημα με την υγεία τους. Με αυτό το κριτήριο έγινε η περαιτέρω διερεύνηση των ενοχλήσεων (βλέπε Κεφάλαιο 8).

Από το ιστόγραμμα είναι φανερό ότι οι ενοχλήσεις στους ώμους και στον αυχένα δρουν συνήθως πολλαπλασιαστικά με τις ενοχλήσεις της μέσης αυξάνοντας σημαντικά την επιβάρυνση συγκεκριμένων χειριστών.



Σχήμα 44: Ιστόγραμμα με το ποσοστό των συνολικών ενοχλήσεων στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους ανά χειριστή

### 5.5.5 Ενοχλήσεις στο υπόλοιπο σώμα κατά το τελευταίο έτος

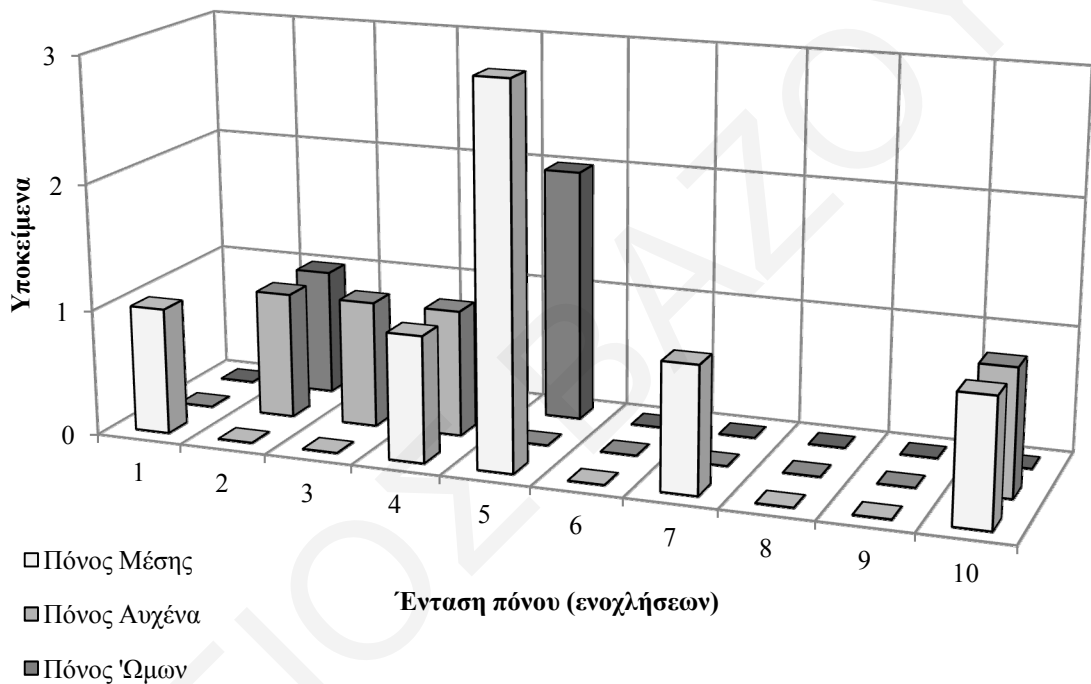
Οι χειριστές ρωτήθηκαν αν είχαν κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους κάποια άλλη ενοχληση όπως άλγος, πόνο, δυσφορία ή μούδιασμα σε άλλο μέρος τους σώματος. Ο Πίνακας 2 πιο κάτω συνοψίζει τα αποτελέσματα των απαντήσεων.

Πίνακας 2: Αριθμός χειριστών με ενοχλήσεις σε άλλα μέρη του σώματος κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους

	<b>Καρποί</b>	<b>Γόνατα</b>	<b>Αστράγαλοι</b>
<b>Δεξιά</b>	3	2	1
<b>Αριστερά</b>	1	3	0
<b>Και τα δύο</b>	1	4	4

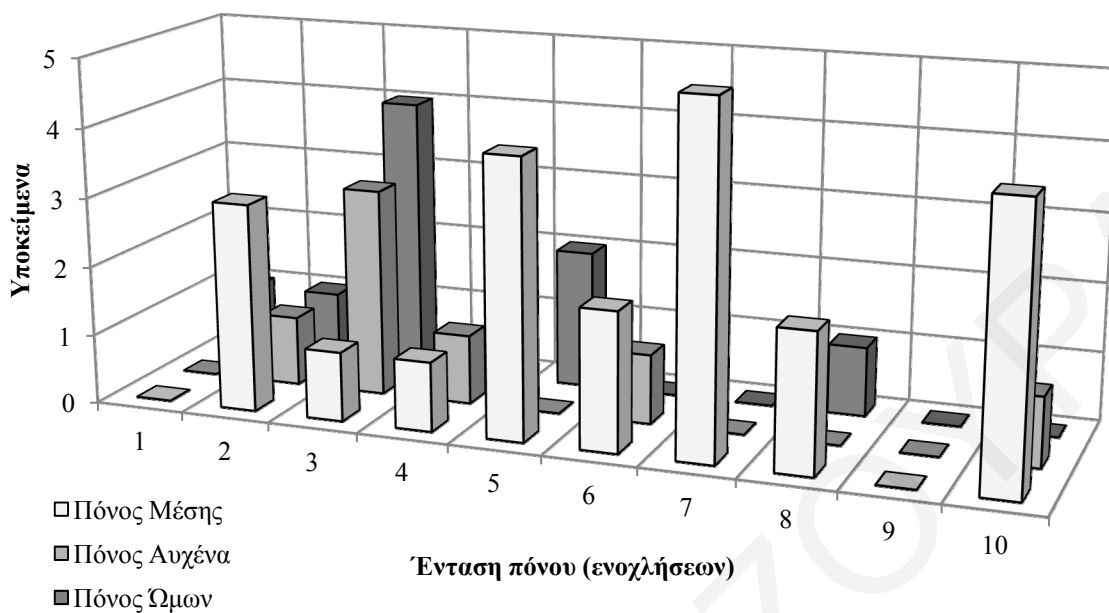
### 5.5.6 Ένταση ενοχλήσεων και επιρροή στην υγεία και ευημερία των χειριστών

Ζητήθηκε από τους χειριστές να περιγράψουν την ένταση του πόνου (ενοχλήσεων) που ένιωθαν κατά την τελευταία εβδομάδα. Οι απαντήσεις φαίνονται στο Σχήμα 45 πιο κάτω. Η βαθμίδα 1 αντιπροσωπεύει το ελάχιστο ενώ η βαθμίδα 10 το μέγιστο. Είναι προφανές ότι ο κυριότερος παράγοντας δυσφορίας ήταν οι ενοχλήσεις στη μέση και ακολουθείται από τον αυχένα και τους ώμους.



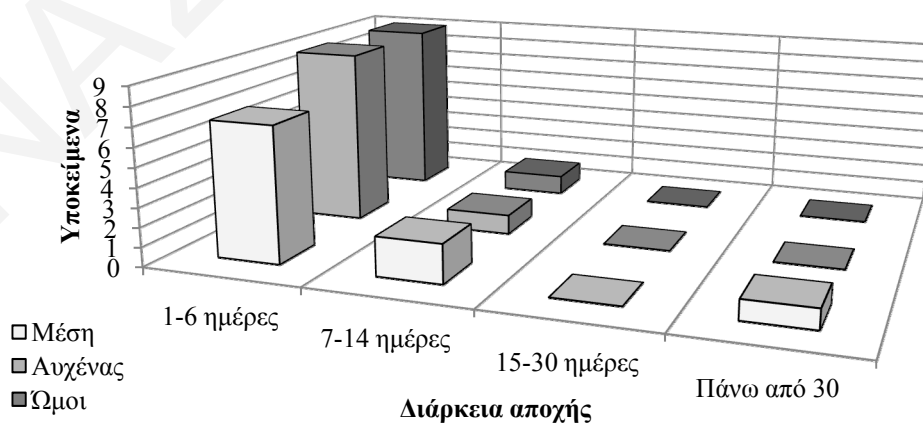
Σχήμα 45: Ιστόγραμμα που συσχετίζει τον αριθμό χειριστών με την ένταση του πόνου προερχόμενων από ενοχλήσεις που αισθάνονται οι χειριστές κατά τις τελευταίες 7 ημέρες

Επίσης, ζητήθηκε από τους χειριστές να περιγράψουν και πάλι την ένταση του πόνου (ενοχλήσεων) που ένιωθαν, αυτή τη φορά κατά το τελευταίο έτος. Οι απαντήσεις φαίνονται στο Σχήμα 46 πιο κάτω. Η βαθμίδα 1 αντιπροσωπεύει το ελάχιστο ενώ η βαθμίδα 10 το μέγιστο. Είναι προφανές ότι ο κυριότερος παράγοντας δυσφορίας ήταν οι ενοχλήσεις στη μέση και ακολουθούνταν από τον αυχένα και τους ώμους.



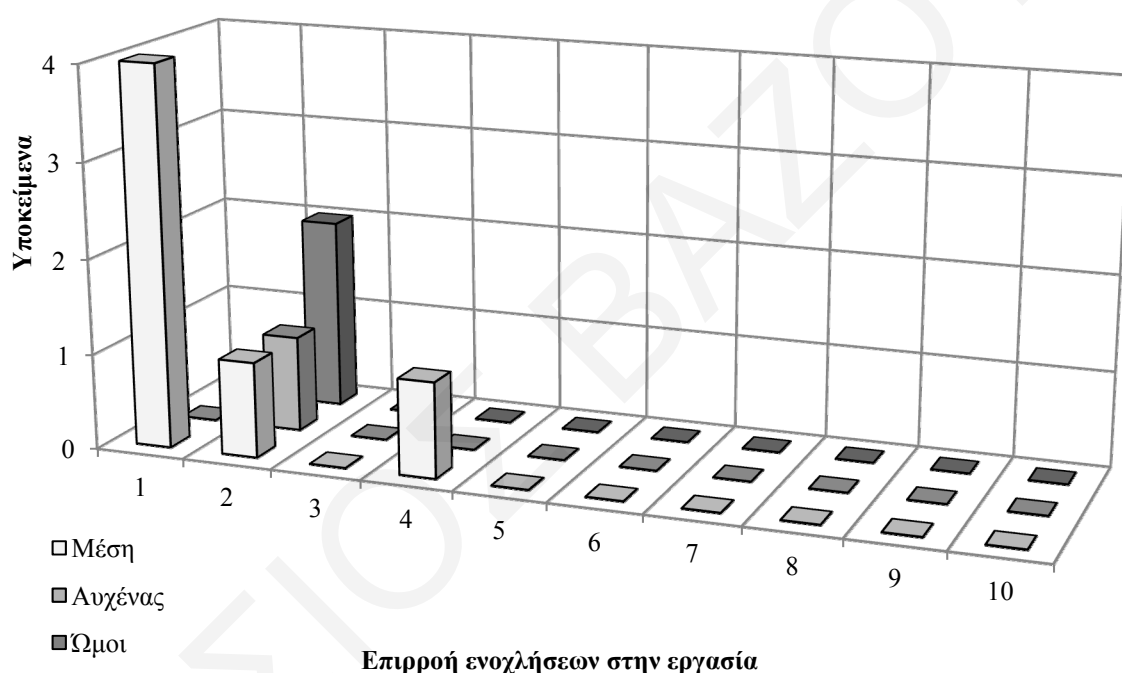
Σχήμα 46: Ιστόγραμμα που συσχετίζει τον αριθμό των υποκειμένων με την ένταση του πόνου προερχόμενου από ενοχλήσεις που αισθάνονται οι χειριστές κατά το τελευταίο έτος

Σε ερώτηση σχετικά με το πόσες μέρες κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους απείχαν από τις συνηθισμένες τους δραστηριότητες (εργασία ή δουλειές του σπιτιού) εξαιτίας των ενοχλήσεων (πόνου) σε μέση αυχένα ή ώμους, οι χειριστές έδωσαν τις απαντήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 47 πιο κάτω. Φαίνεται ότι σε γενικές γραμμές η διάρκεια της αποχής από δραστηριότητες (εργασία ή δουλειές του σπιτιού) ήταν μεταξύ μίας και έξι ημερών (σύντομης διάρκειας).



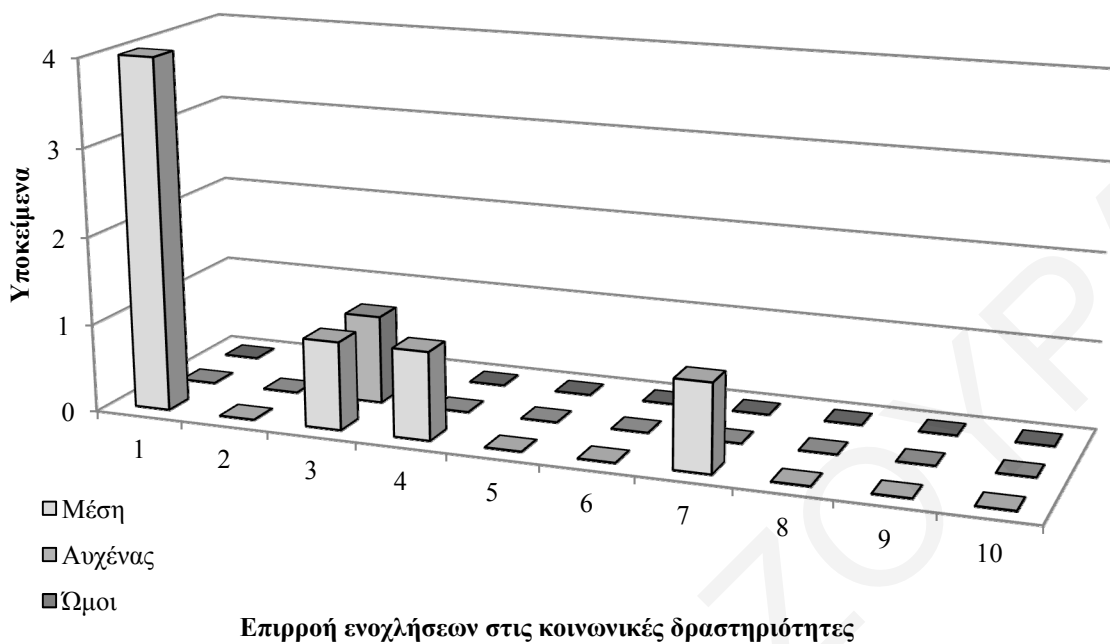
Σχήμα 47: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τη διάρκεια αποχής των χειριστών από δραστηριότητες (εργασία ή δουλειές του σπιτιού)

Σε παρεμφερή ερώτηση σχετικά με την επιρροή των ενοχλήσεων (πόνου) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους στην ικανότητα στην εργασία λήφθηκαν οι απαντήσεις που συνοψίζονται στο Σχήμα 48 πιο κάτω. Η βαθμίδα 1 αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ενώ η βαθμίδα 10 τη μέγιστη επιρροή. Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι δεν αναφέρθηκε σοβαρή επιρροή στην ικανότητα στην εργασία λόγω των ενοχλήσεων. Στο περιθώριο της συνέντευξης διαφάνηκε ότι η συγκεκριμένη ερώτηση λόγω της σημασίας της (σημασία της εργασίας για βιοποριστικούς σκοπούς), ενδεχόμενα να επηρεάζεται από υποκειμενικούς παράγοντες.



Σχήμα 48: Ιστόγραμμα στο οποίο συσχετίζεται ο αριθμός των χειριστών με την επιρροή των ενοχλήσεων (πόνου) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους στην ικανότητα στην εργασία κατά το τελευταίο έτος

Εκτός από την ικανότητα στην εργασία, οι ενοχλήσεις (πόνος) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους επηρεάζουν και τη συμμετοχή στις κοινωνικές δραστηριότητες. Η συχνότητα με την οποία επηρεάζονται οι χειριστές φαίνεται στο Σχήμα 49 πιο κάτω. Η βαθμίδα 1 αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ενώ η βαθμίδα 10 τη μέγιστη επιρροή.



**Επιρροή ενοχλήσεων στις κοινωνικές δραστηριότητες**

Σχήμα 49: Ιστόγραμμα στο οποίο συσχετίζεται ο αριθμός των χειριστών με την επιρροή των ενοχλήσεων (πόνου) στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους στην συμμετοχή σε κοινωνικές δραστηριότητες κατά το τελευταίο έτος.

## 5.6 Συμπεράσματα επιρροής στην υγεία και ευημερία των χειριστών

Το ύψος των εργαζομένων ήταν χαμηλότερο από τον μέσο όρο στην Ευρώπη και το βάρος τους μεγαλύτερο. Η συστηματική συμμετοχή των χειριστών σε ασκήσεις φυσικής δραστηριότητας ήταν μικρή και τα χιλιόμετρα που διένυαν με το προσωπικό τους όχημα καθώς και ο χρόνος που περνούσαν μέσα σ' αυτό ήταν σημαντικός ιδιαίτερα αν στις προσωπικές μετακινήσεις προστεθεί και ο χρόνος από και προς την εργασία.

Σ' ότι αφορά το χρόνο εργασίας στα μηχανήματα ήταν 7 ώρες την ημέρα και οι χειριστές τα χρησιμοποιούσαν κυρίως σε χωμάτινο υπόστρωμα κακής κατάστασης σε σταθερή ταχύτητα (ρυθμός εργασίας).

Σε σχέση με τα καθίσματα, οι περισσότεροι χειριστές διέθεταν κάθισμα με ανάρτηση, η παρεχόμενη προστασία του καθίσματος από κραδασμούς ήταν περιορισμένη λόγω της ύπαρξης μηχανικής ανάρτησης και όχι πιο εξελιγμένου τύπου ανάρτησης όπως υδραυλικής ή πνευματικής ανάρτησης. Επίσης, οι χειριστές δεν είχαν λάβει οδηγίες για το πώς να ρυθμίζουν τα καθίσματα και για τα περισσότερα δεν υπήρχε πληροφόρηση για τη συντήρηση του καθίσματος.

Η εξέταση στοιχείων εργονομίας κατέδειξε ότι η χειρονακτική αλλαγή των ταχυτήτων επιβαρύνει μεν το σώμα των χειριστών, το κάθισμα όμως παρέχει συνήθως επαρκή στήριξη. Παρόλα αυτά απαιτείται συχνά συστροφή του σώματος για καλύτερη οπτική επαφή με το περιβάλλον. Επίσης, λόγω της φύσης του υποστρώματος όπου κινούνται τα μηχανήματα, υπάρχουν και αρκετές αναφορές σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το σώμα του χειριστή χάνει επαφή με το κάθισμα, γεγονός που υποδηλώνει κίνδυνο τραυματισμού λόγω χτυπημάτων (όχι λόγω κραδασμών). Γενικά οι χειριστές δεν υπόκεινται σε χειρονακτική διακίνηση φορτίων, η οποία να έχει τη δυνατότητα να επιτείνει τις συνέπειες της έκθεσης σε κραδασμούς, και έχουν αρκετά διαλείμματα στην εργασία τους (η εργασία τους αποτελεί μέρος αλληλουχίας εργασιών που εκτελούνται σειριακά). Επιβαρυντικό παράγοντα αποτελούν οι εργασίες που εκτελούσαν οι χειριστές στο παρελθόν που στις περισσότερες περιπτώσεις είχαν βαριές σωματικές απαιτήσεις.

Από τα τρία είδη ενοχλήσεων<sup>7</sup> στη μέση, στον αυχένα και στους ώμους, οι πιο σημαντικές ήταν στη μέση. Συγκεκριμένα, το 15% περίπου των χειριστών είχαν ενοχλήσεις στη μέση την τελευταία εβδομάδα, ενώ οι μισοί είχαν ενοχλήσεις κατά το τελευταίο έτος με την ένταση και τον αριθμό των επεισοδίων να ποικίλει. Για τον αυχένα και τους ώμους οι ενοχλήσεις ήταν σημαντικά μικρότερες και έφταναν το ποσοστό του 15% του συνόλου των χειριστών κατά το τελευταίο έτος. Το συνηθέστερο ήταν οι ενοχλήσεις σε ώμους και αυχένα να συνδέονται με τις ενοχλήσεις στη μέση, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό του αισθήματος του πόνου από τους συγκεκριμένους χειριστές.

Η ένταση του πόνου στη μέση κατά το τελευταίο έτος θεωρήθηκε (από τους ίδιους τους χειριστές) σε πολλές περιπτώσεις ως πολύ έντονη, ενώ στους ώμους και στον αυχένα ήταν λιγότερο έντονη. Ο πόνος επηρέασε σε κάποιο βαθμό τόσο την επαγγελματική όσο και τη ιδιωτική ζωή των χειριστών.

---

<sup>7</sup> Οι ενοχλήσεις σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις ισοδυναμούσαν με πόνο.

## Κεφάλαιο 6

### Πειραματικά αποτελέσματα – μετρήσεις στο πεδίο και στο εργαστήριο

#### 6.1 Γενικά

Συνολικά έγιναν 53 μετρήσεις σε χειριστές στο πεδίο για μέτρηση της επαγγελματικής τους έκθεσης, όλοι άρρενες.

Η μέτρηση της επαγγελματικής έκθεσης στο πεδίο συνέβαλε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης στην Κύπρο, ενώ οι μετρήσεις στο εργαστήριο (μέσα στο πλαίσιο συγκεκριμένων παραδοχών) είχαν ως στόχο τη λήψη δεδομένων για την περιγραφή της απόκρισης στον κατακόρυφο άξονα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό συσχετίσεων και ακόλουθα για τη μοντελοποίηση και υπολογισμό της αβεβαιότητας.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν στον άνθρωπο και όχι στα μηχανήματα, για τα οποία εκτός από το γεγονός ότι έχουν γίνει επαρκείς μετρήσεις για τους κραδασμούς που παράγουν (ενδεικτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1) πρέπει να παρέχονται και πληροφορίες σχετικά με τους πραγματικούς κραδασμούς που παράγουν από τον κατασκευαστή τους σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Μηχανήματα 2006/42/EK [55].



## 6.2 Μετρήσεις στο πεδίο της επαγγελματικής έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1: 1997

Οι μετρήσεις της έκθεσης στο χώρο εργασίας έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] για την έκθεση των εργαζόμενων στους κραδασμούς σε 53 υποκείμενα τα οποία χειριζόταν 57 διαφορετικά μηχανήματα (4 χειριστές χειριζόταν τυπικά δύο διαφορετικά είδη μηχανημάτων).

### 6.2.1 Οκτάωρη έκθεση σε επιτάχυνση r.m.s.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν δύο όργανα μέτρησης κραδασμών ολόκληρου σώματος 01dB Maestro σε συνδυασμό με ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο καθίσματος τύπου AP2081 το καθένα για μετρήσεις σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10]. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ακολουθήθηκε το πιο πάνω πρότυπο και ο στόχος ήταν η καταμέτρηση της οκτάωρης έκθεσης των χειριστών σε κραδασμούς. Πριν την έναρξη της μέτρησης ερωτούνταν ο εργαζόμενος και ο προϊστάμενός του για τα καθήκοντα που εκτελούσε ημερησίως. Ακολούθως, ο εργαζόμενος λάμβανε τη θέση εργασίας του και εκτελούσε τα καθήκοντά του καθήμενος πάνω στο τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο με τους άξονες τοποθετημένους σύμφωνα με το πιο πάνω πρότυπο. Ζητούνταν από τον εργαζόμενο να εκτελεί αντιπροσωπευτικές εργασίες για κάθε διαφορετικό καθήκον που εκτελούσε και ο χρόνος της εκτέλεσης του κάθε καθήκοντος καταγράφονταν. Ο χρόνος ήταν αρκετός ώστε το αποτέλεσμα της κάθε μέτρησης να μπορεί να θεωρείται ότι παρέχει επαρκή στατιστική αξιοπιστία ( $\gg 227$  δευτερόλεπτα [10]) για το συγκεκριμένο τύπο διέγερσης. Προσοχή δόθηκε ώστε να περιληφθούν όλες οι εργασίες που εκτελεί ο κάθε εργαζόμενος έτσι ώστε να μετρηθεί η συνολική εκάστοτε έκθεση σε κραδασμούς. Τα δεδομένα συλλεγόταν στο όργανο 01dB Maestro και χρησιμοποιούνταν αργότερα για υπολογισμό της οκτάωρης έκθεσης (με σκοπό τον υπολογισμό των επιπτώσεων στην υγεία) με τη χρήση λογισμικού. Η μέτρηση γινόταν σε τρεις ορθογώνιους μεταξύ τους άξονες x, y και z, για χρονικό διάστημα T. Ακολούθως, για κάθε άξονα υπολογιζόταν η τετραγωνική ρίζα των μέσων τετραγώνων της επιτάχυνσης (r.m.s.) και σε κάθε εκτελούμενο καθήκον με τη χρήση του τύπου:

$$\alpha_w(x,y \text{ or } z) = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

όπου  $a_w(t)$  είναι η τιμή της επιτάχυνσης εκφρασμένη σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο ( $m/s^2$ ) (ανά άξονα) και T είναι η διάρκεια της επιμέρους μέτρησης σε δευτερόλεπτα. Η επιτάχυνση  $a_w$  ήταν σταθμισμένη με τα φίλτρα που περιγράφονται στο πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] για να τονιστούν οι επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Συγκεκριμένα στο πιο πάνω πρότυπο ανάλογα με

την επίδραση που ενδέχεται να έχουν οι κραδασμοί, δηλαδή είτε επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, είτε επίδραση στην άνεση, είτε πρόκληση ναυτίας, η επιτάχυνση  $a_w$  σταθμίζεται με διαφορετικά φίλτρα. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα φίλτρα που σχετίζονται με επίδραση των κραδασμών στην ανθρώπινη υγεία.

Ο υπολογισμός γινόταν για κάθε άξονα (x, y ή z) ξεχωριστά. Για να υπολογιστεί η τελική τιμή της επιτάχυνσης, η τιμή του κάθε άξονα σταθμίζονταν ως εξής:  $1,4a_{wx}$ ,  $1,4a_{wy}$  και  $a_{wz}$  [56]. Το αποτέλεσμα ήταν η διορθωμένη τιμή για τον κάθε άξονα, δηλαδή  $1,4a_{wx}=a_{wx\_corr}$ ,  $1,4a_{wy}=a_{wy\_corr}$ , και  $a_{wz} = a_{wz\_corr}$ . Για τον υπολογισμό της τιμής  $a_w$  λαμβανόταν το μέτρο του διανυσματικού αθροίσματος των διορθωμένων τιμών<sup>8</sup>.

$$a_w = \sqrt{a_{wx\_corr}^2 + a_{wy\_corr}^2 + a_{wz\_corr}^2} \quad (33)$$

Ακόλουθα, γινόταν αναγωγή στις 8 ώρες εργασίας ανάλογα με τον ημερήσιο χρόνο έκθεσης του εργαζόμενου σύμφωνα με τον τύπο που δίνει την οκτάωρη έκθεση σε επιτάχυνση r.m.s.  $A(8)$ :

$$A(8) = a_w \left[ \frac{T_w}{T_{8h}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

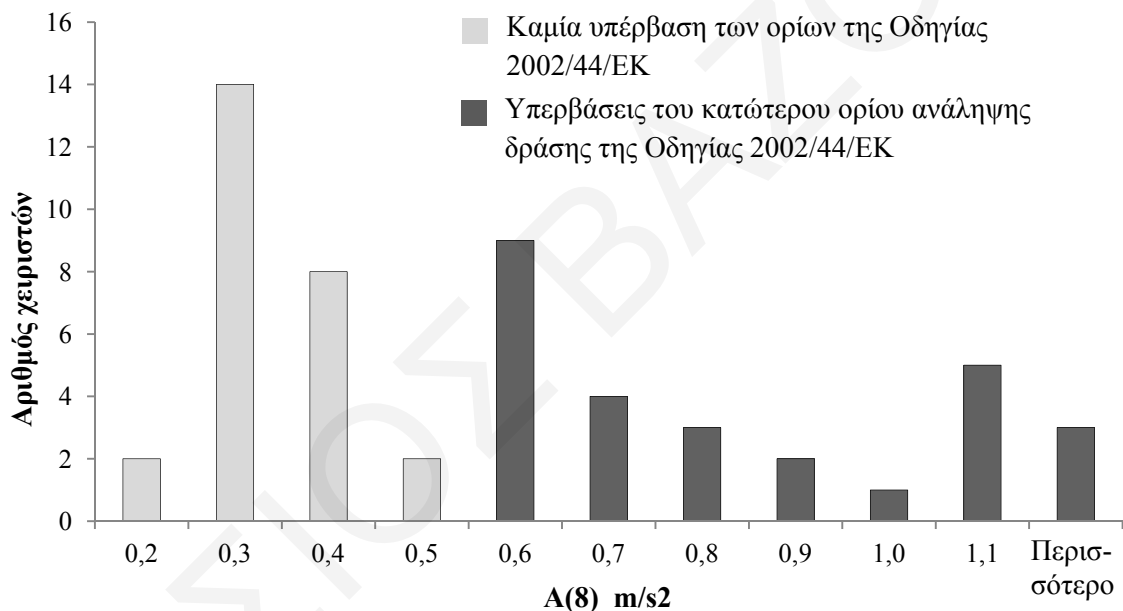
Όπου  $T_w$  ο χρόνος ο οποίος αφιερωνόταν καθημερινά για το συγκεκριμένο καθήκον και  $T_{8h}$  οι 8 ώρες εργασίας. Σε περίπτωση που ο εργαζόμενος απασχολούνταν καθημερινά σε περισσότερες από μία θέσεις εργασίας υποκείμενες σε κραδασμούς για χρόνο  $t_n$ , γινόταν μέτρηση σε κάθε θέση εργασίας της επιτάχυνσης  $a_{wn}^2$  ξεχωριστά και το αποτέλεσμα αθροιζόταν για τον υπολογισμό της οκτάωρης έκθεσης σε επιτάχυνση r.m.s.  $A(8)$  του κάθε εργαζόμενου σύμφωνα με τον τύπο:

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{n=1}^{n=N} a_{wn}^2 t_n} \quad (35)$$

<sup>8</sup> Το μέτρο του διανυσματικού αθροίσματος λήφθηκε διότι οι διορθωμένες τιμές στους τρεις άξονες ήταν «συγκρίσιμες» μεταξύ τους. Παρόλο που στο πρότυπο ISO 2631 -1: 1997 [10] δεν δίνεται κάποια καθοδήγηση για το πότε οι τιμές είναι συγκρίσιμες, όταν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών επιλέγεται ο χειρότερος άξονας. Σε όλες τις μετρήσεις που λήφθηκαν, οι τιμές των επιταχύνσεων στους ορθογώνιους άξονες θεωρήθηκαν «συγκρίσιμες» μεταξύ τους.

Τα στοιχεία για τον συνολικό χρόνο έκθεσης λήφθηκαν κατά κανόνα από ισχυρισμούς των εργαζομένων και των προϊσταμένων τους. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ακριβής για τον υπολογισμό της συνολικής επαγγελματικής έκθεσης για κραδασμούς ολόκληρου σώματος [57] σε επιτάχυνση r.m.s.

Οι μετρήσεις της έκθεσης έδειξαν ότι η οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος σε επιτάχυνση r.m.s. έχει μέση τιμή  $0,5 \text{ m/s}^2$ , τυπική απόκλιση  $0,3 \text{ m/s}^2$ , ελάχιστη τιμή  $0,1 \text{ m/s}^2$  και μέγιστη  $1,1 \text{ m/s}^2$ . Σε σχέση με τα όρια της Οδηγίας 2002/44/EK δεν παρατηρήθηκε καμία υπέρβαση του ανώτερου ορίου  $1,15 \text{ m/s}^2$ , ενώ παρατηρήθηκαν 27 (51%) υπερβάσεις του ορίου ανάληψης δράσης  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Στο Σχήμα 50 πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 50: Ιστογράμμα οκτάωρης επαγγελματικής έκθεσης για κραδασμούς ολόκληρου σώματος σε επιτάχυνση r.m.s.

### 6.2.2 Δόση κραδασμών

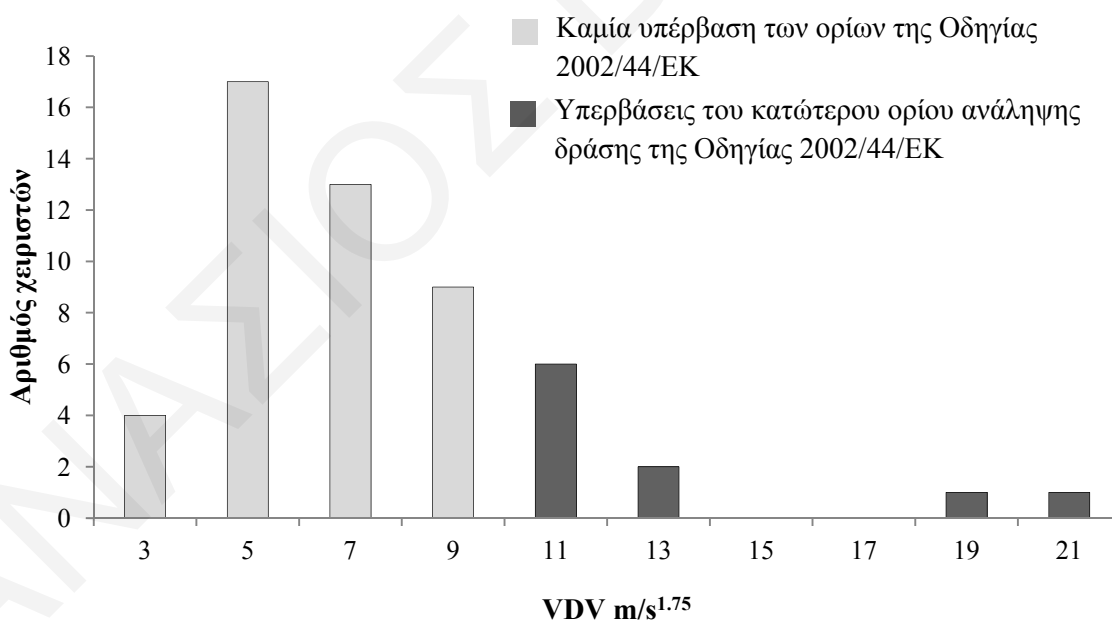
Η δόση των κραδασμών είναι ένα μέγεθος που εφαρμόζει μόνο σε μετρήσεις κραδασμών όλου του σώματος [7]. Επειδή βασίζεται στην  $4^{\text{η}}$  δύναμη της επιτάχυνσης δίνει περισσότερη έμφαση στις αιχμές της επιτάχυνσης (shocks), από ότι δίνει η επιτάχυνση  $a_w$  που περιγράφηκε πιο πάνω. Η τιμή της δόσης των κραδασμών δεν μειώνεται σε περιόδους χαμηλών ή μηδενικών κραδασμών, αλλά συσσωρεύεται συνέχεια. Επιπρόσθετα, η έκθεση σε συνεχείς κραδασμούς έχει ως συνέπεια η τιμή της δόσης να αυξάνει ενώ η τιμή r.m.s. παραμένει σταθερή.

Μαθηματικά, η δόση κραδασμών ορίζεται με την εξής σχέση:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt} \quad (36)$$

όπου  $a_w(t)$  είναι η τιμή της επιτάχυνσης εκφρασμένη σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο ( $m/s^2$ ) (ανά άξονα) και  $T$  είναι η διάρκεια της επιμέρους μέτρησης σε δευτερόλεπτα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της οκτάωρης δόσης των κραδασμών είναι παρόμοια με αυτή της επιτάχυνσης r.m.s.

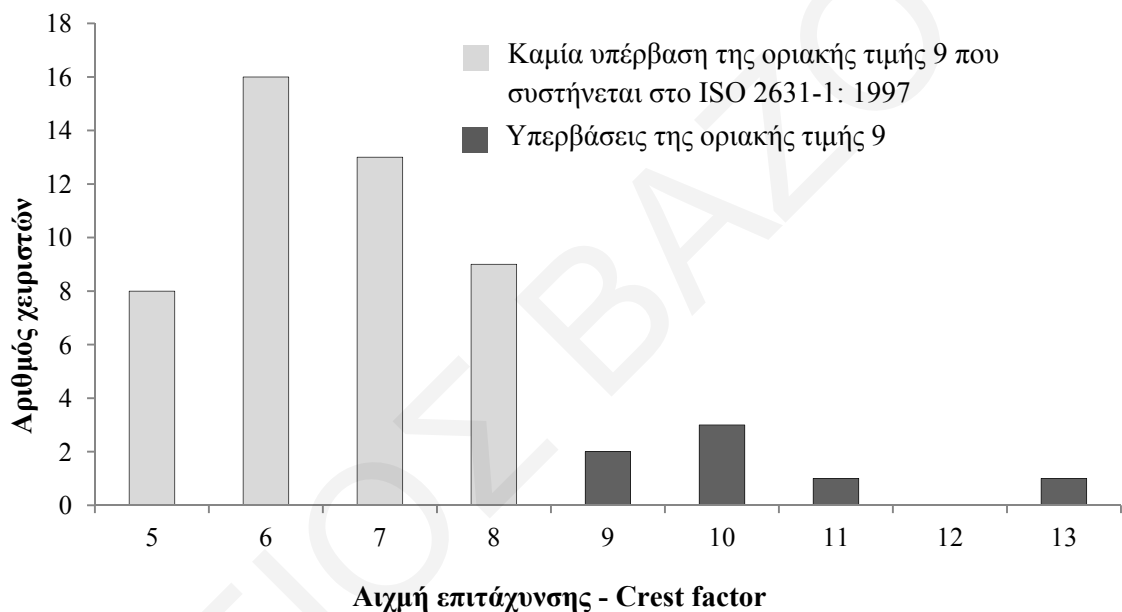
Οι μετρήσεις της έκθεσης έδειξαν ότι η οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος μετρημένη σε δόση κραδασμών έχει μέση τιμή  $6,7 m/s^{1,75}$ , τυπική απόκλιση  $3,6 m/s^{1,75}$ , ελάχιστη τιμή  $2,2 m/s^{1,75}$  και μέγιστη τιμή  $20,5 m/s^{1,75}$ . Σε σχέση με τα όρια της Οδηγίας 2002/44/EK [1] δεν παρατηρήθηκε καμία υπέρβαση του ανώτερου ορίου  $21 m/sec^{1,75}$ , ενώ παρατηρήθηκαν 10 (19%) υπερβάσεις του ορίου ανάληψης δράσης  $9,1 m/sec^{1,75}$ . Στο Σχήμα 51 πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 51: Ιστόγραμμα οκτάωρης επαγγελματικής έκθεσης για κραδασμούς ολόκληρου σώματος μετρημένη σε δόση κραδασμών

### 6.2.3 Τιμή αιχμής (crest factor)

Επειδή οι τιμές αιχμής - crest factors θεωρούνται ιδιαίτερα επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία, το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] χρησιμοποιεί την τιμή αιχμής για να καθορίσει αν η τιμή της οκτάωρης έκθεσης σε επιτάχυνση r.m.s. είναι επαρκής ή αν πρέπει επιπρόσθετα να υπολογιστεί και η τιμή της δόσης των κραδασμών για τον υπολογισμό των επιπτώσεων στην υγεία. Η οριακή τιμή για την τιμή αιχμής της επιτάχυνσης είναι 9 και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης στιγμιαίας τιμής της επιτάχυνσης προς την τιμή r.m.s. της επιτάχυνσης. Από μόνη της η τιμή αιχμής μπορεί να δώσει πληροφορίες για την επίδραση της διέγερσης διότι σύμφωνα με το πιο πάνω πρότυπο οι αιχμές της επιτάχυνσης δημιουργούν επιπρόσθετους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.



Σχήμα 52: Ιστόγραμμα αιχμής επιταχύνσεως – Crest factor

Οι μετρήσεις της έκθεσης έδειξαν ότι η αιχμή επιτάχυνσης- crest factor έχει μέση τιμή 6,6, τυπική απόκλιση 1,7, ελάχιστη τιμή 4,5 και μέγιστη τιμή 12,5. Παρατηρήθηκαν 7 (13%) υπερβάσεις της οριακής τιμής (9) που αναφέρεται στο πιο πάνω πρότυπο. Οι υπερβάσεις αντιστοιχούσαν σε χειριστές με αντίστοιχες υπερβάσεις των κατώτερων ορίων ανάληψης δράσης σε επιτάχυνση r.m.s. Στο Σχήμα 52 πιο πάνω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

### 6.2.4 Επαγγελματική έκθεση – ανάληψη δράσης

Η υπέρβαση των ορίων ανάληψης δράσης συνεπάγεται υποχρεώσεις για τους εργοδότες που περιλαμβάνουν τις ιατρικές εξετάσεις για τους εργαζόμενους, λήψη τεχνικών και οργανωτικών

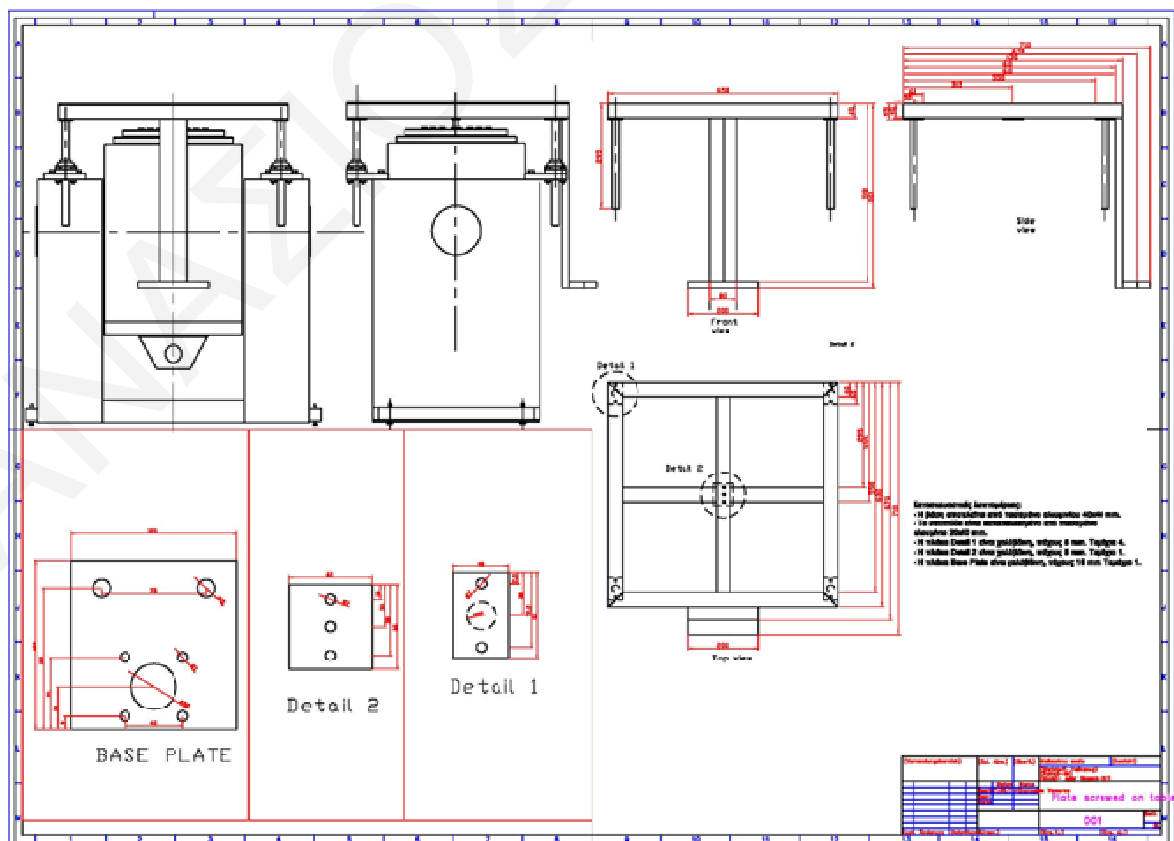
μέτρων για τη μείωση της επαγγελματικής έκθεσης σε κραδασμούς και γραπτή εκτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου.

