



Πανεπιστήμιο Κύπρου
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Αρχιτεκτονικής

ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

από

Μαρία Η. Ματθαίου

Δίπλωμα Αρχιτέκτονα - Μηχανικού, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Κύπρος

Τμήμα Αρχιτεκτονικής Πανεπιστήμιο Κύπρου

**Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση Διδακτορικού Τίτλου
σπουδών στο Πανεπιστήμιο Κύπρου**

Λευκωσία, Μάιος 2014

© Μαρία Η. Ματθαίου, 2014

Μαρία Η. Ματθαίου

ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

«KINETIC HYBRID STRUCTURES»

από

Μαρία Η. Ματθαίου

Επιβλέπων Καθηγητής Διατριβής:

Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς, Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Εξεταστική Επιτροπή Διατριβής:

Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης, Λέκτορας (Πρόεδρος)
Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς, Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου, Ερευνητικός Συνεργάτης
Κοίος Ερευνητικό Κέντρο Τεχνολογίας Ευφυών Συστημάτων και Δικτύων,
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Νάτια Χαραλάμπους, Επίκουρη Καθηγήτρια
Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Αικατερίνη Α. Λιάπη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

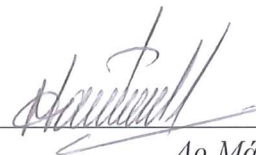
Υποψήφιος Διδάκτορας: Μαρία Η. Ματθαίου

Τίτλος Διατριβής: Κινητικές Υβριδικές Δομικές Κατασκευές

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στο Τμήμα Αρχιτεκτονικής και εγκρίθηκε στις 13.05.2014 από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

Εξεταστική Επιτροπή:

Ερευνητικός Σύμβουλος:



Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς

Μέλος Επιτροπής (Πρόεδρος):



Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης

Μέλος Επιτροπής:



Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου

Μέλος Επιτροπής:



Δρ. Νάτια Χαράλαμπος

Μέλος Επιτροπής:



Δρ. Αικατερίνη Α. Λιάπη

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.

.....Μαρία.....Ματθαίου.....

.....μαριαμωτθεου.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

«Κινητικές Υβριδικές Δομικές Κατασκευές»

Η αλληλένδετη και διαδραστική σχέση της κοινωνίας, της τεχνολογίας και της αρχιτεκτονικής, ενίσχυσε τον άξονα σχεδιασμού του δομημένου περιβάλλοντος σε βέλτιστες δομές που είναι ικανές ν' ανταποκρίνονται σε μεταβαλλόμενες λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Βάσει της δυναμικής ανταπόκρισης σε ερεθίσματα, τα κινητικά αρχιτεκτονικά συστήματα χαρακτηρίζονται από προσαρμογή και βελτιστοποίηση οργανώνοντας κτίρια ή κτιριακές δομές με ευμετάβλητη κίνηση, γεωμετρία και τοποθεσία. Η ερευνητική προσέγγιση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας κινητικής υβριδικής δομής εξετάζοντας τη στατική και κινητική της συμπεριφορά. Η καινοτομία της προτεινόμενης πρωτότυπης δομής βασίζεται στη δυαδική σύνθεση των μελών της και την εφαρμογή του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων στο σχεδιασμό της κίνησης. Αρθρωτά συνδεδεμένα μέλη υποστηρίζονται από ένα δευτερεύον σύστημα ενίσχυσης ορθοστατών και συνεχόμενων καλωδίων, συνθέτοντας το επίπεδο πρωτεύον δομικό σύστημα. Μη γραμμική παραμετρική ανάλυση εδραιώνεται με βάση την ανάπτυξη υβριδικών δομικών τυπολογιών, διαφοροποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τη σύνθεση και τις συνδέσεις. Η αναδιαμόρφωση του συστήματος έγκειται στην εφαρμογή του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων με ένα βαθμό ελευθερίας και τη συνέργεια της δυαδικής λειτουργίας των καλωδίων. Ο σχεδιασμός της κίνησης πραγματώνεται μέσω προσομοιωμένων μοντέλων με σκοπό τη ρύθμιση των γωνιακών θέσεων των αρθρώσεων στις επιθυμητές τιμές κατά τη διάρκεια των βημάτων σε κάθε μοτίβο ακολουθίας. Το ενεργό σύστημα ελέγχου διαχειρίζεται τη λειτουργία κίνησης των δυο ενεργοποιητών στις στηρίξεις, των υδραυλικών γραμμικών φρένων σε κάθε ορθοστάτη και των αισθητήρων που βρίσκονται σε κάθε κομβικό σημείο εξυπηρετώντας το κύκλωμα ανάδρασης. Ειδικά κριτήρια αξιολόγησης της κινητικής συμπεριφοράς του πρωτοτύπου αποτελούν η ανάπτυξη των ροπών στις ενώσεις και των αξονικών δυνάμεων στα καλώδια. Ο σχεδιασμός συμπεριλαμβάνει την ένταξη κελύφους ελαφριών εφελκόμενων δομών επιχειρώντας την ανάπτυξη προσαρμόσιμων δομικών κατασκευών κελύφους.

Λέξεις κλειδιά: Ευμετάβλητες δομές, Μηχανισμοί ανασχηματισμού, Σχεδιασμός κίνησης, Δομή Περιβλήματος.

ABSTRACT

«Kinetic Hybrid Structures»

The interactive relationship of society, technology and architecture has increased the demand on our built environment for optimized structures that are capable to properly respond to changing functional- and environmental conditions. With regard to the dynamic stimuli response, kinetic architectural systems are characterized by adaptability, optimization and sustainability of our built-up recourses leading to buildings and building components with variable mobility, location, or geometry. The purpose of this study is to present the development of a kinetic hybrid steel prototype structure and address its static and kinematic behavior. The innovation of the developed prototype structure is based on the dual composition of its members and the application of the effective 4-Bar method in its motion planning. Hinge connected members, stabilized through a secondary system of struts and continuous diagonal cables with closed circuit compose the planar primary system. A non-linear parametric static analysis is conducted through the development of structural hybrid typologies by differentiating the geometric characteristics, composition and connections. The transformability of the system is based on the application of the effective 4-Bar method using a sequence of 1-DOF motion steps and the synergetic cables' length modification. Motion planning is conducted through simulated models and is based on structural and kinematic criteria, in order to adjust the systems' joints to the desired values during the motion steps involved in the respective transformation sequence. An active control system is applied that manages the operation of the motion actuators and the hydraulic linear brakes, in order to realize the reconfiguration sequences. It includes position sensors installed on the individual joints to provide feedback information, two single motion actuators located at the structural supports, as well as hydraulic brakes installed on each strut. Specified criteria evaluate the kinetic behavior of the prototype according to the static braking torques and the axial cable forces. Following aspects of development and integration of lightweight tensile envelope systems, types of adaptable envelope structures are proposed.

Keywords: Transformable Structures, Reconfigurable Mechanisms, Motion Planning, Envelope Structure.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Βαθιά συγκινημένη επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες, όπως και την απέραντη ευγνωμοσύνη απέναντι στα πρόσωπα που αποτέλεσαν φορέα ανάπτυξης, ενίσχυσης και αποπεράτωσης της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής.

Αξιοσημείωτη και ευεργετική η συνεισφορά του επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Μάριου Κ. Φωκά, όχι μόνο κατά την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής αλλά και των προπτυχιακών σπουδών μου, για τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνσή του. Υποχρέωση αισθάνομαι επίσης, να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια και για τη θερμή υποστήριξη του.

Ιδιαίτερα επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Ευτύχιο Χριστοφόρου, για την ενεργό συνεισφορά και τις επιστημονικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής.

Ένθερμες ευχαριστίες και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής Δρ. Οδυσσέα Κοντοβούρκη, Λέκτορα και Δρ. Νάτια Χαραλάμπους, Επίκουρη Καθηγήτρια, στο Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου και Δρ. Αικατερίνη Α. Λιάπη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών για την πρόθυμη συμμετοχή τους στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Τόνια Σοφοκλέους – Λεμονάρη για την παρότρυνσή της και την καθοδήγησή της, καθώς και για τις ανεκτίμητες συμβουλές της.

Με όλη μου την καρδιά, ευχαριστώ ακόμη όλους τους αγαπητούς μου συναδέλφους, φίλους και οικογένεια, για τη ψυχική συμπαράσταση και αγάπη που υπέδειξαν στον προσωπικό μου αγώνα.