### 6.3 Μετρήσεις στο εργαστήριο

Στις μετρήσεις στο εργαστήριο συμμετείχαν εθελοντικά 43 χειριστές (από τους 53 στους οποίους έγιναν οι μετρήσεις των κραδασμών στο χώρο εργασίας).

#### 6.3.1 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθούν η φαινόμενη μάζα του καθήμενου σώματος, η μεταβιβατικότητα καθίσματος - κεφαλής και οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας με τη χρήση μιας δυναμικά κινούμενης πλατφόρμας, η οποία περιείχε ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (δυναμόμετρο) PCB μοντέλο 208C04 S/N 31857. Ο αισθητήρας ήταν στερεωμένος κάτω από το κέντρο μεταλλικού πλαισίου, κατασκευασμένο από τετράγωνο προφίλ αλουμινίου διαστάσεων 40 mm x 40 mm. Η άνω επίπεδη πλάκα αυτής της πλατφόρμας, πάνω στην οποία καθόταν τα υποκείμενα είχε 5 mm πάχος, 630 mm πλάτος και 630 mm βάθος. Ήταν κατασκευασμένη από κράμα αλουμινίου. Όλη η πλατφόρμα ήταν βιδωμένη πάνω στον ηλεκτρονικό δονητή της LDS μοντέλο 724 με ενισχυτή MPA4.



Σχήμα 53: Σχέδιο πειραματικής διάταξης μαζί με τον δονητή

Στις τέσσερις πλευρές διέθετε τέσσερα αξονικά ρουλεμάν, τα οποία τοποθετήθηκαν για να εξουδετερώνουν τις ροπές στρέψης που εμφανίζονταν κατά το πείραμα και εξασφάλιζαν την δόνηση της πλατφόρμας αποκλειστικά στον άξονα Z. Η πλατφόρμα δεν είχε πλάτη. Η πλάκα που καθόταν τα υποκείμενα διέθετε πλαστικό υμένιο για τη μείωση των τριβών στη διεπιφάνεια ανθρώπου και πλάκας. Στο Σχήμα 53 φαίνεται η κατασκευή της πλατφόρμας μαζί με τον δονητή.

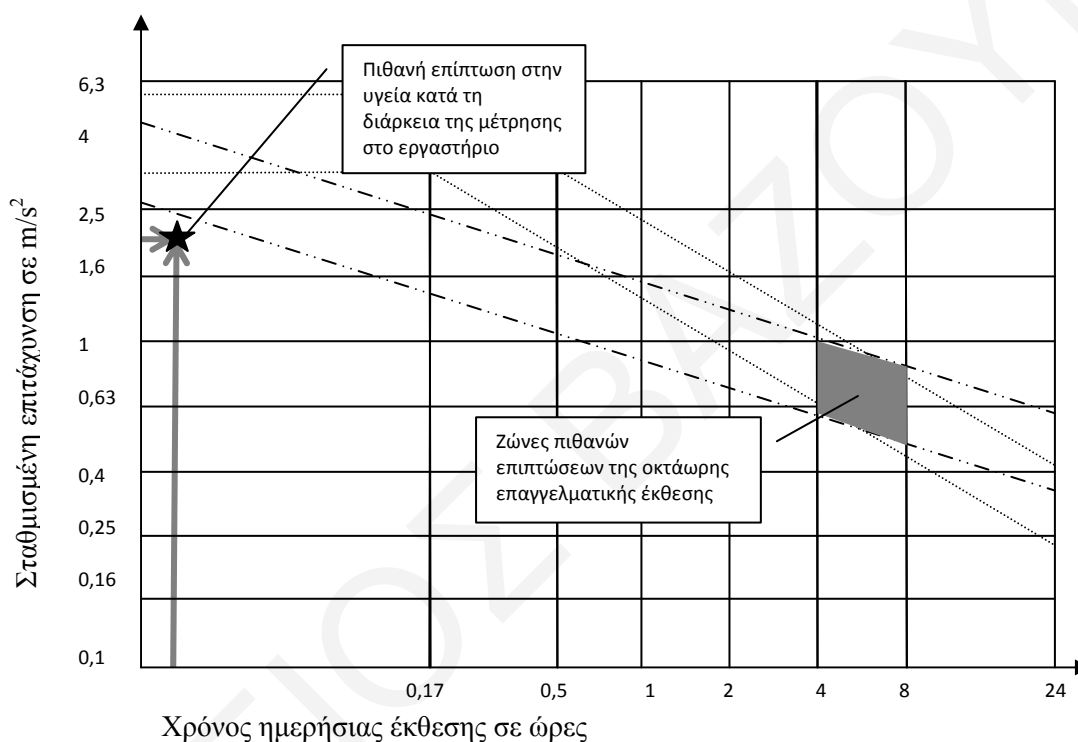
Η επιτάχυνση της πλατφόρμας λήφθηκε στο πάνω μέρος της επίπεδης πλάκας με τη χρήση ενός επιταχυνσιομέτρου (τύπος επιταχυνσιομέτρου PCB μοντέλο 356B41 S/N 116423). Στο στήθος τοποθετήθηκε επιταχυνσιόμετρο Omega, μοντέλο ACC 103, S/N 1285 και στο κεφάλι επιταχυνσιόμετρο Omega, μοντέλο ACC 104A, S/N 2128. Στο Σχήμα 54 φαίνονται οι ιμάντες που συγκρατούσαν τα επιταχυνσιόμετρα στο στήθος και το κεφάλι και η στάση που λάμβαναν τα υποκείμενα κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 54: Η ερευνητική διάταξη με τη θέση των επιταχυνσιομέτρων

Τα σήματα της δύναμης και της επιτάχυνσης από την πλατφόρμα περνούσαν από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο στα 200 Hz. Δεν υπήρχαν αξιόλογοι κραδασμοί εκτός του προαναφερθέντος διαστήματος συχνοτήτων. Έγιναν δύο μετρήσεις στον ηλεκτροδυναμικό δονητή. Πρώτα χρησιμοποιήθηκαν τυχαίοι κραδασμοί με είσοδο 0,4 mV και μετά ημιτονοειδής τύπου “sweep sine” με είσοδο 0,02 mV, σταδιακά αυξανόμενη για 60 δευτερόλεπτα (δύο επαναλήψεις).

Η ένταση ήταν κατά μέσο όρο  $2,15 \text{ m/s}^2$  r.m.s με τυπική απόκλιση  $0,05 \text{ m/s}^2$  για την τυχαία δόνηση και  $1,1 \text{ m/s}^2$  με τυπική απόκλιση  $0,02 \text{ m/s}^2$  για την ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”. Ο χρόνος έκθεσης ήταν 120 δευτερόλεπτα για κάθε υποκείμενο παρόλο που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι από 10 [39] έως 60 [38] δευτερόλεπτα θα ήταν αρκετά. Να σημειωθεί ότι η έκθεση ήταν πιο χαμηλή από τα κατώτερα όρια που τίθενται στο πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] όπως φαίνεται και στο πιο κάτω Σχήμα. Φαίνεται ότι η επίπτωση στην υγεία εξαιτίας των μετρήσεων στο εργαστήριο βρίσκεται εκτός των ζωνών πιθανών επιπτώσεων της επαγγελματικής έκθεσης.



Σχήμα 55: Ζώνες πιθανής επίπτωσης των κραδασμών στην υγεία

Για να μην εκτεθεί περαιτέρω σε κραδασμούς ο εργαζόμενος την ίδια ημέρα ζητήθηκε από τον εργοδότη του να μην του ανατεθούν καθήκοντα σε μηχανήματα έργων μηχανικών κατασκευών ή σε άλλο εξοπλισμό που θα μπορούσε να προκαλέσει κραδασμούς ολόκληρου του σώματος. Το όριο βάρους (επιπρόσθετα από την πλάκα) που μπορεί να δεχτεί ο δονητής ήταν 110 kg, όμως στόχος του πειράματος ήταν οι υποψήφιοι να μην περάσουν τα 95 kg με απόλυτο μέγιστο τα 105 kg.

Κατά την προετοιμασία της μέτρησης ακολουθήθηκε το ακόλουθο πρωτόκολλο. Τα άτομα κάθονταν πάνω στην πλατφόρμα με το ισχιακό εξόγκωμα περίπου 0,22 m από την εμπρόσθια ακμή της εξέδρας. Είχαν μια χαλαρή και άνετη κατακόρυφη στάση με κανονική μυϊκή ένταση και τους δόθηκε η εντολή να διατηρούν την ίδια στάση κατά τη διάρκεια του κάθε

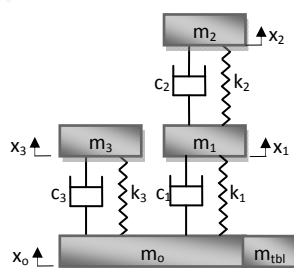


πειράματος. Τα πόδια υποστηρίζονταν από υποπόδιο που ήταν έτσι ρυθμισμένο καθ' ύψος ώστε τα κάτω άκρα να είναι κατακόρυφα και το πάνω μέρος των ποδιών οριζόντιο. Τα χέρια ακουμπούσαν στα πόδια και ο επιστημονικός συνεργάτης κρατούσε το κομβίο εκτάκτου ανάγκης. Η πιο πάνω στάση ελεγχόταν και εφόσον απαιτείτο γινόταν διορθώσεις.

Πριν την έναρξη του πειράματος δινόταν ενημέρωση σε κάθε υποκείμενο για τη διαδικασία του πειράματος, η οποία εξηγούσε το σκοπό του πειράματος και τον τρόπο με τον οποίο μπορούσαν να διακόψουν σε οποιαδήποτε στιγμή το πείραμα ή να αρνηθούν να συμμετέχουν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διαδικασία σχετική με το πείραμα. Το πρωτόκολλο που περιέγραφε την πειραματική διαδικασία ήταν γραπτό και ακολουθείτο κάθε φορά έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός επαναληψιμότητας (το πρωτόκολλο παρατίθεται στο Παράρτημα Ι).

Επειδή τα υποκείμενα κάθονταν πάνω σε μια πλάκα κατά τη διάρκεια του πειράματος και το δυναμόμετρο ήταν τοποθετημένο κάτω από το σύστημα της πλάκας που περιελάμβανε το υποπόδιο και έναν αισθητήρα (seat pad), η ένδειξη που αφορούσε τη φαινόμενη μάζα στο σημείο που καθόταν το υποκείμενο περιείχε ένα σταθερό λάθος, το οποίο έπρεπε να αφαιρεθεί (βλέπε Σχήμα 56 πιο κάτω). Στο σχήμα παρουσιάζεται η βάση του μοντέλου αυξημένη κατά το ποσό της μάζας του υποποδίου με τον αισθητήρα (seat pad)  $m_{tbl}$ .

Για την ακρίβεια, η μάζα του συστήματος της πλάκας με το υποπόδιο και τον αισθητήρα (seat pad) ( $m_{tbl}=11,8$  kg) αφαιρέθηκε από το πραγματικό μέρος της φαινόμενης μάζας με την αφαίρεση της δύναμης  $F$  που προκαλείται από την επιπρόσθετη μάζα  $m_{tbl}$  στη συνολική μετρούμενη δύναμη [48] σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα  $F = m_{tbl}\ddot{x}_0$ .



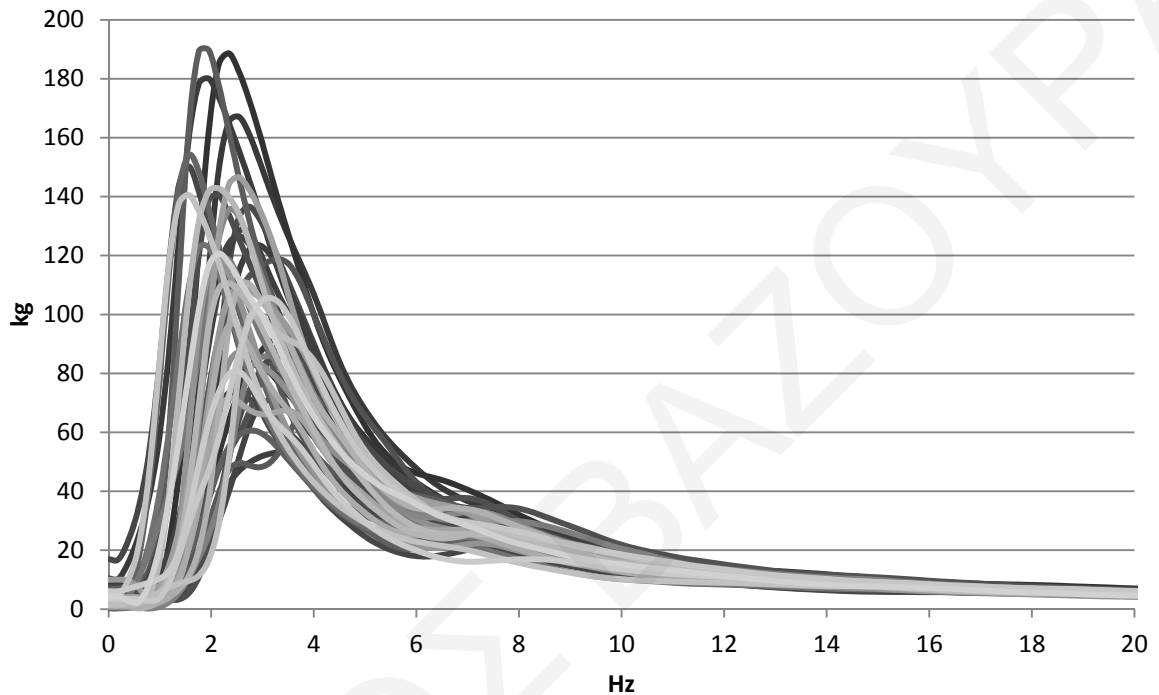
Σχήμα 56: Μοντέλο του ISO 5982: 2001 με επιπλέον μάζα

### 6.3.2 Αποτελέσματα

Για να διαφανεί η συμβατότητα της εργασίας με προηγούμενες έρευνες υπολογίστηκε για κάθε υποκείμενο η φαινόμενη μάζα,

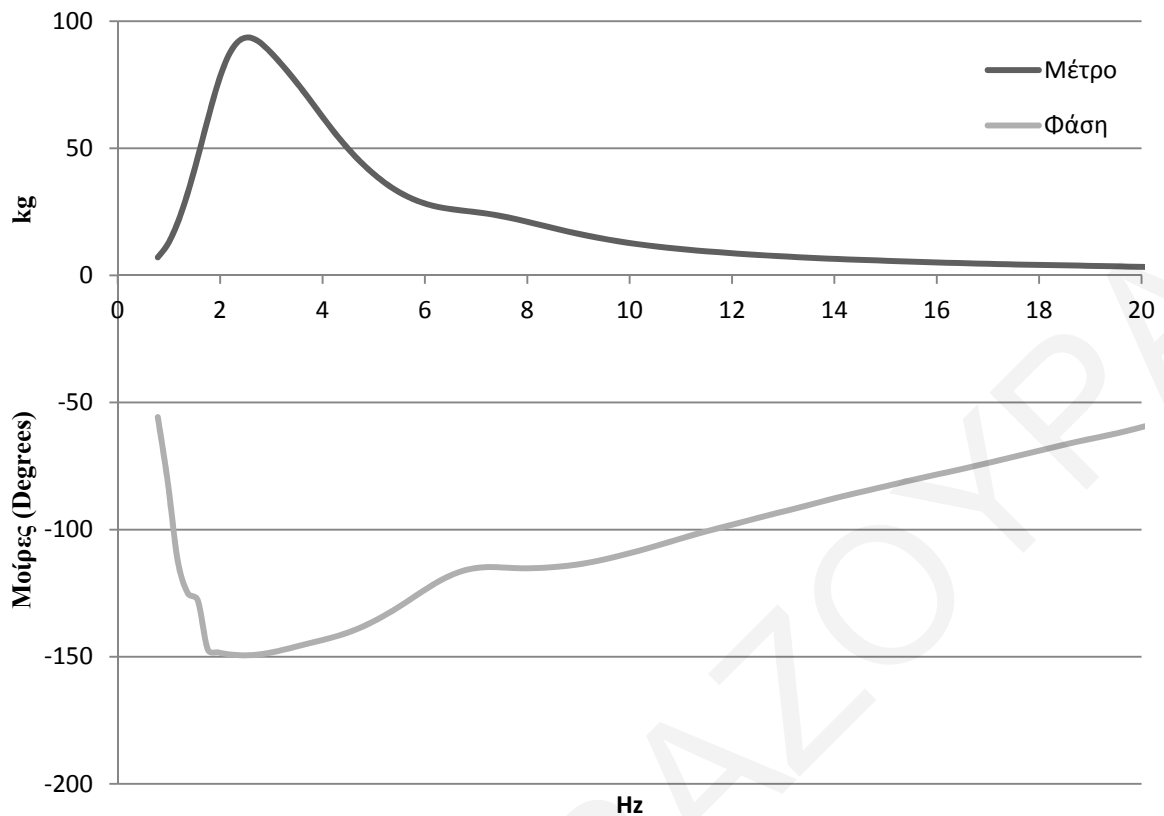
$$M_{0,0}(i\omega) = \frac{F_0(i\omega)}{\alpha_0(i\omega)} \quad (37)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 57, όπου κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει διαφορετικό άτομο.



Σχήμα 57: Η φαινόμενη μάζα 43 χειριστών μηχανημάτων από 0 έως 20 Hz

Επειδή η φαινόμενη μάζα είναι μιγαδική εξίσωση, το μέτρο και η φάση της υπολογίστηκε από τον μέσο όρο της ομάδας των χειριστών και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 58. Ο μέσος όρος του μέγιστου του μέτρου της φαινόμενης μάζας υπολογίστηκε στα 2,7 Hz για τυχαία διέγερση (αντίστοιχα για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” ο μέσος όρος του μέγιστου του μέτρου της φαινόμενης μάζας υπολογίστηκε στα 1,6 Hz).



Σχήμα 58: Μέσος όρος του μέτρου της φαινόμενης μάζας και της φάσης της για ομάδα 43 χειριστών που εκτέθηκε σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος στο εργαστήριο

Για να υπολογιστούν οι συχνότητες συντονισμού και οι ιδιομορφές του κάθε ατόμου, υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας “accelerance” (FRF) για το στήθος, κεφάλι και κάθισμα. Οι συναρτήσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

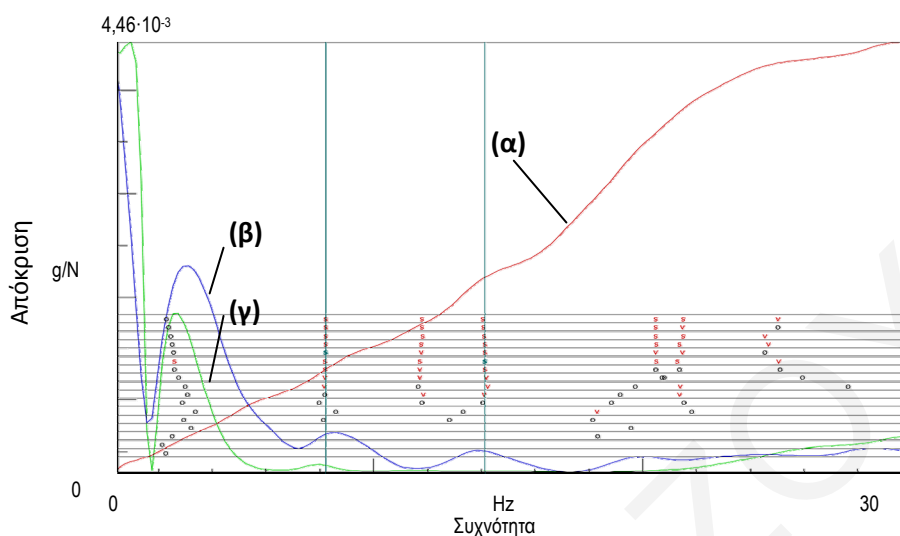
$$A_{0,0}(i\omega) = \frac{a_0(i\omega)}{F_0(i\omega)} \text{ (FRF για κάθισμα - seat accelerance)} \quad (38)$$

$$A_{0,1}(i\omega) = \frac{a_1(i\omega)}{F_0(i\omega)} \text{ (FRF για στήθος - chest accelerance) και} \quad (39)$$

$$A_{0,2}(i\omega) = \frac{a_2(i\omega)}{F_0(i\omega)} \text{ (FRF για κεφάλι - head accelerance)} \quad (40)$$

Μέσα από τα εργαλεία ανάλυσης ιδιομορφών, σύνθεσης και επιβεβαίωσης του λογισμικού της εταιρείας LMS international, υπό την υπόθεση ότι η απόκριση του ανθρώπινου σώματος προσομοιάζει ως ένα σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας με ισχυρή απόσβεση, υπολογίστηκαν οι ιδιομορφές για κάθε άτομο. Ως παράδειγμα απεικόνισης του διαγράμματος

σταθερότητας (stability diagram) παρουσιάζεται στο Σχήμα 59 το διάγραμμα σταθερότητας για τον χειριστή 52.



Σχήμα 59 : Διάγραμμα σταθερότητας για τον χειριστή 52 με τυχαία διέγερση

Λόγω της φύσης του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 56), για τον υπολογισμό των ιδιομορφών λήφθηκαν υπόψη η απόκριση συχνότητας για κάθισμα (μάζα  $m_0$  - seat acceleration - καμπύλη (α)) και για το κεφάλι (μάζα  $m_2$  - head acceleration - καμπύλη (β)), ενώ η απόκριση συχνότητας για το στήθος (καμπύλη (γ)) απεικονίστηκε για σκοπούς σύγκρισης. Αυτό έγινε επειδή σύμφωνα με τους συγγραφείς του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] η μάζα  $m_0$  αντιστοιχεί με την βάση, η μάζα  $m_2$ , αντιστοιχεί με το κεφάλι, ενώ δεν υπάρχει κάποια άλλη φυσική αντιστοιχία για τις άλλες δύο μάζες του προτύπου. Επομένως, το στήθος δεν αντιστοιχεί με κάποια μάζα.

Από το πιο πάνω διάγραμμα σταθερότητας (Σχήμα 59) διαφαίνεται ότι λόγω της πολύ υψηλής απόσβεσης, οι κορυφές των συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων (συχνότητες συντονισμού) δεν είναι ξεκάθαρα σχηματισμένες. Αυτή η εικόνα είναι χαρακτηριστική για όλα τα υποκείμενα. Το γεγονός αυτό δυσχέρανε την επιλογή των κατάλληλων ιδιοσυχνοτήτων καθώς εμφανίζονταν πολλαπλές συχνότητες συντονισμού μεταξύ 0 και 30 Hz.

Με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος με τη μέθοδο της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων αποφασίστηκε όπως χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του προτύπου ISO 5982: 2001 [25], το οποίο θεωρήθηκε ότι είναι επαρκές διότι παρέχει ένα μοντέλο με τρεις βαθμούς ελευθερίας που όπως αναφέρθηκε θεωρούνται επαρκείς με τις παραδοχές τις γραμμικότητας για περιγραφή του ανθρώπινου σώματος. Επίσης, αυτό το πρότυπο παρέχει και το συνδετικό κρίκο μεταξύ της υφιστάμενης έρευνας που έχει γίνει στο πεδίο του υπολογισμού της δυναμικής του ανθρώπινου

σώματος και της θεωρίας της ανάλυσης ιδιομορφών που θα ακολουθηθεί. Το ανθρώπινο σώμα θα μοντελοποιηθεί με βάση το πιο πάνω μοντέλο και η μοντελοποίηση θα γίνει για κάθε χειριστή ξεχωριστά.

#### **6.4 Συμπεράσματα μετρήσεων στο πεδίο και στο εργαστήριο**

Οι μετρήσεις στους χώρους εργασίας έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631-1: 1997 [10] και συγκρίθηκαν με τα όρια της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/44/EK [1] για τους κραδασμούς.

Από αυτές τις μετρήσεις διαφάνηκε ότι οι χειριστές υπόκεινται σε επίπεδα κραδασμών, τα οποία υπερβαίνουν το 51% του ορίου ανάληψης δράσης για οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς ολόκληρου σώματος σε επιτάχυνση r.m.s. και το 19% του ορίου ανάληψης δράσης για οκτάωρη επαγγελματική έκθεση για δόση κραδασμών. Επίσης, ποσοστό 13% των χειριστών υπόκεινται σε κραδασμούς με υψηλές τιμές αιχμής επιτάχυνσης. Σε ότι αφορά το ανώτερο όριο επαγγελματικής έκθεσης, δεν διαφάνηκε οποιαδήποτε υπέρβαση. Το συμπέρασμα δεν είναι μονοσήμαντο. Μπορεί να σημαίνει ότι τα επίπεδα επαγγελματικής έκθεσης που υπόκεινται οι χειριστές μηχανημάτων είναι μεν ανησυχητικά αλλά όχι απαγορευτικά και άμεσα επικίνδυνα για την υγεία τους. Από την άλλη όμως μπορεί να αποτελεί ένδειξη ότι τα ανώτερα όρια επαγγελματικής έκθεσης έχουν τεθεί πολύ ψηλά με αποτέλεσμα να υπάρχει ανησυχητικός εφησυχασμός.

Παρόλο που η μη ύπαρξη υπερβάσεων του ανώτερου ορίου αποτελεί θετικό γεγονός, η υπέρβαση του κατώτερου ορίου της επιτάχυνσης r.m.s. καταδεικνύει ότι οι περισσότεροι εργοδότες έπρεπε να λάβουν άμεσα μέτρα, όπως ιατρικές εξετάσεις των χειριστών, εκτίμηση του κινδύνου σχετικά με τους κραδασμούς και καθορισμό μεθόδων για τη μείωσή τους.

Καθησυχαστικό γεγονός σε σχέση με την πιο πάνω διαπίστωση είναι ότι η Κύπρος έχει επιλέξει να εναρμονιστεί με την Οδηγία 2002/44/EK [1] με τα όρια οκτάωρης έκθεσης σε επιτάχυνση r.m.s. από την οποία προέκυψαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πιο συντηρητικά αποτελέσματα και ως εκ τούτου πιο ασφαλείς, για τους χειριστές, διαπιστώσεις σε σχέση με τη δόση των κραδασμών.

Για τους ίδιους χειριστές μετρήθηκε η απόκριση του ανθρώπινου σώματος στο εργαστήριο (του κάθε χειριστή ξεχωριστά) σε εντάσεις κραδασμών που πλησίαζαν αλλά, δεν ξεπερνούν τα γνωστά όρια οκτάωρης έκθεσης κραδασμών για επηρεασμό της υγείας. Για λόγους σύγκρισης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων, η διέγερση είχε δύο μορφές, τυχαία και ημιτονοειδή τύπου “sweep sine”. Το εύρος των εντάσεων και συχνοτήτων διέγερσης που

διερευνήθηκαν θεωρούνται σχετικές με την επαγγελματική έκθεση ολόκληρου του ανθρώπινου σώματος, δηλαδή από 0 έως 30 Hz και από  $1,1 \text{ m/s}^2$  έως  $2,2 \text{ m/s}^2$ .

Οι μετρήσεις στο εργαστήριο έδωσαν αποτελέσματα για τη βιοδυναμική απόκριση του σώματος, των οποίων όμως η μελέτη δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας. Η σύγκριση της φαινόμενης μάζας με τα αποτελέσματα της γνωστής μέχρι σήμερα βιβλιογραφίας κατέδειξαν ότι ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις είναι συμβατός με προηγούμενες μετρήσεις. Η μετάβαση από τις μετρήσεις στην ανάλυση ιδιομορφών δεν μπορεί να ολοκληρωθεί μέσω εμπορικού λογισμικού που χρησιμοποιεί διαγράμματα σταθερότητας διότι η υψηλή απόσβεση δυσχεραίνει τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης ιδιομορφής. Για το λόγο αυτό προτείνεται και ακολουθείται ένα ενδιάμεσο βήμα, αυτό της μοντελοποίησης μέσω της πραγματικής απόκρισης του συστήματος που επιτρέπει τον υπολογισμό των ιδιομορφών.

## Κεφάλαιο 7

### Μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος

#### 7.1 Υπολογισμός των παραμέτρων ( $m$ , $c$ , $k$ ) του μοντέλου βασισμένου στο ISO 5982: 2001

Για να υπολογιστεί η αβεβαιότητα έπρεπε πρώτα να εκφραστεί η απόκριση του σώματος του κάθε χειριστή ως ένα σύνολο μαζών, σταθερών ελατηρίων και συντελεστών απόσβεσης. Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός για κάθε έναν χειριστή, το σώμα πρέπει να μοντελοποιηθεί.

Το σώμα μοντελοποιήθηκε με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Μέσω αλγόριθμου επανάληψης και βελτιστοποίησης συγκρίθηκαν οι υπολογιζόμενες αποκρίσεις του σώματος με τις πραγματικές αποκρίσεις που μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ελαχιστοποίησης του σφάλματος μεταξύ της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης απόκρισης στη βάση και στο κεφάλι (επιτάχυνση) τόσο για την τυχαία διέγερση, όσο και για την διέγερση ημιτονοειδούς τύπου “sweep sine”.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε περιγράφεται αναλυτικά κάτωθι αφού επεξηγηθεί το θεωρητικό υπόβαθρο.

#### 7.1.1 Καθορισμός δυναμικού συστήματος

Τα συνδεδεμένα (lumped) δυναμικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν με κανονικές (ordinary) διαφορικές εξισώσεις [58]. Αυτές περιλαμβάνουν την υπό διερεύνηση

παράμετρο και τις παραγώγους της ως προς το χρόνο. Οι εξισώσεις που μοντελοποιούν ένα πραγματικό σύστημα μπορούν να εκφραστούν στην ακόλουθη γενική μορφή:

$$\frac{d\underline{z}(t)}{dt} = f[\underline{z}(t), \underline{u}(t), \underline{\zeta}(t), \underline{P}] \quad (41)$$

$$\underline{y}(t) = g[\underline{z}(t), \underline{u}(t), \underline{v}(t), \underline{P}] \quad (42)$$

Η εξίσωση (41) είναι η εξίσωση του συστήματος και (42) είναι η εξίσωση εξόδου του συστήματος. Η δυναμική απόκριση του μοντέλου είναι το διάνυσμα των καταστάσεων  $\underline{z}(t)$  οι οποίες μπορεί είτε είναι παρατηρήσιμες είτε όχι. Αυτή η δυναμική απόκριση καθορίζεται από τη μορφή της εξίσωσης του συστήματος  $f$ , το διάνυσμα εισόδου  $\underline{u}(t)$ , το μη παρατηρήσιμο διάνυσμα της ενόχλησης  $\underline{\zeta}(t)$  και το διάνυσμα των παραμέτρων  $\underline{P}$ .

Η έξοδος του συστήματος καθορίζεται από τη μορφή της εξίσωσης εξόδου  $g$ , το διάνυσμα των καταστάσεων  $\underline{z}(t)$ , το διάνυσμα εισόδου  $\underline{u}(t)$ , τον θόρυβο της μέτρησης  $\underline{v}(t)$  και το διάνυσμα παραμέτρων  $\underline{P}$ .

Όταν η δομή των εξισώσεων  $f$  και  $g$  είναι γνωστή, τότε η απόκριση του μοντέλου εξαρτάται από τις πραγματικές τιμές των στοιχείων των παραμετρικών διανυσμάτων  $\underline{P}$  (παραμετρικό μοντέλο).

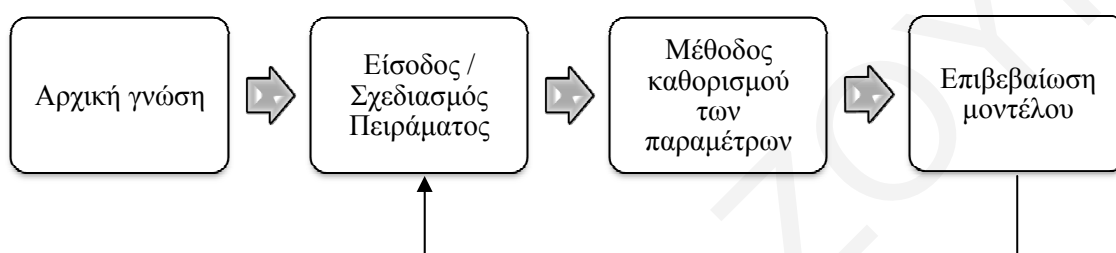
Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το σύστημα που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] (βλέπε παράγραφο 3.9 πιο πάνω) χρησιμοποιήθηκε ως το ονομαστικό σύστημα. Υπενθυμίζεται ότι σ' αυτό το πρότυπο προτείνονται τιμές για τις παραμέτρους της μάζας, των σταθερών ελατηρίων και συντελεστών απόσβεσης (παράγραφος 4.2), οι οποίες δίνουν τιμές για τη φαινόμενη μάζα που προσομοιώνουν το στατιστικό μέσο όρο που προέκυψε από σειρά μετρήσεων της φαινόμενης μάζας σε υποκείμενα (ανθρώπους).

Για τον προγραμματισμό των σχέσεων (41) και (42), που αναφέρονται πιο πάνω, με σκοπό τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος και δυναμική βελτιστοποίηση, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SIMULINK της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.



### 7.1.2 Μεθοδολογία δυναμικής βελτιστοποίησης συστημάτων

Δυναμική βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται τόσο το σύστημα που περιγράφεται από τις σχέσεις (41) και (42), όσο και οι παράμετροι του  $\underline{P}$ . Οι πληροφορίες για την επίτευξη αυτού του στόχου προέρχονται από πειραματικά δεδομένα του υπό διερεύνηση συστήματος [59]. Μια γενική παρουσίαση της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 60.



Σχήμα 60: Μεθοδολογία δυναμικής βελτιστοποίησης συστημάτων

Η αρχική γνώση είναι η γνώση για το πείραμα πριν την έναρξη της μεθόδου καθορισμού των παραμέτρων. Η είσοδος και ο σχεδιασμός του πειράματος είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Η είσοδος πρέπει να είναι επαρκής για να διεγείρει τη δυναμική του συστήματος, ενώ το πείραμα παρέχει τα μέσα για την επίτευξη του στόχου.

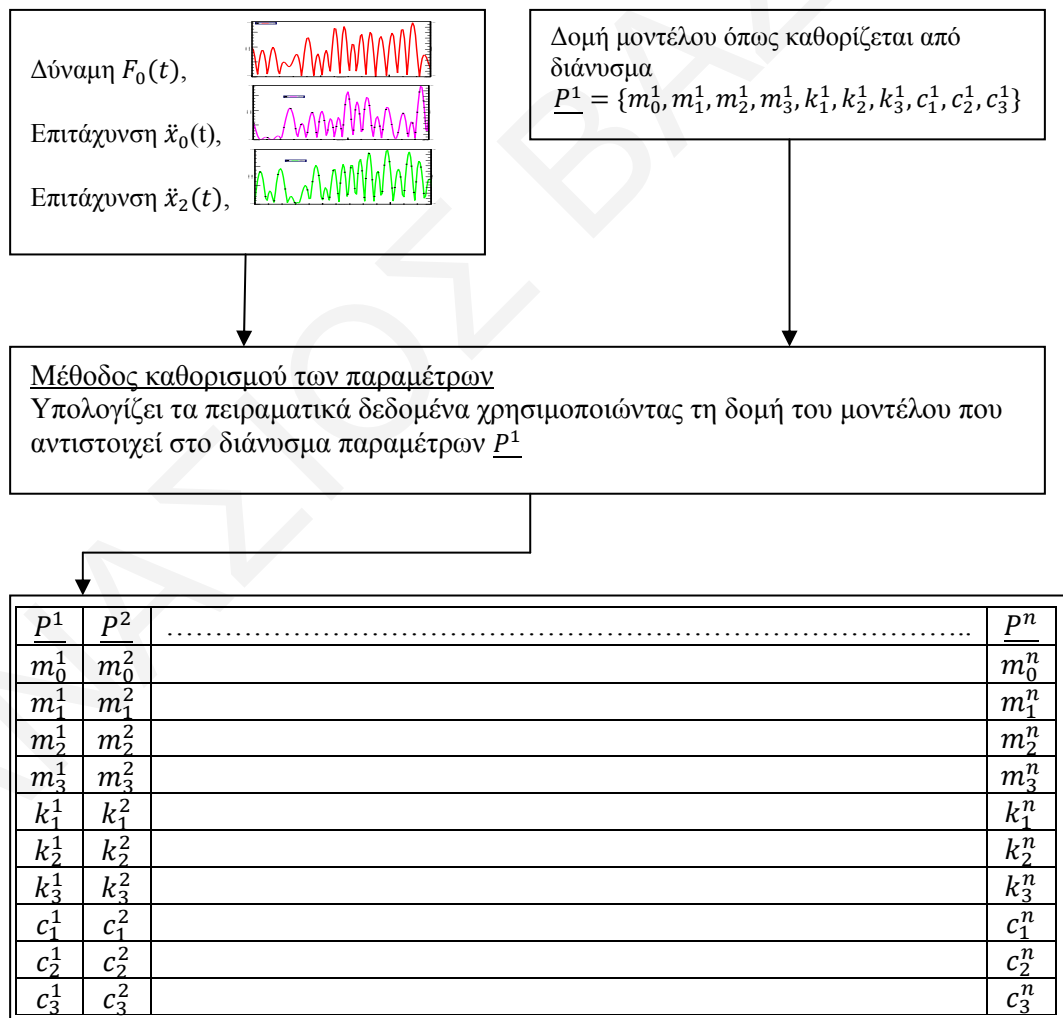
Σε ότι αφορά το σύστημα που επιλέχθηκε, αυτό είναι το σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας και οι λόγοι επιλογής αναφέρονται στην παράγραφο 3.9. Η επιλογή αυτού του μοντέλου άλλωστε παρέχει και τη γέφυρα μεταξύ της υφιστάμενης γνώσης στο πεδίο των κραδασμών του ανθρώπινου σώματος με τη ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων που επιτυγχάνεται μέσω της μοντελοποίησης και δυναμικής βελτιστοποίησης.

Απομένει λοιπόν ο καθορισμός των παραμέτρων για τη δυναμική βελτιστοποίηση. Μία πολύ σημαντική πτυχή σε ότι αφορά τον καθορισμό των παραμέτρων αποτελεί η γραμμικότητα των παραμέτρων. Εάν στις πιο πάνω σχέσεις (41) και (42) το διάνυσμα των παραμέτρων  $\underline{P}$  μπορεί να βγει έξω από τις εξισώσεις  $f$  και  $g$  και να γίνει ο πολλαπλασιαστής τους, τότε οι σχέσεις αυτές θεωρούνται γραμμικές ως προς τις παραμέτρους, σε διαφορετική περίπτωση θεωρούνται ως μη γραμμικές στις παραμέτρους [60]. Σε αυτή τη δεύτερη κατηγορία, ανήκει και το υπό εξέταση μοντέλο λόγω της μορφής της σχέσης (5).

Σε ότι αφορά την περιγραφή της εισόδου στο συγκεκριμένο πείραμα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην παράγραφο 6.3 για περισσότερες λεπτομέρειες όπου γίνεται συζήτηση τόσο για την ένταση όσο και για το φάσμα συχνοτήτων της διέγερσης. Η μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων περιγράφεται στην παράγραφο 7.1.3 και ακολουθεί η επιβεβαίωση του μοντέλου.

### 7.1.3 Μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων

Ένα μοντέλο χρησιμοποιείται για να μπορεί να γίνει πρόβλεψη της μελλοντικής απόκρισης συστήματος δεδομένης της ύπαρξης προηγούμενων παρατηρήσεων. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, πρέπει να επιλεγεί η μέθοδος για τον καθορισμό του βέλτιστου δυνατού μοντέλου για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Τα μοντέλα διαφοροποιούνται με τη μεταβολή του διανύσματος των παραμέτρων. Κάθε διαφορετικό διάνυσμα παραμέτρων δίνει και ένα διαφορετικό μοντέλο.



Σχήμα 61: Καθορισμός των παραμέτρων για το μοντέλο των τριών βαθμών ελευθερίας

Στο Σχήμα 61 παρουσιάζεται το σκεπτικό για τον καθορισμό της δομής του μοντέλου. Η πρόβλεψη της εξόδου, ως η συνάρτηση (42) πιο πάνω δίνεται από την παράμετρο εξόδου  $\hat{y}$ . Αυτή είναι η υπολογιζόμενη έξοδος του μοντέλου. Το μοντέλο για κάθε διάνυσμα παραμέτρων δίνει μια πρόβλεψη, η οποία χαρακτηρίζεται ως  $\hat{y}$ , για την πραγματική έξοδο  $y$ . Το πρώτο βήμα είναι βέβαια ο καθορισμός της δομής του μοντέλου.

Στο Σχήμα 61 φαίνεται ότι για τον καθορισμό των παραμέτρων, αντιστοιχίζονται τα παρατηρηθέντα πειραματικά δεδομένα με το σύνολο των πιθανών διανυσμάτων με όλες τις παραμέτρους που μπορεί να δεχθεί το μοντέλο. Παρουσιάζεται το παράδειγμα της εισόδου της μεταβαλλόμενης ως προς το χρόνο δύναμης στη βάση και των επιταχύνσεων στη βάση και στο κεφάλι. Το Σχήμα 61 πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει το παράδειγμα της επιλογής του διανύσματος παραμέτρων  $\underline{P}^1$ , όμως όπως φαίνεται και στον πίνακα στο κάτω μέρος του Σχήματος, διαφορετικά διανύσματα παραμέτρων<sup>9</sup> καθορίζουν διαφορετικά μοντέλα από την άποψη ότι δίνουν διαφορετικές προβλέψεις για την έξοδο. Έχοντας τα παραπάνω υπόψη ακολουθεί η εξήγηση της μεθόδου καθορισμού του μοντέλου.

Κάθε διάνυσμα παραμέτρων δημιουργεί προβλέψεις για την έξοδο  $\hat{y}$ . Έτσι τη χρονική στιγμή  $t$  το μοντέλο που αντιστοιχεί στο διάνυσμα  $\underline{P}$  θα δημιουργήσει μια πρόγνωση για την έξοδο  $\hat{y}(t|\underline{P})$  βασισμένη στο διάνυσμα παραμέτρων.

Η είσοδος του μοντέλου είναι η πραγματική διέγερση (δύναμη) στη βάση  $F_0(t)$  για χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων. Η έξοδος  $y$  είναι οι μετρημένες (πραγματικές) αποκρίσεις του σώματος στη βάση  $\ddot{x}_0(t)$  και στο κεφάλι  $\ddot{x}_2(t)$  για τον αντίστοιχο συνδυασμό χειριστή – τύπο διέγερσης (τυχαία ή ημιτονοειδής τύπου “sweep sine”) που εμφανίζονται στο δεύτερο και τρίτο διάγραμμα στην πάνω αριστερή γωνία στο Σχήμα 61. Η υπολογιζόμενη απόκριση  $\hat{y}$  κάθε χειριστή είναι η απόκριση (επιτάχυνση) στη βάση  $\hat{\ddot{x}}_0(t|\underline{P})$  και στο κεφάλι  $\hat{\ddot{x}}_2(t|\underline{P})$ .

Επομένως, το σφάλμα ή κόστος στη βάση  $\varepsilon_0(t)$  για τη χρονική στιγμή  $t$  ορίστηκε ως

$$\varepsilon_0(t) = \ddot{x}_0(t) - \hat{\ddot{x}}_0(t|\underline{P}) \quad (43)$$

και αντίστοιχα ορίστηκε και το σφάλμα στο κεφάλι ως:

<sup>9</sup> Όπου  $\underline{P}$  είναι το διάνυσμα παραμέτρων με τα στοιχεία  $m_i, k_i, c_i$ .

$$\varepsilon_2(t) = \ddot{x}_2(t) - \ddot{\hat{x}}_2(t|P) \quad (44)$$

Τα πιο πάνω σφάλματα χρησιμοποιούνται για να γίνει η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μοντέλων. Ο στόχος της διαδικασίας καθορισμού του μοντέλου είναι από ένα μεγάλο αριθμό μοντέλων να επιλεγεί αυτό με το μικρότερο λάθος.

#### 7.1.4 Ορισμός του σφάλματος

Η μέθοδος της μέσης τιμής των ελαχίστων τετραγώνων προϋποθέτει ότι μια ιδεατή πρόγνωση  $\ddot{\hat{x}}_0(t|P)$  και  $\ddot{\hat{x}}_2(t|P)$  των παραμέτρων  $\ddot{x}_0(t)$  και  $\ddot{x}_2(t)$  αντίστοιχα, είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την αναμενόμενη τιμή του τετραγώνου της διαφοράς<sup>10</sup> τους που αν διακριτοποιηθεί και κανονικοποιηθεί για υπολογιστικούς σκοπούς η κανονικοποίηση και διακριτοποίηση οδηγεί στην κάτωθι σχέση για την απόκριση (επιτάχυνση) στη βάση [61]:

$$MSE_0 = \frac{100}{N\sigma_{\ddot{x}_0}^2} \sum_{i=1}^N \left( \ddot{x}_0(i) - \ddot{\hat{x}}_0(i|P) \right)^2 \quad (45)$$

και αντίστοιχα στο κεφάλι ορίζεται ως

$$MSE_2 = \frac{100}{N\sigma_{\ddot{x}_2}^2} \sum_{i=1}^N \left( \ddot{x}_2(i) - \ddot{\hat{x}}_2(i|P) \right)^2 \quad (46)$$

όπου  $\sigma_x^2$  είναι η διασπορά της μετρούμενης επιτάχυνσης και N ο συνολικός αριθμός των σημείων. Το ολικό άθροισμα του μέσου όρου του τετραγώνου του σφάλματος ορίστηκε ως:

$$MSE_{sum} = \frac{100}{N\sigma_{\ddot{x}_0}^2} \sum_{i=1}^N \left( \ddot{x}_0(i) - \ddot{\hat{x}}_0(i|P) \right)^2 + \frac{100}{N\sigma_{\ddot{x}_2}^2} \sum_{i=1}^N \left( \ddot{x}_2(i) - \ddot{\hat{x}}_2(i|P) \right)^2 \quad (47)$$

Οι σχέσεις (45) και (46) περιέχουν το ίδιο φυσικό μέγεθος (επιτάχυνση) και η διαίρεση με την αντίστοιχη διασπορά  $\sigma_{\ddot{x}_0}^2$  ή  $\sigma_{\ddot{x}_2}^2$  αποτελεί φυσικό παράγοντα βαθμονόμησης. Επειδή, παρόλο που για υπολογιστικούς σκοπούς έγινε παραδοχή για γραμμικότητα στο πλαίσιο των εντάσεων και

<sup>10</sup> Η γενική σχέση για το σφάλμα ορίζεται ως  $MSE = E((y(t) - \hat{y}(t|P))^2)$

συχνοτήτων που εκτέθηκαν οι χειριστές στο εργαστήριο, η σχέση του  $MSE_{sum}$  δεν είναι γραμμική. Για την επιλογή των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το ολικό άθροισμα του μέσου όρου του τετραγώνου του σφάλματος MSE, για σκοπούς του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, τέθηκαν όρια έτσι ώστε να πληρείται ο κάτωθι περιορισμός:

$$\underline{P}_{min}^0 \leq \underline{P} \leq \underline{P}_{max}^0 \quad (48)$$

Στόχος είναι λοιπόν η εύρεση του διανύσματος  $\underline{P}$ , εντός συγκεκριμένων ορίων, το οποίο ελαχιστοποιεί το άθροισμα του μέσου όρου του τετραγώνου του σφάλματος στη βάση και στο κεφάλι.

Για τον καθορισμό των ορίων του διανύσματος  $\underline{P}$  λήφθηκε υπόψη ότι οι επιμέρους μάζες  $m_0, m_1, m_2$  και  $m_3$  πρέπει να αθροίζονται στο σύνολο της μάζας του κάθε χειριστή  $m$ , δηλαδή:

$$m = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 \quad (49)$$

Επίσης, λήφθηκαν υπόψη οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου του ISO 5982: 2001 [25] οι οποίες αποτελούσαν το διάνυσμα παραμέτρων  $\underline{P}^0$ . Τα όρια  $\underline{P}_{min}^0$  και  $\underline{P}_{max}^0$  επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το 10% και 1000% των τιμών εκάστου στοιχείου του διανύσματος  $\underline{P}^0$ .

#### 7.1.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της μέσης τιμής των τετραγώνων του σφάλματος

Στη συνέχεια έγινε χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του ολικού αθροίσματος του μέσου όρου του τετραγώνου του σφάλματος  $MSE_{sum}$ . Από τις μεθόδους βελτιστοποίησης, η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης είναι μια ευρετική (heuristic) μέθοδος [62] ικανή να δημιουργήσει έναν αλγόριθμο ο οποίος μπορεί εύρωστα και γρήγορα να επιλέγει παραμέτρους και να βελτιστοποιεί το αποτέλεσμα. Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική στη συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης διότι [63]:

- Η σχέση (47) δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι διαθέτει ένα μόνο γενικό ελάχιστο. Οι απαραίτητες και επαρκείς προϋποθέσεις για την ύπαρξη ενός ελάχιστου να μπορούν να πληρωθούν για διάφορα διανύσματα παραμέτρων  $\underline{P}$  [62]. Αυτό συμβαίνει επειδή ενδεχομένως υπάρχουν πολλά ελάχιστα που να είναι ικανά να προσελκύσουν τη λύση προς αυτά ανάλογα με την αρχική κατάσταση, απαιτείται η χρήση επαναληπτικής μεθόδου βελτιστοποίησης που να λαμβάνει υπόψη τις πληροφορίες

για τοπικά ελάχιστα του ολικού αθροίσματος του μέσου όρου του τετραγώνου του σφάλματος  $MSE_{sum}$  και να μην παγιδεύεται σε αυτά, ιδιαίτερα όταν υπάρχει αβεβαιότητα για την ύπαρξη απότομων κλίσεων (πρώτη παράγωγος) και κυρτώσεων (δεύτερη παράγωγος) της υπό βελτιστοποίηση συνάρτησης.

- Επιτρέπει τον παράλληλο υπολογισμό βελτιώνοντας την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου.
- Είναι εύκολος στη χρήση του και μπορεί να λειτουργήσει με την επιλογή τριών μόνο παραμέτρων ελέγχου (παράγραφος 7.1.7).
- Παρουσιάζει καλά αποτελέσματα σύγκλισης προς το τοπικό ελάχιστο.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που εξελέχθηκε από τον Α. Κυπριανού [64] και περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση της διαφορικής εξέλιξης εφαρμόζοντας το σκεπτικό της μεθόδου Simplex των Nelder και Mead για την απόκτηση πληροφορίας από το διανυσματικό πληθυσμό για να τη συνδυάσει με εξελικτικές μεθόδους παρόμοιες με τους μηχανισμούς της γενετικής.

Επειδή η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης δεν παρέχει μηχανισμό για τον περιορισμό των παραμέτρων στο πλαίσιο που ορίστηκε με τη σχέση (48) εισήχθηκε τιμωριστική συνάρτηση (penalty function)  $\Pi$ . Αυτή η συνάρτηση έδινε επιπρόσθετες τιμές στη συνάρτηση  $MSE_{sum}$  κάθε φορά που οι παράμετροι  $\underline{P}$  έβγαιναν από τα όρια της σχέσης (48). Επίσης προστέθηκε και όρος που περιλαμβάνει τη σχέση (49) που αφορά τον περιορισμό του αθροίσματος των επιμέρους μαζών ο οποίος ελέγχθηκε ότι ισχύει μετά από έλεγχο των αποτελεσμάτων.

$$\Pi = \begin{cases} 10 * \left\{ \left( \frac{P_{i_{min}} - P_i}{P_{i_{min}}} \right)^2 + [m - (m_0 + m_1 + m_2 + m_3)]^2 \right\} & \text{για } P_i < P_{i_{min}} \\ 0 & \text{για } P_{i_{min}} < P_i < P_{i_{max}} \\ 10 * \left\{ \left( \frac{P_{i_{max}} - P_i}{P_{i_{max}}} \right)^2 + [m - (m_0 + m_1 + m_2 + m_3)]^2 \right\} & \text{για } P_i > P_{i_{max}} \end{cases} \quad (50)$$

Η πιο πάνω συνάρτηση παρέχει το πλεονέκτημα των συνοριακών συνθηκών με συνέχεια, έτσι ώστε να μην επιβαρύνει τη βελτιστοποίηση με ασυνέχειες. Επίσης, όσο περισσότερο απομακρύνονται οι παράμετροι από τις επιθυμητές τους τιμές, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τιμωριστικής συνάρτησης. Επομένως, με τη χρήση της πιο πάνω συνάρτησης επιδιώκεται μεν να επιτρέπεται η απομάκρυνση των τιμών από τα επιθυμητά όρια κατά τη βελτιστοποίηση, διαφυλάσσοντας όμως την επιλογή θετικών τιμών για τις μάζες και αυξάνοντας στο τετράγωνο την τιμωριστική συνάρτηση για τις τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται στη βελτιστοποίηση και απομακρύνονται από τα όρια.

Από τα πιο πάνω συνεπάγεται ότι η συνάρτηση σφάλματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Er = MSE_{sum} + \Pi \quad (51)$$

### 7.1.6 Διαφορική εξέλιξη

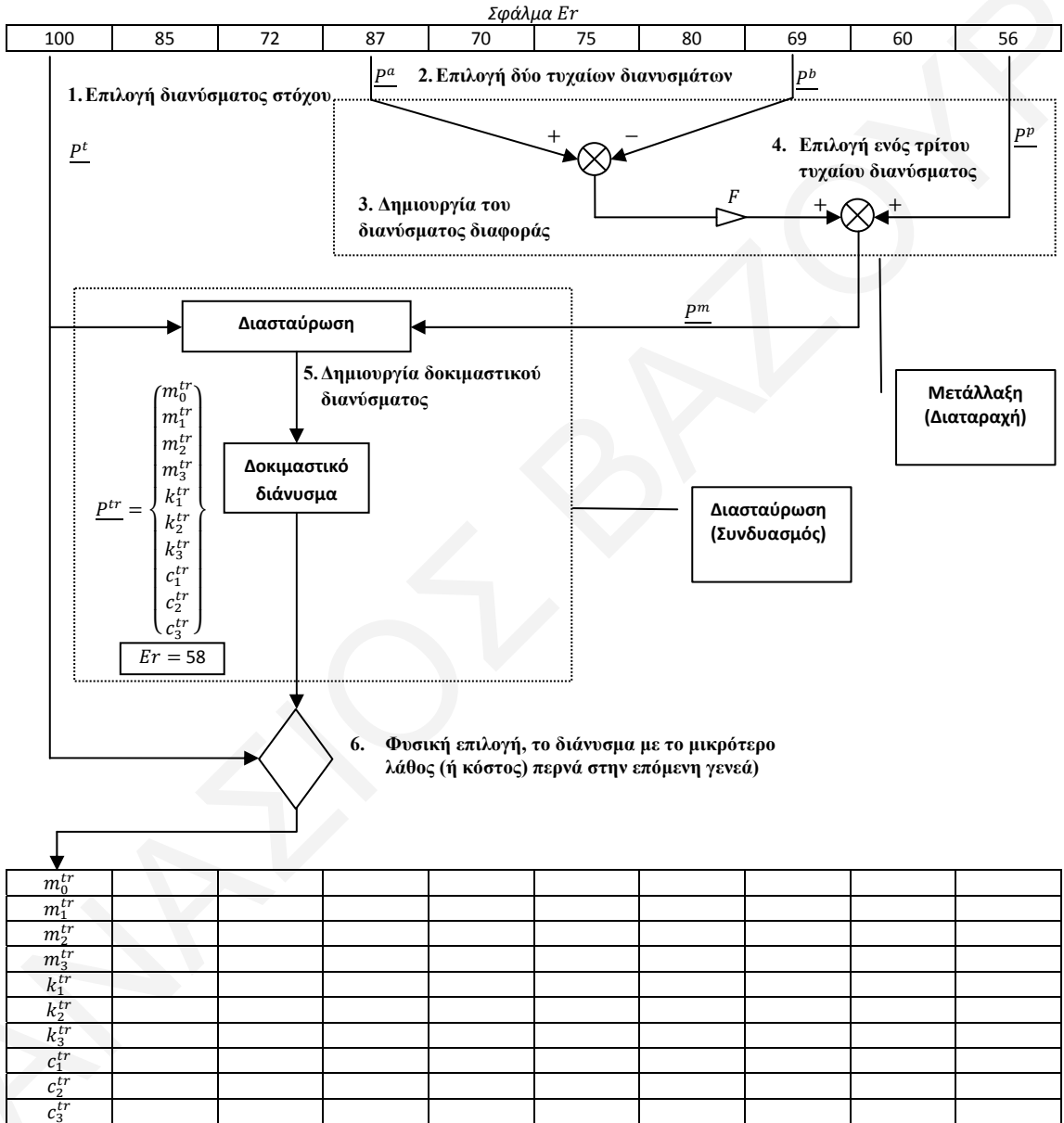
Η διαφορική εξέλιξη είναι όμοια με τους συμβατικούς γενετικούς αλγόριθμους. Η κύρια διαφορά είναι στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μετάλλαξη ή διασταύρωση χρησιμοποιώντας πραγματικούς αριθμούς κινητής υποδιαστολής και όχι μακριές σειρές από μηδενικά και μονάδες. Στην πραγματικότητα το σκεπτικό της μετάλλαξης ενός διανύσματος με τη διαφορά δύο άλλων διανυσμάτων παραμέτρων προέρχεται από τη μέθοδο Simplex των Nelder και Mead [64]. Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας της διαφορικής εξέλιξης και η γραφική της αναπαράσταση στο Σχήμα 62.

Η διαδικασία για κάθε βελτιστοποίηση ξεκινούσε με τη δημιουργία ενός συνόλου 54 διανυσμάτων παραμέτρων  $\underline{P}$  οι οποίες προέρχονταν από συναρτήσεις κανονικής κατανομής. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλιζόταν ότι τα διανύσματα παραμέτρων θα επιλέγονταν από το σύνολο του χώρου των διανυσμάτων που ορίστηκε από την σχέση (48). Από αυτόν τον αρχικό πληθυσμό, με την βοήθεια των μηχανισμών της διαφορικής εξέλιξης προέκυπτε ένας νέος πληθυσμός με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (μία νέα «γενιά»).

Ο αλγόριθμος ξεκινά με μια αρχική δεξαμενή από 54 διανύσματα  $\underline{P}$  με δέκα διαστάσεις τα οποία προκύπτουν από ομοιόμορφες κατανομές πιθανότητας. Κάθε ένα διάνυσμα είχε 10 τιμές,  $m_0, m_1, m_2, m_3, k_1, k_2, k_3, c_1, c_2, c_3$  για τις παραμέτρους του συστήματος 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας. Η ομοιόμορφη πυκνότητα πιθανότητα διασφαλίζει ότι τα διανύσματα παραμέτρων που θα δημιουργηθούν θα απλωθούν ομοιόμορφα στο χώρο των παραμέτρων που ορίζεται από τη σχέση (48). Η αρχική δεξαμενή είναι ο αρχικός πληθυσμός από τον οποίο ξεκινά η όλη διαδικασία της εξέλιξης.

Στο Σχήμα 62 υπάρχουν δύο πίνακες με μέγεθος 54x10 που αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικές γενεές διανυσμάτων παραμέτρων. Ο πίνακας στο πάνω μέρος του σχήματος ενεργεί ως η γενεά της οποίας τα μέλη θα εξελιχθούν σύμφωνα με τους μηχανισμούς της διαφορικής εξέλιξης. Ως αποτέλεσμα κάθε νέο μέλος που εξελίσσεται θα καταλαμβάνει μια θέση στον πίνακα στο κάτω μέρος του σχήματος σύμφωνα με τη θέση που κατείχε ο προκάτοχός του στον προηγούμενο πίνακα.

$p^1$	$p^2$	$p^3$	$p^4$	$p^5$	$p^6$	$p^7$	$p^8$	.....	$p^{54}$
$m_0^1$	$m_0^2$	$m_0^3$	$m_0^4$	$m_0^5$	$m_0^6$	$m_0^7$	$m_0^8$	.....	$m_0^{54}$
$m_1^1$	$m_1^2$	$m_1^3$	$m_1^4$	$m_1^5$	$m_1^6$	$m_1^7$	$m_1^8$	.....	$m_1^{54}$
$m_2^1$	$m_2^2$	$m_2^3$	$m_2^4$	$m_2^5$	$m_2^6$	$m_2^7$	$m_2^8$	.....	$m_2^{54}$
$m_3^1$	$m_3^2$	$m_3^3$	$m_3^4$	$m_3^5$	$m_3^6$	$m_3^7$	$m_3^8$	.....	$m_3^{54}$
$k_1^1$	$k_1^2$	$k_1^3$	$k_1^4$	$k_1^5$	$k_1^6$	$k_1^7$	$k_1^8$	.....	$k_1^{54}$
$k_2^1$	$k_2^2$	$k_2^3$	$k_2^4$	$k_2^5$	$k_2^6$	$k_2^7$	$k_2^8$	.....	$k_2^{54}$
$k_3^1$	$k_3^2$	$k_3^3$	$k_3^4$	$k_3^5$	$k_3^6$	$k_3^7$	$k_3^8$	.....	$k_3^{54}$
$c_1^1$	$c_1^2$	$c_1^3$	$c_1^4$	$c_1^5$	$c_1^6$	$c_1^7$	$c_1^8$	.....	$c_1^{54}$
$c_2^1$	$c_2^2$	$c_2^3$	$c_2^4$	$c_2^5$	$c_2^6$	$c_2^7$	$c_2^8$	.....	$c_2^{54}$
$c_3^1$	$c_3^2$	$c_3^3$	$c_3^4$	$c_3^5$	$c_3^6$	$c_3^7$	$c_3^8$	.....	$c_3^{54}$



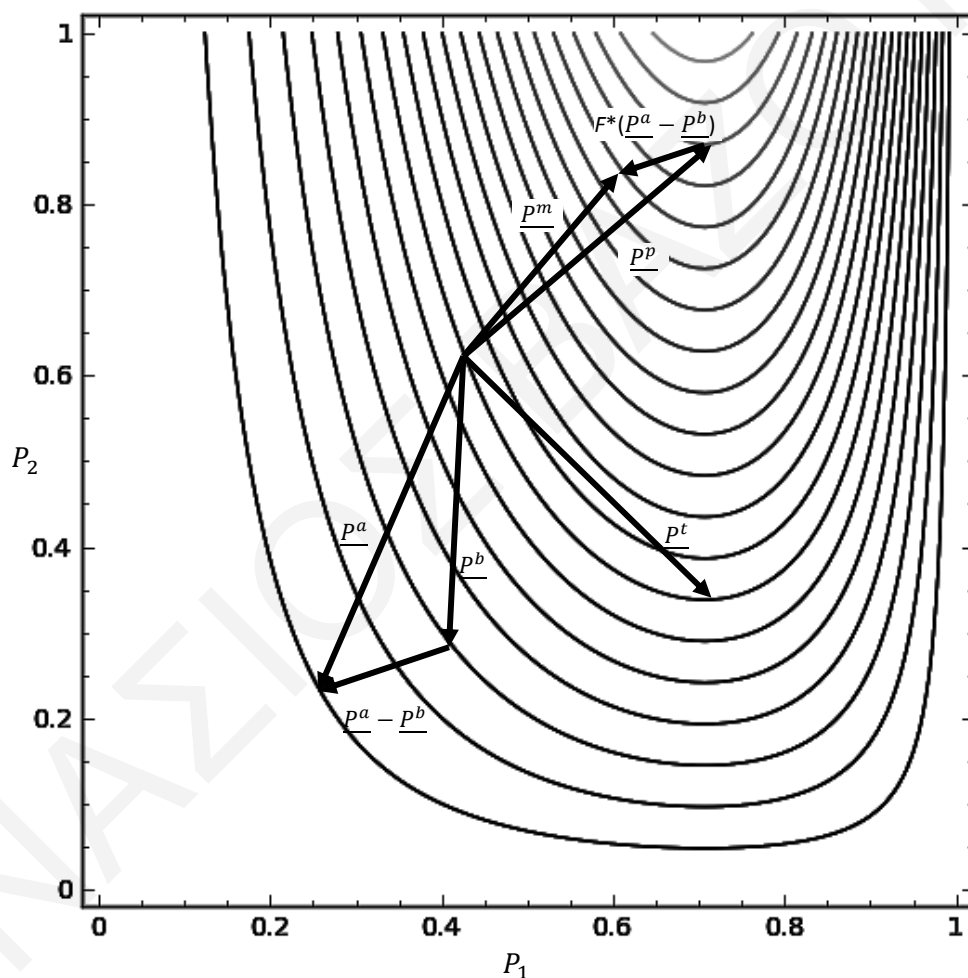
Σχήμα 62: Σχηματική παρουσίαση της διαφορικής εξέλιξης

Είναι λοιπόν εμφανές ότι το διάνυσμα  $P^1$  στο αριστερό μέρος του σχήματος θα εξελιχθεί στο διάνυσμα  $P^{tr}$  και θα καταλάβει την αριστερή θέση στον πίνακα στο κάτω μέρος του σχήματος. Η παράλληλη εφαρμογή της διαφορικής εξέλιξης στα υπόλοιπα μέλη του πίνακα του



πάνω μέρος του σχήματος δημιουργεί τους υπόλοιπους απογόνους που γεμίζουν τα κενά του πίνακα στο κάτω μέρος του σχήματος. Οι τιμές του σφάλματος εμφανίζονται στις αντίστοιχες σειρές στο κάτω μέρος των πινάκων. Ανάμεσα στον πάνω και στον κάτω πίνακα απεικονίζεται η διαδικασία της διαφορικής εξέλιξης.

Από το σύνολο των αρχικών διανυσμάτων επιλέγεται ένα διάνυσμα  $\underline{P}^t$  για βελτιστοποίηση το οποίο χαρακτηρίζεται ως διάνυσμα στόχου. Πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα βήματα της διαφορικής εξέλιξης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 62 εφαρμόζονται παράλληλα στον πάνω πίνακα κατά τη διάρκεια ενός βήματος της διαφορικής εξέλιξης.



Σχήμα 63: Διαδικασία μετάλλαξης στη διαφορική εξέλιξη

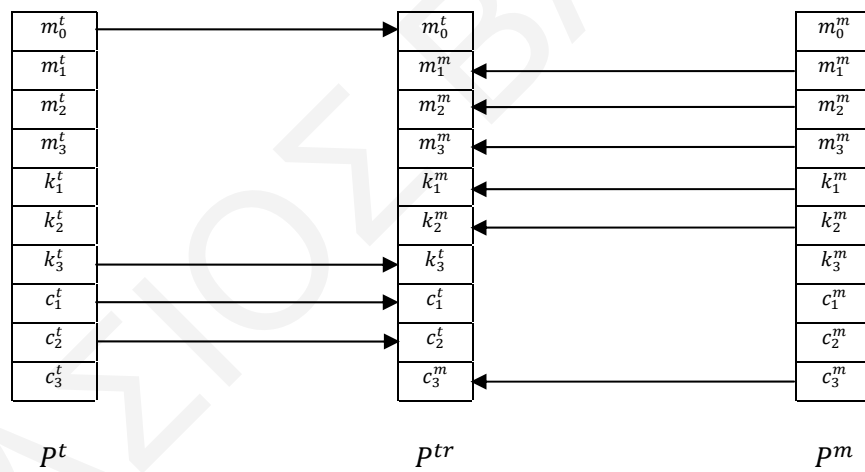
Ακολουθως δύο τυχαία διανύσματα του συνόλου των αρχικών διανυσμάτων  $\underline{P}^a$  και  $\underline{P}^b$  «μεταλλάσσονται»<sup>11</sup> δημιουργώντας ένα διάνυσμα  $\underline{P}^m$  το οποίο προκύπτει από τη διαφορά των  $\underline{P}^a$

<sup>11</sup> Η διαδικασία περιγράφεται στο πιο πάνω σχήμα ως «2.Επιλογή δύο τυχαίων διανυσμάτων», «3.Δημιουργία του διανύσματος διαφοράς» και «4.Επιλογή ενός τρίτου τυχαίου διανύσματος».

και  $\underline{P}^b$  σταθμισμένη με τον παράγοντα F. Τα διανύσματα  $\underline{P}^a$  και  $\underline{P}^b$  δεν πρέπει να είναι το διάνυσμα στόχος  $\underline{P}^t$  ούτε το τρίτο τυχαίο προς μετάλλαξη διάνυσμα  $\underline{P}^p$ . Παρότι στο Σχήμα 62 η διαδικασία μετάλλαξης παρουσιάζεται μέσα στο διαγραμματισμένο κουτί, στο Σχήμα 63 υπάρχει μία οπτική απεικόνιση της διαδικασίας μετάλλαξης με διανύσματα δύο διαστάσεων.

Η επόμενη διαδικασία της διαφορικής εξέλιξης, μετά τη μετάλλαξη είναι η διασταύρωση. Σε αυτή τη διαδικασία το μεταλλαγμένο διάνυσμα  $\underline{P}^m$  διασταυρώνεται με το διάνυσμα στόχου  $\underline{P}^t$  με σκοπό τη δημιουργία ενός δοκιμαστικού διανύσματος  $\underline{P}^{tr}$ . Το νέο δοκιμαστικό διάνυσμα  $\underline{P}^{tr}$  είναι το «παιδί» των «γονέων»  $\underline{P}^a$  και  $\underline{P}^b$  και οι τιμές m, k, c είναι τα «γονίδια» του μηχανισμού του γενετικού αλγόριθμου.

Σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος της διαφορικής εξέλιξης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το παιδί δημιουργείται από τα γονίδια των γονέων του. Στο Σχήμα 62, η διασταύρωση παρουσιάζεται μέσα στις διακεκομμένες γραμμές και χαρακτηρίζεται ως «δημιουργία δοκιμαστικού διανύσματος». Το Σχήμα 64 παρουσιάζει τη διασταύρωση.



Σχήμα 64: Η διαδικασία διασταύρωσης της διαφορικής εξέλιξης

Η πιθανότητα που κυβερνάει την κληρονομικότητα των παραμέτρων για το διάνυσμα  $\underline{P}^{tr}$  καθορίζεται από τον λόγο διασταύρωσης CR. Με την επιλογή της βέλτιστης τιμής του CR επιτυγχάνεται η ισορροπία μεταξύ του γεγονότος από τη μία ότι το δοκιμαστικό διάνυσμα πρέπει να παίρνει γονίδια και από τους δύο γονείς, ώστε να μην καταλήξει το αποτέλεσμα σε ένα τοπικό ελάχιστο αλλά σε ένα γενικό βέλτιστο αποτέλεσμα. Από την άλλη δεν θα πρέπει να απομακρύνεται πολύ από το διάνυσμα  $\underline{P}^t$  διότι καθυστερεί τη διαδικασία της βελτιστοποίησης επειδή τα χαρακτηριστικά του διανύσματος  $\underline{P}^{tr}$  διαφοροποιούνται σημαντικά από αυτά του  $\underline{P}^t$ .

Μετά τη δημιουργία του διανύσματος  $P^{tr}$  γίνεται υπολογισμός της συνάρτησης σφάλματος και γίνεται σύγκριση με το σφάλμα που προκύπτει από το διάνυσμα  $P^t$ . Εάν η συνάρτηση σφάλματος του διανύσματος  $P^{tr}$  είναι μικρότερη από αυτή του διανύσματος  $P^t$  τότε επιλέγεται το διάνυσμα  $P^{tr}$  για να προχωρήσει στην επόμενη γενιά. Σε αντίθετη περίπτωση το διάνυσμα  $P^{tr}$  παραμένει στην ίδια θέση στον πίνακα των 54 διανυσμάτων της νέας γενιάς που δημιουργείται.

Η σύγκριση μεταξύ του σφάλματος του δοκιμαστικού διανύσματος και του διανύσματος στόχου είναι γνωστή ως φυσική επιλογή και είναι το βήμα 6 με τίτλο «φυσική επιλογή» στο Σχήμα 62.

Η πιο πάνω διαδικασία, όπως προαναφέρθηκε, επαναλαμβάνεται παράλληλα 54 φορές. Μετά το τέλος κάθε βήματος η νέα βελτιωμένη γενιά στο κάτω μέρος του πίνακα περνά στο πάνω μέρος του πίνακα με σκοπό να δώσει τους δικούς της απογόνους στο επόμενο βήμα και από την αρχική γενιά προκύπτει μια νέα που μέσω μεταλλάξεων και διασταυρώσεων με τα υπόλοιπα διανύσματα της προηγούμενης γενιάς έχει βελτιωμένες ή τουλάχιστον τις ίδιες τιμές στη συνάρτηση σφάλματος  $E_r$  για κάθε ένα από τα διανύσματά της.

#### 7.1.7 Παράμετροι ελέγχου της διαφορικής εξέλιξης

Μόνο τρεις παράμετροι ελέγχουν την αποτελεσματικότητα της διαφορικής εξέλιξης. Αυτοί είναι ο παράγοντας στάθμισης  $F$  (Σχήμα 62), το μέγεθος του πληθυσμού (Σχήμα 61) και ο λόγος διασταύρωσης  $CR$  (Σχήμα 64).

Σε ότι αφορά τον παράγοντα στάθμισης  $F$ , για να εξηγηθεί η σημασία του πρέπει να ελεγχθεί η επίδρασή του στη διαδικασία μετάλλαξης σε συνάρτηση με το μέγεθος του πληθυσμού. Εάν ληφθεί ένας πληθυσμός διανυσμάτων παραμέτρων με διάσταση λ.χ.  $N$ , τότε από τις διαφορές των διανυσμάτων, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός  $N * (N - 1)$  ο οποίος σχετίζεται αποκλειστικά με τον πληθυσμό  $N$ . Δηλαδή πρόκειται για τον πληθυσμό των διαφορών των διανυσμάτων σταθμισμένων με τον παράγοντα στάθμισης  $F$ . Επειδή ο νέος πληθυσμός είναι πεπερασμένος, βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένα όρια σε ότι αφορά το μέγεθος του, δηλαδή ανάμεσα στο μικρότερο και στο μεγαλύτερο. Η διαδικασία της μετάλλαξης παίρνει ένα διάνυσμα από τον πληθυσμό της σταθμισμένης διαφοράς και το προσθέτει σε ένα μέλος του κανονικού πληθυσμού. Ταυτόχρονα το μέγιστο και ελάχιστο διάνυσμα καθορίζουν το εύρος της έρευνας γύρω από κάθε μέλος του πληθυσμού. Το μέγεθος του παράγοντα στάθμισης  $F$  καθορίζει το μέγεθος αυτού του εύρους. Δηλαδή, ο παράγοντας στάθμισης  $F$  σταθμίζει τη διαφορά μεταξύ δύο διανυσμάτων παραμέτρων του πληθυσμού. Αυτή η διαδικασία μετάλλαξης εφαρμόζεται στο τρίτο

τυχαίο διάνυσμα. Η τιμή του παράγοντα στάθμισης  $F$  πρέπει σε κάποιο βαθμό να αντικατοπτρίζει την κυρτότητα στο τοπικό ελάχιστο γιατί αυτός ο μηχανισμός οδηγεί στο ελάχιστο, αν ο μηχανισμός της διασταύρωσης αποτύχει να εντοπίσει μια περισσότερο υποσχόμενη περιοχή μέσα στον παραμετρικό χώρο. Ως συντηρητική στρατηγική για τον παράγοντα  $F$  προτείνεται η τιμή 0,9 [64].

Το μέγεθος του πληθυσμού πρέπει να είναι μεταξύ 5 και 10 φορές ο αριθμός των παραμέτρων όπως περιγράφεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολούθησαν οι R. Storn και K. Price [65], για αυτό το λόγο επιλέχθηκε στη διαδικασία βελτιστοποίησης με μέγεθος πληθυσμού 54 (δηλαδή  $10 \times 5,4$ ).

Η τελευταία παράμετρος που ελέγχει τη διαφορική εξέλιξη είναι ο λόγος διασταύρωσης CR. Αυτός ο λόγος ρυθμίζει δύο συνυπάρχοντα, αμοιβαία αποκλειόμενα γεγονότα. Το πρώτο γεγονός είναι ότι μια συγκεκριμένη παράμετρος προέρχεται από τον ένα γονέα με πιθανότητα CR:1 ενώ το δεύτερο γεγονός είναι η ίδια παράμετρος να ληφθεί από έναν άλλο γονέα με πιθανότητα  $(1-CR):1$ . Είναι προφανές ότι το παιδί δεν μπορεί να λάβει τη συγκεκριμένη παράμετρο και από τους δύο γονείς. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος διασταύρωσης CR, τόσο ταχύτερη είναι η σύγκλιση αλλά είναι και πιο πιθανό να παγιδευτεί η διαδικασία σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Αυτό συμβαίνει επειδή το δοκιμαστικό διάνυσμα παραμέτρων παίρνει τις περισσότερες τιμές των παραμέτρων του από το διάνυσμα στόχος, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τη μετάλλαξη. Γι'αυτό, κάθε νέα παράμετρος που δημιουργείται είναι κατά κάποιον τρόπο όμοια με τον «πρόγονό» της. Έτσι η όλη διαδικασία θα φτάσει σε ένα σημείο όπου κάθε νέα γενιά θα είναι ακριβώς η ίδια με την προηγούμενη, παράγοντας ένα τοπικό ελάχιστο. Για το λόγο αυτό, ο συντελεστής CR πρέπει να είναι αρκετά μικρός για να μπορεί να λαμβάνει νέα χαρακτηριστικά που προέρχονται από το παραλλαγμένο διάνυσμα. Από την άλλη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να διατηρεί την υπάρχουσα κληρονομιά και με αυτό τον τρόπο να εξαντλεί τις δυνατότητες σε μια συγκεκριμένη περιοχή του παραμετρικού χώρου. Η χρήση ενός πληθυσμού με διαστάσεις 54 και με μέγεθος διάνυσματος παραμέτρων 10, σημαίνει ότι οι βέλτιστες τιμές για τον λόγο διασταύρωσης CR θα είναι μεταξύ 0,5 και 0,1 [64].

### **7.1.8 Στρατηγική για την εφαρμογή της διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση της απόκρισης του ανθρώπου**

Η εφαρμογή της διαφορικής εξέλιξης στον άνθρωπο περιελάμβανε 200 γενιές βελτιστοποίησης, όμως το αποτέλεσμα δεν βελτιωνόταν ιδιαίτερα μετά από τις 25 πρώτες γενιές. Αυτή η σύγκλιση ήταν τυπική και αναμενόμενη επειδή είχε παρατηρηθεί από τον Α. Κυπριανού [64] για όμοιο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Από τη 200<sup>η</sup> γενιά επιλέχθηκε το διάνυσμα με τη χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης σφάλματος  $Er$ . Ο Α. Κυπριανού [64] έκανε και αναλυτική

περιγραφή διαφορετικών στρατηγικών υπολογισμού του βήματος της μετάλλαξης, καταλήγοντας όμως στο ίδιο αποτέλεσμα βελτιστοποίησης μετά από πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων (200). Η ίδια σύγκλιση παρατηρήθηκε και στην παρούσα μελέτη.

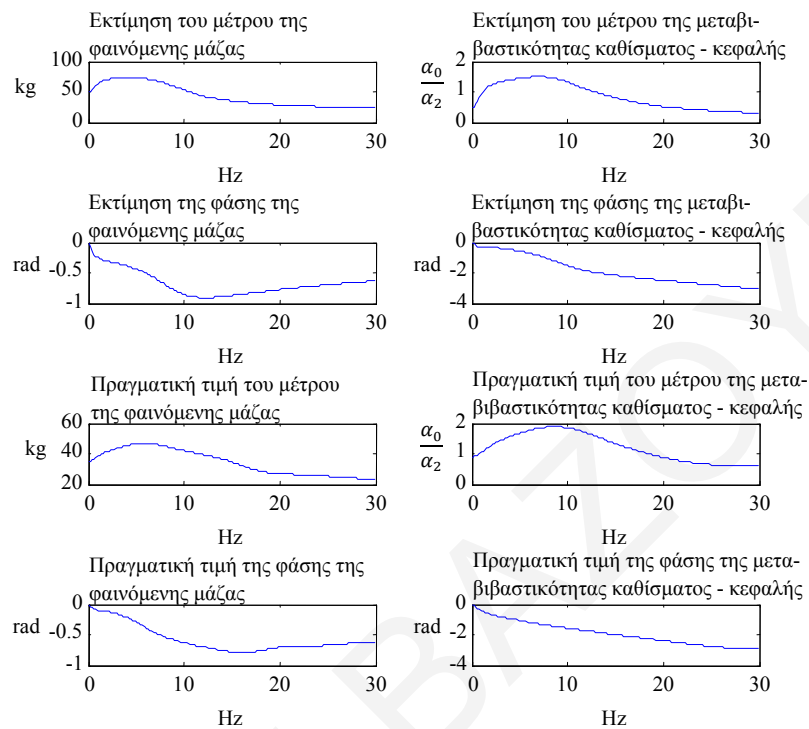
Η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε υποκείμενο σε δύο διαφορετικούς τύπους διέγερσης. Το χρονικό διάστημα της διέγερσης ήταν 30 δευτερόλεπτα και επιλέγηκε ώστε να αφαιρεθούν τα πρώτα και τα τελευταία δευτερόλεπτα. Επίσης, δόθηκε προσοχή ώστε στο διάστημα των 30 δευτερολέπτων να μην υπάρχουν στιγμιαίες εξάρσεις της επιτάχυνσης, οι οποίες θα μπορούσαν να οφείλονται σε ακούσιες κινήσεις των υποκειμένων. Μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου βελτιστοποίησης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε ότι αφορά το μέτρο και την φάση της φαινόμενης μάζας στη βάση και στο κεφάλι, στο πεδίο των συχνοτήτων για συχνότητες μεταξύ 0 και 30 Hz. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 65 για τον χειριστή 29 και παρόμοιας μορφής ήταν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για όλους τους χειριστές και τους δύο τύπους διέγερσης (τυχαίας και ημιτονοειδούς τύπου “sweep sine”).