Αφιέρωση

*Σ' αυτούς που ενστερνίστηκαν το όραμα
για μια κινητική αρχιτεκτονική.*

Μαρία Η. Ματθαίου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Δομή περιεχομένων.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Στατικές και Κινητικές Δομές.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Τυπολογική βελτιστοποίηση δομικών συστημάτων.....	7
2.3 Εξελικτική πορεία σχεδιασμού κινητικών συστημάτων.....	13
2.4 Δομικά συστήματα κτιριακών εφαρμογών.....	25
2.5 Κινητικές δομές.....	33
2.6 Κατασκευαστικό περίβλημα.....	41
2.7 Συμπεράσματα.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Μεθοδολογία Σχεδιασμού Κινητικών Δομικών Κατασκευών.....	57
3.1 Εισαγωγή.....	57
3.2 Μεθοδολογίες σχεδιασμού κινητικών συστημάτων.....	57
3.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής.....	61
3.4 Συμπεράσματα.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ανάλυση Τυπολογίας Υβριδικών Δομικών Συστημάτων.....	65
4.1 Εισαγωγή.....	65
4.2 Μορφολογική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων.....	66
4.3 Στατική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων.....	75
4.4 Μορφολογική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων.....	77
4.5 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων.....	81
4.6 Μορφολογική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων με βάση το στατικό ύψος του ορθοστάτη.....	84

4.7 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων με βάση το στατικό ύψος του ορθοστάτη.....	90
4.8 Συμπεράσματα.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Κατασκευαστική ανάλυση της κινητικής υβριδικής δομής.....	95
5.1 Εισαγωγή.....	95
5.2 Κατασκευαστικός σχεδιασμός της υβριδικής κινητικής δομής.....	96
5.2.1 Επίπεδο κατασκευαστικό σύστημα.....	96
5.2.2 Χωρικό κατασκευαστικό σύστημα.....	101
5.3 Συμπεράσματα.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Κινητικός Μηχανισμός. Δομή και Λειτουργία.....	105
6.1 Εισαγωγή.....	105
6.2 Λειτουργία ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων.....	105
6.3 Σύστημα εννιά αρθρωτών ράβδων.....	106
6.4 Σχεδιασμός κίνησης.....	108
6.5 Περιορισμοί.....	110
6.6 Ανάπτυξη ακολουθιών συστήματος.....	110
6.7 Ανάλυση κινητικών υβριδικών συστημάτων.....	114
6.8 Συμπεράσματα.....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Σχεδιασμός και Ανάλυση της Κίνησης της Υβριδικής Δομής.....	117
7.1 Εισαγωγή.....	117
7.2 Μοντελοποίηση του κινητικού υβριδικού συστήματος.....	117
7.2.1 Συναρμολόγηση του συστήματος.....	117
7.2.2 Γεωμετρικές σχέσεις (mates).....	118
7.3 Ανάλυση Κίνησης.....	120
7.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά και ρυθμίσεις.....	120
7.3.2 Ακολουθία κίνησης του κινητικού υβριδικού συστήματος.....	122
7.3.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης της κίνησης.....	126
7.4 Συμπεράσματα.....	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Κατασκευαστικό περίβλημα.....	133
8.1 Εισαγωγή.....	133
8.2 Συστήματα κατασκευαστικού περιβλήματος.....	134
8.2.1 Παθητικό σύστημα περιβλήματος.....	134
8.2.2 Ενεργό σύστημα περιβλήματος.....	136
8.3 Συμπεράσματα.....	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Συμπεράσματα.....	139
9.1 Ερευνητική συνεισφορά.....	139
9.2 Ερευνητικά αποτελέσματα.....	140
9.3 Μελλοντικές προοπτικές – Εισηγήσεις.....	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	175

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1	Δομικά συστήματα σε σχέση του ανοίγματος	9
Εικόνα 2.2	Κύριες καταπονήσεις αμφιέριστης δοκού και ιδανικά συστήματα ως προς τη διατομή και την επιμήκη μορφή.....	10
Εικόνα 2.3	Μείωση των καμπτικών καταπονήσεων μέσω ανάπτυξης ιδανικών συστημάτων ενίσχυσης, υβριδικών συστημάτων, και σύνθετων καλωδιωτών συστημάτων.....	11
Εικόνα 2.4	Σχεδιαστική πρόταση για τη «La Ville Spatial»	14
Εικόνα 2.5	Χωρική κατασκευή με συναρμολογούμενους χώρους.....	15
Εικόνα 2.6	Χωρική κατασκευή με συναρμολογούμενους χώρους, «Νέα Βαβυλώνα»	16
Εικόνα 2.7	Κινητές προκατασκευασμένες καψούλες	16
Εικόνα 2.8	Χωροδικτύωμα «Raqnitz».....	17
Εικόνα 2.9	Σχεδιαστική πρόταση «Clusters in the Air».....	18
Εικόνα 2.10	Πρωτότυπο μεταβαλλόμενου κινητού Θεάτρου.....	18
Εικόνα 2.11	Βελτιστοποίηση δικτυωτού φορέα.....	23
Εικόνα 2.12	Επίπεδο πλαισιωτό δικτύωμα: Αρχιτεκτονικό γραφείο Hopkins, Ηνωμένο Βασίλειο.....	26
Εικόνα 2.13	Χωρικό πλαισιωτό δικτύωμα: Αθλητικό κέντρο "IBM", Ηνωμένο Βασίλειο.....	27
Εικόνα 2.14	Χωροδικτύωμα: Κέντρο εικαστικών τεχνών "Sainsbury", Ηνωμένο Βασίλειο.....	28
Εικόνα 2.15	Χωροδικτύωμα: Ετήσια έκθεση 1970, Οσάκα.....	29
Εικόνα 2.16	Χωροδικτύωμα: Εκθεσιακός χώρος 13, Αννόβερο.....	30
Εικόνα 2.17	Υβριδικό δομικό σύστημα: εκθεσιακός χώρος 8/9, Αννόβερο.....	31
Εικόνα 2.18	Υβριδικό δομικό σύστημα: Ερευνητικό κέντρο Schlumberger, Ηνωμένο Βασίλειο.....	31

Εικόνα 2.19	Υβριδικό δομικό σύστημα: Εργοστασιακός χώρος Fleetguard, Γαλλία.	32
Εικόνα 2.20	Ευμετάβλητα επίπεδα δικτύωματα: Ενεργά ανταποκρινόμενο δικτύωμα, 2011.....	34
Εικόνα 2.21	Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: μεταβαλλόμενη κατασκευαστική δομή, 2011.....	35
Εικόνα 2.22	Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: Μεταβαλλόμενη κατασκευαστική αρθρωτή δομή	37
Εικόνα 2.23	Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα, 1985	37
Εικόνα 2.24	Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: Muscle Tower II, 2004..	38
Εικόνα 2.25	Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: MIT Tower, 2006.....	39
Εικόνα 2.26	Ευμετάβλητα χωρικά εφελκόμενη δομή, 2003.	40
Εικόνα 2.27	Ευμετάβλητα υβριδικά δομικά συστήματα: Κινητική δομή, 2010.	41
Εικόνα 2.28	Ταξινόμηση των πολυμερή υλικών βάσει των χημικής σύστασής τους.	42
Εικόνα 2.29	PTFE/υαλοβάμβακας 1, PVC/πολυεστέρας 2, Επικαλυμμένο PTFE 3, Μη επικαλυμμένο PTFE 4	45
Εικόνα 2.30	Κατηγοριοποίηση μετατρέψιμων οροφών μεμβράνης: Α) σταθερό δευτερεύον σύστημα και Β) ευέλικτο δευτερεύον σύστημα	49
Εικόνα 2.31	Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Μεσαιωνικό οχυρωματικό Josefsburg, Αυστρία, 2006.....	50
Εικόνα 2.32	Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Στάδιο Warsaw, Πολωνία, 2012.....	51
Εικόνα 2.33	Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Στάδιο Wimbledon, Λονδίνο, 2009.....	51
Εικόνα 2.34	Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Χώρος προσκυνητών, Σαουδική Αραβία, 1992.....	52
Εικόνα 2.35	Πιθανοί γεωμετρικοί μετασχηματισμοί πρωτοτύπου μεμβράνης.....	53
Εικόνα 2.36	Πιθανά στάδια μετασχηματισμού του συστήματος με οχτώ μετακινήσεις στηρίξεων.....	54
Εικόνα 3.1	Διάγραμμα μη γραμμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης (performance-based)	58
Εικόνα 3.2	Διάγραμμα της διαδικασίας ανάπτυξης ανταποκρινόμενων δομών (performance-oriented).....	58