Σε ότι αφορά τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, αυτές ήταν ιδιαίτερα αυξημένες και απαίτησαν την αποκλειστική χρήση οκταπύρηνου υπολογιστή του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι σε γενικές γραμμές η προσομοίωση έδωσε καλή σύγκλιση σε ότι αφορά τη φαινόμενη μάζα. Η μεταβιβατικότητα καθίσματος – κεφαλής έδωσε σε γενικές γραμμές καλή σύγκλιση για την ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”. Η σύγκλιση της μεταβιβατικότητας καθίσματος κεφαλής για τυχαία διέγερση ήταν αποδεκτή για το διάστημα από 0 έως 15 ή 20 Hz (διάστημα στο οποίο συνήθως επικεντρώνεται το πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] και συνήθως η βιβλιογραφία), σε μερικές περιπτώσεις όμως δεν υπήρξε ικανοποιητική σύγκλιση για το διάστημα από 20 έως 30 Hz. Στο σημείο αυτό πρέπει να υποδειχθεί ότι το κεφάλι έχει 6 βαθμούς ελευθερίας, ενώ η απόκριση μετρήθηκε σε έναν (στον κατακόρυφο), ενώ στη βάση η κατασκευή της πλατφόρμας που εδράζονταν τα υποκείμενα (υπήρχαν εγκατεστημένα τέσσερα αξονικά ρουλεμάν) επέτρεπε την κίνηση μόνο στον κατακόρυφο άξονα. Αυτό επηρέασε και την ποιότητα της μέτρησης. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο κεφάλι σε σχέση πάντα με τη μεταβιβατικότητα είναι συμβατά με αυτά της βιβλιογραφίας (από 0-15 Hz) [44]. Ενδεχομένως, οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν να οφείλονται στην περιορισμένη δυνατότητα του μοντέλου των τριών βαθμών ελευθερίας να προσομοιάσει τη μεταβιβατικότητα στις πραγματικές συνθήκες του πειράματος με τυχαία διέγερση.

Εκτός από τη διαδικασία βελτιστοποίησης της απόκρισης (επιτάχυνση) στη βάση και στο κεφάλι σε σχέση με το μοντέλο του προτύπου ISO 5982: 2001 [25], έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης και στο πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας το μέτρο και τη φάση της φαινόμενης μάζας και της μεταβιβατικότητας καθίσματος κεφαλής, η οποία όμως δεν βελτίωσε

τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων και τελικά δεν συμπεριλήφθηκε στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 65: Ενδεικτική σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματική απόκριση για τον χειριστή 29 για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

## 7.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε σχέση με τις παραμέτρους  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , και τις κανονικοποιημένες<sup>3</sup> ως προς τη μάζα, μάζες  $n.m_0$ ,  $n.m_1$ ,  $n.m_2$ ,  $n.m_3$  φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες.

Ο Πίνακας 3 και ο Πίνακας 4 συνοψίζουν τη στατιστική ανάλυση των παραμέτρων της μοντελοποίησης. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι οι μάζες  $m_0$  και  $m_2$  έχουν μικρότερη τυπική απόκλιση (διασπορά) και τυπικό λάθος (ορίζεται ως η διασπορά διαιρούμενη με την τετραγωνική ρίζα του δείγματος) από τις μάζες  $m_1$  και  $m_3$ . Αυτή είναι μια λογική παρατήρηση διότι οι μάζες  $m_0$  και  $m_2$  βρίσκονται στα σημεία 0 και 2 αντίστοιχα που επιλέγηκαν ως η βάση και το κεφάλι για τη βελτιστοποίηση του σφάλματος. Για τις θέσεις 1 και 3 δεν υπήρχαν μετρήσεις, έτσι ο υπολογισμός των μαζών  $m_1$  και  $m_3$  έγινε ελαχιστοποιώντας την επίδρασή τους στο σφάλμα που μετρήθηκε στα σημεία 0 και 2.

Πίνακας 3: Παράμετροι που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας (ISO 5982: 2001 [25]) με τυχαία διέγερση

Παράμετρος	$k_1$ (N/m)	$k_2$ (N/m)	$k_3$ (N/m)	$c_1$ (kg/m·s)	$c_2$ (kg/m·s)	$c_3$ (kg/m·s)	$n.m_0$	$n.m_1$	$n.m_2$	$n.m_3$
Μέση τιμή	84584	158442	254886	1828	240	2967	4,7	9,9	8,2	77
Μεσαία τιμή	96160	$1,56 \cdot 10^5$	$2,69 \cdot 10^5$	2043	146	3008	4	10,1	7,9	77,5
Διασπορά	$1,3 \cdot 10^9$	$7,5 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	15	50	24	122
Τυπική απόκλιση	35979	86820	147108	1259	409	1264	3,9	7,1	4,9	11
Τυπικό λάθος	5619	13559	22974	197	64	197	0,6	1,1	0,8	1,7
Μικρότερο	3,3	4,8	10,3	3,3	4,8	10,3	0,4	0,2	0,5	56,1
Μεγαλύτερο	136786	408652	510534	4175	1974	7202	15,8	25,4	16,6	98
Άθροισμα	$3,5 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^7$	74958	9836	121627	192	408	338	3162

Πίνακας 4: Παράμετροι που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος σε σύστημα 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας (ISO 5982: 2001 [25]) με ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Παράμετρος	$k_1$ (N/m)	$k_2$ (N/m)	$k_3$ (N/m)	$c_1$ (kg/m·s)	$c_2$ (kg/m·s)	$c_3$ (kg/m·s)	$n.m_0$	$n.m_1$	$n.m_2$	$n.m_3$
Μέση τιμή	63297	207174	183356	2091	421	2628	5,2	18,5	14,7	61,6
Μεσαία τιμή	67660	201873	178851	1892	305	2381	3,4	18,6	14,2	60,9
Διασπορά	$1,6 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^6$	26	100	57	269
Τυπική απόκλιση	39594	99749	119317	1257	435	1563	5,1	10	7,5	16,4
Τυπικό λάθος	6038	15212	18196	192	66	238	0,8	1,5	1,1	2,5
Μικρότερο	142,4	8482	3547	90	19	675	0,3	0,6	0,2	36,3
Μεγαλύτερο	$1,33 \cdot 10^5$	$4,16 \cdot 10^5$	$4,15 \cdot 10^5$	4608	2173	7953	17,7	37,3	28,3	97,7
Άθροισμα	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Μέση τιμή	142	8482	3547	90	19	675	0,3	0,6	0,2	36,3

Επίσης, φαίνεται ότι όλοι οι υπολογιζόμενοι παράμετροι του μοντέλου παρουσιάζουν σημαντική διασπορά. Ιδιαίτερα η απόσβεση  $c_2$  παρουσιάζει τυπική απόκλιση μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου (ισχύει και για τους δύο τύπους διέγερσης), γεγονός που καταδεικνύεται και από το γεγονός ότι αυτή η μεταβλητή ιδιαίτερα παρουσιάζει σημαντική απόκλιση μεταξύ της μεσαίας και της μέσης τιμής.

Από τα πιο πάνω είναι φανερό ότι η μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος έδωσε αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν διασπορά τόσο ανάμεσα στα υποκείμενα, όσο και ανάλογα με τον τύπο της διέγερσης.

Επειδή τα κλασικά εργαλεία της ανάλυσης ιδιομορφών (modal analysis) του λογισμικού LMS βρίσκονται στα όρια τους σε ότι αφορά συστήματα με σημαντική απόσβεση όπως το ανθρώπινο σώμα, δοκιμάστηκε η περιγραφή της απόκρισης μέσω της μοντελοποίησης του σώματος του κάθε χειριστή. Χρησιμοποιήθηκε το πλέον γνωστό μοντέλο του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] και ελαχιστοποιήθηκε το σφάλμα της απόκρισης (επιτάχυνση) στο κεφάλι και στο κάθισμα με αλγόριθμο διαφορικής εξέλιξης.

Στη μεταβιβατικότητα καθίσματος και κεφαλής παρατηρήθηκαν αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές του μοντέλου σε σχέση με τις μετρηθείσες στο εργαστήριο, γεγονός ενδεχομένως που οφείλεται στην περιορισμένη δυνατότητα του μοντέλου των τριών βαθμών ελευθερίας να προσομοιώσει τη μεταβιβατικότητα κυρίως στις πραγματικές συνθήκες του πειράματος με τυχαία διέγερση.

### 7.3 Χαρακτηρισμός απόκρισης σε ελεύθερη ταλάντωση (περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές)

Στις συνήθεις εφαρμογές των ταλαντώσεων, ο λόγος απόσβεσης  $\zeta$  (βλέπε σχέση (7)) είναι μικρότερος της μονάδας με αποτέλεσμα τα συστήματα να είναι υποαποσβεσμένα. Σε αυτή την περίπτωση οι ιδιοτιμές  $s_r$ , δηλαδή οι λύσεις της χαρακτηριστικής εξίσωσης (βλέπε σχέση (68)), είναι συζυγείς μιγαδικοί αριθμοί, και το ίδιο ισχύει και για τα ιδιοδιανύσματα  $X_r$  που προκύπτουν από τη λύση της πιο κάτω σχέσης (52):

$$(s_r^2 \mathbf{M} + s_r \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{X}_r = \{0\} \quad (52)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε τη σχέση (52) με το ανάστροφο διάνυσμα του  $\mathbf{X}_r$  από τα αριστερά, προκύπτει η σχέση (53):

$$s_r^2 \mathbf{X}_r^T \mathbf{M} \mathbf{X}_r + s_r \mathbf{X}_r^T \mathbf{C} \mathbf{X}_r + \mathbf{X}_r^T \mathbf{K} \mathbf{X}_r = 0 \quad (53)$$

Εάν λύσουμε τη σχέση (53) ως προς τις ιδιοτιμές  $s_r$  βρίσκουμε [66]:



$$s_{r_{1,2}} = -\frac{\mathbf{X}_r^T \mathbf{C} \mathbf{X}_r}{2\mathbf{X}_r^T \mathbf{M} \mathbf{X}_r} \pm \sqrt{\frac{(\mathbf{X}_r^T \mathbf{C} \mathbf{X}_r)^2}{(2\mathbf{X}_r^T \mathbf{M} \mathbf{X}_r)^2} - \frac{\mathbf{X}_r^T \mathbf{K} \mathbf{X}_r}{2\mathbf{X}_r^T \mathbf{M} \mathbf{X}_r}} \quad (54)$$

Από τη σχέση (10), προκύπτει ότι

$$s_{r_{1,2}} = -\omega_r \zeta_r \pm \sqrt{\omega_r^2 \zeta_r^2 - \omega_r^2} \quad (55)$$

και από τις σχέσεις (54) και (55),

$$2\zeta_r \omega_r = \frac{\mathbf{X}_r^T \mathbf{C} \mathbf{X}_r}{\mathbf{X}_r^T \mathbf{K} \mathbf{X}_r} \quad (56)$$

$$\omega_r^2 = \frac{\mathbf{X}_r^T \mathbf{K} \mathbf{X}_r}{\mathbf{X}_r^T \mathbf{M} \mathbf{X}_r} \quad (57)$$

Οι πιο πάνω σχέσεις είναι οι σχέσεις ορθογωνιότητας που συνδέουν τα ιδιοδιανύσματα με τις ιδιοσυχνότητες και τους συντελεστές απόσβεσης και είναι προφανές ότι σε περίπτωση υποαποσβεσμένων συστημάτων οι ιδιοσυχνότητες και οι συντελεστές απόσβεσης θα προκύπτουν σε ζευγάρια λόγω των συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών.

### 7.3.1 Περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές – τυπική απόκριση ανθρώπινου σώματος

Αν όλες οι ιδιομορφές έχουν  $\zeta < 1$ , δηλαδή είναι υποαποσβεσμένες, τότε για την ιδιοτιμή  $r$  ισχύει [66]:

$$s_{r_{1,2}} = -\omega_r \zeta_r \pm \omega_r \sqrt{-1} \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (58)$$

Επομένως, η απόκριση του συστήματος  $n$  βαθμών ελευθερίας στη θέση  $j$  εκφράζεται ως:

$$x^j(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\omega_i \zeta_i t} (X_{i1}^j e^{i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}} + X_{i2}^j e^{-i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}}) \quad (59)$$

ή αλλιώς:

$$x^j(t) = \sum_{i=1}^n C_i^j e^{-\omega_i \zeta_i t} (e^{i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}} + e^{-i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}}) \quad (60)$$

Αν όλες οι ιδιομορφές έχουν  $\zeta > 1$ , δηλαδή είναι υπεραποσβεσμένες, και θεωρήσουμε ότι  $\lambda_r = \omega_r^2 \zeta_r^2 - \omega_r^2$ , τότε για την ιδιοτιμή  $r$  από τη σχέση (55) προκύπτει:

$$s_{r_{1,2}} = -\omega_r \zeta_r \pm \sqrt{\omega_r^2 \zeta_r^2 - \omega_r^2} = -\omega_r \zeta_r \pm \lambda_r \quad (61)$$

Επομένως, η απόκριση του συστήματος  $n$  βαθμών ελευθερίας στη θέση  $j$  εκφράζεται ως:

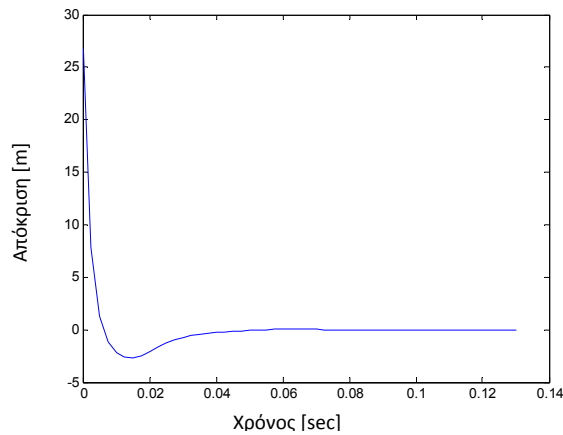
$$x^j(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\omega_i \zeta_i t} (X_{i1}^j e^{\lambda_i t} + X_{i2}^j e^{-\lambda_i t}) = \sum_{i=1}^n C_i^j e^{-\omega_i \zeta_i t} \sinh(\lambda_i t + \theta_i) \quad (62)$$

Σε περίπτωση που το σύστημα διαθέτει κάποιες ιδιομορφές που είναι υπεραποσβεσμένες (μιγαδικές ιδιοτιμές) και κάποιες ιδιομορφές που είναι υποαποσβεσμένες (πραγματικές ιδιοτιμές), όπως είναι άλλωστε και ο κανόνας στην απόκριση του ανθρώπινου σώματος, τότε η απόκριση του συστήματος στη θέση  $j$  δίνεται από τη σχέση:

$$x^j(t) = \sum_{i=1}^m C_i^j e^{-\omega_i \zeta_i t} (e^{i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}} + e^{-i\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}}) + \sum_{i=m+1}^n C_i^j e^{-\omega_i \zeta_i t} \sinh(\lambda_i t + \theta_i) \quad (63)$$

### 7.3.2 Παράδειγμα απόκρισης ανθρώπινου σώματος - υπεραποσβεσμένη ιδιομορφή

Στο Σχήμα 66 παρατίθεται ένα παράδειγμα ελεύθερης απόκρισης για να φανεί η επιρροή της απόσβεσης στην απόκριση. Παρουσιάζεται η απόκριση στη βάση του συστήματος που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] ως προς το χρόνο. Φαίνεται ότι αν το σύστημα αφεθεί ελεύθερο από αρχικές συνθήκες οι οποίες είναι η πρώτη πραγματική ιδιομορφή, τότε ουσιαστικά δεν υπάρχει ταλάντωση και η ηρεμία επιτυγχάνεται μετά από πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ως αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεραπόσβεσης (για τη συγκεκριμένη ιδιομορφή ισχύει  $\zeta > 1$ ).



Σχήμα 66: Ελεύθερη απόκριση του συστήματος τριών βαθμών ελευθερίας που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 από αρχικές συνθήκες της πρώτης πραγματικής ιδιομορφής

Από το πιο πάνω σχήμα και τη σχέση (63) προκύπτει ότι για την υπεραποσβεσμένη ιδιομορφή δεν υπάρχει ουσιαστικά ταλάντωση, επομένως δεν θα είχε ιδιαίτερο νόημα να χρησιμοποιηθούν τα ιδιοδιανύσματα των υπεραποσβεσμένων ιδιομορφών για την παραγωγή ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης από τις σχέσεις (46) και (47) με σκοπό τον υπολογισμό της αβεβαιότητας που θα αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 9.

#### 7.4 Χαρακτηρισμός απόκρισης σε ελεύθερη ταλάντωση (περίπτωση συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές)

Έχοντας περιγράψει την ιδιαιτερότητα που παρουσιάζεται στις περιπτώσεις υπεραποσβεσμένων συστημάτων, παρουσιάζονται κάτωθι τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε ότι αφορά τον υπολογισμό των μέσων τιμών των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης για τους δύο τύπους διέγερσης, όπου ο Πίνακας 5 αντιστοιχεί στην τυχαία διέγερση και ο Πίνακας 6 αντιστοιχεί στην ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.

Πίνακας 5: Οι μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης όπως προέκυψαν από την μοντελοποίηση του σώματος των χειριστών, ανάλογα με τον αριθμό των υποαποσβεσμένων ιδιομορφών για τυχαία διέγερση

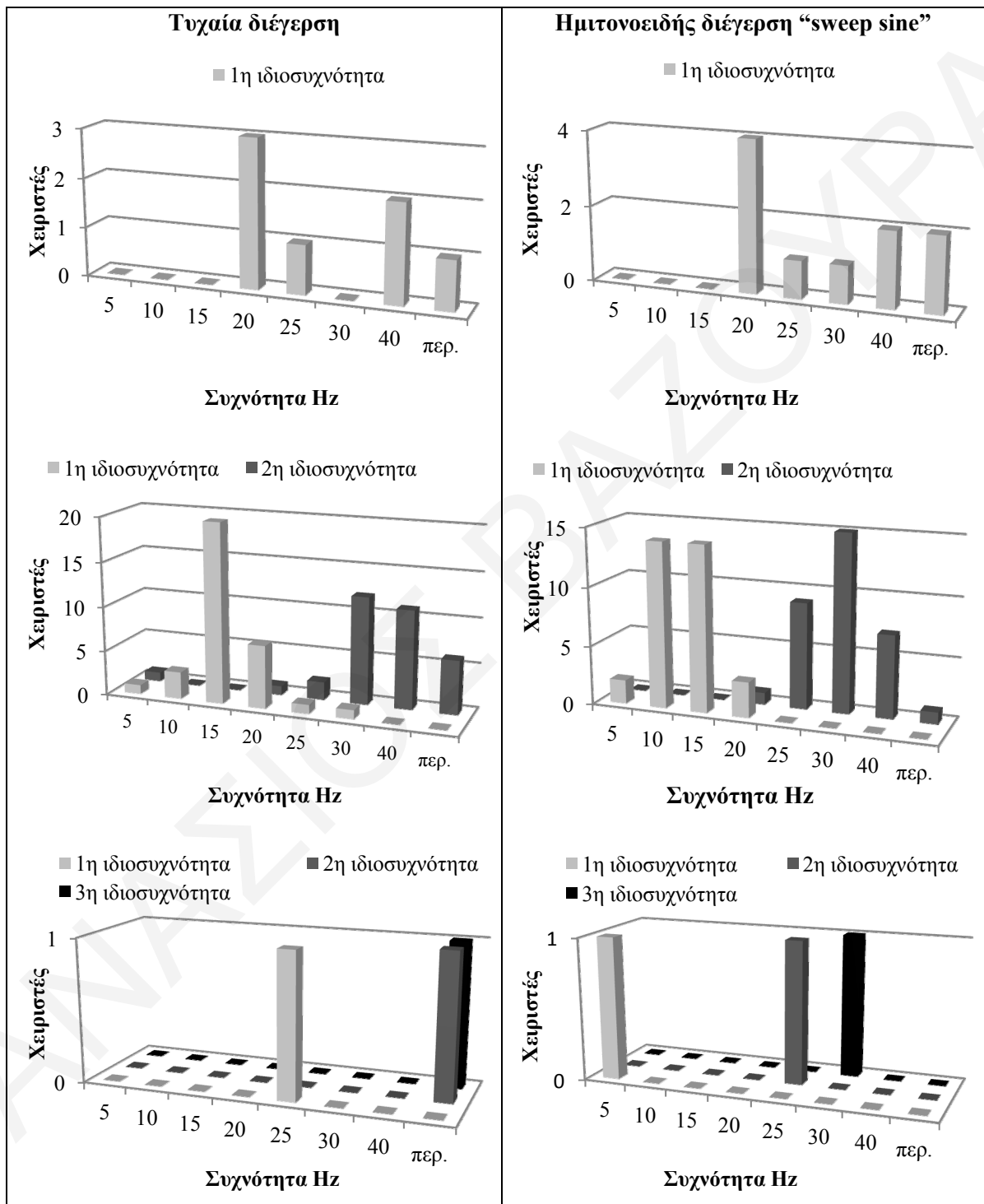
Αριθμός ιδιομορφών (modes) σώματος	Αριθμός χειριστών	Ιδιοσυχνότητες (Hz)			Συντελεστής απόσβεσης ζ		
		1η	2η	3η	1η	2η	3η
1	7	32,2	Υπεραποσβεσμένη	Υπεραποσβεσμένη	0,35	Υπεραποσβεσμένη	Υπεραποσβεσμένη
2	33	13,5	32,2	Υπεραποσβεσμένη	0,48	0,27	Υπεραποσβεσμένη
3	1	25,7	48,9	84,1	0,07	0,8	0,08

Πίνακας 6: Οι μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης προέκυψαν από την μοντελοποίηση του σώματος των χειριστών, ανάλογα με τον αριθμό των ιδιομορφών για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Αριθμός ιδιομορφών (modes) σώματος	Αριθμός χειριστών	ιδιοσυχνότητες (Hz)			Συντελεστής απόσβεσης ζ		
		1η	2η	3η	1η	2η	3η
1	9	34,7	Υπεραποσβεσμένη	Υπεραποσβεσμένη	0,39	Υπεραποσβεσμένη	Υπεραποσβεσμένη
2	34	10,2	27,32	Υπεραποσβεσμένη	0,53	0,26	Υπεραποσβεσμένη
3	1	5,0	25,2	33,6	0,32	0,66	0,04

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.3.2, δεν υπάρχει ιδιαίτερο νόημα για την αναφορά των ιδιοσυχνοτήτων που αντιστοιχούν σε υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές. Επομένως, στους πιο πάνω πίνακες δεν έχει νόημα η αναφορά των υπεραποσβεσμένων ιδιοσυχνοτήτων. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι όταν η ιδιομορφή είναι υπεραποσβεσμένη, τότε αντί για μία, εμφανίζονται δύο ιδιοσυχνότητες ως αποτέλεσμα της ύπαρξης δύο πραγματικών ιδιοτιμών που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιομορφή.

Στο Σχήμα 67 παρουσιάζονται ιστογράμματα με τις ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν από τη μοντελοποίηση ανά συνολικό αριθμό υποαποσβεσμένων ιδιομορφών ανά χειριστή και τύπο διέγερσης.



Σημείωση: περ. σημαίνει περισσότερο

Σχήμα 67: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης ως προς τον συνολικό αριθμό των ιδιομορφών ανά χειριστή, το είδος της διέγερσης και το μέγεθος της ιδιοσυχνότητας εκφρασμένης σε Hz

## 7.5 Συμπεράσματα μοντελοποίησης - βελτιστοποίησης

Η περίπτωση του ανθρώπινου σώματος έχει την ιδιαιτερότητα, συγκρινόμενη με άλλα συστήματα της δυναμικής, της πολύ υψηλής απόσβεσης που παρατηρείται λόγω της φύσης του ανθρώπινου σώματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα στο 20% περίπου του δείγματος να εμφανίζονται μία ή τρεις μιγαδικές ιδιοτιμές (και οι συζυγείς τους), ενώ στο υπόλοιπο δείγμα εμφανιζόταν δύο μιγαδικές ιδιοτιμές (και οι συζυγείς τους). Οι χειριστές οι οποίοι δεν είχαν δύο μιγαδικές ιδιοτιμές (και τις συζυγείς τους) εξαιρέθηκαν από την περαιτέρω ανάλυση για τους εξής δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι επειδή η μοναδική ιδιοτιμή δεν μπορούσε με κάποιο κριτήριο να καταταχθεί στην πρώτη ή δεύτερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος και αξιοποιηθεί περαιτέρω για στατιστικούς υπολογισμούς. Ο δεύτερος λόγος είναι γιατί όπως φαίνεται και στο Σχήμα 66, στην περίπτωση των πραγματικών ριζών δεν υπάρχει ουσιαστικά ταλάντωση και επομένως η σύγκριση πραγματικών ιδιοτιμών στη συγκεκριμένη ιδιομορφή δεν οδηγούσε σε αξιόπιστα αποτελέσματα όταν συγκρίνονταν με αντίστοιχη (δηλαδή πρώτη ή δεύτερη) μιγαδική.

Οι κυριότερες ιδιοσυχνότητες ήταν 13,5 Hz η πρώτη και 32,2 Hz η δεύτερη για τυχαία διέγερση και 10,2 Hz και 27,32 για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” και αφορούσαν τους χειριστές των οποίων τα σώματα παρουσίαζαν μόνο μια υπεραποσβεσμένη ιδιομορφή.

Ενδιαφέρον συμπέρασμα αποτελεί και το γεγονός ότι για τους χειριστές με δύο υποαποσβεσμένες ιδιομορφές, η μέση τιμή της πρώτης ιδιοσυχνότητας είναι 13,5 Hz (τυχαία διέγερση) και 10,2 Hz (ημιτονοειδής διέγερση τύπου “sweep sine”), ενώ η μέση τιμή του συντονισμού της φαινόμενης μάζας βρέθηκε ότι είναι 2,7 Hz και 1,6 Hz αντίστοιχα (παράγραφος 6.3.2). Αυτό δείχνει ακόμα μια φορά (βλέπε παράγραφο 4.4.2) ότι η μέση τιμή της πρώτης ιδιοσυχνότητας του συστήματος και οι μέσες τιμές του μέγιστου του μέτρου της φαινόμενης μάζας είναι διαφορετικά μεγέθη.

Ένα άλλο αποτέλεσμα που απορρέει από τη μοντελοποίηση είναι ότι στο ανθρώπινο σώμα υπάρχει μεγάλη διασπορά των παραμέτρων των μαζών, των συντελεστών απόσβεσης και των συντελεστών δυσκαμψίας. Αυτή πηγάζει τόσο από τη δυναμική του σώματος όσο και από τη στατιστική που προκύπτει από τη σύγκριση διαφορετικών ανθρώπων. Επομένως, σε ότι αφορά την απόκριση των χειριστών παρατηρείται μεγάλη διασπορά των παραμέτρων που οδηγεί σε αυξημένη αβεβαιότητα σε ότι αφορά την απόκριση του σώματός τους σε κραδασμούς. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο επειδή γνωρίζουμε ότι η απόκριση του κάθε ανθρώπου, εκφραζόμενη είτε με τις βιοδυναμικές συναρτήσεις μεταφοράς, είτε λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία της ανάλυσης ιδιομορφών, παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από άνθρωπο σε άνθρωπο (υπό την υπόθεση ότι οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα όπως η στάση του σώματος, η ένταση των κραδασμών, η ύπαρξη πλάτης και υποποδίου παραμένουν σταθεροί).

Στο Κεφάλαιο 9 προτείνεται ένας νέος τρόπος για ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας, ο οποίος εκτός από το ανθρώπινο σώμα, έχει γενικότερη εφαρμογή στη δυναμική των κατασκευών.

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΒΑΖΟΥΡΑΣ

## Κεφάλαιο 8

### Συσχέτιση επαγγελματικής έκθεσης, συχνοτήτων συντονισμού και ιατρικού ιστορικού

#### 8.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα Κεφάλαια έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στο πεδίο, της επίδρασης των κραδασμών στους χειριστές καθώς και υπολογισμός των ιδιομορφών μέσω της μοντελοποίησης. Στο παρόν Κεφάλαιο εξετάζονται αλληλεπιδράσεις και στατιστικές συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν και αφορούν κυρίως την πραγματική ή δυνητική επίδραση των διαφόρων παραγόντων στην υγεία των χειριστών.

Σημειώνεται ότι από τους 52 χειριστές που απάντησαν τα ερωτηματολόγια, 43 προσήλθαν στο εργαστήριο, επομένως η στατιστική ανάλυση που ακολουθεί και αναφέρεται σε συσχετίσεις δεδομένων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο εργαστήριο, περιορίζεται στους 43 χειριστές που προσήλθαν στο εργαστήριο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι στατιστικοί υπολογισμοί του παρόντος και του επόμενου Κεφαλαίου που αναφέρονται στις ιδιοσυχνότητες είναι συνδυασμοί που πηγάζουν από τη σύγκριση των χειριστών οι οποίοι εμφανίζουν δύο ιδιομορφές στο σώμα τους. Επειδή οι περιπτώσεις των χειριστών που παρουσιάζουν μία ή τρεις ιδιομορφές είναι πολύ λιγότερες, δεν παρέχονται επαρκή στοιχεία για στατιστική επεξεργασία γι' αυτό η μελέτη επικεντρώνεται μόνο στα στοιχεία που λήφθηκαν από τους χειριστές, των οποίων το σώμα παρουσίαζε δύο



ιδιοσυχνότητες. Αυτή η προσέγγιση είναι συμβατή και με τις τιμές των παραμέτρων που προτείνονται στο πρότυπο ISO 5982: 2001 [25] διότι με εκείνες τις τιμές η μία από τις τρεις ιδιομορφές ήταν υπεραποσβεσμένη, όπως φαίνεται και στη σχέση (14).

Επίσης, όλα τα σχήματα και οι πίνακες του παρόντος Κεφαλαίου αναφέρονται σε διάστημα συχνοτήτων από 0 έως 20 Hz. Αυτό επιλέχθηκε γιατί συναντάται στις περισσότερες αναφορές της βιβλιογραφίας που παρουσιάζονται αποτελέσματα των βιοδυναμικών συναρτήσεων. Παρόλα αυτά τα συμπεράσματα που λαμβάνονται έχουν ελεγχθεί και ισχύουν και για το διάστημα από 0 έως 30 Hz.

Το όριο που τέθηκε για να διαχωριστούν οι χειριστές χωρίς ενοχλήσεις σε μέση / αυχένα / ώμους ήταν το 5% που παρουσιάζεται στο Σχήμα 44 και η υπέρβαση του ορίου περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις στις οποίες δηλώθηκαν έντονες ενοχλήσεις στο αντίστοιχο μέρος του σώματος κατά το τελευταίο έτος ή /και κατά την τελευταία εβδομάδα οι οποίες συνοδεύονταν από απουσίες στην εργασία ή επίσκεψη σε ιατρό και επιβάρυνση της προσωπικής και κοινωνικής δραστηριότητας. Μετά από έλεγχο των ερωτηματολογίων διαφάνηκε ότι κάτω από το 5 % στην ουσία βρίσκονται όλες οι περιπτώσεις που δεν υπήρχε καμία ενόχληση ή η ενόχληση ήταν πολύ σποραδική.

## **8.2 Συσχέτιση των συχνοτήτων συντονισμού με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση)**

Διερευνήθηκε η συσχέτιση των συχνοτήτων συντονισμού με το ιατρικό ιστορικό και πιο συγκεκριμένα με τις ενοχλήσεις στη μέση. Από τους 43 χειριστές, οι 21 είχαν δηλώσει ότι κατά το τελευταίο έτος ή / και εβδομάδα είχαν προβλήματα με πόνο στη μέση, ενώ οι 22 δεν δήλωσαν κάποια σημαντική ενόχληση στη μέση τους.

Η υπόθεση της συσχέτισης των συντονισμών με την υγεία είναι ότι ο πρώτος συντονισμός (όπως προκύπτει από τις συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας) σε χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση εντοπίζεται σε χαμηλότερες συχνότητες από ότι στους χειριστές που δήλωσαν σημαντικό πόνο στη μέση κατά το τελευταίο έτος. Ο στατιστικός έλεγχος έγινε με μονόπλευρη κατανομή Student σε ζεύγη με την υπόθεση ότι οι μέσοι όροι του πρώτου και δεύτερου συντονισμού είναι μεγαλύτεροι για την ομάδα των χειριστών που παρουσίαζαν προβλήματα με πόνο στη μέση. Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”:

Πίνακας 7: Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους των συχνοτήτων συντονισμού για μια ομάδα 43ων χειριστών μηχανημάτων που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” σε σχέση με τον 1<sup>ο</sup> συντονισμό χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση

Ιδιομορφή (Mode)	1 <sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα
Μέσος όρος χωρίς ενοχλήσεις στη μέση	11,2 Hz
Μέσος όρος χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση	9,2 Hz
Επίπεδο Σημαντικότητας $p$ ( $0,05 > p$ )	0,046

Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι μέσοι όροι της συχνότητας συντονισμού είναι μεγαλύτεροι για τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση (σημαντικό πόνο κατά το τελευταίο έτος) παρά για τους χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση.

*Η υπόθεση αυτή αποτελεί ένδειξη ότι οι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση παρουσιάζουν πιο χαλαρό σώμα. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι συστήματα με υψηλότερη δυσκαμψία παρουσιάζουν τις ιδιοσυχνότητες τους σε ψηλότερες συχνότητες.*

Η πιο πάνω υπόθεση δεν επιβεβαιώθηκε για την περίπτωση της τυχαίας διέγερσης αλλά ούτε και για τη δεύτερη συχνότητα συντονισμού.

### 8.3 Συσχέτιση του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση)

Διερευνήθηκε η συσχέτιση του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας από 0 μέχρι 20 Hz με το ιατρικό ιστορικό και πιο συγκεκριμένα με τις ενοχλήσεις στη μέση.

Η υπόθεση της συσχέτισης είναι ότι ο μέσος όρος του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτερος για τους χειριστές μηχανημάτων οι οποίοι δεν δήλωσαν ενόχληση στη μέση παρά για τους χειριστές που δήλωσαν ενόχληση.

Ο στατιστικός έλεγχος έγινε με μονόπλευρη κατανομή Student σε ζεύγη. Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τυχαία διέγερση.

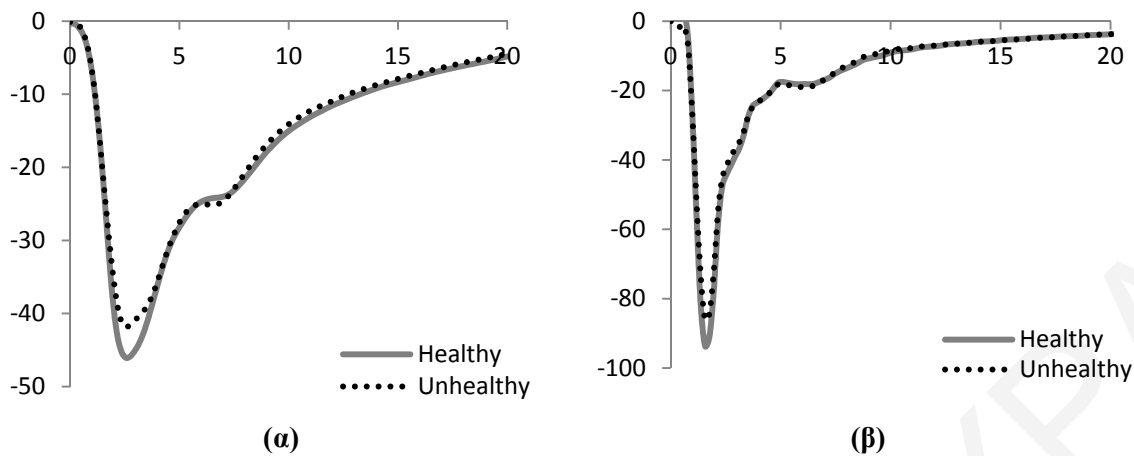
Πίνακας 8: Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση που υποβλήθηκαν σε τυχαία και ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Εμβαδό κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας	Τυχαία διέγερση	Ημιτονοειδής διέγερση τύπου “sweep sine”
Μέσος όρος χωρίς ενοχλήσεις στη μέση	6,64	8,07
Μέσος όρος χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση	5,92	7,30
Επίπεδο Σημαντικότητας $p$ ( $0,05 > p$ )	0,028	0,041

Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι μέσοι όροι του εμβαδού κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας από 0 έως 20 Hz είναι μεγαλύτεροι για τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση (σημαντικό πόνο) παρά για τους χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση. Το πιο πάνω αποτέλεσμα ισχύει και για τους δύο τρόπους διέγερσης.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η επίδραση της απόσβεσης στο ανθρώπινο σώμα, στο Σχήμα 68 παρουσιάζεται το φανταστικό μέρος της φαινόμενης μάζας. Στις γραφικές απεικονίσεις (α) και (β) συγκεκριμένα φαίνεται ότι το φανταστικό μέρος της φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση που οι χειριστές δεν έχουν προβλήματα υγείας στη μέση, παρά στην περίπτωση που οι χειριστές παρουσιάζουν προβλήματα υγείας. Αυτή η παρατήρηση είναι συνεπής και στις δύο περιπτώσεις διέγερσης, δηλαδή τόσο σε τυχαία όσο και σε ημιτονοειδή τύπου “sweep sine”.

Όπως έχει δειχθεί από τη σχέση (31), η φαινόμενη μάζα στο ανθρώπινο σώμα είναι το αντίστροφο της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας FRF. Για ένα βαθμό ελευθερίας από τη σχέση (28) προκύπτει ότι το φανταστικό μέρος της φαινόμενης μάζας εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσβεση [46], δηλαδή ισούται με τον όρο  $-\frac{c}{\omega}$ .



Σχήμα 68: Γραφική απεικόνιση της μέσης τιμής του φανταστικού μέρους της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για (α) τυχαία διέγερση και (β) ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Το υπό εξέταση σύστημα είναι μεν τριών βαθμών ελευθερίας, παρόλα αυτά, δεδομένης της συσχέτισης που παρατηρήθηκε στο εμβαδό της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας, η πιο πάνω ανάλυση παρέχει ενδείξεις ότι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση έχουν μικρότερη απόσβεση στο σώμα τους.

#### 8.4 Συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση)

Διερευνήθηκε η συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας<sup>3</sup> από 0 μέχρι 20 Hz με το ιατρικό ιστορικό και πιο συγκεκριμένα με τις ενοχλήσεις στη μέση.

Η πρώτη υπόθεση της συσχέτισης είναι ότι ο μέσος όρος της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτερος για τους χειριστές μηχανημάτων οι οποίοι δεν δήλωσαν ενόχληση στη μέση παρά για τους χειριστές που δήλωσαν ενόχληση.

Ο στατιστικός έλεγχος έγινε με μονόπλευρη κατανομή Student σε ζεύγη. Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.

Τα αποτελέσματα, όταν η διέγερση είναι ημιτονοειδής τύπου “sweep sine”, υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι μέσοι όροι της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτεροι για τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις (σημαντικό πόνο) στη μέση παρά για τους χειριστές με προβλήματα στη μέση.

Πίνακας 9: Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα 43<sup>ov</sup> χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Μέγιστη κανονικοποιημένη φαινόμενη μάζα	Ημιτονοειδής διέγερση τύπου “sweep sine”
Μέσος όρος χειριστών χωρίς ενοχλήσεις στη μέση	2,11
Μέσος όρος χειριστών με ενοχλήσεις στη μέση	1,76
Επίπεδο Σημαντικότητας p (0,05>p)	0,029

Μεγάλες τιμές για τη μέγιστη κανονικοποιημένη φαινόμενη μάζα συνεπάγονται, όπως φαίνεται από τη σχέση (19) μεγάλες τιμές για τη μεταβιβαστικότητα των τιμών τις επιτάχυνσης σε διάφορα μέρη του σώματος σε σχέση με την επιτάχυνση του καθίσματος.

Όμως το μέτρο της φαινόμενης μάζας επηρεάζεται τόσο από την απόσβεση όσο και από τη δυσκαμψία του συστήματος όπως φαίνεται και από τη σχέση (28). Η πιο πάνω διαπίστωση επιβεβαιώνει τις δύο προηγούμενες διαπιστώσεις ότι *οι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση παρουσιάζουν πιο χαλαρό σώμα και έχουν μικρότερη απόσβεση στο σώμα τους από τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση.*

Η πιο πάνω συσχέτιση, συνεπικουρούμενη από το γεγονός ότι υπήρξε συσχέτιση για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”, της μέγιστης τιμής της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας, του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας, καθώς και της πρώτης συχνότητας συντονισμού της με τις ενοχλήσεις στη μέση, μπορεί να ληφθεί το συμπέρασμα ότι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση διαθέτουν σώμα που έχει πιο μικρή δυσκαμψία και πιο μικρή απόσβεση από ότι οι χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση. Δεν είναι γνωστή η ύπαρξη παρόμοιας διαπίστωσης στη βιβλιογραφία, διότι συνήθως ελέγχονται υποθέσεις που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες συγκεκριμένων τμημάτων (π.χ. των μεσοσπονδύλιων δίσκων) και όχι του σώματος ως σύνολο.