Εικόνα 3.3	Μεθοδολογία σχεδιασμού προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής.....	62
Εικόνα 5.1	Επίπεδο κινητικό υβριδικό σύστημα.....	96
Εικόνα 5.2	Συναρμολογημένο CAD model του εννιαμελούς μηχανισμού.....	97
Εικόνα 5.3	Κινητικό υβριδικό κατασκευαστικό πρωτότυπο: α) Στοιχεία σχεδιασμού β) πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία σύνδεσης με το υδραυλικό σύστημα γραμμικών φρένων.....	98
Εικόνα 5.4	Κατασκευαστική λεπτομέρεια κόμβου, Κλ. 1:8.....	99
Εικόνα 5.5	Κατασκευαστική λεπτομέρεια μονάδας της κινητικής υβριδικής δομής, Κλ. 1:16.....	100
Εικόνα 5.6	Οριζόντια δομή από δυο συνεχόμενες γραμμικές μονάδες.....	102
Εικόνα 5.7	Κατασκευαστική επίλυση και σχεδιασμός σύνδεσης των μελών.....	102
Εικόνα 5.8	Κάτοψη κινητικού υβριδικού συστήματος, Κλ. 1:16.....	103
Εικόνα 5.9	Ισομετρική άποψη κινητικού υβριδικού συστήματος.....	104
Εικόνα 6.1	Ενεργός μηχανισμός τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (effective 4- bar - E4B) σε σύστημα εννιά αρθρωτών ράβδων και καλώδια.....	107
Εικόνα 6.2	Εφικτά μοτίβα ακολουθιών στο υπό εξέταση μηχανισμό εννιά αρθρωτών ράβδων (9- bar).....	112
Εικόνα 6.3	Προσομοίωση βημάτων για την απαιτούμενη ρύθμιση της τελικής θέσης του μηχανισμού εννιά αρθρωτών ράβδων (9 - bar).....	113
Εικόνα 6.4	Προσομοιωμένα στάδια μετασχηματισμού του εννιαμελούς αρθρωτού συνδυασμού σε σχέση με τον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2].....	115
Εικόνα 7.1	Αποσυναρμολόγηση του κινητικού υβριδικού συστήματος.....	118
Εικόνα 7.2	Τρισδιάστατη απεικόνιση της μοντελοποίησης των καλωδίων.....	120
Εικόνα 7.3	Λογικό διάγραμμα της ακολουθίας της κίνησης.....	123
Εικόνα 7.4	Θέση γωνίων των αρθρώσεων κατά τα διακριτά βήματα της ακολουθίας της κίνησης (1: Αρχική Θέση, 2: βήμα 1, 3: Βήμα 2, 4: Βήμα 3, 5: Βήμα 4, 6: Βήμα 5, 7: Βήμα 6).....	125
Εικόνα 7.5	Συγκριτική αποτίμηση της μέγιστης ροπής (A: κλειδωμένες αρθρώσεις χωρίς την προένταση, B: προένταση).....	127

Εικόνα 7.6	Μέγιστη ροπή σύμφωνα με τα βήματα (1: Προένταση, 2: βήμα 1, 3: Προένταση, 4: Βήμα 2, 5: Βήμα 3, 6:Βήμα 4, 7: Βήμα 5, 8: Βήμα 6).....	128
Εικόνα 7.7	Μέγιστη αξονική δύναμη στα καλώδια (1: Προένταση, 2: βήμα 1, 3: Προένταση, 4: Βήμα 2, 5: Βήμα 3, 6:Βήμα 4, 7: Βήμα 5, 8: Βήμα 6).....	129
Εικόνα 7.8	Συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων (WM: Working Model, SW: SolidWorks).	130
Εικόνα 8.1	Ισομετρική άποψη της τρισδιάστατης κινητικής υβριδικής δομής εφαρμόζοντας το ενεργό υβριδικό δομικό σύστημα περιβλήματος.....	133
Εικόνα 8.2	Προσαρμόσιμο κατασκευαστικό περίβλημα α) Παθητικό σύστημα β) Ενεργό σύστημα... ..	134
Εικόνα 8.3	Παθητικό σύστημα περιβλήματος με ενεργά καμπτόμενα μέλη.....	135
Εικόνα 8.4	Λεπτομέρεια σύνδεσης ενεργά καμπτόμενων μελών με τους ορθοστάτες της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής.....	136
Εικόνα 8.5	Ενεργό υβριδικό προσαρμόσιμο σύστημα περιβλήματος.....	137
Εικόνα 8.6	Λεπτομέρειες σύνδεσης του ενεργού κατασκευαστικού συστήματος περιβλήματος: α) δευτερεύοντα καλώδια με ορθοστάτες πρωτεύουσας δομικής κατασκευής β) δευτερεύοντα καλώδια με δευτερεύοντες ορθοστάτες γ) σταθεροποίηση μεμβράνης στους δευτερεύοντες ορθοστάτες.....	138

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Χαρακτηριστικά γεωμετρίας και μηχανικής συμπεριφοράς στατικών συστημάτων.....	25
Πίνακας 2.2	Ιδιότητες επιλεγμένων πολυμερών υλικών: PTFE και ETFE.....	44
Πίνακας 2.3	Μηχανικές ιδιότητες των κοινών συνθετικών υλικών για εφαρμογή σε μετατρέψιμες και αναδιπλωμένες οροφές μεμβρανών (1 Μέσος όρος, 2 Σε σύγκριση με το μέσο όρο τιμής PTFE/γυαλί 100 %)	48
Πίνακας 4.1	Κατηγοριοποίηση υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.....	68
Πίνακας 4.2	Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων	70
Πίνακας 4.3	Γεωμετρία συστημάτων (Α-1-2), (Α-1-3), (Α-1-4) και (Α-1-5)	71
Πίνακας 4.4	Γεωμετρία συστημάτων (Β-1-3) και (Β-1-5).....	71
Πίνακας 4.5	Γεωμετρία συστημάτων (Β-2-3) και (Β-2-5).....	72
Πίνακας 4.6	Γεωμετρία συστημάτων (Γ-1-2), (Γ-1-3), (Γ-1-4) και (Γ-1-5)	72
Πίνακας 4.7	Γεωμετρία συστημάτων (Γ-2-3) και (Γ-2-5).....	72
Πίνακας 4.8	Γεωμετρία συστημάτων (Δ-1-3) και (Δ-1-5)	73
Πίνακας 4.9	Γεωμετρία συστημάτων (Δ-2-3) και (Δ-2-5)	73
Πίνακας 4.10	Γεωμετρία συστημάτων (Ε-1-2), (Ε-1-3), (Ε-1-4) και (Ε-1-5).....	73
Πίνακας 4.11	Γεωμετρία συστημάτων (Ε-2-3) και (Ε-2-5)	74
Πίνακας 4.12	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ-1-2), (ΣΤ-1-3), (ΣΤ-1-4) και (ΣΤ-1-5).....	74
Πίνακας 4.13	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ-2-3) και (ΣΤ-2-5).....	74
Πίνακας 4.14	Κατηγοριοποίηση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.....	79
Πίνακας 4.15	Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων	79
Πίνακας 4.16	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ1-1-2), (ΣΤ1-1-3), (ΣΤ1-1-4) και (ΣΤ1-1-5).....	80

Πίνακας 4.17	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ2-1-2), (ΣΤ2-1-3), (ΣΤ2-1-4) και (ΣΤ2-1-5).....	80
Πίνακας 4.18	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3-1-2), (ΣΤ3-1-3), (ΣΤ3-1-4) και (ΣΤ3-1-5).....	80
Πίνακας 4.19	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ4-1-2), (ΣΤ4-1-3), (ΣΤ4-1-4) και (ΣΤ4-1-5).....	81
Πίνακας 4.20	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ5-1-2), (ΣΤ5-1-3), (ΣΤ5-1-4) και (ΣΤ5-1-5).....	81
Πίνακας 4.21	Μέγιστες τιμές των επιλεγμένων δομικών συστημάτων	84
Πίνακας 4.22	Κατηγοριοποίηση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.....	86
Πίνακας 4.23	Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων	86
Πίνακας 4.24	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.1-1-2), (ΣΤ3.1-1-3), (ΣΤ3.1-1-4) και (ΣΤ3.1-1-5).....	87
Πίνακας 4.25	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.2-1-3), και (ΣΤ3.2-1-5)	87
Πίνακας 4.26	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.3-1-3), και (ΣΤ3.3-1-5)	88
Πίνακας 4.27	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.4-1-2), (ΣΤ3.4-1-3), (ΣΤ3.4-1-4) και (ΣΤ3.4-1-5).....	88
Πίνακας 4.28	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.5-1-2), (ΣΤ3.5-1-3), (ΣΤ3.5-1-4) και (ΣΤ3.5-1-5).....	89
Πίνακας 4.29	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.6-1-2), (ΣΤ3.6-1-3), (ΣΤ3.6-1-4) και (ΣΤ3.6-1-5).....	89
Πίνακας 4.30	Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.7-1-2), (ΣΤ3.7-1-3), (ΣΤ3.7-1-4) και (ΣΤ3.7-1-5).....	90
Πίνακας 6.1	Μέγιστη ροπή και αξονική δύναμη στα καλώδια	114
Πίνακας 7.1	Θέση της γωνίας άρθρωσης J_i σε κάθε βήμα.....	124
Πίνακας 7.2	Συγκριτική αποτίμηση της μέγιστης ροπής στις κλειδωμένες αρθρώσεις χωρίς την προένταση και με την προένταση	126
Πίνακας 7.3	Μέγιστη ροπή στις κλειδωμένες αρθρώσεις.....	128
Πίνακας 7.4	Μέγιστη αξονική δύναμη στα καλώδια και μετατόπιση	129

Πίνακας 7.5	Συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων (WM: Working Model, SW: SolidWorks).....	130
Πίνακας I.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.....	147
Πίνακας I.2	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων A-1-1, A-1-2, A-1-3, A-1-4, και A-1-5.....	150
Πίνακας I.3	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων B-1-1, B-1-2, B-1-3, B-1-4, και B-1-5.....	151
Πίνακας I.4	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων B-2-1, B-2-2, B-2-3, B-2-4, και B-2-5.....	152
Πίνακας I.5	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Γ-1-1, Γ-1-2, Γ-1-3, Γ-1-4, και Γ-1-5.....	153
Πίνακας I.6	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Γ-2-1, Γ-2-2, Γ-2-3, Γ-2-4, και Γ-2-5.....	154
Πίνακας I.7	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Δ-1-1, Δ-1-2, Δ-1-3, Δ-1-4, και Δ-1-5.....	155
Πίνακας I.8	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Δ-2-1, Δ-2-2, Δ-2-3, Δ-2-4, και Δ-2-5.....	156
Πίνακας I.9	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων E-1-1, E-1-2, E-1-3, E-1-4, και E-1-5.....	157
Πίνακας I.10	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων E-2-1, E-2-2, E-2-3, E-2-4, και E-2-5.....	158
Πίνακας I.11	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ-1-1, ΣΤ-1-2, ΣΤ-1-3, ΣΤ-1-4, και ΣΤ-1-5.....	159
Πίνακας I.12	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ-2-1, ΣΤ-2-2, ΣΤ-2-3, ΣΤ-2-4, και ΣΤ-2-5.....	160
Πίνακας I.13	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.....	162
Πίνακας I.14	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ1-2-1, ΣΤ1-2-2, ΣΤ1-2-3, ΣΤ1-2-4, και ΣΤ1-2-5.....	163
Πίνακας I.15	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ2-2-1, ΣΤ2-2-2, ΣΤ2-2-3, ΣΤ2-2-4, και ΣΤ2-2-5.....	164
Πίνακας I.16	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3-2-1, ΣΤ3-2-2, ΣΤ3-2-3, ΣΤ3-2-4, και ΣΤ3-2-5.....	165

Πίνακας I.17	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ4-2-1, ΣΤ4-2-2, ΣΤ4-2-3, ΣΤ4-2-4, και ΣΤ4-2-5	166
Πίνακας I.18	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.....	168
Πίνακας I.19	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.3-2-1, ΣΤ3.3-2-2, ΣΤ3.3-2-3, ΣΤ3.3-2-4, και ΣΤ3.3-2-5.....	170
Πίνακας I.20	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.4-2-1, ΣΤ3.4-2-2, ΣΤ3.4-2-3, ΣΤ3.4-2-4, και ΣΤ3.4-2-5.....	171
Πίνακας I.21	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.6-2-1, ΣΤ3.6-2-2, ΣΤ3.6-2-3, ΣΤ3.6-2-4, και ΣΤ3.6-2-5.....	172
Πίνακας I.22	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.7-2-1, ΣΤ3.7-2-2, ΣΤ3.7-2-3, ΣΤ3.7-2-4, και ΣΤ3.7-2-5.....	173

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Έναυσμα στην ενοποιημένη σχεδιαστική υλοποίηση των ευμετάβλητων και διαδραστικών δομών αποτελούν τα σύγχρονα ζητήματα για παραγωγικότητα, αποτελεσματικότητα, αποδοτικότητα, οικολογική και περιβαλλοντική συνείδηση, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, του οικονομικού κόστους, της κτιριακής μάζας, αειφόρο αρχιτεκτονική κ.ο.κ. ([1.1], [1.2]). Οι κινητικές μεταβαλλόμενες δομές ανταποκρίνονται στα ζητήματα αυτά και επιτυγχάνουν τη βέλτιστη κτιριακή απόδοση απέναντι σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, περιβαλλοντικές ή/και λειτουργικές ([1.3], [1.4]).

Η αλληλένδετη σχέση κοινωνίας, τεχνολογίας και αρχιτεκτονικής διεύρυνε το πεδίο έρευνας, σχεδιασμού και εφαρμογής υβριδικών δομικών συστημάτων με άξονα τη μεταβολή και την προσαρμογή ως κατασκευαστική διαδικασία του σχεδιαστικού αποτελέσματος, αξιοποιώντας την εξέλιξη και τις ποικιλόμορφες ανάγκες των χρηστών. Ο William Zuk και ο Roger H. Clark επιδεικνύουν την ανάγκη για μια οργανική αρχιτεκτονική που έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται σε χρονικές αλλαγές μέσω αρθρωτών συστημάτων, ενσωματώνοντας μηχανισμούς κίνησης ([1.5], [1.6]). Η σχεδιαστική φιλοσοφία της κινητικής αρχιτεκτονικής όπως αναφέρει ο Michael Fox σε επιστημονικό άρθρο στοχεύει στην ανάπτυξη κτιρίων ή/και κτιριακών στοιχείων με ευμετάβλητη κίνηση, γεωμετρία, ή τοποθεσία. Η κατηγοριοποίηση των ποικίλων μετασχηματισμών οργανώνεται βάσει της συμπεριφοράς της κίνησης και του τρόπου που ενεργοποιείται αντίστοιχα όπως: αναδίπλωση, κύλιση, επέκταση και μετασχηματισμού κλίμακας και του σχήματος, και μέσω πνευματικών, χημικών και μαγνητικών συστημάτων [1.7].

Κρίνεται εξίσου επιβεβλημένη η εφαρμογή της διάδρασης ως ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που υποστηρίζει, ενδυναμώνει και ελέγχει την ανταπόκριση σ' ερεθίσματα, αποφεύγοντας την απλή δράση και τη γραμμική ακολουθία συμπεριφορών ([1.5], [1.6]). Ο διαδραστικός και προσαρμοστικός χώρος βασίζεται στη σύγκληση της φυσικής απόδοσης μηχανισμών και συστημάτων που προδιαγράφουν μεταβαλλόμενες συνθήκες (kinetic systems) και της ενσωμάτωσης ενός αυτόματου ενεργού ελέγχου (embedded computation). Στα πλαίσια

αυτά, το ανθρώπινο σώμα θεωρείται ως το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, αντίστοιχα ο Fox αναφέρει ότι ένα κινητικό περιβάλλον χωρίς υπολογιστική διαδικασία είναι ένα σώμα χωρίς εγκέφαλο: ανίκανο να κινηθεί [1.7].

Άρρηκτα συνυφασμένα με τα πιο πάνω, αποτελεί η ικανότητα προσαρμογής των ζωντανών οργανισμών, όπου αποδίδουν το μετασχηματισμό τους όχι μόνο στην ιδιότητα της μετάλλαξης της μορφής τους, αλλά υπόκεινται σε διαδικασία εξέλιξης, βελτιστοποίησης και άμεσης συσχέτισης με ποικιλόμορφες εξωτερικές συνθήκες [1.8]. Αντίστοιχα στον τομέα της αρχιτεκτονικής μηχανικής, η μείωση του ιδιοβάρους μιας δομικής τυπολογίας θα μπορούσε να επιτευχθεί προσαρμόζοντας τη δομή της απέναντι στις ποικιλόμορφες χρηστικές ανάγκες μέσω της ικανότητας μετασχηματισμού.