Οι Κ. Χάνου και άλλοι [67] σε ανασκόπηση δημοσιεύσεων σχετικών με τις θεραπευτικές ιδιότητες των κραδασμών αναφέρουν την ύπαρξη «τονωτικού αντανεκλαστικού των κραδασμών ολόκληρου του σώματος», το οποίο αποδίδεται εν μέρει σε συστολή των μυών που, κάτω από προϋποθέσεις αυξάνουν τη δύναμη των μυών. Η ύπαρξη αυτού του αντανεκλαστικού σε υγιείς χειριστές θα μπορούσε να σημαίνει ότι το σώμα τους είναι πιο «σταθερό» ώστε οι μύες να συγκρατούν καλύτερα τη μέση και να μην αποσταθεροποιούνται από τους κραδασμούς. Αυτή η

παρατήρηση συνάδει με τον συσχετισμό του σώματος με μικρή απόσβεση και ελαστικότητα με προβλήματα ενοχλήσεων στη μέση.

Η πιο πάνω υπόθεση που αφορά την μέγιστη κανονικοποιημένη φαινόμενη μάζα δεν επιβεβαιώθηκε για την περίπτωση της τυχαίας διέγερσης.

#### **8.5 Συσχέτιση άλλων παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στη μέση)**

Δεν υπήρξαν ενδείξεις για στατιστικές συσχετίσεις σχετικά με τα προβλήματα υγείας στη μέση με άλλους παράγοντες όπως τα χρόνια εργασίας, η ηλικία, η οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε ένταση των κραδασμών A(8), η δόση των κραδασμών VDV, το βάρος των χειριστών, ο δείκτης BMI (Body Mass Index) και ο αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων.

#### **8.6 Συσχέτιση παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στον αυχένα)**

Δεν υπήρξαν ενδείξεις για στατιστικές συσχετίσεις σχετικά με τα προβλήματα υγείας στον αυχένα με παράγοντες όπως τα χρόνια εργασίας, η ηλικία, η οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε ένταση των κραδασμών A(8), η δόση των κραδασμών VDV, το βάρος των χειριστών και ο δείκτης BMI (Body Mass Index) αλλά και ούτε με το μέγεθος των ιδιοσυχνοτήτων και τον αριθμό αυτών.

#### **8.7 Συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό (ενοχλήσεις στους ώμους)**

Διερευνήθηκε η συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας από 0 μέχρι 20 Hz με το ιατρικό ιστορικό και πιο συγκεκριμένα με τις ενοχλήσεις στους ώμους.

Η υπόθεση της συσχέτισης είναι ότι οι μέσοι όροι της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της είναι μεγαλύτεροι για τους χειριστές μηχανημάτων οι οποίοι δεν δήλωσαν ενοχλήσεις στους ώμους παρά για τους χειριστές που δήλωσαν ενοχλήσεις.

Ο στατιστικός έλεγχος έγινε με μονόπλευρη κατανομή Student σε ζεύγη. Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.

Τα αποτελέσματα, όταν η διέγερση είναι ημιτονοειδής τύπου “sweep sine”, υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι μέσοι όροι της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας

και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτεροι για τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στους ώμους παρά για τους χειριστές με ενοχλήσεις στους ώμους.

Η πιο πάνω υπόθεση δεν επιβεβαιώθηκε για την περίπτωση της τυχαίας διέγερσης.

Πίνακας 10: Στατιστικός έλεγχος Student στους μέσους όρους της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας για μια ομάδα 43ων χειριστών χωρίς και χειριστών με ενοχλήσεις στους ώμους που υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”

Ημιτονοειδής διέγερση τύπου “sweep sine”	Μέγιστη κανονικοποιημένη φαινόμενη μάζα	Εμβαδό κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας
Μέσος όρος χειριστών χωρίς ενοχλήσεις στους ώμους	2,01	7,89
Μέσος όρος χειριστών με ενοχλήσεις στους ώμους	1,6	6,68
Επίπεδο Σημαντικότητας $p$ ( $0,05 > p$ )	0,04	0,033

#### 8.8 Συσχέτιση άλλων παραμέτρων με το ιατρικό ιστορικό (πόνος στους ώμους)

Δεν υπήρξαν ενδείξεις για στατιστικές συσχετίσεις σχετικά με τα προβλήματα υγείας στους ώμους με άλλους παράγοντες όπως τα χρόνια εργασίας, η ηλικία, η οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε ένταση των κραδασμών  $A(8)$ , η δόση των κραδασμών VDV, το βάρος των χειριστών, ο δείκτης BMI (Body Mass Index) και με το μέγεθος των ιδιοσυχνοτήτων και τον αριθμό αυτών.

#### 8.9 Συμπεράσματα συσχετίσεων

Η κατάσταση της υγείας (σε ότι αφορά επιβάρυνση λόγω κραδασμών) των χειριστών συσχετίζεται στατιστικά εν μέρει με τις ιδιοσυχνότητες του σώματος τους. Σε ότι αφορά τις ενοχλήσεις στη μέση (σημαντικό πόνο κατά το τελευταίο έτος) διαφάνηκε ότι ο μέσος όρος της πρώτης ιδιοσυχνότητας για χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση (11,2 Hz) είναι ψηλότερος από ότι για χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση (9,2 Hz) για ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”. Με αυτή τη διαπίστωση παρέχονται ενδείξεις ότι οι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση παρουσιάζουν πιο χαλαρό σώμα.

Η συσχέτιση της μέγιστης κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας με το ιατρικό ιστορικό για τη μέση δείχνει ότι σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” τόσο η μέγιστη κανονικοποιημένη φαινόμενη μάζα, όσο και το εμβαδό της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας είναι μεγαλύτερα για τους χειριστές χωρίς προβλήματα υγείας που θα μπορούσαν να οφείλονται σε επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς.

Τα πιο πάνω αποτελέσματα μαζί με μία σύγκριση του φανταστικού μέρους της φαινόμενης μάζας για χειριστές χωρίς ενοχλήσεις με τους χειριστές με ενοχλήσεις, παρέχουν ενδείξεις ότι οι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση παρουσιάζουν πιο χαλαρό σώμα και έχουν μικρότερη απόσβεση στο σώμα τους από τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη του «τονωτικού αντανακλαστικού των κραδασμών ολόκληρου του σώματος» λόγω της επίδρασης των κραδασμών.

Παρόλο που ελέγχθηκαν βιβλιογραφικές υποθέσεις όπως ο συσχετισμός του βάρους και του συντελεστή “B.M.I.”, της ηλικίας, της οκτάωρης έκθεσης και της συνολικής εργασιακής έκθεσης σε κραδασμούς με την κατάσταση της υγείας στη μέση / αυχένα / ώμους, αυτές οι υποθέσεις δεν επιβεβαιώθηκαν.



## Κεφάλαιο 9

### Υπολογισμός της αβεβαιότητας μεταβλητού συστήματος σε σύγκριση με τιμές που προκύπτουν από το ονομαστικό μοντέλο της ανθρώπινης απόκρισης

#### 9.1 Γενικά

Αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια ότι η μέτρηση της απόκρισης του ανθρώπινου σώματος εμπεριέχει αβεβαιότητα. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι παρόλο που το ανθρώπινο σώμα είναι ονομαστικά όμοιο, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση από άνθρωπο σε άνθρωπο. Επειδή το ανθρώπινο σώμα διαθέτει πολλούς βαθμούς ελευθερίας, η παρατήρηση της απόκρισης μόνο στον άξονα  $z$  αγνοεί κινήσεις που μπορεί να γίνουν σε άλλους άξονες. Επιπρόσθετα δεν είναι γνωστά μοντέλα που να περιγράφουν πλήρως τη δυναμική του σώματος, με αποτέλεσμα με την επιλογή οποιουδήποτε μοντέλου να γίνονται παραδοχές που απομακρύνουν την πραγματική από την θεωρητική απόκριση. Όμως και η επιλογή των υποκειμένων για *in vivo* μετρήσεις θέτει περιορισμούς για το μέγεθος της δόνησης και την εφαρμογή των αισθητήρων μέτρησης της απόκρισης καθώς και για τον αριθμό επανάληψης των μετρήσεων στο ανθρώπινο σώμα.

Η αβεβαιότητα είναι η νοητική κατάσταση ενός παρατηρητή πειράματος, του οποίου το αποτέλεσμα είναι μία από πολλές δυνατές εναλλακτικές. Από την ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 7 διαφάνηκε ότι στο ανθρώπινο σώμα υπάρχει μεγάλη διασπορά των παραμέτρων που πηγάζει τόσο από τη δυναμική (αβέβαιο σύστημα) όσο και από την φυσιολογία (βιολογική αβεβαιότητα). Επίσης, η ύπαρξη μη γραμμικοτήτων (οι οποίες βάσει παραδοχής δεν επιδρούν στα

όρια επιταχύνσεων και εντάσεων που διερευνώνται), η χρήση απλουστευμένων μοντέλων για την περιγραφή ενός εξαιρετικά σύνθετου συστήματος, η απόκριση σε πολλούς βαθμούς ελευθερίας, οι περιορισμοί στη μέτρηση που σχετίζονται με τη θέση των αισθητήρων και την επαφή τους με το σώμα και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη χρήση ανθρώπων ως υποκείμενα για μέτρηση (ηθικοί περιορισμοί και περιορισμοί της πρόσβασης για επανάληψη του πειράματος) αποτελούν παράγοντες που δημιουργούν αβεβαιότητα σε σχέση με το αποτέλεσμα.

Στην προσέγγιση για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας λαμβάνεται υπόψη ότι τα υπό διερεύνηση ανθρώπινα συστήματα υπόκεινται σε κραδασμούς όλου του σώματος σε χαμηλές συχνότητες, όπου οι ιδιοσυχνότητες είναι σχετικά καλά διαχωρισμένες και τα υπό διερεύνηση μεγέθη είναι οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας, οι ιδιομορφές και η απόσβεση. Για τέτοια συστήματα είναι συνήθης πρακτική στη δυναμική των κατασκευών να ακολουθείται η ανάλυση ιδιομορφών [68], όπως ακολουθήθηκε και στην παρούσα μελέτη.

Για την μοντελοποίηση αβέβαιων συστημάτων δυναμικής των κατασκευών προτείνεται το σκεπτικό του πίνακα πυκνότητας. Οι ιδιομορφές θεωρούνται ότι είναι οι παρατηρούμενες μεταβλητές του συστήματος και δημιουργώντας παραλληλισμούς με την κβαντική μηχανική, η προσέγγιση οδηγεί στην πρόβλεψη των μέσων τιμών και της διασποράς των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης. Ο πίνακας πυκνότητας ορίζεται ως το γινόμενο των κανονικοποιημένων στη μονάδα ιδιοδιανυσμάτων με τον ανάστροφο τους. Οι μέσοι όροι των πινάκων πυκνότητας, για κάθε ιδιομορφή του συστήματος (που προέρχονται από τον μέσο όρο των πινάκων πυκνότητας, μεγιστοποιώντας ένα κριτήριο σχετικής εντροπίας) χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τις μέσες τιμές των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης δυναμικών συστημάτων η βαθμών ελευθερίας. Κατά συνέπεια, οι ιδιοσυχνότητες και οι ρυθμοί απόσβεσης τόσο των βέβαιων όσο και των αβέβαιων συστημάτων ορίζονται ως αναμενόμενες τιμές των ιδιοτήτων του συστήματος σε σχέση με τους πίνακες πυκνότητας. Επιπλέον, λαμβάνοντας γινόμενα Kronecker του μέσου όρου των πινάκων πυκνότητας, δημιουργούνται νέοι πίνακες, ώστε η διασπορά των ιδιοσυχνοτήτων και των συντελεστών απόσβεσης να είναι η αναμενόμενη τιμή των πινάκων διασποράς διανυσματοποιημένων πινάκων.

### 9.1.1 Αξία του πίνακα πυκνότητας

Η αβεβαιότητα είναι γενική έννοια, η οποία σε συγκεκριμένους τομείς της επιστήμης, όπως στη μετρολογία είναι σαφώς καθορισμένη αλλά και οριοθετημένη [69]. Στη δυναμική των κατασκευών, η αβεβαιότητα γίνεται αντιληπτή είτε ως (1) πραγματική μεταβλητότητα μεταξύ ονομαστικά πανομοιότυπων φυσικών συστημάτων, είτε ως (2) έλλειψη γνώσης για τις ακριβείς τιμές της αδράνειας, της απόσβεσης και της δυσκαμψίας ή για τη μορφή των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται ή και στις δύο αιτίες. Στην πρώτη περίπτωση η αβεβαιότητα λέγεται ότι είναι

τυχαία (aleatoric) και οφείλεται συνήθως στην κατασκευαστική μεταβλητότητα. Στη δεύτερη, η αβεβαιότητα είναι επιστημική (epistemic) και προκύπτει από την αδυναμία να περιγράψει πλήρως όλες τις παραμέτρους μιας πολύπλοκης δομής. Έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές τεχνικές για τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας κατά τη διάρκεια των ετών. Μια επισκόπηση των στοχαστικών παραμετρικών μεθόδων, μαζί με τους τρόπους υπολογισμού τους δόθηκε από τον Schuëller [70], ενώ μια πιο πρόσφατη επισκόπηση μεθόδων με και χωρίς υπολογισμό πιθανοτήτων δίνεται στην αναφορά [71] καθώς και στα άρθρα που αναφέρονται εκεί. Οι Schuëller και Prandlwarter [72] διερεύνησαν μεθόδους για τον προσδιορισμό της μεταβλητότητας της απόκρισης και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του συστήματος, περιλαμβανομένης της αντιμετώπισης της αβεβαιότητας αβέβαιων παραμέτρων ως τυχαίες μεταβλητές.

Η μέθοδος που περιγράφεται στο παρόν Κεφάλαιο για τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας είναι διαφορετική από αυτές που αναφέρονται πιο πάνω επειδή χρησιμοποιεί το σκεπτικό του πίνακα πυκνότητας σε δυναμικά συστήματα. Θα δειχθεί κάτωθι ότι ο πίνακας πυκνότητας περιλαμβάνει τόσο τη δυναμική του συστήματος, όσο και τα στατιστικά στοιχεία του αβέβαιου συστήματος. Το κίνητρο για τη χρήση του πίνακα πυκνότητας προέρχεται από το ρόλο του στην κβαντομηχανική και στη θεωρία της κβαντομηχανικής [73] και της κβαντικής πληροφορίας [74]. Όπως και στην κβαντική μηχανική, ο πίνακας πυκνότητας ορίζεται τόσο για καθορισμένα όσο και για αβέβαια συστήματα. Ο πίνακας πυκνότητας μπορεί να θεωρηθεί ως μια κατανομή πιθανότητας επί των παραμέτρων του συστήματος και οι αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές αποδίδουν τις φυσικές παρατηρήσιμες μεταβλητές του συστήματος. Αυτά τα *παρατηρήσιμα μεγέθη για δυναμικά συστήματα είναι τα τετράγωνα των ιδιοσυχνοτήτων και ο ρυθμός απόσβεσης*. Θα αποδειχθεί ότι ο πίνακας πυκνότητας ενός ντετερμινιστικά καθορισμένου συστήματος υπολογίζει τις αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων μεγεθών αξιοποιώντας το σκεπτικό της μέγιστης σχετικής εντροπίας. Οι εξισώσεις αυτές είναι εκτιμητές των παρατηρήσιμων μεγεθών του συστήματος.

Η πραγματική αξία του πίνακα πυκνότητας ως τελεστή είναι ότι ενσωματώνει τη γνώση της δυναμικής και της στατιστικής σε μια ενιαία μαθηματική οντότητα. Για την ακρίβεια, η δυναμική εισέρχεται λόγω της κατασκευής του πίνακα πυκνότητας, ως το γινόμενο των κανονικοποιημένων στη μονάδα ιδιοδιανυσμάτων του δυναμικού συστήματος με τον ανάστροφο τους (ή τον ερμητιανό – συζυγή ανάστροφο στην περίπτωση συστημάτων με απόσβεση) και τη στατιστική που προκύπτει από τη στάθμιση των δεδομένων που προέρχονται από ένα πεπερασμένο δείγμα αβέβαιων συστημάτων.

Οι Au και Zhang [75] χρησιμοποίησαν τα κανονικοποιημένα στη μονάδα ιδιοδιανύσματα ως όρια σε μεγιστοποίηση μιας λογαριθμικής συνάρτησης πιθανότητας. Ο στόχος ήταν να καθοριστεί, στο πλαίσιο της συμπερασματολογίας κατά Bayes, ο μεταγενέστερος πίνακας

ιδιοδιανυσμάτων που προκύπτουν αποκλειστικά από δεδομένα εξόδου. Καθορίστηκε το κριτήριο, MAC (Modal Assurance Criterion), ανάμεσα στο πιο πιθανό ιδιοδιάνυσμα, το οποίο συνάδει με τη μεταγενέστερη κατανομή, δημιουργήθηκε μια σειρά από τυχαία ιδιοδιανύσματα και δείχθηκε ότι η αναμενόμενη τιμή του κριτηρίου MAC ποσοτικοποιεί τη μεταγενέστερη αβεβαιότητα των ιδιομορφών. Ακολούθησε η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας σε μια γέφυρα και σε ένα πολύ ψηλό κτήριο και εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η πληροφορία για τα ιδιοδιανύσματα μπορεί να ληφθεί πιο εύκολα από ότι για άλλες ιδιότητες των ιδιομορφών όπως οι συντελεστές απόσβεσης. Αυτή η διαπίστωση είναι σε συμφωνία με την παρούσα μελέτη όπου οι μεταβλητές των ιδιομορφών (δηλαδή το τετράγωνο της συχνότητας και οι ρυθμοί απόσβεσης) εκφράζονται ως λόγοι τυχαίων μεταβλητών.

Η έννοια του πίνακα πυκνότητας επεκτείνεται μέσω του γινομένου Kronecker των ιδιοδιανυσμάτων για να δείχθει ότι όταν επενεργεί σε πίνακες συνδιασποράς των παραμέτρων του συστήματος, δίνει τις συνδιασπορές των ιδιοσυχνοτήτων συστημάτων χωρίς απόσβεση. Στην περίπτωση συστημάτων με απόσβεση, δίνει τις συνδιασπορές των αποσβεσμένων ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης. Με αυτόν τον τρόπο φανερώνονται τόσο φυσικοί παράμετροι όσο και η στατιστική του συστήματος.

Η θεωρία του πίνακα πυκνότητας που παρουσιάζεται παρακάτω μοντελοποιεί την αβεβαιότητα σε δύο μέρη. Στο πρώτο που είναι το ντετερμινιστικά καθορισμένο μέρος, αποτυπώνεται η δυναμική του μέσου μοντέλου και στο δεύτερο που είναι το τυχαίο μέρος, αποτυπώνεται η αβέβαιη στατιστική. Η θεωρία χρησιμοποιεί τα κανονικοποιημένα στη μονάδα ιδιοδιανύσματα. Να σημειωθεί ότι τα πειραματικά ιδιοδιανύσματα που υπολογίζονται από τις συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας FRF είναι συνήθως κανονικοποιημένα ως προς τη μάζα.

### **9.1.2 Εναλλακτικές μεθοδολογίες**

Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για τη μάζα, τη δυσκαμψία και την απόσβεση για την ενημέρωση και επικαιροποίηση των αβέβαιων δυναμικών συστημάτων που μοντελοποιούνται με στοχαστικά πεπερασμένα στοιχεία ([76], [77], [78], [79]). Η βάση αυτής της τεχνικής επικαιροποίησης ήταν ένας εκτιμητής σφάλματος που βασίζεται σε καταστατικές εξισώσεις. Η χρήση αντίστροφων τεχνικών Monte Carlo για την επικαιροποίηση μέσω των τιμών παραμέτρων και συνδιασπορών παραμέτρων προτάθηκε από τους Mares και άλλοι ([80], [81]), ενώ μεθοδολογίες που βασίζονται στην παράλλαξη αναπτύχθηκαν από τον Khodaparast και άλλους [82].

Μια μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας δομών λαμβάνοντας συλλογές από τυχαίους πίνακες με μεγιστοποίηση της εντροπίας προτάθηκε από τον Soize σε μια σειρά

άρθρων ([83], [84]). Αυτή η μη παραμετρική τεχνική επεκτάθηκε με (1) τη μοντελοποίηση των μεταβατικών αποκρίσεων αβέβαιων συστημάτων [85], (2) των αβέβαιων συστημάτων με καθορισμένα γνωστές διασπορές στις φυσικές τους συχνότητες [84] και (3) τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες οι διασπορές πολλών φυσικών συχνοτήτων μιας αβέβαιης δομής είναι γνωστές [86]. Οι μέθοδοι που εξετάζουν την αβεβαιότητα και περιγράφηκαν μέχρι στιγμής σχετίζονται με τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας και την επακόλουθη χρήση των μοντέλων για τον προσδιορισμό της επίδρασης της αβεβαιότητας στην απόκριση των κατασκευών. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας εξακολουθεί να είναι ένα ανοιχτό ερευνητικό πεδίο στον τομέα της δυναμικής των κατασκευών, ειδικά η επίδραση της αβεβαιότητας στη μορφή και την παραμετροποίηση μοντέλων για την περιγραφή της συμπεριφοράς σε κραδασμούς διαφόρων φασμάτων συχνοτήτων. Μια σειρά πειραματικών δοκιμών διεξήχθησαν από τον Adhikari και άλλους [87] για να εξηγήσει την επίδραση της αβεβαιότητας των κατασκευών σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων.

### 9.1.3 Περιγραφή της θεωρητικής προσέγγισης

Στην επόμενη παράγραφο εξηγείται η θεωρία του πίνακα πυκνότητας χρησιμοποιώντας τον ορισμό που του δίνεται στην κβαντομηχανική και ακολούθως εξηγούνται οι ιδιότητες του σε σχέση με τη δυναμική συστημάτων. Η θεωρία και η εφαρμογή της μοντελοποίησης μέσω των μέσων τιμών εξηγούνται στην παράγραφο 9.3. Η θεωρία της μοντελοποίησης της συνδιασποράς των ιδιοτήτων των ιδιομορφών εξηγείται στις παραγράφους 9.4 έως 9.7. Εκεί υπολογίζονται οι διασπορές των ιδιοτήτων των ιδιομορφών για συστήματα με και χωρίς απόσβεση και συγκρίνονται με αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται από το δείγμα.

## 9.2 Ο πίνακας πυκνότητας στη δυναμική των κατασκευών

### 9.2.1 Το κίνητρο από την κβαντομηχανική

Για κατασκευές με  $n$  βαθμούς ελευθερίας ισχύουν οι σχέσεις ορθογωνιότητας (56) και (57) που επαναδιατυπώνονται ως εξής:

$$2\omega_r \zeta_r = \frac{c_r}{m_r} = \frac{\Psi_r^H \mathbf{C} \Psi_r}{\Psi_r^H \mathbf{M} \Psi_r} \quad (64)$$

$$\omega_r^2 = \frac{k_r}{m_r} = \frac{\Psi_r^H \mathbf{K} \Psi_r}{\Psi_r^H \mathbf{M} \Psi_r} \quad (65)$$

όπου  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  και  $\mathbf{K}$ , είναι οι πίνακες μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας της κατασκευής όπου  $\Psi_r \in \mathbb{C}^n$  είναι η  $r$  ιδιομορφή με το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα κανονικοποιημένο στη μονάδα.  $\Psi_r^H$

είναι το ερμητιανό συζυγή ιδιοδιάνυσμα του  $\Psi_r$ . Σε περίπτωση συστημάτων χωρίς απόσβεση,  $\mathbf{C} = 0$  και τα ιδιοδιανύσματα γίνονται πραγματικά. Στην περίπτωση που τα ιδιοδιανύσματα είναι πραγματικά, τότε τα ερμητιανά συζυγή είναι τα ανάστροφα διανύσματα. Η ιδιοσυχνότητα που αντιστοιχεί στην  $r$  ιδιομορφή συμβολίζεται με  $\omega_r$  και  $\zeta_r$  και συμβολίζει τον  $r$  συντελεστή απόσβεσης. Οι σχέσεις αυτές είναι έγκυρες, ανεξάρτητα από τη στάθμιση και την κανονικοποίηση των ιδιοδιανυσμάτων  $\Psi_r$ . Ωστόσο, όταν τα ιδιοδιανύσματα κανονικοποιούνται στη μονάδα, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον κβαντομηχανικό παραλληλισμό μέσω του πίνακα πυκνότητας.

Οι σχέσεις (64) και (65) παρέχουν το σημείο εισόδου στη θεωρία της κβαντικής μηχανικής, η οποία είναι το κίνητρο για τα περισσότερα από αυτά που ακολουθούν. Ακολουθεί μόνο μια σύντομη περιγραφή των βασικών εννοιών της κβαντικής θεωρίας και όχι λεπτομερής έκθεση των μαθηματικών και των ερμηνειών που διέπουν τις αρχές της κβαντικής μηχανικής. Το οικοδόμημα της κβαντικής μηχανικής είναι χτισμένο πάνω στο αξίωμα ότι η κατάσταση ενός σωματιδίου που υπακούει στους νόμους της κβαντομηχανικής εκφράζεται μαθηματικά από την κυματοσυνάρτηση  $\Phi(x)$ , όπου  $x$  δηλώνει τη θέση του σωματιδίου. Αυτή η συνάρτηση, της οποίας το τετράγωνο είναι η συνάρτηση πυκνότητας - πιθανότητας ως προς τη θέση, ανήκει σε ένα χώρο που ονομάζεται ο χώρος των καταστάσεων. Τα μετρήσιμα φυσικά μεγέθη περιγράφονται από ερμητιανούς γραμμικούς τελεστές  $\mathbf{O}$ , που ενεργούν στο χώρο των καταστάσεων. Οι τιμές αυτών των μεγεθών που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, αποτελούν τις ιδιοτιμές των τελεστών. Όταν ένα σύστημα είναι σε δεδομένη κανονικοποιημένη κατάσταση (κυματοσυνάρτηση)  $\Phi(x)$ , που δεν αποτελεί ιδιοσυνάρτηση του τελεστή  $\mathbf{O}$ , η μέση τιμή  $\langle O \rangle$  του παρατηρήσιμου μεγέθους, που αντιστοιχεί στον τελεστή  $\mathbf{O}$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\langle O \rangle = \Phi^H \mathbf{O} \Phi \quad (66)$$

Στο πλαίσιο της δυναμικής των κατασκευών και με βάση τη συζήτηση της προηγούμενης παραγράφου, οι πίνακες μάζας  $\mathbf{M}$ , οι συντελεστές απόσβεσης  $\mathbf{C}$  και οι συντελεστές δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$ , είναι τα παρατηρήσιμα μεγέθη, δηλαδή ερμητιανοί τελεστές του  $n$ -βαθμού ελευθερίας δονούμενου δυναμικού συστήματος με απόσβεση και  $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Τα μιγαδικά ιδιοδιανύσματα του συστήματος είναι οι καταστάσεις και οι μέσες τιμές των παρατηρήσιμων μεγεθών λαμβάνονται από αυτές τις καταστάσεις. Παρόμοια, τα παρατηρήσιμα μεγέθη ενός συστήματος χωρίς απόσβεση είναι οι πίνακες της μάζας και της δυσκαμψίας και οι αντίστοιχες καταστάσεις είναι πραγματικά ιδιοδιανύσματα. Κατά αντιστοιχία με αυτή την παρουσίαση, οι σχέσεις (64) και (65) δίνουν τα παρατηρήσιμα μεγέθη των κατασκευών και επειδή οι ιδιομορφές δεν είναι τα ιδιοδιανύσματα των

πινάκων των παρατηρήσιμων μεγεθών, θα δειχθεί κάτωθι ότι αυτές οι παρατηρήσιμες μεταβλητές  $\omega_r$  και  $2\omega_r\zeta_r$  είναι λόγοι των μέσων όρων των  $m_r$ ,  $c_r$  και  $k_r$ .

Η ερμηνεία αυτή είναι σύμφωνη με τις πρακτικές πτυχές της δυναμικής συστημάτων. Δηλαδή, εάν ένα σύστημα χωρίς απόσβεση δονείται ελεύθερα με το ιδιοδιάνυσμα  $\Psi_r$ , τότε η ιδιοσυχνότητα  $\omega_r$  είναι η άμεσα μετρήσιμη ποσότητα. Αντίστοιχα, εάν ένα αποσβεσμένο σύστημα δονείται ελεύθερα με το μιγαδικό ιδιοδιάνυσμα  $\Psi_r$ , τότε η άμεσα μετρήσιμη ποσότητα είναι ο ρυθμός απόσβεσης  $\omega_r\zeta_r$  και η αποσβεσμένη φυσική συχνότητα  $\omega_r\sqrt{1-\zeta_r^2}$ . Ένα σημαντικό και διακριτικό χαρακτηριστικό από την κβαντική μηχανική συστημάτων είναι ότι οι πιο πάνω μεταβλητές μπορεί να μετρηθούν πραγματικά χωρίς να στρεβλώνουν την κατάσταση του συστήματος.

### 9.2.2 Πίνακες πυκνότητας: ορισμός και ιδιότητες

Ο πίνακας πυκνότητας (ή τελεστής) στην κβαντική μηχανική είναι ένα μαθηματικό αντικείμενο που ενσωματώνει ταυτόχρονα τα αξιώματα της κβαντομηχανικής και της θεωρίας των πιθανοτήτων που απαιτούνται για την αντιμετώπιση της έλλειψης γνώσεων σχετικά με την κατάσταση ενός αβέβαιου κβαντικού μηχανικού συστήματος. Με τη χρήση παραλληλισμών με την κβαντομηχανική και τη θεωρία των πιθανοτήτων, επιδιώκεται ο ορισμός ενός τέτοιου τελεστή, ο οποίος θα επιτρέψει την ταυτόχρονη εφαρμογή της δυναμικής των κατασκευών και της θεωρίας των πιθανοτήτων. Ο τελεστής πυκνότητας στην κβαντική μηχανική ορίζεται ως το γινόμενο της κανονικοποιημένης κατάστασης μαζί με τον ερμητιανό του.

Στην κβαντική μηχανική, η αβεβαιότητα ασχολείται με την έλλειψη πληροφοριών σχετικά με την πραγματική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Για ένα δονούμενο σύστημα n-βαθμού ελευθερίας αυτή μεταφράζεται άμεσα στην αβεβαιότητα σχετικά με το κατά πόσο, από όλες τις ιδιομορφές, παρούσα είναι η n-ιδιομορφή. Ωστόσο, για τη δυναμική των κατασκευών η αβεβαιότητα βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη ιδιομορφή και όχι για το ποια από τις πολλές ιδιομορφές είναι παρούσα. Κατά συνέπεια, λαμβάνεται μια διαφορετική κατεύθυνση σε σχέση με την κβαντομηχανική, επειδή καθορίζεται ένας πίνακας πυκνότητας για κάθε κατάσταση ή ιδιομορφή, και όχι ένας πίνακας πυκνότητας που ενσωματώνει όλες τις ιδιομορφές.

Πιο κάτω δείχνεται ότι οι πίνακες πυκνότητας είναι αποτελεσματικοί ενσωματώνοντας τόσο τη δυναμική όσο και τη στατιστική που σχετίζεται με μια αβέβαιη κατασκευή. Πρώτα όμως καθορίζονται συγκεκριμένες σχέσεις που σχετίζονται γενικά με προβλήματα στη δυναμική των κατασκευών.

### A. Θεώρημα

Για ένα κανονικοποιημένο στη μονάδα ιδιοδιάνυσμα  $\Psi_r$  ενός αποσβεσμένου συστήματος n-βαθμών ελευθερίας, οι σχέσεις ορθογωνιότητας (64) και (65) μπορούν να διατυπωθούν ως:

$$2\omega_r\zeta_r = \frac{Tr(\mathbf{P}_r\mathbf{C})}{Tr(\mathbf{P}_r\mathbf{M})} \quad (67)$$

και

$$\omega_r^2 = \frac{Tr(\mathbf{P}_r\mathbf{K})}{Tr(\mathbf{P}_r\mathbf{M})} \quad (68)$$

όπου

$$\mathbf{P}_r = \Psi_r \Psi_r^H \quad (69)$$

και

$$Tr(\mathbf{P}_r) = 1 \quad (70)$$

$\Psi_r^H$  είναι το ερμητιανό του  $\Psi_r$  και  $Tr$  είναι ο τελεστής ίχνους (*trace*).

### Απόδειξη

Επειδή το μιγαδικό ιδιοδιάνυσμα  $\Psi_r$  του αποσβεσμένου συστήματος n-βαθμών ελευθερίας είναι κανονικοποιημένο στη μονάδα, ισχύει ότι:

$$\sum_i^n |\psi_i^{(r)}|^2 = 1 \quad (71)$$

όπου  $|\cdot|$  είναι το μέτρο των στοιχείων  $\psi_i^{(r)}$  του ιδιοδιανύσματος  $\Psi_r$ . Για συστήματα χωρίς απόσβεση, τα στοιχεία  $\psi_i^{(r)}$  είναι πραγματικά και  $|\cdot|$  είναι η απόλυτη τιμή τους. Μετά από τους



υπολογισμούς των πινάκων που σχετίζονται με τις σχέσεις (64) και (65) οδηγούμαστε αντίστοιχα στις σχέσεις (72) και (73).

$$2\omega_r \zeta_r = \frac{c_r}{m_r} = \frac{\sum_{i,j} \psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)} C_{ij}}{\sum_{i,j} \psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)} M_{ij}} \quad (72)$$

$$\omega_r^2 = \frac{c_r}{m_r} = \frac{\sum_{i,j} \psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)} K_{ij}}{\sum_{i,j} \psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)} M_{ij}} \quad (73)$$

όπου \* είναι το συζυγές μιγαδικό στοιχείο της αντίστοιχης ιδιομορφής. Οι συντελεστές  $\psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)}$  στις σχέσεις (72) και (73) μπορούν να δημιουργήσουν έναν πίνακα  $n \times n$ , γνωστό ως πίνακα πυκνότητας  $\mathbf{P}_r$ , που αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη ιδιομορφή  $\Psi_r$ . Αυτός ο πίνακας πυκνότητας προκύπτει από το γινόμενο της σχέσης (69).

Η διαγώνιος του  $\mathbf{P}_r$  αποτελείται από τα στοιχεία  $\psi_i^{(r)*} \psi_i^{(r)}$ . Δεδομένου ότι εξ ορισμού,  $\psi_i^{(r)*} \psi_i^{(r)} = |\psi_i^{(r)}|^2$  η σχέση (71) είναι το ίχνος του  $\mathbf{P}_r$ , και συνεπώς λαμβάνεται η σχέση (70).

Οι σχέσεις (67) και (68) δείχνουν τον ρόλο του πίνακα πυκνότητας, ο οποίος ενσωματώνει τη δυναμική του συστήματος ως μέσους όρους των παραμέτρων του συστήματος, ενώ το γινόμενο  $\psi_i^{(r)*} \psi_j^{(r)}$  αποτυπώνει τη σημασία των αντίστοιχων στοιχείων της μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας για τον προσδιορισμό των παρατηρήσιμων μεταβλητών. Ως εκ τούτου  $m_r$ ,  $c_r$  και  $k_r$  των σχέσεων (72) και (73) μπορούν να ερμηνευθούν ως σταθμισμένοι μέσοι όροι των στοιχείων των πινάκων της μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας.

## **B. Πόρισμα**

*Οι ρυθμοί απόσβεσης και οι ιδιοσυχνότητες ενός συστήματος  $n$ -βαθμών ελευθερίας μπορούν να αποτυπωθούν στη μορφή:*

$$2\zeta_r \omega_r = \frac{Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{C}_{ch})}{Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{M}_{ch})} \quad (74)$$

και

$$\omega_r^2 = \frac{\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{K}_{\text{ch}})}{\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{M}_{\text{ch}})} \quad (75)$$

όπου  $\mathbf{Q}_r$  είναι νέος πίνακας πυκνότητας που σχηματίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{Q}_r = \frac{\mathbf{R} \mathbf{P}_r \mathbf{R}^T}{\text{Tr}(\mathbf{R} \mathbf{P}_r \mathbf{R}^T)} \quad (76)$$

και  $\mathbf{R}$  είναι ο άνω τριγωνικός πίνακας που δίνεται από την αποσύνθεση Cholesky του πίνακα της μάζας  $\mathbf{M}$ ,

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}^T \mathbf{R} \quad (77)$$

#### Απόδειξη

Αντικατάσταση της σχέσης (77) στις σχέσεις (67) και (68), χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του ίχνους γινομένου πινάκων, που δόθηκε προηγουμένως, και γράφοντας:

$$\mathbf{M}_{\text{ch}} \equiv \mathbf{R}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{I}_{n \times n} \quad (78)$$

$$\mathbf{C}_{\text{ch}} \equiv \mathbf{R}^{-T} \mathbf{C} \mathbf{R}^{-1} \quad (79)$$

$$\mathbf{K}_{\text{ch}} \equiv \mathbf{R}^{-T} \mathbf{K} \mathbf{R}^{-1} \quad (80)$$

οδηγεί άμεσα στις σχέσεις (74) και (75).

Τα τετράγωνα των ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_i^2$  και οι ρυθμοί απόσβεσης  $2\omega_i \zeta_i$  μπορούν επίσης να εκφράζονται ως ιδιοτιμές των πινάκων του συστήματος  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  και  $\mathbf{K}$ , ως λόγοι αναμενόμενων τιμών.

#### Γ. Πόρισμα

Το τετράγωνο των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος  $\omega_i^2$   $n$  βαθμών ελευθερίας που περιγράφεται από πίνακες δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$  και μάζας  $\mathbf{M}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_i^2 = \frac{\sum_{l=1}^n q_l^{K,i} \lambda_l^K}{\sum_{l=1}^n q_l^{M,i} \lambda_l^M} \quad (81)$$

όπου  $\lambda_l^K$  και  $\lambda_l^M$  είναι οι ιδιοτιμές των πινάκων της δυσκαμψίας και της μάζας αντίστοιχα, όπου οι συντελεστές  $q_l^{K,i}$  και  $q_l^{M,i}$  πληρούν την προϋπόθεση:

$$\sum_{l=1}^n q_l^{K,i} = \sum_{l=1}^n q_l^{M,i} = 1 \quad (82)$$

### Απόδειξη

Η φασματική παραγοντοποίηση των πινάκων δυσκαμψίας και της μάζας δίνεται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{M} = \mathbf{E}_M \mathbf{\Lambda}_M \mathbf{E}_M^T \quad (83)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{E}_K \mathbf{\Lambda}_K \mathbf{E}_K^T \quad (84)$$

όπου  $\mathbf{\Lambda}_M$  και  $\mathbf{\Lambda}_K$  είναι διαγώνιοι πίνακες που περιέχουν τις ιδιοτιμές του  $\mathbf{M}$  και  $\mathbf{K}$ , αντίστοιχα, με τα ορθοκανονικά ιδιοδιανύσματα να βρίσκονται στις στήλες των πινάκων  $\mathbf{E}_M$  και  $\mathbf{E}_K$ . Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (83) και (84) στη σχέση (68) και χρησιμοποιώντας την ιδιότητα  $Tr(\mathbf{AB}) = Tr(\mathbf{BA})$  των ιχνών λαμβάνεται:

$$\omega_i^2 = \frac{Tr(\mathbf{\Lambda}_K \mathbf{E}_K^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_K)}{Tr(\mathbf{\Lambda}_M \mathbf{E}_M^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_M)} \quad (85)$$

Οι πίνακες που ορίζονται από  $\mathbf{Q}_K^{(i)} \equiv \mathbf{E}_K^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_K$  και  $\mathbf{Q}_M^{(i)} \equiv \mathbf{E}_M^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_M$  είναι νέοι πίνακες πυκνότητας αφού:

$$Tr(\mathbf{Q}_K^{(i)}) = Tr(\mathbf{E}_K^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_K) = Tr(\mathbf{E}_K \mathbf{E}_K^T \mathbf{P}_i) \quad (86)$$

και δεδομένου ότι ισχύει η σχέση  $\mathbf{E}_K \mathbf{E}_K^T = \mathbf{I}$ , όπου  $\mathbf{I}$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας  $n \times n$ , η σχέση (86) γίνεται:

$$Tr(\mathbf{Q}_K^i) = Tr(\mathbf{P}_i) = 1 \quad (87)$$

Παρόμοιοι υπολογισμοί δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα για  $\mathbf{Q}_M^i$ . Ως εκ τούτου, η σχέση (85) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\omega_i^2 = \frac{Tr(\mathbf{Q}_K^i \mathbf{\Lambda}_K)}{Tr(\mathbf{Q}_M^i \mathbf{\Lambda}_M)} \quad (88)$$

και δεδομένου ότι  $\mathbf{\Lambda}_M$  και  $\mathbf{\Lambda}_K$  είναι διαγώνιοι πίνακες που περιέχουν τις ιδιοτιμές των πινάκων μάζας  $\mathbf{M}$  και δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$ , αντίστοιχα, υπολογίζοντας τα ίχνη στον αριθμητή και τον παρονομαστή της σχέσης (88) δίνουν τη σχέση (81), όπου  $q_l^{M,i}$  και  $q_l^{K,i}$  είναι τα στοιχεία των διαγωνίων του  $\mathbf{Q}_M^i$  και  $\mathbf{Q}_K^i$ , αντίστοιχα. Τέλος, υπολογίζοντας το ίχνος στη σχέση (87) οδηγεί στη σχέση (82). Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα μπορεί να ληφθεί για τη σχέση  $2\omega_i \zeta_i$  αντικαθιστώντας τον πίνακα δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$  με τον πίνακα της απόσβεσης  $\mathbf{C}$  στην ανάλυση.