Επιτακτική ανάγκη για βελτιστοποίηση των δομικών συστημάτων έγκειται στην αντίσταση των εξωτερικών φορτίων εφαρμόζοντας την ελάχιστη μάζα της κατασκευής και παράλληλα διατηρώντας την ακαμψία. Αντιπροσωπευτικές κατηγορίες δομικών συστημάτων που στοχεύουν στη μείωση του ιδιοβάρους χωρίς τη συνεπαγόμενη μείωση του ανοίγματος αποτελούν οι χωρικά εφελκόμενες δομές και τα υβριδικά δομικά συστήματα [1.9]. Στην παρούσα μελέτη επιλέγονται τα υβριδικά δομικά συστήματα όπου δυο ή περισσότερα συστήματα δομών με ανόμοιες μηχανικές ιδιότητες παραλαβής δυνάμεων, συμπλέκονται για να μορφοποιήσουν μια ενιαία λειτουργική κατασκευή. Η αύξηση της ακαμψίας, της ακεραιότητας και η συνέργεια μεταξύ των μελών, καθιστούν την ομάδα των υβριδικών δομικών συστημάτων ιδιαίτερα κατάλληλη για κινητικές δομικές κατασκευές [1.10].

Η μετατροπή δομικών συστημάτων σε κινητικά συστήματα επιτυγχάνεται με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία σε δυο κατευθύνσεις: μέσω προσθετικής ένταξης στοιχείων ενεργοποίησης κινητικού μηχανισμού, ή μέσω αντικατάστασης κύριων μελών της δομικής κατασκευής με απαιτούμενους ενεργοποιητές και αντίστοιχη ανάπτυξη των αρθρώσεων. Βασισμένα στις προαναφερόμενες αρχές είναι το ευμετάβλητο επίπεδο δικτύωμα των Merali και Long όπου ανταποκρίνεται δυναμικά σε φορτία μέσω της αντικατάστασης των θλιβόμενων μελών με υδραυλικά πιστόνια και των εφελκόμενων μελών με ελαστομερή σωλήνα [1.11]. Η πρόταση για το ευμετάβλητο γεωμετρικά δικτύωμα (Variable Geometry Truss - VGT) των Miura και Furuya συγκροτείται από αρθρωτά συνδεδεμένες κάθετες ράβδους με σταθερή διάσταση και οριζόντιες ράβδους με δυνατότητα επέκτασης και

συρρίκνωσης μέσω των υδραυλικών πιστονιών που αντικαθιστούν τα θλιβόμενα μέλη [1.12]. Το κατασκευαστικό πρωτότυπο Muscle Tower II, αφορά ένα σύστημα από χωρικά εφελκόμενες μονάδες που αναπτύσσονται κατακόρυφα στον επιμήκη άξονα. Έξι διαφορετικές γεωμετρικές μονάδες (τραπεζοειδή πρίσματα) είναι αρθρωτά συνδεδεμένες και συγκροτούν τον πυρήνα. Η ομαλή διεξαγωγή της κίνησης της κατασκευής οφείλεται εξίσου στους ελαστομερή μύες που συνδέονται με τη σφαιρική άρθρωση [1.13]. Σε παράλληλο επίπεδο σχεδιασμού τοποθετείται το κατασκευαστικό πρωτότυπο του κινητικού πύργου στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Μασαχουσέτης. Προσδιορίζεται από την επανάληψη πέντε πανομοιότυπων μονάδων, αρθρωτά συνδεδεμένων καθ' ύψος, που διατηρούνται σε ευστάθεια μέσω των κάθετων ελαστομερή μελών που διαπερνούν τα πρωτεύοντα δομικά στοιχεία. Ενσωματωμένοι αποσβεστήρες ενέργειας είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή περιστροφικής κίνησης του συστήματος [1.14]. Η σχεδιαστική πρόταση του Sterk για την ευμετάβλητη χωρικά εφελκόμενη δομή επιτυγχάνεται μέσω των ενεργοποιητών που τοποθετούνται έναντι των θλιβόμενων ορθοστατών. Το δευτερεύον σύστημα καλωδίων είναι υπεύθυνο για τις εφελκυστικές δυνάμεις και για ενεργοποίηση της μονάδας με δυνατότητες μετασχηματισμού [1.15].

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση της κινητικής υβριδικής δομής της παρούσας μελέτης αντανακλά αρχές ενοποιημένου σχεδιασμού μη γραμμικής ανάπτυξης εστιάζοντας στη διερεύνηση της δομικής μορφολογίας, της κατασκευαστικής, της οικοδομικής και της κινητικής επίλυσης σε μικρο – κλίμακα. Θεμέλιο της παρούσας έρευνας στο σχεδιασμό αποτέλεσε η δομική και κινητική συνέργεια, μέσω της εστίασης στις διαφορετικές ενότητες και της συγχρονικής σχέσης τους προκειμένου να οριστεί η βέλτιστη δομή. Η επιλεγμένη κινητική επίλυση σύμφωνα με τη λειτουργία του μηχανισμού εννιά αρθρωτών ράβδων και η δυαδική συμπεριφορά των δευτερεύοντων μελών, προκειμένου να καθοριστεί η επιθυμητή θέση του συστήματος, απαιτούν ένα βαθμό ελευθερίας (1-DOF), μειωμένο αριθμό ενεργοποιητών και ενεργειακή κατανάλωση. Ο έλεγχος του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων και η επαλήθευση της συμπεριφοράς της κινητικής υβριδικής δομής βάσει της τροποποίησης των καλωδίων υποστηρίζεται από λογισμικά προγράμματα.

Η ερευνητική πρόταση εγείρεται στον ενοποιημένο σχεδιασμό κινητικής υβριδικής δομικής κατασκευής βασισμένη στο δομικό, κινητικό και κατασκευαστικό σχεδιασμό,

αναδεικνύοντας τη βέλτιστη κατασκευαστική τυπολογία κινητικού υβριδικού πρωτότυπου. Η εφαρμογή της προτεινόμενης δομής θα μπορούσε επίσης, να απαντήσει στα σύγχρονα ζητήματα για ανταποκρινόμενες κτιριακές δομές απέναντι σε περιβαλλοντικές ή/και χρηστικές συνθήκες. Πρωτίστως, αναφέρονται ενδεικτικά εισερχόμενα ερεθίσματα όπως ανεμοπιέσεις, φορτία χιονιού, φυσικός φωτισμός και θερμοκρασία, όπου θα επηρεάζουν άμεσα τη δομική μορφολογία του συστήματος μέσω τοπικών μετασχηματισμών, προκειμένου να συμπεριφερθεί βέλτιστα με βάση το ενεργό σύστημα ελέγχου. Παράλληλα, η ικανότητα της προτεινόμενης δομής να αποδίδει διαφορετικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς προδιαγράφει χαρακτηριστικά μεταβολής του εσωτερικού χώρου βάσει τον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.

1.2 Δομή Περιεχομένων

Η δομή της προτεινόμενης διατριβής διαρθρώνεται στην παρούσα μελέτη με τα εξής κομβικά κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 1 εισάγει τη θεματική των στατικών και κινητικών κατασκευών, στα πλαίσια ανάπτυξης των κινητικών υβριδικών δομικών κατασκευών. Παράλληλα, παρουσιάζεται η δομή των περιεχομένων της παρούσας μελέτης.

Το κεφάλαιο 2 περιγράφει το πλαίσιο της τυπολογικής βελτιστοποίησης δομικών συστημάτων, καθώς και την περιγραφή της κινητικής αρχιτεκτονικής εστιάζοντας στην ιστορική ανασκόπηση σχεδιασμού κινητικών συστημάτων βάσει της επίδρασης των κοινωνικοοικονομικών, τεχνολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, τη σύγχρονη προοπτική στον αντίστοιχο τομέα. Με αφορμή την αλληλένδετη συνέργεια καμπτικών και αξονικών καταπονήσεων, αποδίδοντας μείωση των καμπτικών καταπονήσεων και αύξηση των φορτίσεων αντίστοιχα, παρουσιάζονται στατικά δομικά συστήματα που ανάγονται από τον υφιστάμενο αρχιτεκτονικό χώρο. Κατ' επέκταση, δίδεται εξίσου βαρύτητα στην ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων, μ' έμφαση στη δομική μορφολογία, στη γεωμετρική και κατασκευαστική τυπολογία, ενσωματώνοντας παράλληλα μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης και ενεργό σύστημα ελέγχου.