Τα διαγώνια στοιχεία  $q_l^{M,i}$  και  $q_l^{K,i}$  είναι μη αρνητικά, έχουν μοναδιαίο άθροισμα όπως στη σχέση (82), και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθούν ως μια κατανομή πιθανοτήτων. Ο αριθμητής της σχέσης (88) είναι ο μέσος όρος των ιδιοτιμών του πίνακα δυσκαμψίας σε σχέση με την κατανομή πιθανοτήτων  $q_l^{K,i}$  και ο παρονομαστής είναι ο μέσος όρος των ιδιοτιμών του πίνακα της μάζας που ελήφθη σε σχέση με την κατανομή πιθανότητας που ορίζεται από  $q_l^{M,i}$ . Ομοίως, με τη λήψη της φασματικής παραγοντοποίησης του πίνακα της απόσβεσης, η πιο πάνω επεξήγηση εφαρμόζεται στην περίπτωση του  $2\omega_r \zeta_r$  στη σχέση (67).

### 9.3 Θεωρία στοχαστικής δυναμικής κατασκευών με τη χρήση του πίνακα πυκνότητας

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκε η αρχική θεωρία η οποία αναδεικνύει πως μέσα από τη μηχανική μπορεί να ερμηνευτεί η θεωρία των πιθανοτήτων. Η πραγματοποίηση της θεωρίας των πιθανοτήτων επιτυγχάνεται μέσω της θεωρίας στοχαστικής δυναμικής των κατασκευών σε γραμμικά συστήματα με διαγώνιους πίνακες μάζας. Τα συστήματα αυτά είναι ονομαστικά όμοια και περιέχουν τυχαίες διαφοροποιήσεις στα στοιχεία των μαζών, απόσβεσης και δυσκαμψίας οι οποίες θεωρούνται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή.

Σε αυτή την ενότητα υποθέτουμε ότι πίνακες μάζας,  $\mathbf{M}$ , απόσβεσης  $\mathbf{C}$  και δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$ , είναι διαθέσιμοι ή μπορούν να ληφθούν από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής. Οι πίνακες  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  και  $\mathbf{K}$  του συστήματος διαχωρίζονται σε ένα ντετερμινιστικά καθορισμένο μέρος και ένα τυχαίο μέρος, για να περιγράψουν τη μέση τιμή του συστήματος και την αβεβαιότητα του αντίστοιχα. Στην κβαντική μηχανική, ο μέσος του πίνακα πυκνότητας χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την αβεβαιότητα δημιουργώντας τις μέσες τιμές των παρατηρήσιμων μεταβλητών. Στο πλαίσιο της αβέβαιης δυναμικής των κατασκευών θα δειχθεί ότι ο μέσος όρος του πίνακα πυκνότητας περιγράφει μόνο εν μέρει τον μέσο όρο των τετραγώνων των φυσικών συχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης. Ωστόσο, για αβέβαιες κατασκευές με ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα, ο μέσος όρος των πινάκων πυκνότητας που ορίζεται από τη λήψη του γινομένου Kronecker των ιδιοδιανυσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθούν οι πίνακες συνδιασποράς των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης από τους πίνακες συνδιασποράς της δυσκαμψίας και της απόσβεσης.

#### 9.3.1 Μέσες τιμές

Η αβεβαιότητα στις ιδιοσυχνότητες και τους ρυθμούς απόσβεσης δημιουργείται από τυχαία μάζα, τυχαίους συντελεστές απόσβεσης και τυχαία δυσκαμψία, που εκφράζονται με τυχαία και μεταβλητά διανύσματα  $\mathbf{m} \in \mathbb{R}^{n_m}$ ,  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^{n_c}$  και  $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^{n_k}$ , τα οποία ακολουθούν κανονική κατανομή και με διανύσματα μέσων τιμών,  $\bar{\mathbf{m}}$ ,  $\bar{\mathbf{c}}$  και  $\bar{\mathbf{k}}$  και πίνακες συνδιασποράς  $\Sigma_{\mathbf{m}}$ ,  $\Sigma_{\mathbf{c}}$  και  $\Sigma_{\mathbf{k}}$ , όπου  $n_m$ ,  $n_c$  και  $n_k \leq n$ .

Επομένως, η τυχαία μάζα είναι  $\mathbf{m} = [M_1 \dots M_{n_m}]^T$ , η τυχαία απόσβεση  $\mathbf{c} = [C_1 \dots C_{n_c}]^T$  και η τυχαία δυσκαμψία  $\mathbf{k} = [K_1 \dots K_{n_k}]^T$  είναι διανύσματα που εκφράζονται από τις πιο κάτω σχέσεις:

$$\mathbf{m} = \bar{\mathbf{m}} + \mathbf{D}_m \mathbf{Z}^m \quad (89)$$

$$\mathbf{c} = \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{D}_c \mathbf{Z}^c \quad (90)$$

$$\mathbf{k} = \bar{\mathbf{k}} + \mathbf{D}_k \mathbf{Z}^k \quad (91)$$

Οι πίνακες  $\mathbf{D}_m$ ,  $\mathbf{D}_c$  και  $\mathbf{D}_k$  μπορεί να εκφραστούν ως:

$$\mathbf{D}_m = \mathbf{E}_m \Lambda_m^{\frac{1}{2}} \quad (92)$$

$$\mathbf{D}_c = \mathbf{E}_c \Lambda_c^{\frac{1}{2}} \quad (93)$$

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{E}_k \Lambda_k^{\frac{1}{2}} \quad (94)$$

όπου  $\mathbf{E}_m$ ,  $\mathbf{E}_c$  και  $\mathbf{E}_k$  είναι οι πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων και  $\Lambda_m$ ,  $\Lambda_c$  και  $\Lambda_k$  οι διαγώνιοι πίνακες των ιδιοτιμών των πινάκων συνδιασποράς  $\Sigma_m$ ,  $\Sigma_c$  και  $\Sigma_k$ , αντίστοιχα. Τα  $\mathbf{Z}^m$ ,  $\mathbf{Z}^c$  και  $\mathbf{Z}^k$  είναι διανύσματα  $n_m$ ,  $n_c$  και  $n_k$  διατάσεων, των οποίων οι μεταβλητές  $z_i^m$ ,  $z_i^c$  και  $z_i^k$  αντίστοιχα ακολουθούν κανονική κατανομή.

Ο πίνακας δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$  για κάθε αβέβαιο σύστημα είναι ένας συμμετρικός πίνακας που δημιουργείται από τα στοιχεία του διανύσματος  $\mathbf{k}$  και τα αβέβαια στοιχεία δυσκαμψίας που προκύπτουν, π.χ. από τη συνδεσμολογία των ελατηρίων. Ο  $i$  διαγώνιος όρος  $\mathbf{K}_{i,i}$ , σχηματίζεται από το άθροισμα των συντελεστών δυσκαμψίας των στοιχείων που συνδέονται στον  $i$  βαθμό ελευθερίας. Το στοιχείο  $(i,j)$  που βρίσκεται εκτός διαγωνίου είναι ο αρνητικός συντελεστής δυσκαμψίας του στοιχείου που συνδέει τους  $i$  και  $j$  βαθμούς ελευθερίας. Ο πίνακας απόσβεσης  $\mathbf{C}$  σχηματίζεται με ακριβώς την ίδια διαδικασία, αλλά αντικαθιστώντας τους συντελεστές δυσκαμψίας με τους συντελεστές απόσβεσης. Η διαγώνιος του πίνακα μάζας  $\mathbf{M}$  περιέχει τις συγκεντρωμένες μάζες σε κάθε βαθμό ελευθερίας.

Κάθε σειρά των σχέσεων (89), (90) και (91) είναι μια υλοποίηση των στοιχείων της αβέβαιης μάζας  $M_h, 1 \leq h \leq n_m$ , της αβέβαιης απόσβεσης  $C_i, 1 \leq i \leq n_c$  και της αβέβαιης δυσκαμψίας  $K_j, 1 \leq j \leq n_k$ , που δίνονται από τις σχέσεις:

$$M_h = \overline{M}_h + \sum_{l=1}^{n_m} d_m^{(hl)} z_l^m \quad (95)$$

$$C_i = \overline{C}_i + \sum_{l=1}^{n_c} d_c^{(il)} z_l^c \quad (96)$$

$$K_j = \overline{K}_j + \sum_{l=1}^{n_k} d_k^{(jl)} z_l^k \quad (97)$$

όπου  $d_m^{(hl)}$  είναι το στοιχείο  $(h, l)$  στη θέση του  $\mathbf{D}_m$  κ.ο.κ.  $\overline{M}_h$ ,  $\overline{C}_i$  και  $\overline{K}_j$  είναι οι μέσες τιμές της αβέβαιης μάζας, της απόσβεσης και δυσκαμψίας  $M_h$ ,  $C_i$  και  $K_j$  και αντίστοιχα. Με αντικατάσταση των σχέσεων (95), (96) και (97) για κάθε  $M_h$ ,  $C_i$ ,  $K_j$  στον πίνακα μάζας  $\mathbf{M}$ , απόσβεσης  $\mathbf{C}$  και δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$  λαμβάνονται οι ακόλουθοι τυχαίοι πίνακες συστήματος:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_m + \sum_{l=1}^{n_m} z_l^m \mathbf{F}_l^m \quad (98)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_m + \sum_{l=1}^{n_c} z_l^c \mathbf{F}_l^c \quad (99)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_m + \sum_{l=1}^{n_k} z_l^k \mathbf{F}_l^k \quad (100)$$

Όπου  $\mathbf{M}_m$ ,  $\mathbf{C}_m$  και  $\mathbf{K}_m$  είναι οι πίνακες της μέσης μάζας, της απόσβεσης και της δυσκαμψίας.  $\mathbf{F}_l^k$  είναι ένας πίνακας  $n \times n$ , ο οποίος κατασκευάζεται ως εξής: Ο  $i$ -διαγώνιος όρος περιέχει το άθροισμα αυτών των όρων της  $l$ -στήλης του  $\mathbf{D}_k$  των οποίων οι δείκτες της σειράς χαρακτηρίζουν αβέβαια ελατήρια που ενώνονται στον  $i$ -βαθμό ελευθερίας. Όταν δεν υπάρχουν αβέβαια ελατήρια που να συνδέονται στον  $i$ -βαθμό ελευθερίας (αλλά μόνο ντετερμινιστικά καθορισμένα ελατήρια), τότε ένας μηδενικός όρος εισάγεται στην  $i$ -θέση της διαγωνίου. Οι όροι  $(i, j)$  που βρίσκονται εκτός της διαγωνίου περιέχουν τις αρνητικές τιμές της  $l$ -στήλης με δείκτες σειράς που χαρακτηρίζουν αβέβαια ελατήρια συνδεδεμένα μεταξύ του  $i$  και του  $j$  βαθμού ελευθερίας. Εάν αυτοί οι βαθμοί ελευθερίας δεν είναι συνδεδεμένοι με ένα αβέβαιο ελατήριο τότε ο όρος  $(i, j)$  παίρνει την τιμή μηδέν. Ο πίνακας  $\mathbf{F}_l^c$  κατασκευάζεται με παρόμοιο τρόπο και ο διαγώνιος πίνακας  $\mathbf{F}_l^m$  δημιουργείται από τα μη μηδενικά στοιχεία της  $l$ -στήλης του  $\mathbf{D}_m$  και χαρακτηρίζει τυχαίες μάζες.

Ο πολλαπλασιασμός των σχέσεων (98) έως (100) πριν και μετά με  $\mathbf{R}^{-T}$  και  $\mathbf{R}^{-1}$  αντίστοιχα (όπου  $\mathbf{R}$  είναι ο παράγοντας Cholesky του πίνακα μέσης μάζας  $\mathbf{M}_m$ , που ορίζεται στη σχέση (77)) οδηγεί στις σχέσεις:

$$\mathbf{M}_{ch} = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{I}_n + \sum_{j=1}^{n_m} \mathbf{B}_j^M z_j^M \quad (101)$$

$$\mathbf{C}_{ch} = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{C} \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{A}_m^C + \sum_{j=1}^{n_c} \mathbf{B}_j^C z_j^C \quad (102)$$

$$\mathbf{K}_{ch} = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{K} \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{A}_m^K + \sum_{i=1}^{n_k} \mathbf{B}_i^K z_i^K \quad (103)$$

όπου  $\mathbf{A}_m^C$  και  $\mathbf{A}_m^K$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{A}_m^C \equiv \mathbf{R}^{-T} \mathbf{C}_m \mathbf{R}^{-1} \quad (104)$$

$$\mathbf{A}_m^K \equiv \mathbf{R}^{-T} \mathbf{K}_m \mathbf{R}^{-1} \quad (105)$$

Όπου  $\mathbf{I}_n$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων  $n \times n$ ,  $\mathbf{B}_j^M = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{F}_j^M \mathbf{R}^{-1}$ ,  $\mathbf{B}_i^C = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{F}_i^C \mathbf{R}^{-1}$  και  $\mathbf{B}_i^K = \mathbf{R}^{-T} \mathbf{F}_i^K \mathbf{R}^{-1}$ . Η αντικατάσταση των σχέσεων (103) και (101) στη σχέση (75) οδηγεί στη διαφοροποίηση της έκφρασης του  $\omega_r^2$  ως μια τυχαία μεταβλητή στην ακόλουθη σχέση:

$$\omega_r^2 = \frac{Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^K) + \sum_{i=1}^{n_k} z_i^K Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_i^K)}{1 + \sum_{j=1}^{n_m} z_j^M Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_j^M)} \quad (106)$$

Όπου  $\mathbf{Q}_r$  είναι πλέον τυχαίος πίνακας και εξαρτάται από  $z_i^M$ ,  $z_i^C$  και  $z_i^K$ . Η ακόλουθη έκφραση του  $2\zeta_r \omega_r$  ως μια τυχαία μεταβλητή λαμβάνεται με πανομοιότυπη διαδικασία, αλλά αντικαθιστώντας τις σχέσεις (102) και (101) στη σχέση (74).

$$2\zeta_r \omega_r = \frac{Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^C) + \sum_{i=1}^{n_c} z_i^C Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_i^C)}{1 + \sum_{j=1}^{n_m} z_j^M Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_j^M)} \quad (107)$$

Οι αναμενόμενες τιμές των  $\omega_r^2$  και  $2\zeta_r \omega_r$  δίνονται από τις σχέσεις:



$$E(\omega_r^2) = E\left(\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}})\right) + \sum_{i=1}^{n_k} \text{cov}\left(z_i^{\mathbf{K}}, \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_i^{\mathbf{K}})\right) - \sum_{j=1}^{n_m} \text{cov}\left(z_j^{\mathbf{M}}, \omega_r^2 \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_j^{\mathbf{M}})\right) \quad (108)$$

$$E(2\zeta_r \omega_r) = E\left(\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{C}})\right) + \sum_{i=1}^{n_c} \text{cov}\left(z_i^{\mathbf{C}}, \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_i^{\mathbf{C}})\right) - \sum_{j=1}^{n_m} \text{cov}\left(z_j^{\mathbf{M}}, 2\zeta_r \omega_r \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_j^{\mathbf{M}})\right) \quad (109)$$

Ο όρος  $E\left(\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}})\right)$  μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο  $\bar{\mathbf{Q}}_r$  των πινάκων πυκνότητας, ως εξής:

$$E\left(\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}})\right) \approx \text{Tr}(\bar{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}) \quad (110)$$

επειδή

$$\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}) = \sum_{i,j=1}^n \mathbf{Q}_r(i,j) \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}(j,i) \quad (111)$$

Στη συνέχεια, υποθέτοντας την ύπαρξη δείγματος  $k$  πινάκων πυκνότητας  $\mathbf{Q}_r^l$ ,  $1 \leq l \leq k$ ,

$$\overline{\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}})} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \sum_{i,j=1}^n \mathbf{Q}_r^l(i,j) \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}(j,i) \quad (112)$$

και με την εναλλαγή των συνόλων, επειδή  $\mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}$  είναι ντετερμινιστικά καθορισμένο, λαμβάνεται η σχέση:

$$\sum_{i,j=1}^n \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}(j,i) \sum_{l=1}^k \frac{\mathbf{Q}_r^l(i,j)}{k} = \sum_{i,j=1}^n \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}(j,i) \bar{\mathbf{Q}}_r^l(i,j) = \text{Tr}(\bar{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}) \quad (113)$$

Στην περίπτωση του  $2\zeta_r \omega_r$  μπορεί να αποδειχθεί ότι ακολουθώντας παρόμοια βήματα ισχύει η σχέση:

$$E\left(\text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_m^c)\right) \approx \text{Tr}(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^c) \quad (114)$$

Οι κατανομές των  $\omega_r^2$  και  $2\zeta_r \omega_r$  ως αναλογίες των τυχαίων μεταβλητών, όπως περιγράφονται από τις σχέσεις (106) και (107) αντίστοιχα, είναι περίπλοκες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Σε γενικές γραμμές δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και, κατά συνέπεια, οι εκτιμήσεις των συνδιασπορών από τα δείγματα δεν είναι συνεπείς. Οι κατανομές των  $\omega_r^2$  και  $2\zeta_r \omega_r$  είναι κανονικές μόνο στην περίπτωση της ντετερμινιστικά καθορισμένης μάζας όταν οι παρονομαστές των σχέσεων (106) και (107) είναι ίσοι με τη μονάδα. Θα δειχθεί αργότερα ότι οι συνδιασπορές των  $\omega_r^2$  και  $2\zeta_r \omega_r$  μπορούν να ληφθούν από τους πίνακες συνδιασποράς της δυσκαμψίας και απόσβεσης των παραμέτρων χρησιμοποιώντας τον μέσο πίνακα πυκνότητας για την περίπτωση ντετερμινιστικά καθορισμένης μάζας.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τις σχέσεις (108) έως (114) είναι ότι, σε αντίθεση με την θεωρία της κβαντικής μηχανικής, ο μέσος πίνακας πυκνότητας αντιπροσωπεύει μόνο εν μέρει τις μέσες τιμές των  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r \omega_r}$  που λαμβάνονται από ένα δείγμα. Σύμφωνα με τις σχέσεις (108) και (110) η εκτίμηση  $E(\omega_r^2)$  για  $\overline{\omega_r^2}$  που προκύπτει από το δείγμα λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τον όρο  $\text{Tr}(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^k)$  με την προσθήκη όμως ενός όρου που περιέχει την προκατάληψη και ο οποίος είναι  $\sum_{j=1}^{n_m} \text{cov}(z_j^M, \omega_r^2 \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_j^M)) - \sum_{i=1}^{n_k} \text{cov}(z_i^K, \text{Tr}(\mathbf{Q}_r \mathbf{B}_i^K))$ . Σε πραγματικές συνθήκες είναι αδύνατο να υπολογιστεί ή να εκτιμηθεί η προκατάληψη αφού η παρουσία της οφείλεται στη συνδιασπορά μεταξύ της πηγής της αβεβαιότητας  $\mathbf{Z}^K$  και  $\mathbf{Z}^M$ , καθώς και της δυναμικής του συστήματος, όπως αποτυπώνεται από τους πίνακες πυκνότητας  $\mathbf{Q}_r$ . Θα δειχτεί παρακάτω ότι η μεγιστοποίηση της σχετικής εντροπίας οδηγεί σε ένα πίνακα πυκνότητας που διορθώνει την προκατάληψη των εκτιμήσεων  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r \omega_r}$ .

### 9.3.2 Σχετική εντροπία και πίνακες πυκνότητας

Η έννοια της σχετικής εντροπίας ως μέτρο της διαφοράς μεταξύ δύο κατανομών πιθανότητας εφαρμόζεται ευρέως σε διάφορους κλάδους και μια επισκόπηση των μαθηματικών και άλλες θεωρητικές πληροφορίες μπορεί να βρεθούν στην αναφορά [88]. Σε αυτή την ενότητα ο ορισμός της σχετικής εντροπίας επεκτείνεται σε πίνακες πυκνότητας στη δυναμική των κατασκευών. Στη συνέχεια, η σχετική εντροπία μεγιστοποιείται σε σχέση με τον μέσο πίνακα πυκνότητας προκειμένου να ληφθεί ένας πίνακας πυκνότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r\omega_r}$ .

#### A. Ορισμός

Σχετική εντροπία των πινάκων πυκνότητας. Οι όροι του πίνακα πυκνότητας  $\mathbf{Q}$  προσδιορίζονται από  $\mathbf{Q}^{(i,j)}$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ . Η σχετική εντροπία ενός άλλου πίνακα πυκνότητας  $\mathbf{S}$  με στοιχεία  $\mathbf{S}^{(i,j)}$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ , σε σχέση με τον πίνακα  $\mathbf{Q}$  ορίζεται από τη σχέση:

$$H(\mathbf{S}|\mathbf{Q}) \equiv \sum_{i,j=1}^n \mathbf{S}^{(i,j)} \ln \left( \frac{\mathbf{S}^{(i,j)}}{\mathbf{Q}^{(i,j)}} \right) \quad (115)$$

Ο πίνακας πυκνότητας που λαμβάνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ληφθούν οι μέσοι όροι  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r\omega_r}$  και να αφαιρεθεί η προκατάληψη.

#### B. Θεώρημα

Τα στοιχεία του πίνακα πυκνότητας  $\mathbf{S}_r$ ,  $1 \leq r \leq n$  που μεγιστοποιούν τη σχετική εντροπία  $H(\mathbf{S}_r|\overline{\mathbf{Q}}_r)$  του πιο πάνω ορισμού και τελούν υπό τον περιορισμό ότι ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

$$Tr(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^k) = \overline{\omega_r^2} \quad (116)$$

$$Tr(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^c) = \overline{2\zeta_r\omega_r} \quad (117)$$

και

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{s}_r^{(i,i)} = 1 \quad (118)$$

είναι τα εξής:

$$\mathbf{s}_r^{(i,i)} = \frac{\bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,i)} \exp\left(-\left(\lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{C}}\right)\right)}{\sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_r^{(j,j)} \exp\left(-\left(\lambda_1 \mathbf{A}_{m(j,j)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(j,j)}^{\mathbf{C}}\right)\right)} \quad (119)$$

$$\mathbf{s}_r^{(i,j)} = \bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,j)} \exp\left(-\left(1 + \lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{C}}\right)\right) \quad (120)$$

και  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  προσδιορίζονται από τους περιορισμούς (116) και (117). Οι εκθέτες στις παρενθέσεις όπως  $(i,j)$  στο  $\mathbf{s}_r^{(i,j)}$ , χαρακτηρίζουν τις θέσεις των ειδικών όρων στους πίνακες πυκνότητας.

### Απόδειξη

Με σκοπό τη μετατροπή του προβλήματος σε βελτιστοποίηση χωρίς οριακές συνθήκες ορίζεται η ακόλουθη παράμετρος του όρου  $\mathbf{S}_r$ , η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$f(\mathbf{S}_r) = H(\mathbf{S}_r | \bar{\mathbf{Q}}_r) + \lambda_1 \text{Tr}(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}) + \lambda_2 \text{Tr}(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{C}}) + \mu \sum_{i=1}^n \mathbf{s}_r^{(i,i)} \quad (121)$$

όπου  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  και  $\mu$  είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange που σχετίζονται με την πλήρωση των περιορισμών (116), (117) και (118) αντίστοιχα. Επειδή οι ονομαστικοί πίνακες  $\mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}$  και  $\mathbf{A}_m^{\mathbf{C}}$  είναι συμμετρικοί τότε:

$$\text{Tr}(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{K}}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{s}_r^{(i,j)} \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{K}} \quad (122)$$

και

$$\text{Tr}(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^{\mathbf{C}}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{s}_r^{(i,j)} \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{C}} \quad (123)$$

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η σχέση (121), πρέπει η ακόλουθη παράγωγος να υπολογιστεί και να τεθεί ίση με το μηδέν,

$$\frac{d}{d\varepsilon} [f(\mathbf{S}_r + \varepsilon\delta\mathbf{S}_r) - f(\mathbf{S}_r)]_{\varepsilon=0} = 0 \quad (124)$$

Στη συνέχεια οι σχέσεις (122), (123) και (115) αντικαθίστανται στον όρο  $f(\mathbf{S}_r + \varepsilon\delta\mathbf{S}_r)$  για να ληφθεί:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{S}_r + \varepsilon\delta\mathbf{S}_r) &= \sum_{i,j=1}^n (\mathbf{s}_r^{(i,j)} + \varepsilon\delta\mathbf{s}_r^{(i,j)}) \ln \left( \frac{\mathbf{s}_r^{(i,j)} + \varepsilon\delta\mathbf{s}_r^{(i,j)}}{\bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,j)}} \right) \\ &+ \lambda_1 \sum_{i,j=1}^n (\mathbf{s}_r^{(i,j)} + \varepsilon\delta\mathbf{s}_r^{(i,j)}) \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{K}} \\ &+ \lambda_2 \sum_{i,j=1}^n (\mathbf{s}_r^{(i,j)} + \varepsilon\delta\mathbf{s}_r^{(i,j)}) \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{C}} + \mu \sum_{i=1}^n (\mathbf{s}_{ii} + \varepsilon\delta\mathbf{s}_r^{(i,i)}) \end{aligned} \quad (125)$$

Αντικατάσταση του όρου (125) στη σχέση (124) και υπολογίζοντας την παράγωγο οδηγεί στη σχέση:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left( 1 + \ln \left( \frac{\mathbf{s}_r^{(i,i)}}{\bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,i)}} \right) + \lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{C}} + \mu \right) \delta\mathbf{s}_r^{(i,i)} \\ + \sum_{(i,j=1), i \neq j}^n \left( 1 + \ln \left( \frac{\mathbf{s}_r^{(i,j)}}{\bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,j)}} \right) + \lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,j)}^{\mathbf{C}} \right) \delta\mathbf{s}_r^{(i,j)} = 0 \end{aligned} \quad (126)$$

Ο αντίστοιχος όρος της οποίας γίνεται μηδέν όταν:

$$\mathbf{s}_r^{(i,i)} = \frac{\bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,i)} \exp \left( - \left( \lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{C}} \right) \right)}{\exp \left( - (1 + \mu) \right)} \quad (127)$$

και

$$\mathbf{s}_r^{(i,j)} = \bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,j)} \exp\left(-\left(1 + \lambda_1 \mathbf{A}_{nom(i,j)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{nom(i,j)}^{\mathbf{C}}\right)\right) \quad (128)$$

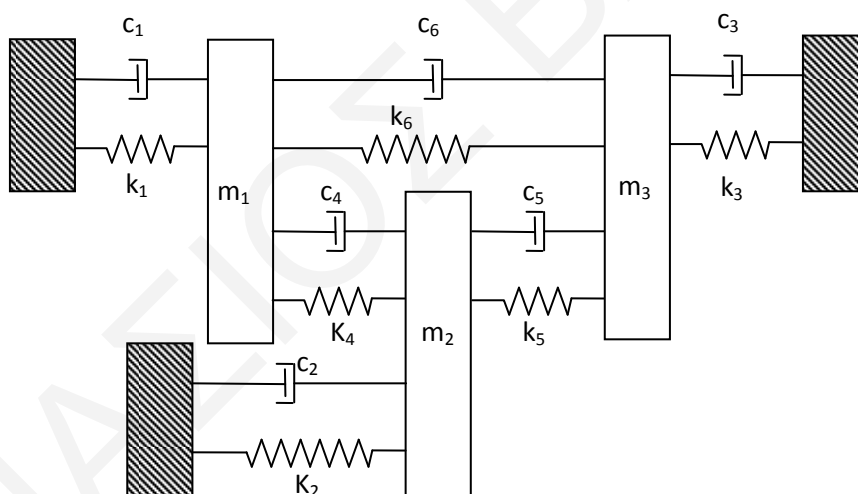
Τέλος, με αντικατάσταση της σχέσης (127) στον περιορισμό (118), προκύπτει η σχέση:

$$\exp(1 + \mu) = \sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{Q}}_r^{(i,i)} \exp\left(-\left(\lambda_1 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{K}} + \lambda_2 \mathbf{A}_{m(i,i)}^{\mathbf{C}}\right)\right) \quad (129)$$

που με τη σειρά της, μετά από αντικατάσταση της σχέσης (129) στη σχέση (127) προκύπτει η σχέση (119). Παρόμοια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί για να δώσει τη σχέση (120).

### 9.3.3 Παράδειγμα με σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας

Για χάρη παραδείγματος οι πιο πάνω σχέσεις εφαρμόζονται σε ένα σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας που απεικονίζεται στο Σχήμα 69.



Σχήμα 69: Παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας σε σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας

Προκειμένου να παρουσιαστεί ένα από παράδειγμα εφαρμογής της πιο πάνω θεωρίας, θεωρούνται οι ακόλουθες τιμές των παραμέτρων του ονομαστικού συστήματος χωρίς απόσβεση:

$$M_1 = 2 \text{ kg}, M_2 = 3 \text{ kg}, M_3 = 4 \text{ kg} \quad (130)$$

$$K_3 = 10 \text{ Nm}^{-1}, K_4 = 10 \text{ Nm}^{-1}, K_6 = 30 \text{ Nm}^{-1}, K_1 = K_2 = K_5 = 20 \text{ Nm}^{-1} \quad (131)$$

$$C_1 = C_2 = C_4 = 0,2 \text{ Nsm}^{-1}, C_3 = 0,1 \text{ Nsm}^{-1}, C_5 = 0,16 \text{ Nsm}^{-1}, C_6 = 0,15 \text{ Nsm}^{-1} \quad (132)$$

Το σύστημα μπορεί να γίνει αβέβαιο ως εξής:

- α)  $K_1, K_2$  και  $K_5$  θεωρούνται να είναι τυχαίες μεταβλητές που προέρχονται από μια κανονική κατανομή πολλών μεταβλητών με διάνυσμα μέσων τιμών που δίνεται από:

$$\bar{\mathbf{k}} = [20 \quad 20 \quad 20]^T \text{ Nm}^{-1} \quad (133)$$

και πίνακα συνδιασποράς:

$$\Sigma_{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} 15 & 0,8 & 0,7 \\ 0,8 & 10 & 0,4 \\ 0,7 & 0,4 & 12 \end{bmatrix} \quad (134)$$

- β)  $C_1, C_2$  και  $C_5$  είναι τυχαίες μεταβλητές που προέρχονται από μια κανονική κατανομή πολλών μεταβλητών με διάνυσμα μέσων τιμών που δίνεται από:

$$\bar{\mathbf{c}} = [0,2 \quad 0,2 \quad 0,16]^T \text{ Nsm}^{-1} \quad (135)$$

και πίνακα συνδιασποράς:

$$\Sigma_{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} 0,001 & 0,0008 & 0,00087 \\ 0,0008 & 0,002 & 0,001 \\ 0,00087 & 0,001 & 0,0015 \end{bmatrix} \quad (136)$$

- γ)  $M_1, M_2$  και  $M_3$  είναι τυχαίες μεταβλητές που προέρχονται από μια κανονική κατανομή πολλών μεταβλητών με διάνυσμα μέσων τιμών που δίνεται από:

$$\bar{\mathbf{m}} = [2 \quad 3 \quad 4]^T \text{ kg} \quad (137)$$

και πίνακα συνδιασποράς:

$$\Sigma_m = \begin{bmatrix} 0,15 & 0,01 & 0,05 \\ 0,1 & 0,5 & 0,03 \\ 0,05 & 0,03 & 1,5 \end{bmatrix} \quad (138)$$

Το ίδιο σύστημα χρησιμοποιείται και στα επόμενα παραδείγματα, αν και ορισμένοι όροι που λαμβάνουν τυχαίες τιμές εδώ λαμβάνουν ντετερμινιστικά καθορισμένες τιμές αργότερα.

Σε ένα δείγμα 10.000 υλοποιήσεων λήφθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r\omega_r}$ :

$$\begin{bmatrix} \overline{\omega_r^2} & Tr(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^K) & Tr(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^K) \\ 5,3136 & 5,3090 & 5,3136 \\ 22,0944 & 20,9954 & 22,0944 \\ 39,3387 & 33,6502 & 39,3389 \end{bmatrix} \quad (139)$$

και

$$\begin{bmatrix} \overline{2\zeta_r\omega_r} & Tr(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_m^C) & Tr(\mathbf{S}_r \mathbf{A}_m^C) \\ 0,0527 & 0,0518 & 0,0527 \\ 0,2368 & 0,2239 & 0,2355 \\ 0,3239 & 0,2742 & 0,3239 \end{bmatrix} \quad (140)$$

Με τη χρήση των μέσων πινάκων πυκνότητας σε σχέση με το ονομαστικό σύστημα  $\mathbf{A}_m^K$  και  $\mathbf{A}_m^C$  λαμβάνονται τιμές που περιέχουν προκατάληψη. Οι νέοι πίνακες πυκνότητας  $\mathbf{S}_r$  λαμβάνονται μεγιστοποιώντας την σχετική εντροπία. Από την τρίτη στήλη των σχέσεων (139) και (140) φαίνεται ότι η προκατάληψη αφαιρείται εντελώς σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Οι τιμές των πολλαπλασιαστών Lagrange που μεγιστοποιούν τη σχετική εντροπία βρέθηκαν να είναι:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 \\ 0,0885 & 1,8317 \\ 11,2825 & 2212 \\ -0,7030 & 48,786 \end{bmatrix} \quad (141)$$

#### 9.4 Ιδιότητες διασποράς συστήματος χωρίς απόσβεση με ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα

Εάν πάρουμε την αυστηρή έννοια των μαθηματικών της κβαντομηχανικής, το παρατηρήσιμο μέγεθος είναι ένας πίνακας. Με αυτή την έννοια, δεν μπορεί να ειπωθεί ότι η σχέση (68) είναι η αναμενόμενη τιμή ενός ενιαίου παρατηρήσιμου μεγέθους. Είναι μια αναλογία των



αναμενόμενων τιμών των δύο παρατηρήσιμων μεγεθών, δηλαδή του πίνακα δυσκαμψίας  $\mathbf{K}$ , και του πίνακα της μάζας  $\mathbf{M}$ . Ένα συμμετρικά παρατηρήσιμο μέγεθος δίνεται από  $\mathbf{K}_{ch}$  που ορίζεται από τη σχέση (103), και δεδομένου ότι η μάζα είναι η ντετερμινιστικά καθορισμένη, το τετράγωνο της ιδιοσυχνότητας δίνεται από:

$$\omega_r^2 = Tr(\mathbf{Q}_r \mathbf{K}_{ch}) \quad 1 \leq r \leq n \quad (142)$$

όπου  $\mathbf{Q}_r$  ορίζεται από τη σχέση (76).

Με τον ίδιο τρόπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τη λήψη της διασποράς των τυχαίων μεταβλητών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι πίνακες της πυκνότητας για τη λήψη της διασποράς των παρατηρήσιμων μεγεθών από τους πίνακες συνδιασποράς του συστήματος. Ο πίνακας του συστήματος που αντιστοιχεί σε  $\omega_r^2$  δίνεται από  $\mathbf{K}_{ch}$ . Ο πίνακας συνδιασποράς του  $\mathbf{K}_{ch}$  είναι ο πίνακας συνδιασποράς διαστάσεων  $n^2 \times n^2$  που αντιστοιχεί στο διάνυσμα με διαστάσεις  $n^2$ , το οποίο λαμβάνεται με διανυσματοποίηση του  $\mathbf{K}_{ch}$  και συμβολίζεται με  $cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))$ . Η σχέση μεταξύ  $cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))$  και των αναμενόμενων τιμών  $E(cov(\omega_i^2, \omega_j^2))$ , κάθε όρου του πίνακα συνδιασποράς  $cov(\omega_i^2, \omega_j^2)$  των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων περιγράφεται στην ανάλυση που ακολουθεί.

#### A. Θεώρημα

Ορισμός νέων πινάκων πυκνότητας ως εξής:

$$\mathbf{Q}_{ij} = (\Phi_i \otimes \Phi_i)(\Phi_j \otimes \Phi_j)^T \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (143)$$

όπου  $\Phi_i$  και  $\Phi_j$  είναι τα κανονικοποιημένα στη μονάδα ιδιοδιανύσματα του  $\mathbf{K}_{ch}$ . Στη συνέχεια  $E(cov(\omega_i^2, \omega_j^2))$  δίνεται από:

$$E(cov(\omega_i^2, \omega_j^2)) = Tr(\bar{\mathbf{Q}}_{ij} cov(vec(K_{ch}))) \quad (144)$$

Όπου  $\bar{\mathbf{Q}}_{ij}$ , είναι η μέση τιμή των πινάκων πυκνότητας  $\mathbf{Q}_{ij}$  που ορίζεται από τη σχέση (143).

Ο πίνακας συνδιασποράς του διανυσματοποιημένου  $\mathbf{K}_{ch}$  δίνεται από τη σχέση:

$$cov(vec(\mathbf{K}_{ch})) = E(vec(\mathbf{K}_{ch})vec(\mathbf{K}_{ch})^T) - E(vec(\mathbf{K}_{ch}))E(vec(\mathbf{K}_{ch})^T) \quad (145)$$

Λαμβάνεται το γινόμενο Kronecker  $\Phi_i \otimes \Phi_i$   $1 \leq i \leq n$ , για κάθε ιδιοδιάνυσμα,  $\Phi_i$ , του  $\mathbf{K}_{ch}$ , με τον εαυτό του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανήκουν στον χώρο  $\mathbb{R}^{n^2}$  του πίνακα συνδιασποράς (145). Πολλαπλασιασμός πριν και μετά του  $cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))$  με τους όρους  $(\Phi_i \otimes \Phi_i)^T$  και  $(\Phi_j \otimes \Phi_j)$  αντίστοιχα οδηγεί στη σχέση:

$$\begin{aligned} & (\Phi_i \otimes \Phi_i)^T cov(vec(\mathbf{K}_{ch})) (\Phi_j \otimes \Phi_j) \\ &= E\left((\Phi_i \otimes \Phi_i)^T vec(\mathbf{K}_{ch}) vec(\mathbf{K}_{ch})^T (\Phi_j \otimes \Phi_j)\right) \\ & - E((\Phi_i \otimes \Phi_i)^T vec(\mathbf{K}_{ch})) E\left(vec(\mathbf{K}_{ch})^T (\Phi_j \otimes \Phi_j)\right) \end{aligned} \quad (146)$$

Χρησιμοποιώντας την ταυτότητα  $vec(\mathbf{CXB}) = (\mathbf{B}^T \otimes \mathbf{C})vec(\mathbf{X})$  για τους πίνακες  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{X}$  καθώς και  $\mathbf{B}$  [89], κάθε όρος στους τελεστές της αναμενόμενης τιμής στη σχέση (146) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} \Phi_i^T \otimes \Phi_i^T vec(\mathbf{K}_{ch}) &= vec(\Phi_i^T \mathbf{K}_{ch} \Phi_i) = vec(\omega_i^2) = \omega_i^2 \\ vec(\mathbf{K}_{ch})^T (\Phi_j \otimes \Phi_j) &= \omega_j^2 \end{aligned} \quad (147)$$

Αντικατάσταση της σχέσης (147) στη σχέση (146) οδηγεί στη σχέση:

$$(\Phi_i \otimes \Phi_i)^T cov(vec(\mathbf{K}_{ch})) (\Phi_j \otimes \Phi_j) = E(\omega_i^2, \omega_j^2) - E(\omega_i^2)E(\omega_j^2) = cov(\omega_i^2, \omega_j^2) \quad (148)$$

και ως εκ τούτου ο μέσος όρος  $E(cov(\omega_i^2, \omega_j^2))$  δίνεται από τη σχέση (144).