Η σχεδιαστική διαδικασία ανάπτυξης κινητικών κατασκευών καθορίζει διαφορετικές προσεγγίσεις, με αφετηρία την αλληλένδετη σχέση μεταξύ της έρευνας και του σχεδιασμού. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι διαφορετικές μεθοδολογίες όπως επίσης και η μεθοδολογία σχεδιασμού της προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής. Η

μεθοδολογία της κινητικής υβριδικής δομής απορρέει από τη σύγκλιση διαφορετικών κλάδων με κύρια πυξίδα τους κοινούς στόχους για την ανάπτυξη ενός βέλτιστου κινητικού δομικού συστήματος που θα εκπληρώσει αρχιτεκτονικά, κατασκευαστικά, οικοδομικά, μηχανικά και κινητικά ζητήματα.

Το κεφάλαιο 4 επιχειρεί ν' αναδείξει τη βέλτιστη τυπολογική δομή ενός υβριδικού κινητικού συστήματος. Αφετηρία ανάπτυξης αποτέλεσε η εξέταση και η αξιολόγηση των στατικών και κινητικών ιδιοτήτων συγκεκριμένης δομής, υιοθετώντας την παραμετρική στατική ανάλυση ενός υβριδικού κινητικού συστήματος. Καθοριστικής σημασίας αποτελούν οι παράγοντες διερεύνησης της δομικής μορφολογίας, της γεωμετρίας και των συνθηκών σύνδεσης των μελών του συστήματος για τη βελτιστοποίηση της δομής. Το πρώτο επίπεδο ανάλυσης ενός εννιαμελούς συστήματος οργανώνεται με βάση το εύρος δυνατοτήτων μετάλλαξης της τυπολογικής δομής και της γενικότερης απόδοσης του συστήματος. Ο άξονας της ανάλυσης εξελίσσεται παραμετρικά και στηρίζεται στην επιλογή μιας δομικής τυπολογίας, η οποία αποδίδει τα ιδανικότερα χαρακτηριστικά ως προς την ακριβή μοντελοποίηση του κινητικού μηχανισμού.

Στο κεφάλαιο 5 πραγματώνεται η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός της κατασκευαστικής επίλυσης της κινητικής υβριδικής δομής και κατ' επέκταση η δημιουργία χωρικής δομής εξασφαλίζοντας τη διαφραγματική λειτουργία και συνάμα την άμεση τροποποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, προκειμένου να συμπεριφερθεί ευέλικτα και να προσαρμοστεί στα δεδομένα μετασχηματισμού της κινητικής υβριδικής δομής. Στα πλαίσια ενοποιημένου σχεδιασμού επιτυγχάνεται συγχρόνως η ενσωμάτωση ενεργού συστήματος ελέγχου στο κατασκευαστικό κινητικό σύστημα.

Η κίνηση της υβριδικής δομής εξελίχθηκε στο κεφάλαιο 6 βάσει της σύνθεσης ενός μηχανισμού, με σκοπό την πραγμάτωση επιθυμητών κινήσεων μέσω μιας ακολουθίας βημάτων. Η δυναμική συμπεριφορά της κινητικής υβριδικής δομής στηρίζεται στην εφαρμογή της σύνθεσης ενός επίπεδου μηχανισμού εννιά αρθρωτών ράβδων (9 - bar linkage). Ο σχεδιασμός, η ανάλυση και ο έλεγχος της κινητικής υβριδικής δομής υποστηρίζεται από τη ψηφιακή πλατφόρμα του δυσδιάστατου προγράμματος προσομοίωσης και ανάλυσης Working Model 2D, εξετάζοντας το σχεδιασμό της κίνησης βάσει περιορισμών, τη συμπεριφορά του συστήματος βάσει ειδικών κριτηρίων και τη συνέργεια των συνδετικών μελών.

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση της κίνησης της υβριδικής δομής παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7. Η επαλήθευση της λειτουργίας του δευτερεύοντος καλωδίου υποστηρίζεται από το μηχανικό και αυτοματοποιημένο λογισμικό πρόγραμμα Solidworks Essentials. Θεμελιώδες εργαλείο προώθησης της δυναμικής ανάλυσης έγκειται στο σχεδιασμό της κίνησης μέσω της καταγραφής μιας σειράς καταστάσεων κίνησης (event - based motion). Ο πυλώνας σχεδιασμού της κίνησης έγκειται σε μια ακολουθία ενεργειών με καθορισμένα αλληλένδετα και αλληλεπιδρώμενα βήματα, στοχεύοντας στην ομαλή διεξαγωγή της κίνησης από την αρχική στην τελική θέση.

Το εξωτερικό περίβλημα της προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομικής κατασκευής αναλύεται κατασκευαστικά στο κεφάλαιο 8, όπου προτείνονται δυο συστήματα μεταβαλλόμενου κατασκευαστικού περιβλήματος εφαρμόζοντας THV- (Τετραφλουοροαιθυλένιο εξαφλουοροπροπυλένιο βινυλιδένιο) μεμβράνες με κύρια χαρακτηριστικά σύστασης του συστήματος: την παθητική ανταπόκριση στους πολλαπλούς μετασχηματισμούς της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής και τον ενεργό έλεγχο για βελτίωση των συνθηκών έντασης στη μεμβράνη.

Η ερευνητική συνεισφορά, σύνοψη των ερευνητικών αποτελεσμάτων και οι μελλοντικές προοπτικές παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο επιχειρεί να πλαισιώσει την τυπολογική βελτιστοποίηση των δομικών συστημάτων, με αφορμή την αλληλένδετη συνέργεια καμπτικών και αξονικών καταπονήσεων αποδίδοντας αντίστοιχα μείωση των καμπτικών, μέσω των στατικών δομικών συστημάτων που ανάγονται από τον υφιστάμενο αρχιτεκτονικό χώρο και στα πλαίσια του ενοποιημένου σχεδιασμού το κατασκευαστικό περίβλημα. Κατ' επέκταση, δίδεται εξίσου βαρύτητα στην εξελικτική πορεία σχεδιασμού κινητικών συστημάτων και στην ανάλυση κινητικών δομικών συστημάτων, μ' έμφαση τη δομική μορφολογία, τη γεωμετρική και κατασκευαστική τυπολογία, ενσωματώνοντας παράλληλα μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης και ενεργό σύστημα ελέγχου.

2.2 Τυπολογική βελτιστοποίηση δομικών συστημάτων

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα και η πρόοδος της κατασκευαστικής τεχνολογίας εισήγαγαν καινοτόμες βελτιστοποιημένες μεθόδους κατεργασίας υλικών και ισχυρή ώθηση στη διαδικασία υλοποίησης πρωτοποριακών δομικών συστημάτων. Η ευρύτερη και συστηματική εφαρμογή του χάλυβα σε κατασκευαστικές δομές ως φέρον δομικό στοιχείο, τοποθετείται στη βιομηχανική εποχή και οφείλεται εξίσου στα φυσικά και μηχανικά του χαρακτηριστικά. Ανασταλτικός παράγοντας για την ανάπτυξη των δομικών μεταλλικών συστημάτων υπήρξε η επιτακτική κατεργασία του σιδήρου προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες. Τροχοπέδη επίσης, αποτέλεσε η επίπονη χειρονακτική εργασία σφυρήλατων ή χυτών κατασκευών [2.1].

Η τυποποίηση των ενώσεων και τα βιομηχανικά παραγόμενα μεταλλικά στοιχεία δόμησης προϋποθέτουν ένα ευρύ φάσμα ποικιλομορφίας διατομών και συνθέσεων μεταξύ τους. Οι λυόμενες μέθοδοι σύνδεσης (κοχλιώσεις) προδιαθέτουν και χορηγούν τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και επανασυναρμολόγησης, υποστηρίζοντας την ιδιότητα της προσαρμοστικότητας. Αφετηρία του βιομηχανικού σχεδιασμού σηματοδότησε η εξαιρετικά αυξημένη αντοχή του χάλυβα έναντι των καταπονήσεων

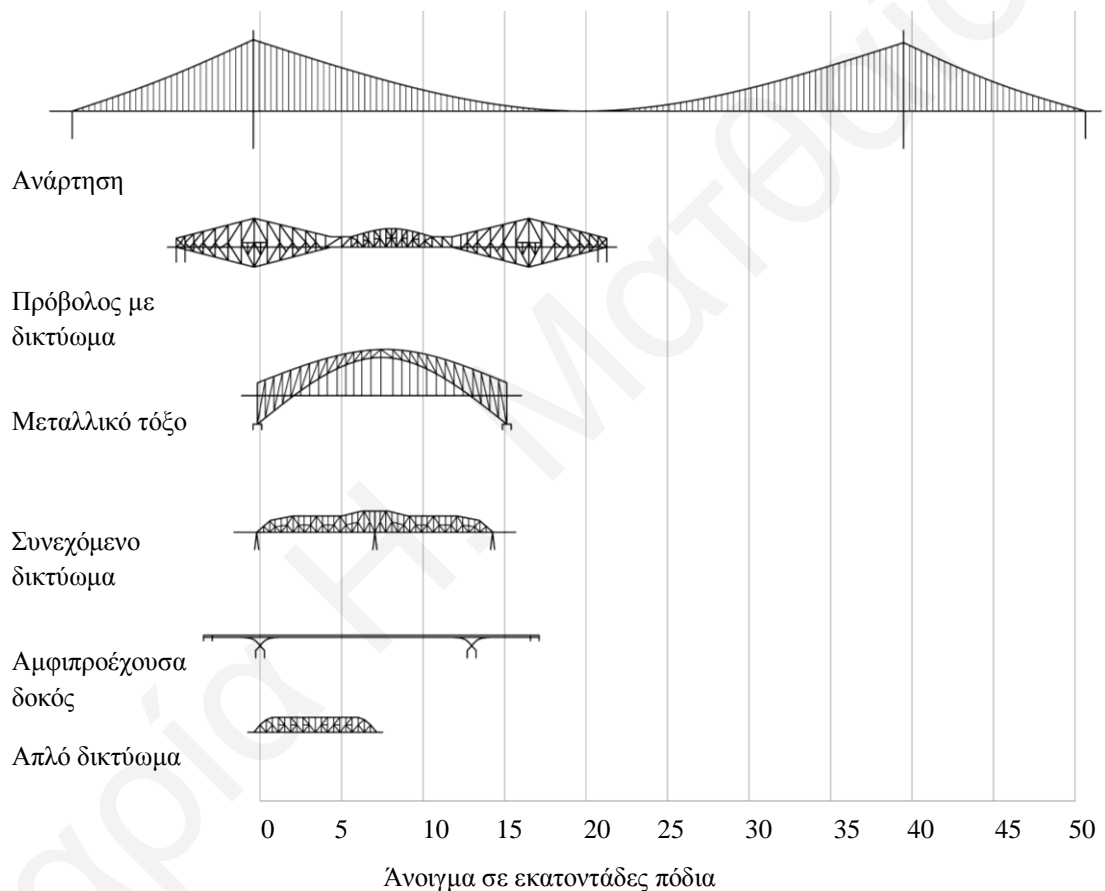
(εφελκυσμό, θλίψη) και η ανάληψη έντονων φορτίσεων εφαρμόζοντας μικρές διατομές με μεγάλα ανοίγματα ([2.2], [2.3], [2.4], [2.5]).

Άμεσα σχετιζόμενα με τη σύγχρονη σχεδιαστική και τεχνική μέθοδο μεγάλων ανοιγμάτων - μικρές διατομές και μειωμένο ιδιοβάρος - αποτέλεσαν τα φιλοσοφικά συγγράμματα "Two New Sciences" του Γαλιλαίου [2.2]. Γνωστοποιούσε το νόημα της μηχανικής και ουσιαστικότερα τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται να μεταβάλλονται οι αναλογίες μιας μηχανικής κατασκευής καθώς η δομή μεγεθύνεται υπό κλίμακα. Συσχετίζοντας το φιλοσοφικό του στοχασμό με το ερειστικό σύστημα των βιολογικών οργανισμών, διαπίστωσε ότι το μέγεθος και η λειτουργία ενός ζωντανού οργανισμού δεν αναλογούν με το ερειστικό σύστημα του. Υποστήριξε απαιτούμενη αύξηση της αντοχής των φερόντων στοιχείων, όπως μείωση του ιδιοβάρους και αύξηση της ακαμψίας σύμφωνα με την αύξηση του συνολικού μεγέθους των οργανισμών. Η τυπολογική εξέλιξη των δομικών συστημάτων σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα επιβεβαιώνουν σε γενικές γραμμές τη διαπίστωση του Γαλιλαίου [2.2].

Με γνώμονα την επικείμενη συσχέτιση, προβάλλεται η επιτακτική και ευρεία εφαρμογή των επίπεδων και χωρικών πλαισιωτών δικτυωμάτων έναντι του ολόσωμου φορέα, βελτιώνοντας ζητήματα ιδιοβάρους και ουσιαστικής μείωσης των καμπτικών καταπονήσεων. Ο ποικιλόμορφος γεωμετρικός σχεδιασμός δικτυωμάτων μπορεί να υλοποιηθεί με τη συναρμολόγηση μελών σε τριγωνική μορφή. Υπό κατακόρυφη φόρτιση η άνω και η κάτω "χορδή" παραλαμβάνουν θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα, φροντίζοντας για την αντοχή του συστήματος υπό καμπτικές φορτίσεις, ενώ ο υπόλοιπος ιστός εξυπηρετεί στην αντοχή των διατμητικών καταπονήσεων ([2.6], [2.7], [2.8]).

Επιτακτική ανάγκη για βελτιστοποίηση των συστημάτων έγκειται στην αντίσταση των εξωτερικών φορτίων εφαρμόζοντας την ελάχιστη μάζα της κατασκευής. Η συνδεσμολογία των συστημάτων διακρίνεται σε αντίστοιχο σχεδιασμό κοχλιώσεων, ή συγκολλήσεων με σκοπό την αποτροπή περιστροφής των μελών και τη μεγιστοποίηση της αντοχής υπό την άσκηση φορτίου. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη των κόμβων τροφοδοτεί την παράμετρο της μεταβολής σ' ένα σύστημα, επιτρέποντας την ενσωμάτωση και τη λειτουργία κινητικών μηχανισμών διατηρώντας τη δομική τους ακεραιότητα [2.9].

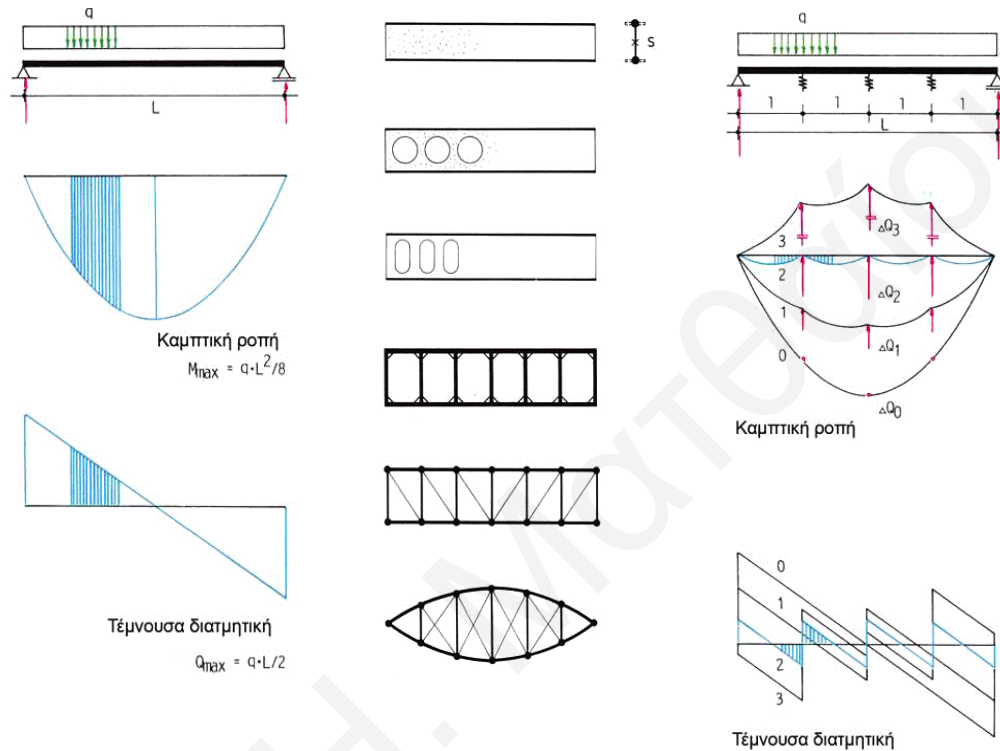
Η αύξηση του ιδιοβάρους της κατασκευής έγκειται στην τυπολογία του καμπτικού συστήματος, ενώ ο σχεδιασμός δομικών συστημάτων που αναπτύσσουν κυρίως αξονικές δυνάμεις αποβαίνει στην εφαρμογή μικρότερων διατομών και κατ' επέκταση στη μείωση του ιδιοβάρους. Αντιπροσωπευτικές κατηγορίες δομικών συστημάτων που στοχεύουν στη μείωση του ιδιοβάρους χωρίς τη συνεπαγόμενη μείωση του ανοίγματος (εικόνα 2.1) αποτελούν οι ραβδωτές κατασκευές πλαισίων, τα δικτύωματα, τα καλωδιωτά συστήματα, οι χωρικά εφελκόμενες δομές και τα υβριδικά δομικά συστήματα [2.11].