Το αβέβαιο σύστημα που περιγράφεται στην παράγραφο 9.3.3 θεωρήθηκε ως μη αποσβεσμένο και τα στοιχεία της μάζας έγιναν ντετερμινιστικά καθορισμένα λαμβάνοντας τη μέση τιμή τους χωρίς διακύμανση. Για ένα δείγμα 10.000 τιμών και με τη χρήση του πίνακα συνδιασποράς του δείγματος  $cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))$  οι τιμές του  $cov(\omega_i^2, \omega_j^2)$  που λήφθηκαν ήταν:

$$\text{cov}(\omega_i^2, \omega_j^2) = \begin{bmatrix} 0,2022(0,2024) & 0,3684(0,3687) & 0,5273(0,5243) \\ 0,3684(0,3687) & 4,2994(4,2740) & 0,6256(0,6218) \\ 0,5273(0,4243) & 0,6256(0,6218) & 2,3536(2,3444) \end{bmatrix} \quad (149)$$

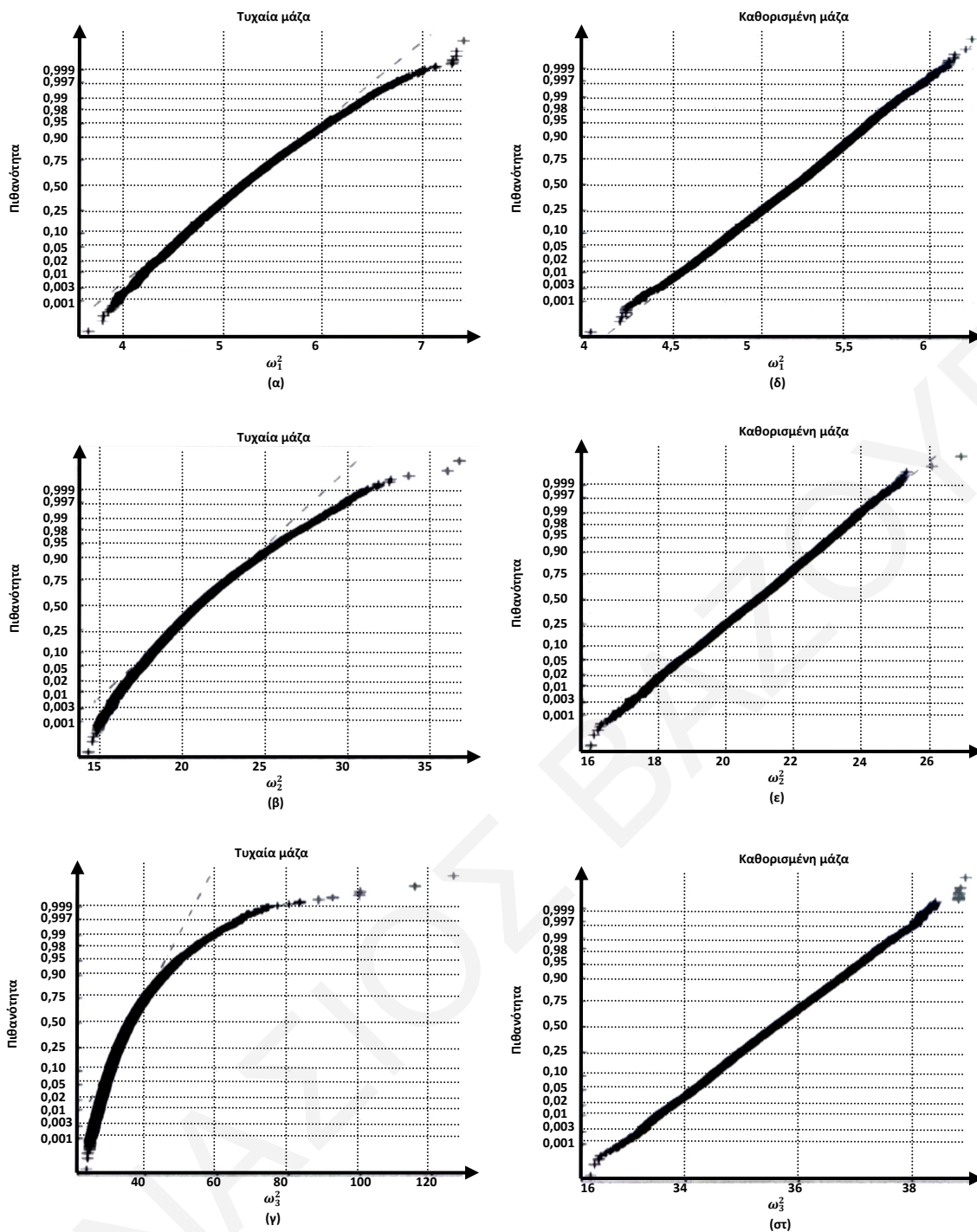
όπου οι τιμές στις παρενθέσεις αντιστοιχούν σε εκείνες που λαμβάνονται με τον υπολογισμό της συνδιασποράς των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων του δείγματος.

### 9.5 Η διασπορά του συστήματος χωρίς απόσβεση: τυχαίος πίνακας μάζας

Το σύστημα είναι το ίδιο με εκείνο όπως στην παράγραφο 9.3.3, όμως χωρίς απόσβεση. Ο πίνακας συνδιασποράς για ένα δείγμα 10.000 συστημάτων είναι ο ακόλουθος:

$$\text{cov}(\omega_i^2, \omega_j^2) = \begin{bmatrix} 0,3213(0,2278) & 0,8184(0,6854) & 1,4417(2,3162) \\ 0,8184(0,6854) & 6,3378(6,2608) & 2,2885(1,5168) \\ 1,4417(2,3168) & 2,2885(1,5168) & 43,0737(45,2783) \end{bmatrix} \quad (150)$$

Οι συνδιασπορές χωρίς παρένθεση ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τη σχέση (144). Ο συμμετρικός πίνακας  $\text{cov}(\text{vec}(\mathbf{K}_{\text{ch}}))$  δηλαδή ο πίνακας συνδιασποράς των στοιχείων του διανυσματοποιημένου  $\mathbf{K}_{\text{ch}}$ , αποτελεί το παρατηρήσιμο μέγεθος του πίνακα συνδιασποράς των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων. Επειδή δεν υπάρχει καμία γνωστή θεωρία που καθορίζει την κατανομή του  $\mathbf{K}_{\text{ch}}$  από τα στοιχεία των πινάκων  $\mathbf{K}$  και  $\mathbf{R}$ , ένα συμπέρασμα στο οποίο θα μπορούσε κάποιος να καταλήξει είναι ότι δεν πρόκειται για κανονική κατανομή. Ο πολλαπλασιασμός του  $\mathbf{K}$  με τον αντίστροφο του  $\mathbf{R}$  δίνει λόγο μεταξύ δύο μεταβλητών που είναι τυχαίες μεταβλητές [90]. Ως εκ τούτου, ο παρατηρήσιμος πίνακας  $\text{cov}(\text{vec}(\mathbf{K}_{\text{ch}}))$  αποτελείται από συνδιασπορές που προκύπτουν από τιμές τυχαίων μεταβλητών που δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Η κανονικότητα της κατανομής επηρεάζει ιδιαίτερα τη διασπορά, επειδή αυτή εξαρτάται από το τετράγωνο της τυχαίας μεταβλητής. Κατά συνέπεια, οι αναμενόμενες τιμές της συνδιασποράς που παρουσιάζονται χωρίς παρένθεση στη σχέση (150) λαμβάνονται από μια παράμετρο που προέρχεται από μια ασυνεπή εκτίμηση. Ομοίως, οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι συνδιασπορές των αναλογιών των τυχαίων μεταβλητών του δείγματος. Αυτό προκύπτει από τη σχέση (65), όπου το τετράγωνο των ιδιοσυχνοτήτων που εκφράζεται ως λόγος της δυσκαμψίας ιδιομορφών (modal stiffness) προς τη μάζα ιδιομορφών (modal mass).



Σχήμα 70: Γραφική απεικόνιση πιθανοτήτων των τετραγώνων των τριών ιδιοσυχνοτήτων σε συστήματα χωρίς απόσβεση

Το Σχήμα 70 απεικονίζεται η πιθανότητα για τις ιδιοσυχνότητες  $\omega_1^2$ ,  $\omega_2^2$  και  $\omega_3^2$  αντίστοιχα. Τα σχήματα (α), (β) και (γ) αντιστοιχούν σε μη αποσβεσμένα συστήματα με τυχαία μάζα και τα σχήματα (δ), (ε) και (στ) σε μη αποσβεσμένα συστήματα με ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα. Η απόκλιση των δειγμάτων από την ευθεία γραμμή στα σχήματα (α), (β) και (γ) καταδεικνύουν ότι η κατανομή των τετραγώνων ιδιοσυχνοτήτων δεν είναι κανονική. Από την άλλη πλευρά, η πολύ μεγάλη εγγύτητα στην ευθεία γραμμή στα αριστερά σχήματα (δ), (ε) και (στ)

καταδεικνύει ότι η κατανομή είναι κανονική στην περίπτωση μη αποσβεσμένων συστημάτων με ντετερμινιστικά καθορισμένους πίνακες μάζας. Ως εκ τούτου, οι εκτιμήσεις της συνδιασποράς σε περίπτωση τυχαίας μάζας δεν είναι ακριβείς.

## 9.6 Αβέβαιο σύστημα με απόσβεση: ντετερμινιστικά καθορισμένη μάζα

Προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε η αποσύνθεση Cholesky για τους πίνακες της μάζας ώστε να εξασφαλιστεί συμμετρία των παρατηρήσιμων μεγεθών που αντιστοιχούν στο τετράγωνο των ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης. Η έκφραση για το τετράγωνο της ιδιοσυχνότητας δίνεται από τη σχέση (142).

Οι πίνακες συνδιασποράς του τετράγωνου της ιδιοσυχνότητας και οι ρυθμοί απόσβεσης μπορούν να προσδιοριστούν σύμφωνα με την ακόλουθη ανάλυση.

### A. Θεώρημα

Ορισμός νέων πινάκων πυκνότητας από:

$$\mathbf{Q}_{ij} = (\Phi_i \otimes \Phi_i)(\Phi_j \otimes \Phi_j)^H \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (151)$$

όπου  $\Phi_i$  και  $\Phi_j$  είναι τα μιγαδικά κανονικοποιημένα στη μονάδα ιδιοδιανύσματα του συστήματος με απόσβεση. Τότε ισχύει ότι:

$$E(\text{cov}(\omega_i^2, \omega_j^2)) = \text{abs}\left(\text{Tr}\left(\bar{\mathbf{Q}}_{ij} \text{cov}(\text{vec}(\mathbf{K}_{ch}))\right)\right) \quad (152)$$

και

$$E(\text{cov}(2\zeta_i \omega_i, 2\zeta_j \omega_j)) = \text{abs}\left(\text{Tr}\left(\bar{\mathbf{Q}}_{ij} \text{cov}(\text{vec}(\mathbf{C}_{ch}))\right)\right) \quad (153)$$

όπου  $\text{abs}(\cdot)$  δηλώνει την απόλυτη τιμή ενός μιγαδικού αριθμού,  $\bar{\mathbf{Q}}_{ij}$  είναι ο μέσος όρος των πινάκων πυκνότητας που ορίζονται στη σχέση (151) και  $\mathbf{C}_{ch}$  και  $\mathbf{K}_{ch}$  δίνονται από τις σχέσεις (79) και (80) αντίστοιχα.

## Απόδειξη

Δίνεται μόνο η απόδειξη της σχέσης (152), ενώ η απόδειξη της σχέσης (153) είναι παρόμοια. Οι πίνακες πυκνότητας  $\mathbf{Q}_{ij}$  που αντιστοιχούν σε  $i \neq j$  ορίζονται στη σχέση (151) και περιέχουν μιγαδικά στοιχεία και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα του  $Tr(\bar{\mathbf{Q}}_{ij})$  είναι επίσης ένας μιγαδικός αριθμός. Δεδομένης της απόδειξης στην παράγραφο 9.4, μπορεί να διατυπωθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\left( (\Phi_i \otimes \Phi_i)^H cov(vec(\mathbf{K}_{ch})) (\Phi_j \otimes \Phi_j) \right) \left( (\Phi_i \otimes \Phi_i)^H cov(vec(\mathbf{K}_{ch})) (\Phi_j \otimes \Phi_j) \right)^H \quad (154)$$

επομένως για κάθε όρο σε παρένθεση ισχύει ότι:

$$\left( Tr(\mathbf{Q}_{ij} cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))) \right) \left( Tr(\mathbf{Q}_{ij} cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))) \right)^* = \left( cov(\omega_i^2, \omega_j^2) \right)^2 \quad (155)$$

όπου \* δηλώνει συζυγή μιγαδικό.

Η λήψη της τετραγωνικής ρίζας των δύο πλευρών αυτής της σχέσης οδηγεί στη σχέση:

$$abs \left( \left( Tr(\mathbf{Q}_{ij} cov(vec(\mathbf{K}_{ch}))) \right) \right) = cov(\omega_i^2, \omega_j^2) \quad (156)$$

Λαμβάνοντας τον μέσο όρο δίνει, τη σχέση (152). Οι αναμενόμενες και οι πραγματικές τιμές της συνδιασποράς του δείγματος βρέθηκαν να είναι:

$$cov(\omega_i^2, \omega_j^2) = \begin{bmatrix} 0,2047(0,2051) & 0,3494(0,3492) & 0,5495(0,5498) \\ 0,3494(0,3492) & 4,2112(4,1766) & 0,6038(0,5961) \\ 0,5495(0,5498) & 0,6038(0,5961) & 2,4639(2,4874) \end{bmatrix} \quad (157)$$

και

$$cov(2\zeta_i \omega_i, 2\zeta_j \omega_j) = \begin{bmatrix} 0,0372(0,0377) & 0,1583(0,1598) & 0,0708(0,0679) \\ 0,1583(0,1598) & 0,8561(0,8817) & 0,3171(0,2832) \\ 0,0708(0,0679) & 0,3171(0,2832) & 0,1876(0,2192) \end{bmatrix} 10^{-3} \quad (158)$$

στις παρενθέσεις είναι οι τιμές που λαμβάνονται απ' ευθείας από το δείγμα.

## 9.7 Ανθρώπινο σώμα: Αβέβαιο σύστημα με απόσβεση και τυχαία μάζα

Μέσα στο πλαίσιο της θεωρίας που αναπτύχθηκε παραπάνω, έγινε ο υπολογισμός της αβεβαιότητας του ανθρώπινου σώματος και εφαρμόστηκε η θεωρία του πίνακα πυκνότητας για να υπολογιστούν το τετράγωνο και η διακύμανση της μέσης τιμής και του ρυθμού απόσβεσης καθώς και οι αναμενόμενες τιμές τους.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στις πιο κάτω σχέσεις, οι οποίες προέκυψαν από τα δεδομένα μοντελοποίησης για τυχαία διέγερση και ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine” αντίστοιχα. Σε ότι αφορά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, είναι αυτά που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση και αφορούν αποκλειστικά τους χειριστές που το σώμα τους παρουσιάζει μόνο δύο ιδιομορφές. Υπενθυμίζεται ότι ο Πίνακας 5 και ο Πίνακας 6 περιέχει τον αριθμό των χειριστών ανά αριθμό ιδιομορφών που εμφανίζονται στο σώμα των χειριστών. Όπως προαναφέρθηκε, για λόγους σύγκρισης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας το δείγμα περιορίστηκε σε εκείνους τους χειριστές το σώμα των οποίων παρουσιάζει δύο ιδιομορφές. Αυτοί αποτελούσαν το 80% του δείγματος σε τυχαία διέγερση και το 77% του δείγματος σε ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.

Τυχαία διέγερση

$$\begin{bmatrix} \overline{\omega_r^2} & Tr(\overline{\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_{nom}^K}) \\ 5,3 \cdot 10^3 & 6,0 \cdot 10^3 \\ 3,5 \cdot 10^4 & 3,2 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \quad (159)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{2\zeta_r \omega_r} & Tr(\overline{\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_{nom}^C}) \\ 80,6 & 76,2 \\ 85,3 & 98,9 \end{bmatrix} \quad (161)$$

$$\begin{bmatrix} var(\omega_r^2) \\ 1,7 \cdot 10^4(870) \\ 7,5 \cdot 10^4(1,4 \cdot 10^4) \end{bmatrix} \quad (163)$$

$$\begin{bmatrix} var(2\zeta_r \omega_r) \\ 1,6 \cdot 10^8(3,8 \cdot 10^7) \\ 3,3 \cdot 10^9(4,2 \cdot 10^9) \end{bmatrix} \quad (165)$$

Ημιτονοειδής διέγερση τύπου “sweep sine”

$$\begin{bmatrix} \overline{\omega_r^2} & Tr(\overline{\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_{nom}^K}) \\ 3,1 \cdot 10^3 & 4,1 \cdot 10^3 \\ 2,7 \cdot 10^4 & 2,6 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \quad (160)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{2\zeta_r \omega_r} & Tr(\overline{\mathbf{Q}_r \mathbf{A}_{nom}^C}) \\ 66,2 & 69,9 \\ 79,0 & 82,3 \end{bmatrix} \quad (162)$$

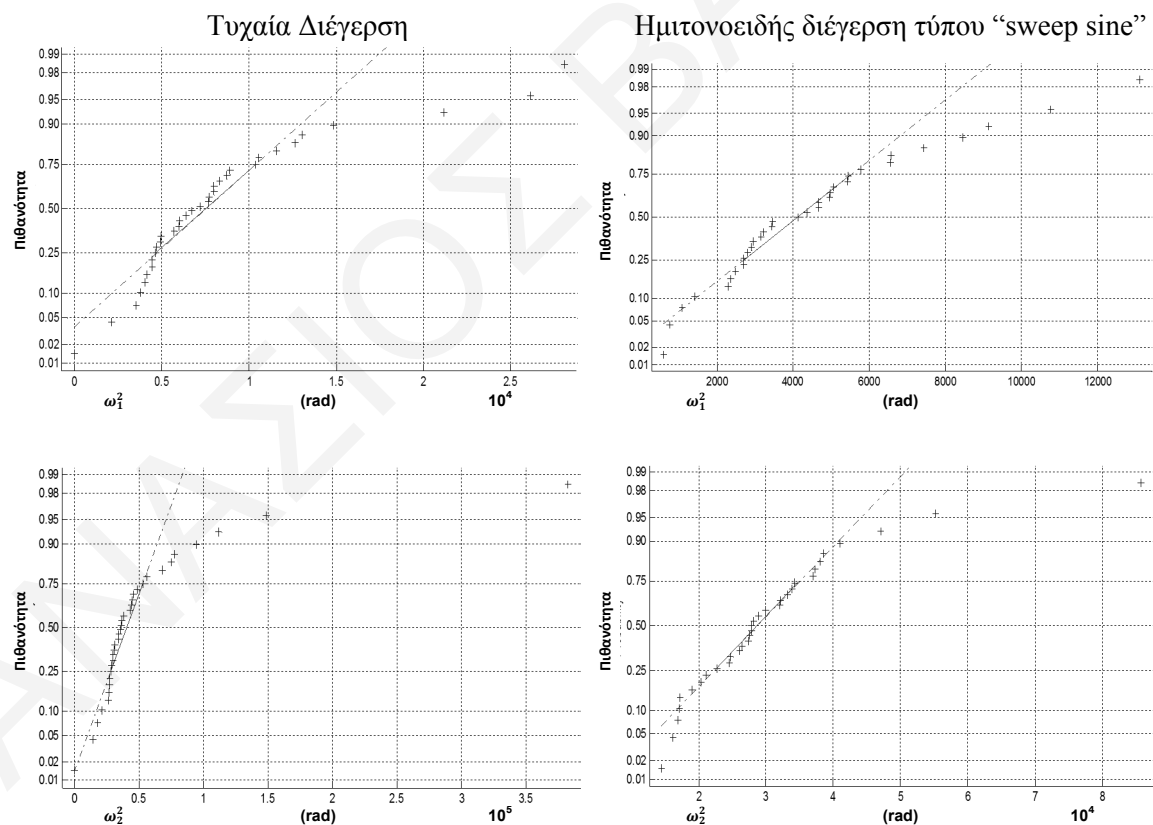
$$\begin{bmatrix} var(\omega_r^2) \\ 3,5 \cdot 10^4(888) \\ 4,7 \cdot 10^4(7,1 \cdot 10^3) \end{bmatrix} \quad (164)$$

$$\begin{bmatrix} var(2\zeta_r \omega_r) \\ 2,8 \cdot 10^8(8 \cdot 10^6) \\ 2,9 \cdot 10^8(1,8 \cdot 10^8) \end{bmatrix} \quad (166)$$

Στις παρενθέσεις είναι οι τιμές που λαμβάνονται απ'ευθείας από το δείγμα (οι τιμές του  $\omega_r$  είναι εκφρασμένες σε rad/s).

Οι σχέσεις (159) έως (162) περιέχουν τις αναμενόμενες τιμές των  $\overline{\omega_r^2}$  και  $\overline{2\zeta_r\omega_r}$ , χωρίς την αφαίρεση της προκατάληψης. Οι αναμενόμενες τιμές είναι οι  $Tr(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_{nom}^K)$  και  $Tr(\overline{\mathbf{Q}}_r \mathbf{A}_{nom}^C)$  αντίστοιχα. Οι σχέσεις (159) έως (162) παρουσιάζουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με την ακρίβεια των σχέσεων (139) και (140) αντίστοιχα, γεγονός αναμενόμενο εφόσον πρόκειται για σύστημα με τυχαίους πίνακες μάζας και, δυσκαμψίας συντελεστών απόσβεσης.

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που πηγάζει από τις πιο πάνω σχέσεις είναι ότι, οι εκτιμήσεις της διασποράς δεν είναι συνεπείς σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή της διασποράς όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (163) έως (166) επειδή η μάζα παρουσιάζει διακυμάνσεις (τυχαία μάζα) όπως επεξηγήθηκε αναλυτικά στην παράγραφο 9.5. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που αφορούν τους μέσους όρους των ιδιοσυχνοτήτων που υπολογίστηκαν κατευθείαν από το δείγμα της μοντελοποίησης δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με αυτά της παραγράφου 7.4 διότι υπάρχει διαφορά στο μέγεθος του δείγματος λόγω της εξαίρεσης του 20% περίπου του δείγματος για το λόγο ότι εμφάνιζε μόνο μία ιδιομορφή που να μην είναι υπεραποσβεσμένη.



Σχήμα 71: Γραφική απεικόνιση πιθανοτήτων για τα τετράγωνα της πρώτης και δεύτερης ιδιοσυχνότητας μετά τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος (συστήματα με σημαντική απόσβεση)



Επιπρόσθετα, σε ότι αφορά την κατανομή των τετραγώνων των ιδιοσυχνοτήτων επιβεβαιώνεται ότι η κατανομή που ακολουθούν δεν είναι κανονική για τον ίδιο λόγο που αναλύθηκε στην παράγραφο 9.5. Στο Σχήμα 71 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση πιθανοτήτων για  $\omega_1^2$  και  $\omega_2^2$  ανάλογα με τον τύπο της διέγερσης.

## 9.8 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε ένα νέο μοντέλο της αβεβαιότητας στον τομέα της δυναμικής των κατασκευών, χρησιμοποιώντας το σκεπτικό του πίνακα πυκνότητας. Αυτό οδηγεί στην επαναδιατύπωση των σχέσεων ορθογωνιότητας της ανάλυσης ιδιομορφών χρησιμοποιώντας τον τελεστή ίχνους (trace operator) και αυτός ο πίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της αβεβαιότητας σε κατασκευές (ή δομές με την ευρύτερη έννοια). Δείχθηκε ότι οι μέσοι πίνακες πυκνότητας αντιπροσωπεύουν μόνο εν μέρει τις μέσες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης. Οι μέσες τιμές μοντελοποιούνται με νέους πίνακες πυκνότητας, που λαμβάνονται από μέσους πίνακες πυκνότητας, μεγιστοποιώντας τη σχετική εντροπία.

Το ίχνος του γινομένου του πίνακα πυκνότητας με τους πίνακες του συστήματος (παρατηρήσιμα μεγέθη) είναι ένας τελεστής αναμενόμενης τιμής που χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι συνδιασπορές των ιδιοσυχνοτήτων και οι ρυθμοί απόσβεσης (σχετίζονται με την πρόγνωση των μέσων τιμών που οφείλονται στη μεταβλητότητα των παραμέτρων του συστήματος). Τα στοιχεία των πινάκων συνδιασποράς των ιδιοσυχνοτήτων και των ρυθμών απόσβεσης λαμβάνονται ως παρατηρήσιμα μεγέθη πινάκων συνδιασποράς που θεωρούνται ότι επενεργούν στους χώρους του γινομένου Kronecker των αρχικών διανυσματικών χώρων. Οι εκφράσεις τόσο για τις εκτιμώμενες μέσες τιμές όσο και τις συνδιασπορές δόθηκαν ως παράδειγμα σε αβέβια συστήματα με τρεις βαθμούς ελευθερίας.

Επιπλέον, η εφαρμογή της θεωρίας στο ανθρώπινο σώμα με τα δεδομένα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση, παρήγαγε αναμενόμενες μέσες τιμές για τη μέση τιμή και τη διασπορά των ιδιοσυχνοτήτων. Τα αποτελέσματα για τις αναμενόμενες τιμές που υπολογίστηκαν από τον πίνακα πυκνότητας πιθανότητας έδωσαν σύγκλιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση του δείγματος.

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παρέχει ένα ευρύ πλαίσιο για περαιτέρω μελέτη των μεθόδων ενημέρωσης μοντέλων και δομικών τροποποιήσεων σε αβέβαιες κατασκευές. Το ίχνος του προϊόντος των πινάκων πυκνότητας με τους πίνακες του συστήματος επιτρέπει τη χρήση αβέβαιων συστημάτων ως σαν να ήταν βέβαια συστήματα και, κατά συνέπεια, παρέχει το εργαλείο ώστε υφιστάμενες τεχνικές και γνώσεις που αναπτύχθηκαν για ενημέρωση μοντέλων και δομικές τροποποιήσεις να εφαρμοστούν σε αβέβαιες κατασκευές.

Η κατανομή των ιδιοσυχνοτήτων σε συστήματα με απόσβεση και τυχαία μάζα, όπως αυτή του ανθρώπινου σώματος, δεν είναι κανονική. Επομένως, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένη η υπόθεση ότι οι ιδιοσυχνότητες του ανθρώπινου σώματος σε ένα δείγμα, ακολουθούν την κανονική κατανομή.

## Κεφάλαιο 10

### Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

#### 10.1 Γενικά

Η μελέτη του ανθρώπινου σώματος από την άποψη της επίδρασης των κραδασμών παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις. Η αρχική ιδέα της παρούσας διατριβής, η οποία είχε ως στόχο να βασιστεί στην υφιστάμενη γνώση για τους κραδασμούς του ανθρώπινου σώματος και να προχωρήσει μοντελοποιώντας το ανθρώπινο σώμα και συσχετίζοντας πραγματικά δεδομένα επαγγελματικής έκθεσης, συνάντησε αρκετά θεωρητικά εμπόδια.

Από τη μία φαίνεται ότι η δημοσιευμένη έρευνα που έγινε τις τελευταίες δύο δεκαετίες στο θέμα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη της βιοδυναμικής περιγραφής της απόκρισης, δηλαδή με τη χρήση βιοδυναμικών συναρτήσεων<sup>12</sup>. Από την άλλη, η υψηλή απόσβεση του ανθρώπινου σώματος οδηγεί τη θεωρία των ιδιομορφών στα όριά της, δεδομένου ότι σε υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές δεν υπάρχει ταλάντωση.

Ακόμα και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για ανάλυση των δεδομένων λαμβάνει μόνο μερικώς υπόψη την ιδιαιτερότητα των συστημάτων με υπεραποσβεσμένες ιδιομορφές.

---

<sup>12</sup> Φαινόμενη μάζα, μηχανική εμπέδηση οδηγητικού σημείου και μεταβιβαστικότητα καθίσματος - κεφαλής.

Ενδεχομένως, η προσέγγιση μέσω των βιοδυναμικών συναρτήσεων να έδωσε στο παρελθόν αποτελέσματα τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση της ποιότητας των καθισμάτων των χειριστών, δεν μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν από τη θεωρία της ανάλυσης ιδιομορφών για περιγραφή του ανθρώπινου σώματος. Σε ότι αφορά τη φαινόμενη μάζα και τη μηχανική εμπέδηση, πρόκειται στην ουσία για το ίδιο μέγεθος με διαφορά φάσης  $90^\circ$  (βλέπε (2)). Στην πραγματικότητα, λοιπόν υπολογισμός του ενός μεγέθους συνεπάγεται υπολογισμό του άλλου.

Με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων εργαλείων για επιβεβαίωση της ερευνητικής υπόθεσης έγιναν θεωρητικοί υπολογισμοί. Κριτική μελέτη της βιοδυναμικά ορισμένης φαινόμενης μάζας έδειξε ότι το μέτρο της δεν σχετίζεται με τους συντονισμούς του σώματος, όμως το φανταστικό και πραγματικό της μέρος περιέχουν πληροφορίες για τη δυναμική του συστήματος .

Ανάλυση ευαισθησίας θεωρητικών μοντέλων 2 και 3<sup>ov</sup> βαθμών ελευθερίας έδειξε ότι η μείωση της απόσβεσης επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα συντονισμού της φαινόμενης μάζας, ενώ οι ιδιοσυχνότητες παραμένουν σταθερές.

Η διάθεση για συνεργασία από τους εργοδότες από τη μία και η αθρόα προσέλευση των χειριστών μηχανημάτων στο εργαστήριο από την άλλη επέτρεψε τη συλλογή ανά χειριστή και τη σύγκριση μεταξύ τους δεδομένων από μετρήσεις στο πεδίο και εργαστήριο καθώς και από ερωτηματολόγια σχετικά με την υγεία και ευημερία.

## **10.2 Μετρήσεις στο πεδίο**

Η επαγγελματική ομάδα των χειριστών μηχανημάτων εκτίθεται σε σημαντικά επίπεδα κραδασμών επειδή το όριο ανάληψης δράσης ξεπεράστηκε στην οκτάωρη επαγγελματική έκθεση σε επιτάχυνση r.m.s. στο 51% του δείγματος των χειριστών (53 χειριστές) και στη δόση σε κραδασμούς στο 19% του δείγματος των χειριστών. Το ανώτερο όριο για έκθεση σε κραδασμούς δεν ξεπεράστηκε σε οποιαδήποτε από τις μετρήσεις που έγιναν. Επίσης, στο 13% του δείγματος των χειριστών η μετρηθείσα τιμή της αιχμής ξεπέρασε τα όρια του προτύπου που αποτελεί για τους συγκεκριμένους χειριστές ένδειξη ότι εκτίθεντο σε υψηλές στιγμιαίες τιμές της επιτάχυνσης.

## **10.3 Ερωτηματολόγια**

Από την έρευνα μέσω των ερωτηματολογίων προέκυψαν μερικά πολύ σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση των χειριστών μηχανημάτων στην Κύπρο, εντοπίστηκαν επιβαρυντικοί παράγοντες και δείκτες για την επιρροή της υγείας και ευημερίας των χειριστών από τους κραδασμούς και αναλύθηκε το ατομικό εργασιακό ιστορικό.

#### **10.4 Συσχετίσεις**

Η πιο ενδιαφέρουσα συσχέτιση που εντοπίστηκε ήταν αυτή της πρώτης ιδιοσυχνότητας του σώματος, του εμβαδού της κανονικοποιημένης φαινόμενης μάζας και της μέγιστης τιμής της με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών. Οι πιο πάνω διαπιστώσεις υποστηρίζουν την υπόθεση ότι οι χειριστές με ενοχλήσεις στη μέση παρουσιάζουν πιο χαλαρό σώμα και έχουν μικρότερη απόσβεση στο σώμα τους από τους χειριστές χωρίς ενοχλήσεις στη μέση.

#### **10.5 Μοντελοποίηση- βελτιστοποίηση**

Οι μετρήσεις στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση, η οποία κατέδειξε την ύπαρξη διαφορετικών αριθμών μη υπεραποσβεσμένων ιδιομορφών ανά χειριστή και σημαντική διασπορά των μαζών, των σταθερών ελατηρίων και των συντελεστών απόσβεσης. Αυτό συνεπαγόταν μεγάλη αβεβαιότητα για τον τρόπο απόκρισης του ανθρώπινου σώματος.

#### **10.6 Υπολογισμός της αβεβαιότητας**

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος υπολογισμού της αβεβαιότητας, χρησιμοποιώντας το σκεπτικό του πίνακα πυκνότητας. Στο ίδιο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και τα όρια της μεθόδου. Η εφαρμογή της θεωρίας στο ανθρώπινο σώμα με τα δεδομένα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση, παρήγαγε αναμενόμενες μέσες τιμές για τη μέση τιμή και τη διασπορά των ιδιοσυχνοτήτων.

Επίσης δείχθηκε ότι η κατανομή των ιδιοσυχνοτήτων σε συστήματα με απόσβεση και τυχαία μάζα, όπως αυτή του ανθρώπινου σώματος, δεν είναι κανονική. Επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι οι ιδιοσυχνότητες του ανθρώπινου σώματος σε ένα δείγμα, ακολουθούν την κανονική κατανομή.

#### **10.7 Πρωτοτυπία της Διατριβής και συνεισφορά στη γνώση**

Από τα πιο πάνω συμπεραίνεται ότι η υπόθεση που διατυπώνεται στο Κεφάλαιο 3 επιβεβαιώνεται και προκύπτουν οι εξής πρωτοτυπίες σε ότι αφορά τις διαδικασίες που ακολουθούνται αλλά και τις γνώσεις που αποκτούνται:

## A. Νέες διαδικασίες

- α) Χρησιμοποιείται ένα μεγάλο δείγμα από 53 ενεργούς χειριστές μηχανημάτων για να συσχετιστεί για τον καθένα ξεχωριστά η βιοδυναμική απόκριση, με την κατάσταση της υγείας, τις φυσικές συχνότητες και την επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς, παρέχεται ένας τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας της ανταπόκρισης με παράλληλη μελέτη πεδίου και εργαστηριακές μετρήσεις.
- β) Χρησιμοποιείται η απόκριση στο πεδίο του χρόνου και μέσω του αλγόριθμου της διαφορικής εξέλιξης εκτιμώνται οι πίνακες της μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης του ανθρώπινου σώματος με τη χρήση ενός καθιερωμένου μοντέλου τριών βαθμών ελευθερίας.

## B. Νέες γνώσεις

- α) Η βιοδυναμική φαινόμενη μάζα που ορίζεται ως βιοδυναμική συνάρτηση μεταφοράς διαφέρει από τον κοινώς παραδεκτό ορισμό για τη φαινόμενη μάζα της δυναμικής του συστήματος, δηλαδή η βιοδυναμική φαινομενική μάζα είναι το αντίστροφο της συνάρτησης απόκρισης συχνοτήτων γνωστής ως «accelerance». Αυτό αποδεικνύει ότι οι συντονισμοί της βιοδυναμικής φαινόμενης μάζας δεν είναι οι ίδιοι με τις φυσικές συχνότητες και είναι πολύ ευαίσθητοι στην απόσβεση η οποία έχει θεμελιώδη σημασία στην απόκριση του ανθρώπινου σώματος .
- β) Η βιοδυναμική φαινόμενη μάζα περιέχει πολύτιμες πληροφορίες για την απόκριση του ανθρώπινου σώματος που μπορεί να προκύψουν τόσο από το φανταστικό μέρος (απόσβεση) όσο και από το πραγματικό της μέρος (συχνότητες συντονισμού). Επιπλέον, η κανονικοποιημένη βιοδυναμική φαινόμενη μάζα σχετίζεται στατιστικά με τις ενοχλήσεις στη μέση των χειριστών. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι οι υγιείς χειριστές έχουν πιο άκαμπτο σώμα και εμφανίζουν περισσότερη απόσβεση .
- γ) Το δείγμα των χειριστών μηχανημάτων εκτίθεται σε ανησυχητικά επίπεδα κραδασμών ολόκληρου του σώματος. Οι χειριστές δηλώνουν συχνά προβλήματα υγείας, κυρίως στην πλάτη τους, αλλά και στον αυχένα και τους ώμους. Παράλληλα ταυτοποιήθηκαν ποιοτικοί και ποσοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επίδραση των κραδασμών στην υγεία.

- δ) Παρουσιάστηκε ένα νέο μοντέλο της αβεβαιότητας στην δυναμική των κατασκευών με τη χρήση του πίνακα πυκνότητας. Αυτό οδηγεί στην επαναδιατύπωση των σχέσεων ορθογωνιότητας της ανάλυσης ιδιομορφών χρησιμοποιώντας τον τελεστή ίχνους και το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αβέβαιων δομών. Το μοντέλο παρέχει αναμενόμενες τιμές για τα παρατηρήσιμα μεγέθη που σχετίζονται με την απόκριση του ανθρώπινου σώματος. Η μεθοδολογία παρέχει το πλαίσιο για περαιτέρω μελέτη της αναθεώρησης μοντέλων και δομικών μετασκευών για βέβαιες δομές .

## 10.8 Μελλοντική εργασία

Επειδή στην παρούσα μελέτη δεν υπήρχε δείγμα από τον γενικό πληθυσμό και η μελέτη έγινε σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, η ποιότητα των αποτελεσμάτων επηρεάστηκε από παράγοντες που σχετίζονται με το ίδιο δείγμα. Για παράδειγμα θα ήταν χρήσιμο να υπάρχουν στοιχεία για λόγους σύγκρισης και από ανθρώπους του γενικού πληθυσμού που δεν εκτίθενται σε σημαντικούς κραδασμούς ολόκληρου του σώματος (control group). Επίσης, για βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων θα ήταν καλύτερα να διερευνηθεί η επαγγελματική ομάδα για αριθμό ετών επειδή με τα χρόνια ενδεχομένως ορισμένοι χειριστές να αλλάζουν θέσεις εργασίας ώστε να μην εκτίθενται σε κραδασμούς ή αποσύρονται για λόγους υγείας<sup>13</sup>. Επιπρόσθετα από τα ερωτηματολόγια θα μπορούσε να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η συνολική δόση σε δονήσεις που έχει δεχτεί ο υπό διερεύνηση πληθυσμός αν χρησιμοποιηθούν αρχεία βάσεων δεδομένων για μηχανήματα.

Τα ιατρικά δεδομένα των χειριστών θα μπορούσαν να ληφθούν από τα ιατρικά αρχεία τους και όχι με ερωτηματολόγια, τα οποία περιέχουν μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας. Βασική προϋπόθεση βέβαια είναι να υπάρχουν τέτοια ιατρικά αρχεία. Για το σκοπό αυτό πρέπει να γίνει πιστή εφαρμογή των νομοθετικών ρυθμίσεων με σκοπό τη δημιουργία τέτοιων αρχείων, ιδιαίτερα τώρα που είναι γνωστό ότι υπάρχει υπέρβαση των ορίων ανάληψης δράσης, δηλαδή τεκμηριώνεται η υποχρέωση των εργοδοτών για ιατρική παρακολούθηση των χειριστών σε σχέση με τους κραδασμούς. Μπορούν επίσης να γίνουν μετρήσεις σε άλλους χώρους εργασίας και να συγκριθεί η επαγγελματική έκθεση σε κραδασμούς διαφόρων κατηγοριών χειριστών μηχανημάτων. Στις μετρήσεις αυτές μπορεί να μετρηθεί και η επιρροή των κραδασμών στην ισορροπία των χειριστών με μέτρηση σε πλατφόρμα ισορροπίας πριν και αμέσως μετά τη χρήση του μηχανήματος.

---

<sup>13</sup> Το φαινόμενο ονομάζεται “healthy worker effect” και σημαίνει ότι στην πορεία της εργασίας τους οι ασθενείς εργαζόμενοι αναγκαστικά αποσύρονται. Επομένως σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή θα βρίσκονται στην ενεργό επαγγελματική δράση μόνο υγιείς εργαζόμενοι [100].

Το μοντέλο τριών βαθμών ελευθερίας του προτύπου ISO 5982: 2001 [25] δίνει μεν σύγκλιση για τη φαινόμενη μάζα, κυρίως στο σημείο συντονισμού της φαινόμενης μάζας, όμως για τη βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα της απόκρισης θα πρέπει να αναζητηθούν πιο πολύπλοκα μοντέλα.

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε για υπολογισμό της αβεβαιότητας παρέχει ένα ευρύ πλαίσιο για περαιτέρω μελέτη των μεθόδων ενημέρωσης μοντέλων και δομικών τροποποιήσεων σε αβέβαιες κατασκευές. Το ίχνος του προϊόντος των πινάκων πυκνότητας με τους πίνακες του συστήματος επιτρέπει τη χρήση αβέβαιων συστημάτων ως να ήταν βέβαια συστήματα και, κατά συνέπεια, παρέχει το εργαλείο ώστε υφιστάμενες τεχνικές και γνώσεις που αναπτύχθηκαν για ενημέρωση μοντέλων και δομικές τροποποιήσεις να εφαρμοστούν σε αβέβαιες κατασκευές.



## Βιβλιογραφία

- [1] *Directive 2002/44/EC of the Council of the European Union on the minimum Health and Safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (Vibration).*
- [2] International Labour Organization, *C148 - Working Environment (Air Pollution, Noise and Vibration) Convention, (No. 148)*, Geneva, 1977.
- [3] U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, "Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors," National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, 1997.
- [4] R. L. Williams, W. Ji, J. N. Howell and R. R. Conatser, "Device for Measurement of Human Tissue Properties In Vivo," *Journal of Medical Devices*, vol. 1, no. 3, pp. 197-205, 2007.
- [5] S. Kitazaki and M. J. Griffin, "Resonance behavior of the seated human body and effects of posture," *Journal of Biomechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 143-149, 1998.
- [6] H. Seidel, "On The Relationship between whole - body Vibration exposure and Spinal Health risk," *Industrial Health*, vol. 43, no. 3, pp. 361-377, 2005.
- [7] N. J. Mansfield, *Human Response to Vibration*, Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [8] M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, Eastbourne: Elsevier Academic Press, 1990.
- [9] I. Pinto and N. Stacchini, "Uncertainty in the evaluation of occupational exposure to whole - body vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, no. 3, p. 556-562, 2006.
- [10] *ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole - body vibration -Part 1: General requirements*, 1997.
- [11] *BS 6841: Measurement and evaluation of human exposure to whole - body mechanical vibration*, 1987.
- [12] C. H. Lewis and M. J. Griffin, "A comparison of evaluations and assessments obtained using alternative standards for predicting the hazards of whole - body vibration and repeated shock," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, pp. 915-926, 1998.
- [13] EC Biomed II, *Final Report, Research Network on Detection and Prevention of Injuries due to Occupational Vibration Exposures*, project no. BMH4-CT98-3251, April 1988 to March 2001.
- [14] European Agency for Safety and Health at Work, *Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review*, European Risk Observation Report, Office for Official Publications of the European Communities, 2008.

- [15] J. Malchaire, A. Piette and I. Mullier, "Vibration exposure on fork-lift trucks," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 40, no. 1, pp. 79-91, 1996.
- [16] K. T. Palmer, M. J. Griffin, H. Bendall, B. Pannett and D. Coggon, "Prevalence and pattern of occupational exposure to whole body vibration in Great Britain: findings from a national survey," *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 57, no. 4, pp. 229-236, 2000.
- [17] P. M. Bongers, C. T. Hulstoft, L. Dijkstra, H. C. Boshuizen, J. M. Groenhout and E. Valken, "Back pain and exposure to whole body vibration in helicopter pilots," *Ergonomics*, vol. 33, no. 8, pp. 1007-1026, 1990.
- [18] G. W. David, "The Biomechanics of Vibration and Low Back Pain," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 23, no. 4, pp. 577-588, 1993.
- [19] G. Zhang, "Evaluating the viscoelastic properties of biological tissues in a new way," *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, vol. 5, no. 1, pp. 85-90, 2005.
- [20] M. Szpalski and A. Gunzburg, "In Vivo effects of Iatrogenic Injuries of the Spine on Intervertebral Motion and Biomechanics," in *The Failed Spine*, Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2005, pp. 15-24.
- [21] A. G. Hadjipavlou, M. N. Tzermiadianos and M. R. Zindrick, "The pathophysiology of disc degeneration," *The Bone & Joint Journal*, Vols. 90.-B, no. 10, pp. 1261-1270, 2008.
- [22] V. Gerodimos, A. Zafeiridis, K. Karatrantou, T. Vasilopoulou, K. Chanou and E. Pispirikou, "The acute effects of different whole-body vibration amplitudes and frequencies on flexibility and vertical jumping performance," *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 13, no. 4, pp. 438-443, 2010.
- [23] K. Karatrantou, V. Gerodimos, K. Dipla and A. Zafeiridis, "Whole - body vibration training improves flexibility, strength profile of knee flexors, and hamstrings - to - quadriceps strength ratio in females," *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 16, no. 5, pp. 477-481, 2012.
- [24] R. Lundström, P. Holmlund and L. Lindberg, "Absorption of energy during vertical whole - body vibration exposure," *Journal of Biomechanics*, vol. 31, no. 4, pp. 317-326, 1998.
- [25] *ISO 5982: Mechanical vibration and shock - Range of idealized values to characterize seated body biodynamic response under vertical vibration*, 2001.
- [26] European Commission, Non binding guide to good practice with a view to implementation of Directive 2002/44/EC (Vibrations at Work), Italy: Office for Official Publications of the European Communities, 2007.
- [27] H. Seidel, "Selected Health Risks Caused by Long-Term, Whole-Body Vibration," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 23, no. 4, pp. 589-604, 1993.
- [28] X. Wu, S. Rakheja and P.-É. Boileau, "Analysis of relationships between biodynamic response functions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 266, no. 3, pp. 595-606, 1999.

- [29] T. E. Fairlay and M. J. Griffin, "The apparent mass of the seated human body: vertical vibration," *Journal of Biomechanics*, vol. 22, no. 2, pp. 81-94, 1998.
- [30] G. J. Stein, P. Můčka, B. Hinz and R. Blüthner, "Measurement and modeling of the y-direction apparent mass of sitting human body-cushioned seat systems," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 322, no. 2, pp. 454-474, 2009.
- [31] P. Holmlund, R. Lundström and L. Lindberg, "Mechanical impedance of the human body in vertical direction," *Applied Ergonomics*, vol. 31, no. 4, pp. 415-422, 2000.
- [32] N. J. Mansfield, "Impedance Methods (Apparent Mass, Mechanical Impedance and Absorbed Power) for Assessment of Biomechanical Response of the Seated Person to Whole-Body Vibration," *Industrial Health*, vol. 43, pp. 378-389, 2005.
- [33] N. J. Mansfield and M. J. Griffin, "Effect of magnitude of vertical whole-body vibration on absorbed power for the seated human body," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, pp. 813-825, 1998.
- [34] P.-É. Boileau, S. Rakheja and X. Wu, "A body mass dependent mechanical impedance model for applications in vibration seat testing," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, no. 1, pp. 243-264, 2002.
- [35] B. Hinz, H. Seidel, G. Menzel and R. Blüthner, "Effects related to random whole-body vibration and posture on a suspended seat with and without backrest," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, no. 1, pp. 265-282, 2002.
- [36] Y. Matsumoto and M. J. Griffin, "Effect of muscle tension on non-linearities in the apparent masses of seated subjects exposed to vertical whole-body vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253, no. 1, pp. 77-92, 2000.
- [37] N. J. Mansfield and M. J. Griffin, "Non-linearities in apparent mass and transmissibility during exposure to whole-body vertical vibration," *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 8, pp. 933-941, 2000.
- [38] N. J. Mansfield, P. Holmlund, R. Lundström, P. Lenzuni and P. Nataletti, "Effect of vibration magnitude, vibration spectrum and muscle tension on apparent mass and cross axis transfer functions during whole-body vibration exposure," *Journal of Biomechanics*, vol. 39, no. 16, pp. 3062-3070, 2006.
- [39] N. J. Mansfield, P. Holmlund and R. Lundström, "Apparent mass and absorbed power during exposure to whole-body vibration and repeated shocks," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 248, no. 3, pp. 427-440, 2001.
- [40] B. Hinz, R. Blüthner, G. Menzel, S. Rützel, H. Seidel and H. P. Wölfel, "Apparent mass of seated men-Determination with single and multi-axis excitation at different magnitudes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, no. 3, pp. 788-809, 2006.
- [41] P. Holmlund and R. Lundström, "Mechanical impedance of the human body in horizontal direction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, pp. 801-812, 1998.

- [42] P. Holmund and R. Lundström, "Mechanical impedance of the sitting human body in single-axis compared to multi-axis whole body vibration exposure," *Chlinical Biomechanics*, vol. 16, no. Supplement No. 1, pp. S101-S110, 2001.
- [43] G. S. Paddan and M. J. Griffin, "Review of the transmission of translational seat vibration to the head," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, pp. 863-882, 1998.
- [44] W. Wang, S. Rakheja and P.-É. Boileau, "Relationships between measured apparent mass and seat-to-head transmissibility responses of seated occupants exposed to vertical vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 314, no. 3-5, pp. 907-922, 2008.
- [45] B. Rützel, H. B. and H. P. Wölfel, "Modal Description - A better way of characterizing human vibration behavior," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, no. 3, pp. 810-823, 2006.
- [46] D. J. Ewins, *Modal Testing theory, practice and application*, Baldock: Research Studies Press Ltd, 2000.
- [47] R. Craig and A. J. Kurdila, *Fundamentals of structural dynamics*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [48] D. Findeisen, *System Dynamics and Mechanical Vibrations*, Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [49] N. J. Mansfield, "Impedance Methods (Apparent Mass, Driving Point Mechanical Impedance and Absorbed Power) for Assessment of the Biomechanical Response of the Seated Person to Whole-body Vibration," *Industrial Health*, vol. 43, no. 3, pp. 378-389, 2005.
- [50] L. Wei and M. J. Griffin, "Mathematical models for the apparent mass of the seated human body exposed to vertical vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 212, no. 5, pp. 855-874, 1998.
- [51] R. L. Williams II, J. Wei, J. N. Howell and R. R. Conatser Jr., "In Vivo Measurement of Human Tissue Compliance," in *SAE Digital Human Modeling Conference, Paper #2007-01-2453*, Seattle, 2007.
- [52] H. Seidel, B. Hinz, J. Hofmann and G. Menzel, "Intraspinal forces and health risk caused by whole - body vibration - Predictions for European drivers and different field conditions," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, no. 9-10, pp. 856-867, 2008.
- [53] European Commission, *Eurobarometer 246/wave 64,3-TNS opinion & social*, Brussels, 2006.
- [54] B. P. Bernard, "A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back," U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, Cincinnati, 1997.
- [55] *Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of Council on machinery*, 2006.

- [56] "Οι περί Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία (Προστασία από τους Κραδασμούς) Κανονισμοί (Κ.Δ.Π. 332/2005)," Επίσημη Εφημερίδα της Κυπριακής Δημοκρατίας, αρ.4015, 22 Ιουλίου 2015.
- [57] K. T. Palmer, B. Haward, M. J. Griffin, H. Bendall and D. Coggon, "Validity of self reported occupational exposures to hand transmitted and whole body vibration," *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 57, no. 4, p. 237–241, 2000.
- [58] P. Young, "Parameter estimation for continuous-time models - A survey," *Automatica*, vol. 17, no. 1, pp. 23-39, 1981.
- [59] T. Söderström and P. Stoica, *System Identification*, New York: Prentice Hall, 1989.
- [60] E. Walter, L. Pronzato and J. Norton, *Identification of Parametric Models: from Experimental Data (Communications and Control Engineering)*, Springer, 2010.
- [61] Δ. Π. Ψωινός, *Εφαρμοσμένη Στατιστική, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη*, 1992.
- [62] S. S. Rao, "Engineering optimisation," in *Third edition*, New York, Wiley-Interscience, 1996.
- [63] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, p. 341–359, 1997.
- [64] A. Kyprianou, *Non-linear parameter estimation of dynamic models using differential evolution: application to hysteretic systems and hydraulic engine mounts*, PhD Thesis, University of Sheffield, 1999.
- [65] R. Storn and K. Price, "Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution," in *IEEE International conference on evolutionary computation*, 1996.
- [66] A. Kyprianou, *Explanatory notes for Eigenvalues*, Nicosia, 2014.
- [67] K. Chanou, V. Gerodimos, K. Karatrantou and A. Jamurtas, "Whole-Body Vibration and Rehabilitation of Chronic Diseases: A Review of the Literature," *Journal of Sports Science and Medicine*, vol. 11, no. 2, pp. 187-200, 2012.
- [68] B. R. Mace, K. Worden and G. Manson, "Uncertainty in structural dynamics," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 288, no. 3, pp. 423-429, 2005.
- [69] GUIDE 98-3, *Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, Geneva: ISO/IEC, 2008.
- [70] G. I. Schuëller, "A state of the art report on computational stochastic mechanics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, no. Special Issue 12, pp. 197-321, 1997.
- [71] B. R. Mace, K. Worden and G. Manson, "Uncertainty in structural Dynamics," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 288, no. 3, pp. 423-429, 2005.

- [72] G. I. Schuëller and G. J. Prandlwarter, "Uncertain linear systems in dynamics: Retrospective and recent developments by stochastic approaches," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 2507-2517, 2009.
- [73] K. Blum, *Density Matrix Theory and Applications*, Heidelberg Dordrecht London New York: Springer-Verlag, 1981, 1996, 2012.
- [74] D. Petz, *Quantum information theory and quantum statistics, Theoretical and Mathematical Physics*, Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2008.
- [75] K. S. Au and L. F. Zhang, "On assessing the posterior mode shape uncertainty in ambient modal identification," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 26, pp. 427-434, 2011.
- [76] P. Ghanem and P. Spanos, *Stochastic finite elements: A spectral approach*, New York Berlin Heidelberg: Springer, 1991.
- [77] P. Ladeveze, G. Puel, T. Romeuf and A. Deraemaeker, "Validation of structural dynamics models containing uncertainties," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 195, no. 4-6, pp. 373-393, 2006.
- [78] B. Faverjon, P. Ladeveze and F. Louf, "Validation of stochastic linear structural dynamics models," *Computers and Structures*, vol. 87, no. 13-14, pp. 829-837, 2009.
- [79] B. Faverjon, P. Ladeveze and F. Louf, "An updating method for structural dynamics models with uncertainties," *Shock and Vibration*, vol. 15, no. 3-4, pp. 245-256, 2008.
- [80] C. Mares, J. E. Mottershead and M. I. Friswell, "Stochastic model updating: Part 1 - theory and simulated example," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1674-1695, 2006.
- [81] J. E. Mottershead, C. Mares and M. I. Friswell, "Stochastic model updating: Part 2 - application to a set of structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 8, pp. 2171-2185, 2006.
- [82] H. Haddad Khodaparast, J. E. Mottershead and W. I. Friswell, "Perturbation methods for the estimation of parameter variability in stochastic model updating," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 8, pp. 1751-1773, 2008.
- [83] C. Soize, "A nonparametric model of random uncertainties for reduced matrix models in structural dynamics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 15, no. 3, pp. 277-294, 2000.
- [84] C. Soize, "Random matrix theory for modeling uncertainty in computational mechanics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 12-16, pp. 1333-1366, 2005.
- [85] C. Soize, "Transient responses of dynamical systems with random uncertainties," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 16, no. 4, pp. 363-372, 2001.

- [86] P. M. Mignolet and C. Soize, "Nonparametric stochastic modeling of linear systems with prescribed variance of several natural frequencies," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 23, no. 2-3, pp. 267-278, 2008.
- [87] S. Adhikari, I. M. Friswell, K. Lonkar and A. Sarkar, "Experimental case studies for uncertainty quantification in structural dynamics," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 24, no. 4, pp. 473-492, 2009.
- [88] V. Vedral, "The role of relative entropy in quantum information theory," *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, pp. 197-234, 2002.
- [89] J. A. Laub, *Matrix Analysis for Scientists and Engineers*, Davis: SIAM, 2005.
- [90] G. Marsaglia, "Ratios of normal variables," *Journal of Statistical Software*, vol. 16, no. 4, 2006.
- [91] *ISO 5349-1: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements*, 2001.
- [92] D. W. Wasserman, "Occupational Vibration: Are you at risk?," Quest Technologies, Oconomowoc, 2005.
- [93] S. Pankoke, B. Buck and H. P. Wölfel, "Dynamic FE model of sitting man adjustable to body height, body mass and posture used for calculating internal forces in the lumbar vertebral disks," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, p. 827-839, 1998.
- [94] M. L. Magnusson, M. H. Pope, C. J. Hulstorf and B. M., "Development of a protocol for epidemiological studies of whole body vibration and musculoskeletal disorders of the lower back," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, no. 4, pp. 643-651, 1998.
- [95] J. W. Frymoyer and W. L. Cats-Baril, "An overview of incidents and costs of low back pain," *The Orthopedics clinic of North America*, vol. 22, no. 2, pp. 263-71, 1991.
- [96] Comité Européen de Normalisation, *Mechanical vibration-guide to the health effects of vibration on the human body*, Brussels, 1996.
- [97] S. K. Patra, S. Rakheja, H. Nelisse, P. -É. Boileau and J. Boutin, "Determination of reference values of apparent mass responses of seated occupants of different body masses under vertical vibration with and without a back support," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, no. 1, pp. 810-823, 2008.
- [98] A. Kyprianou, J. E. Mottershead and H. Ouyang, "Assignment of natural frequencies by an added mass and one or more springs," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, no. 2, pp. 263-289, 2004.
- [99] W. Wang, S. Rakheja and P.-É. Boileau, "Analysis of relationships between biodynamic response functions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 226, no. 3, pp. 595-606, 1999.

- [100] H. Dupuis, "Medical and occupational preconditions for vibration-induced spinal disorders:occupational disease no 2110 in Germany," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 66, pp. 303-308, 1994.

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΒΑΖΟΥΡΑΣ



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

## Πρωτόκολλο ελέγχου

### Μετρήσεις έκθεσης σε κραδασμούς στο εργαστήριο και στο χώρο εργασίας

#### Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας και Πανεπιστήμιο Κύπρου

1. Υπεύθυνος για τη μεθοδολογία του πειράματος είναι ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Αντρέας Κυπριανού και το πείραμα εκτελείται από τους κ.κ. Αθανάσιο Βαζούρα και Γεώργιο Βεσσιάρη.
2. Πριν την έναρξη του πειράματος γίνεται επίσκεψη στο χώρο εργασίας των υποψηφίων. Οι υποψήφιοι επιλέγονται βάσει της καταπόνησης του σώματος τους σε κραδασμούς με μηχανήματα έργων μηχανικών κατασκευών. Δεν επιλέγεται υποψήφιος, ο οποίος δηλώνει ότι έχει ενεργό πρόβλημα υγείας που τον κρατά μακριά από την εκτέλεση της εργασίας του.
3. Επίσης, ο υποψήφιος ζυγίζεται. Δεν επιλέγεται υποψήφιος με βάρος πάνω από 95 κιλά. Ακολούθως, γίνεται μέτρηση και καταγραφή της καταπόνησης του υποψηφίου σε κραδασμούς σύμφωνα με την Οδηγία 2002/44/EK για οκτάωρη εργασία.
4. Ο υποψήφιος καλείται να συμπληρώσει ερωτηματολόγιο για την κατάσταση της υγείας του. Σε κάθε υποψήφιο εξηγείται το ερωτηματολόγιο και βοηθείται στην απάντηση των ερωτήσεων για αποφυγή της προκατάληψης που μπορεί να υπάρξει ερμηνεύοντας μόνος του τις ερωτήσεις.
5. Ο υποψήφιος μαζί με (το μέγιστο) ακόμα 3 υποψήφιους οδηγούνται για να επισκεφτούν το εργαστήριο A021 στα κεντρικά κτήρια του Πανεπιστημίου Κύπρου.
6. Γίνεται εκκίνηση του συμπιεστή αέρα, ελέγχεται η κατάσταση του δονητή, ειδικά η ύπαρξη αέρα στα ελατήρια.
7. Υπάρχουν διαθέσιμα υγρά (νερό και χυμοί) προς διάθεση των επισκεπτών.
8. Κατά την είσοδο των επισκεπτών στο εργαστήριο, τους εξηγούνται οι βασικοί κανόνες ασφάλειας και υγείας που σχετίζονται με το χώρο του πειράματος στο εργαστήριο.
9. Καταγράφονται τα στοιχεία των επισκεπτών.
10. Οι επισκέπτες ζυγίζονται και το βάρος τους καταγράφεται.
11. Τους εξηγείται το πείραμα και ενημερώνονται για τους κινδύνους που ελλοχεύουν για την υγεία τους εξαιτίας της έκθεσής τους σε κραδασμούς.
12. Εάν κάποιος εκφράσει σε οποιοδήποτε στάδιο επιφύλαξη για την εθελοντική του συμμετοχή στο πείραμα, αυτό διακόπτεται και ο επισκέπτης απομακρύνεται από το χώρο του εργαστηρίου.
13. Ακολούθως, ο κάθε επισκέπτης κάθεται πάνω στην πλατφόρμα.
14. Τοποθετούνται πάνω του οι αισθητήρες κεφαλής και στήθους.
15. Ο επισκέπτης μπορεί να διακόψει το πείραμα όποτε θέλει, απλά αναφέροντάς το ή σηκώνοντας το χέρι του.

16. Του εξηγείται η στάση του σώματος, δηλαδή ότι θα πρέπει να έχει τα πόδια του κλειστά, να πατά πάνω στο υποπόδιο του, τα χέρια του να ακουμπούν πάνω στα πόδια και η πλάτη του να είναι σε χαλαρή και όρθια στάση.
17. Του υποδεικνύεται ότι πρέπει να κοιτάζει ευθεία (σε συγκεκριμένο σημείο).
18. Ενεργοποιείται ο ρευματοδότης του δονητή, τοποθετείται το κομβίο του στη θέση «έναρξη», ενημερώνεται ο επισκέπτης για την επικείμενη έναρξη και ξεκινά το πείραμα με διάρκεια 2 λεπτά σε τυχαία διέγερση.
19. Μετά το πέρας της μέτρησης επαναλαμβάνεται η μέτρηση για δύο λεπτά με ημιτονοειδή διέγερση τύπου “sweep sine”.
20. Μετά το πέρας και της δεύτερης μέτρησης, αφαιρούνται οι αισθητήρες.
21. Σημειώνεται σε έντυπο το όνομα του αρχείου με τον τύπο της μέτρησης για κάθε επισκέπτη.
22. Ο επισκέπτης απομακρύνεται από την πλατφόρμα, τη θέση του παίρνει ο επόμενος επισκέπτης και το πείραμα επαναλαμβάνεται.
23. Μετά το πέρας του πειράματος και την απομάκρυνση του τελευταίου επισκέπτη, τίθεται το κομβίο του δονητή στη θέση «κλειστό» και απενεργοποιείται ο ρευματοδότης.
24. Τα δεδομένα φυλάσσονται σε αρχείο.
25. Οι επισκέπτες απομακρύνονται από το εργαστήριο A021 και τους δίνονται τα στοιχεία επικοινωνίας του Τμήματος Επιθεώρησης Εργασίας εάν έχουν οποιεσδήποτε απορίες για τη νομοθεσία και το συγκεκριμένο πείραμα.

7.10.2012

## ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑ

### Ερωτηματολόγιο για την έκθεση σε κραδασμούς όλου του σώματος

Η έρευνα απευθύνεται αποκλειστικά σε άρρενες χειριστές μηχανημάτων.

Το ερωτηματολόγιο συμπληρώνεται από τον χειριστή παρουσία ερευνητικού συμβούλου.

### ΜΕΡΟΣ 1: Γενική περιγραφή του ατόμου

Φωτογραφία

Όνομα: \_\_\_\_\_

Επίθετο: \_\_\_\_\_

Ημερομηνία γεννήσεως: \_\_\_\_\_

Χώρα γέννησης: \_\_\_\_\_

Χώρα διαμονής: \_\_\_\_\_

Ταχυδρομική Διευθ.: \_\_\_\_\_

Ταχυδρομικός Κώδικας: \_\_\_\_\_

Αριθμός Τηλεφώνου: \_\_\_\_\_

## ΜΕΡΟΣ 2: Δραστηριότητες εκτός εργασιακού περιβάλλοντος

i. Κάνετε αθλήματα; Ναι<sup>1</sup>  Όχι<sup>2</sup>

ii. Ύψος: \_\_\_\_\_ μ. \_\_\_\_\_ εκατ. Βάρος: \_\_\_\_\_ κιλά.

iii. Κάνετε κάθε εβδομάδα / ημέρα ασκήσεις γυμναστικής;

Ποτέ<sup>1</sup>  Λιγότερο από μια φορά την εβδομάδα<sup>2</sup>

1 με 2 φορές την εβδομάδα<sup>3</sup>  3 φορές ή περισσότερες φορές την εβδομάδα<sup>4</sup>

Κάθε μέρα<sup>5</sup>

iv. Πόσα χιλιόμετρα οδηγείτε το χρόνο για προσωπικούς λόγους:

λιγότερο από 10.000<sup>1</sup> , 10.000 –25.000<sup>2</sup> , περισσότερο από 25.000<sup>3</sup>

v. Οδηγούσατε ή οδηγείτε καθημερινά κάποιο όχημα στον ελεύθερο χρόνο σας;

Αν ναι πόσες ώρες την ημέρα;

---

vi. Σε τι αθλήματα, εάν υπάρχουν, συμμετέχετε εβδομαδιαία;

---

### ΜΕΡΟΣ 3: Ιστορικό επαγγελματικής έκθεσης

#### A. Παρούσα Εργασία

i. Ποια είναι η σας απασχόληση σας σήμερα;

\_\_\_\_\_

ii. Σε ποιο κλάδο οικονομικής δραστηριότητας ασχολείστε (πχ κατασκευαστική, γεωργική, Δημόσιο);

\_\_\_\_\_

iii. Πόση ώρα θέλετε για να φθάσετε στην εργασία σας ;

Λιγότερο από 20 λεπτά<sup>1</sup>  21-40 λεπτά<sup>2</sup>  41 λεπτά- μία ώρα<sup>3</sup>

Πάνω από μία ώρα<sup>4</sup>

iv. Πόσα χρόνια απασχολείστε στην τωρινή σας εργασία; \_\_\_\_\_ χρόνια

v. Χειρίζεστε ή οδηγείτε κάποιο μηχάνημα στην παρούσα εργασία σας;

Ναι<sup>1</sup>  Όχι<sup>2</sup>

Αν Ναι:

Είδος οχήματος	από-μέχρι (έτος)	ώρες/ημέρα	ημέρες/εβδομάδα
_____	_____ - _____	___ ώρες	___ ημέρες
_____	_____ - _____	___ ώρες	___ ημέρες
_____	_____ - _____	___ ώρες	___ ημέρες

vi. Σε τι είδος οδοστρώματος χειρίζεστε το μηχάνημα συνήθως;

		κατάσταση	
άσφαλτος/τσιμέντο	1	Καλή <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Κακή <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>
λιθόστρωτος δρόμος (χαλίκια)	2	Καλή <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Κακή <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>
χωματόδρομος	3	Καλή <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Κακή <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>
άλλο , ονομαστικά	4	Καλή <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Κακή <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>



- xiii. Πόσες ώρες την ημέρα κάθεστε χωρίς να δονείστε στην εργασία σας; \_\_\_\_\_ ώρες
- xiv. Η εργασία σας περιέχει χειρωνακτική μεταφορά;     Ναι<sup>1</sup>                       Όχι<sup>2</sup>   
Μέχρι 5 κιλ. <sup>1</sup>                      5-10 κιλ.<sup>2</sup>                       Πάνω από 10 κιλ.<sup>3</sup>   
Φορές/ημέρα \_\_\_\_\_                      Φορές /ημέρα \_\_\_\_\_                      Φορές/ημέρα \_\_\_\_\_
- xv. Η εργασία σας, εκτός του χειρισμού του μηχανήματος περιέχει (κατά μέσο όρο σε μια εργάσιμη ημέρα) παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενη εργασία που εκτελείται με την πλάτη σας:  
Κλίση προς τα εμπρός, προς τα πίσω ή πλευρικά                      Ναι<sup>1</sup>                       Όχι<sup>2</sup>   
Περιστροφή                      Ναι<sup>1</sup>                       Όχι<sup>2</sup>   
Ταυτόχρονη κλίση και περιστροφή                      Ναι<sup>1</sup>                       Όχι<sup>2</sup>
- xvi. Η εργασία σας περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενη, παρατεταμένη ή δύσκολη μεταφορά, ώθηση ή έλξη φορτίων;  
  
Ναι<sup>1</sup>                       Όχι<sup>2</sup>
- xvii. Αν οδηγείτε και ανυψώνετε στην εργασία σας πόσο συχνά ανυψώνετε αμέσως μετά το χειρισμό του μηχανήματος;  
  
Σχεδόν ποτέ<sup>1</sup>      Σπάνια<sup>2</sup>                       Συχνά<sup>3</sup>
- xviii. Υπάρχουν άλλα καθήκοντα που απαιτούνται στην εργασία σας τα οποία επιδρούν στην πλάτη ή στον αυχένα σας ;  


---

## Β. Προηγούμενες Εργασίες

i. Ποιο(α) ήταν το(α) προηγούμενο(α) επάγγελμα(τα) σας;

\_\_\_\_\_ για \_\_\_\_\_ χρόνια  
\_\_\_\_\_ για \_\_\_\_\_ χρόνια  
\_\_\_\_\_ για \_\_\_\_\_ χρόνια  
\_\_\_\_\_ για \_\_\_\_\_ χρόνια

ii. Οδηγούσατε στις προηγούμενες εργασίες σας οχήματα όπως : φορτηγά, λεωφορεία, μπουλντόζες, κινούμενο εξοπλισμό κτλ ;      Ναι<sup>1</sup>  Όχι<sup>2</sup>

Αν ναι:

_____ χρόνος(ια) σε (όχημα) _____	κατά μέσο όρο	_____ ώρες/ημέρα
_____ χρόνος(ια) σε (όχημα) _____	κατά μέσο όρο	_____ ώρες/ημέρα
_____ χρόνος(ια) σε (όχημα) _____	κατά μέσο όρο	_____ ώρες/ημέρα
_____ χρόνος(ια) σε (όχημα) _____	κατά μέσο όρο	_____ ώρες/ημέρα
_____ χρόνος(ια) σε (όχημα) _____	κατά μέσο όρο	_____ ώρες/ημέρα

iii. Η(Οι) προηγούμενη(-ες) εργασία(-ες) σας περιλάμβαναν:

Παρατεταμένη καθιστική εργασία;	Ναι <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Όχι <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>
Βαριές σωματικές απαιτήσεις	Ναι <sup>1</sup> <input type="checkbox"/>	Όχι <sup>2</sup> <input type="checkbox"/>

iv. Είχατε ποτέ πόνο στη μέση σε προηγούμενη (-ες) εργασία (-ες) σας;

Ναι<sup>1</sup>       Όχι<sup>2</sup>



#### ΜΕΡΟΣ 4: Προσωπικό ιατρικό ιστορικό

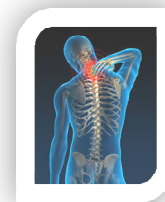
Σε αυτό το τμήμα, ερωτώνται οι χειριστές για ενοχλήσεις που πιθανόν είχαν σε διαφορετικά μέρη του σώματος και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Αν δεν είχαν ποτέ κάποιο πόνο / πρόβλημα με την πλάτη, αγνοήστε αυτό το τμήμα και προχωρήστε στην επόμενη σελίδα.

##### A: ΜΕΣΗ (Χαμηλά στην πλάτη)



	Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 7 ημερών	Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 12 μηνών
i. Είχατε πόνο/ενοχλήσεις	(α) ποτέ <sup>1</sup> (β) σπάνια <sup>2</sup> (γ) συχνά <sup>3</sup>	(α) ποτέ <sup>1</sup> (β) σπάνια <sup>2</sup> (γ) συχνά <sup>3</sup>
ii. Τι είδος ενοχλήσεων είχατε;	(α) δεν είχατε/κανένα πόνο <sup>1</sup> (β) πόνος μόνο στην πλάτη <sup>2</sup> (γ) πόνος στο πόδι/μόνο συμπτώματα <sup>3</sup> (δ) πόνος σε πλάτη και πόδι/συμπτώματα <sup>4</sup>	(α) δεν είχατε/κανένα πόνο <sup>1</sup> (β) πόνος μόνο στην πλάτη <sup>2</sup> (γ) πόνος στο πόδι/μόνο συμπτώματα <sup>3</sup> (δ) πόνος σε πλάτη και πόδι/συμπτώματα <sup>4</sup>
ii. Πόσα επεισόδια είχατε;	(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-3 <sup>3</sup> (δ) Πάνω από 4 <sup>4</sup>	(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-5 <sup>3</sup> (δ) 6-10 <sup>4</sup> (ε) Πάνω από 10 <sup>5</sup>
v. Πόση διάρκεια είχαν;	(α) δεν είχαν <sup>1</sup> (β) Ώρες <sup>2</sup> (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup> (δ) Πάντα <sup>4</sup>	(α) Δεν είχαν <sup>1</sup> (β) Ώρες <sup>2</sup> (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup> (δ) 3-6 ημέρες <sup>4</sup> (ε) Εβδομάδες <sup>5</sup> (στ) Μήνες <sup>6</sup> (ζ) Πάντα <sup>7</sup>
v. Πόση άδεια πήρατε από την εργασία σας εξαιτίας του πόνου στην πλάτη/πόδι;	(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 1-2 ημέρες <sup>2</sup> (γ) 3-4 ημέρες <sup>3</sup> (δ) πάνω από 5 ημέρες <sup>4</sup>	(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 3-6 μήνες <sup>2</sup> (γ) 1-4 εβδομ. <sup>3</sup> (δ) 1-3 μήνες <sup>4</sup> (ε) πάνω από 6 μήνες <sup>5</sup>
ii. Σας έχει πει ο γιατρός τι έφταιγε με την πλάτη σας, πχ να κάνει διάγνωση;*	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε
ii. Είχατε ποτέ τραύμα στην πλάτη σας που χρειαζόταν ιατρική επίσκεψη;	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Τι είδος τραύματος;	Πότε συνέβη;    Περιγράψτε
ii. Σας χορήγησε θεραπεία ο γιατρός;	Καμία <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε	Καμία <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε
x. Υπάρχει κάποια κίνηση ή δραστηριότητα που σας προκαλεί ή επιδεινώνει τον πόνο;	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup> Περιγράψτε

**Β: ΑΥΧΕΝΑΣ** (Αν δεν είχατε ποτέ κάποιο πόνο/πρόβλημα με τον αυχένα, αγνοήστε αυτό το τμήμα και προχωρήστε στην επόμενη σελίδα).



	Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 7 ημερών			Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 12 μηνών	
i. Είχατε πόνο/ενοχλήσεις	(α) <sup>1</sup> ποτέ (β) <sup>2</sup> σπάνια (γ) <sup>3</sup> συχνά			(α) <sup>1</sup> ποτέ (β) <sup>2</sup> σπάνια (γ) <sup>3</sup> συχνά	
ii. Τι είδος ενοχλήσεων είχατε;	(α) <sup>1</sup> δεν είχατε/κανένας πόνος (β) <sup>2</sup> πόνος μόνο στον αυχένα (γ) <sup>3</sup> πόνος στην άνω πλάτη μόνο (δ) <sup>4</sup> πόνος σε αυχένα και άνω πλάτη			(α) <sup>1</sup> δεν είχατε/κανένας πόνος (β) <sup>2</sup> πόνος μόνο στον αυχένα (γ) <sup>3</sup> πόνος στην άνω πλάτη μόνο (δ) <sup>4</sup> πόνος σε αυχένα και άνω πλάτη	
ii. Πόσα επεισόδια είχατε;	(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-3 <sup>3</sup> (δ) Πάνω από 4 <sup>4</sup>			(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-5 <sup>3</sup> (δ) 6-10 <sup>4</sup> (ε) Πάνω από 10 <sup>5</sup>	
v. Πόση διάρκεια είχαν;	(α) δεν είχαν <sup>1</sup>  (β) Ώρες <sup>2</sup>  (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup>  (δ) Πάντα <sup>4</sup>			(α) Δεν είχαν <sup>1</sup> (β) Ώρες <sup>2</sup> (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup> (δ) 3-6 ημέρες <sup>4</sup> (ε) Εβδομάδες <sup>5</sup> (στ) Μήνες <sup>6</sup> (ζ) Πάντα <sup>7</sup>	
v. Πόση άδεια πήρατε από την εργασία σας εξαιτίας του πόνου στον αυχένα;	(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 1-2 ημέρες <sup>2</sup> (γ) 3-4 ημέρες <sup>3</sup> (δ) πάνω από 5 ημέρες <sup>4</sup>			(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 3-6 μήνες <sup>2</sup> (γ) 1-4 εβδομ. <sup>3</sup> (δ) 1-3μήνες <sup>4</sup> (ε) πάνω από 6 μήνες <sup>5</sup>	
ii. Σας έχει πει ο γιατρός τι έφταιγε με τον αυχένα σας, πχ να κάνει διάγνωση;*	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε		Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε
ii. Είχατε ποτέ τραύμα στο αυχένα σας που χρειαζόταν ιατρική επίσκεψη;	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Τι είδος τραύματος;		Πότε συνέβη;	Περιγράψτε
ii. Σας χορήγησε θεραπεία ο γιατρός;	Καμία <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε		Καμία <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε
x. Υπάρχει κάποια κίνηση ή δραστηριότητα που σας προκαλεί ή επιδεινώνει τον πόνο;	Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε		Όχι <sup>1</sup> Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε

**Γ: ΩΜΟΙ** (Αν δεν είχατε ποτέ κάποιο πόνο/πρόβλημα με τον ώμο, αγνοήστε αυτό το τμήμα και προχωρήστε στην επόμενη σελίδα).



	Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 7 ημερών			Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 12 μηνών		
i. Είχατε πόνο/ενοχλήσεις	(α) <sup>1</sup> ποτέ (β) <sup>2</sup> σπάνια (γ) <sup>3</sup> συχνά			(α) <sup>1</sup> ποτέ (β) <sup>2</sup> σπάνια (γ) <sup>3</sup> συχνά		
ii. Τι είδος ενοχλήσεων είχατε;	(α) <sup>1</sup> δεν είχατε/κανένα πόνο (β) <sup>2</sup> πόνο μόνο στον ώμο (γ) <sup>3</sup> μόνο συμπτώματα σε βραχίονα/χέρι (δ) <sup>4</sup> πόνο σε ώμο και βραχίονα			(α) <sup>1</sup> δεν είχατε/κανέναν πόνο (β) <sup>2</sup> πόνο μόνο στον ώμο (γ) <sup>3</sup> μόνο συμπτώματα σε βραχίονα/χέρι (δ) <sup>4</sup> πόνο σε ώμο και βραχίονα		
iii. Πόσα επεισόδια είχατε;	(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-3 <sup>3</sup> (δ) Πάνω από 4 <sup>4</sup>			(α) 0 <sup>1</sup> (β) 1 <sup>2</sup> (γ) 2-5 <sup>3</sup> (δ) 6-10 <sup>4</sup> (ε) Πάνω από 10 <sup>5</sup>		
iv. Πόση διάρκεια είχαν;	(α) δεν είχαν <sup>1</sup> (β) Ώρες <sup>2</sup> (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup> (δ) Πάντα <sup>4</sup>			(α) Δεν είχαν <sup>1</sup> (β) Ώρες <sup>2</sup> (γ) 1-2 ημέρες <sup>3</sup> (δ) 3-6 ημέρες <sup>4</sup> (ε) Εβδομάδες <sup>5</sup> (στ) Μήνες <sup>6</sup> (ζ) Πάντα <sup>7</sup>		
v. Πόση άδεια πήρατε από την εργασία σας εξαιτίας του πόνου στον ώμο/βραχίονα;	(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 1-2 ημέρες <sup>2</sup> (γ) 3-4 ημέρες <sup>3</sup> (δ) πάνω από 5 ημέρες <sup>4</sup>			(α) Καμία <sup>1</sup> (β) 3-6 μήνες <sup>2</sup> (γ) 1-4 εβδομ. <sup>3</sup> (δ) 1-3μήνες <sup>4</sup> (ε) πάνω από 6 μήνες <sup>5</sup>		
vi. Σας έχει πει ο γιατρός τι έφταιγε με τον ώμο σας, πχ να κάνει διάγνωση;*	Όχι <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε	Όχι <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε
vii. Είχατε ποτέ τραύμα στους ώμους σας που χρειαζόταν ιατρική επίσκεψη;	Όχι <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Τι είδος τραύματος;	Πότε συνέβη;		Περιγράψτε
viii. Σας χορήγησε θεραπεία ο γιατρός;	Καμία <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε	Καμία <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε
ix. Υπάρχει κάποια κίνηση ή δραστηριότητα που σας προκαλεί ή επιδεινώνει τον πόνο;	Όχι <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε	Όχι <sup>1</sup>	Ναι <sup>2</sup>	Περιγράψτε

**Δ: Άλλα μέρη του σώματος σας**

Στη διάρκεια των τελευταίων 12 μηνών είχατε κάποια ενόχληση (όπως άλγος, πόνος, δυσφορία, μούδιασμα)

σε :

**i. Καρπός/χέρια**

- |                                           |                                           |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Όχι <sup>1</sup> <input type="checkbox"/> | Ναι <sup>2</sup> <input type="checkbox"/> |
| στον δεξιό καρπό/χέρι <sup>1</sup>        | <input type="checkbox"/>                  |
| στον αριστερό καρπό/χέρι <sup>2</sup>     | <input type="checkbox"/>                  |
| και στους δυο καρπούς/χέρια <sup>3</sup>  | <input type="checkbox"/>                  |

**ii. Γόνατα**

- |                                           |                                           |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Όχι <sup>1</sup> <input type="checkbox"/> | Ναι <sup>2</sup> <input type="checkbox"/> |
| στο δεξιό γόνατο <sup>1</sup>             | <input type="checkbox"/>                  |
| στο αριστερό γόνατο <sup>2</sup>          | <input type="checkbox"/>                  |
| και στα δυο γόνατα <sup>3</sup>           | <input type="checkbox"/>                  |

**iii. Αστράγαλοι /πόδια**

- |                                           |                                           |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Όχι <sup>1</sup> <input type="checkbox"/> | Ναι <sup>2</sup> <input type="checkbox"/> |
| στο δεξιό αστράγαλο/πόδι <sup>1</sup>     | <input type="checkbox"/>                  |
| στον αρ. αστράγαλο/πόδι <sup>2</sup>      | <input type="checkbox"/>                  |
| και στους δυο αστρ./πόδ. <sup>3</sup>     | <input type="checkbox"/>                  |

**Ε: Άλλες διαταραχές**

Υποφέρατε από άλλες διαταραχές;

---

## ΜΕΡΟΣ 5: Ένταση του πόνου, ανικανότητα και αποχή από δραστηριότητες

### A. Ένταση πόνου

Η βαθμολογία είναι ως εξής: το 0 σημαίνει «κανένας πόνος» και το 10 «ο πιο δυνατός πόνος».

- i. Πώς θα βαθμολογούσατε τον πόνο σας στη μέση/αυχένα/ώμο σε μια κλίμακα από το 0-10 κατά τη διάρκεια των τελευταίων 7 ημερών;

Πλάτη	<input type="text"/>
Αυχένας	<input type="text"/>
Ωμος	<input type="text"/>

- ii. Πώς θα βαθμολογούσατε τον πόνο σας στη μέση/αυχένα/ώμο σε μια κλίμακα από το 0-10 κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους;

Μέση	<input type="text"/>
Αυχένας	<input type="text"/>
Ωμος	<input type="text"/>

### B. Μονάδες Ανικανότητας

Η βαθμολογία είναι ως εξής: 0 σημαίνει «καμία αλλαγή» και το 10 «πολύ μεγάλη αλλαγή».

- i. Τους τελευταίους 12 μήνες πόσο ο πόνος στη μέση/αυχένα/ώμο έχει επηρεάσει την ικανότητα σας στην εργασία (περιλαμβάνοντας τις δουλειές στο σπίτι);

Μέση	<input type="text"/>
Αυχένας	<input type="text"/>
Ωμος	<input type="text"/>

- ii. Τους τελευταίους 12 μήνες πόσο ο πόνος στη μέση/αυχένα/ώμο έχει επηρεάσει την ικανότητα σας να συμμετέχετε σε δημιουργικές, κοινωνικές και οικογενειακές δραστηριότητες;

Μέση	<input type="text"/>
Αυχένας	<input type="text"/>
Ωμος	<input type="text"/>

### Γ. Αποχή από δραστηριότητες

- i. Πόσες μέρες περίπου τους τελευταίους 12 μήνες απέχετε από τις συνηθισμένες σας δραστηριότητες (εργασία, ή δουλειές του σπιτιού) εξαιτίας του :

Πόνου στη μέση;	Αριθμός ημερών:	0 <sup>0</sup>	1–6 <sup>1</sup>	7–14 <sup>2</sup>	15–30 <sup>3</sup>	31+ <sup>4</sup>
Πόνου στον αυχένα;	Αριθμός ημερών:	0 <sup>0</sup>	1–6 <sup>1</sup>	7–14 <sup>2</sup>	15–30 <sup>3</sup>	31+ <sup>4</sup>
Πόνου στον ώμο;	Αριθμός ημερών:	0 <sup>0</sup>	1–6 <sup>1</sup>	7–14 <sup>2</sup>	15–30 <sup>3</sup>	31+ <sup>4</sup>