Εικόνα 2.1 Δομικά συστήματα σε σχέση του ανοίγματος [2.10].

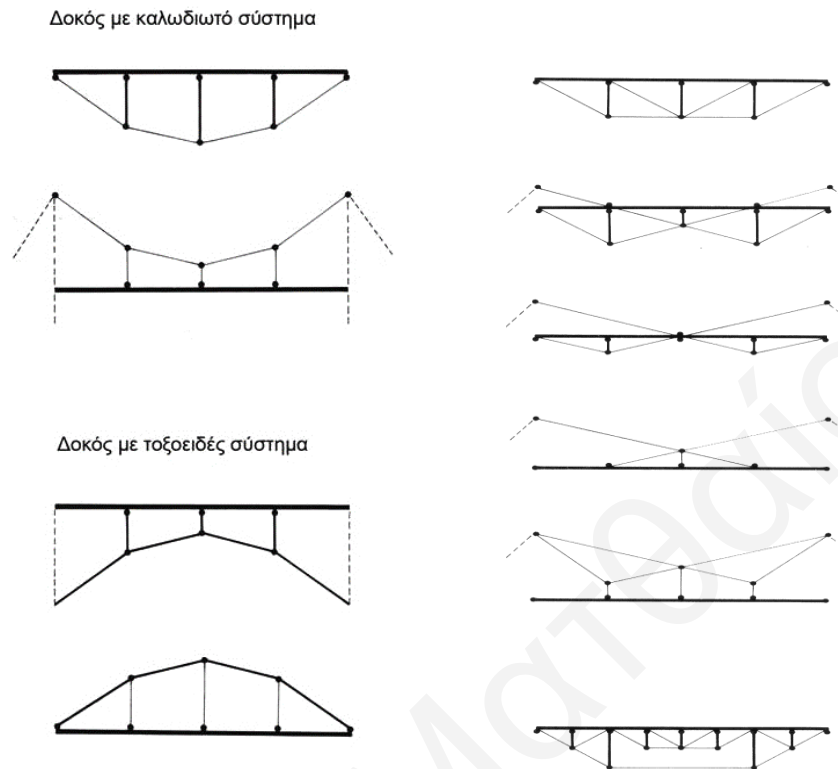
Επιπρόσθετα, η τυπολογική και κατασκευαστική βελτιστοποίηση των δομικών συστημάτων αναδύει κατηγορίες υβριδικών δομικών συστημάτων που προδιαγράφουν ένα υψηλό επίπεδο στη μείωση του ιδιοβάρους και των καμπτικών καταπονήσεων (εικόνα 2.2). Υβριδικά δομικά συστήματα δεν κατατάσσονται σε μια κατηγορία συστημάτων, εφόσον δεν χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο μηχανισμό ανακατανομής δυνάμεων,

καταπονήσεων και από μια ιδιαιτερότητα δομικής μορφής, αλλά από τη συγκεκριμένη συμπεριφορά που απορρέει από τα ζεύγη δομών και από τη συνδεσμολογία των συστημάτων [2.12].



Εικόνα 2.2 Κύριες καταπονήσεις αμφιέριστης δοκού και ιδανικά συστήματα ως προς τη διατομή και την επιμήκη μορφή [2.13].

Υβριδικά δομικά συστήματα ορίζονται δυο ή περισσότερα συστήματα δομών με ανόμοιες μηχανικές ιδιότητες παραλαβής δυνάμεων που συμπλέκονται για να μορφοποιήσουν μια ενιαία λειτουργική κατασκευή. Βασική προϋπόθεση των υβριδικών δομικών συστημάτων αποτελεί η ολιστική συμπεριφορά και η ισοδύναμη ανταπόκριση κατά τη λειτουργία των καταπονήσεων (εικόνα 2.3). Η αύξηση της ακαμψίας, της ακεραιότητας και η συνέργεια μεταξύ των μελών, καθιστούν την ομάδα των υβριδικών δομικών συστημάτων ιδιαίτερα κατάλληλη για κτίρια εκτεθειμένα σε μεγάλα ποσοστά καταπονήσεων [2.13].



Εικόνα 2.3 Μείωση των καμπτικών καταπονήσεων μέσω ανάπτυξης ιδανικών συστημάτων ενίσχυσης, υβριδικών συστημάτων και σύνθετων καλωδιωτών συστημάτων [2.13].

Η εξελικτική διαδικασία βελτιστοποίησης της αλληλένδετης και διαδραστικής σχέσης μορφολογίας και μηχανικής της κατασκευής, παρουσιάζει τον βελτιστοποιημένο ιχθυόμορφο φορέα. Ο ενοποιημένος σχεδιασμός και η σύζευξη των ειδικοτήτων (αρχιτεκτόνων, μηχανικών, βιολόγων και μαθηματικών) προδιαγράφει ένα ολοκληρωμένο σύστημα αρχών [2.14]. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η ερευνητική προσέγγιση του D' Arcy Thompson στο βιβλίο του "On growth and Form" επιδεικνύοντας την εξέλιξη ως θεμελιώδης αρχή για τη δομή και τη μορφή των ζωντανών οργανισμών και καταγράφοντας επίσης, τους φυσικούς νόμους που εξυπηρετούν στη μηχανική απόδοση των βέλτιστων δομικών συστημάτων με γνώμονα τη μεταβαλλόμενη εξελικτική γεωμετρία [2.15].

Η ανάπτυξη υβριδικών δομικών συστημάτων με εσωτερικά καλωδιωτά συστήματα ενίσχυσης αποσκοπεί κυρίως στη μείωση των καμπτικών και διατμητικών καταπονήσεων.

Το πρωτεύον δομικό σύστημα αποφορτίζεται από το ισχυρό ποσοστό φορτίου που μεταφέρεται μέσω κάμψης, ενώ το δευτερεύον ραβδωτό σύστημα ενίσχυσης παραλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό φόρτισης μέσω εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων. Αξίζει να τονισθεί ότι, η αξιοποίηση των εφελκυστικών δυνάμεων διακρίθηκε και εδραιώθηκε με την τεχνολογική εξέλιξη των υλικών και των κατασκευαστικών μεθόδων. Οι ιδιότητες του υβριδικού δομικού συστήματος να διατηρεί την αντοχή, την ευστάθεια και τη δομική ακεραιότητά του, το καθιστούν ολοκληρωμένο, και δημιούργησαν ταυτόχρονα νέες προοπτικές στον τομέα της αρχιτεκτονικής, μηχανικής, ρομποτικής και αεροναυπηγικής [2.16].

Οι ανάγκες της αεροναυπηγικής για την εφαρμογή δομών που προδιαγράφουν χαρακτηριστικά συρρίκνωσης μ' ελάχιστο χώρο κατά τη μεταφορά και επέκταση για τη διεκπεραίωση της λειτουργίας τους, παρακίνησε την ανάπτυξη των αναδιπλούμενων δομών. Η εφαρμογή των χωρικά εφελκυσμένων δομών (tensegrity structures) υποστηρίζει άμεσα αντίστοιχες ανάγκες. Η εδραίωση τους στο χώρο θεμελιώνεται από την ανάγκη για χαμηλό ιδιοβάρος, ευκαμψία, δυνατότητα αναδίπλωσης και εφαρμογή αυτόματου ενεργού ελέγχου. Πρωτοστάτης στην προσπάθεια επίλυσης του ζητήματος και συνήγορος των χωρικά εφελκυσμένων δομών υπήρξε ο Buckminster Fuller, ενώ ο καλλιτέχνης Kenneth Snelson κατασκεύασε την πρώτη εφελκυσμένη δομή ([2.16], [2.17], [2.18], [2.19]).

Χωρικά εφελκυσμένη δομή ορίζεται «το σύστημα από διακριτά θλιβόμενα στελέχη που αναρτάται σ' ένα συνεχές δίκτυο προεντεταμένων τενόντων, ώστε να δημιουργηθεί μια ευσταθής και ακέραιη κατασκευή στο χώρο» [2.20]. Η ετυμολογία του όρου "tensegrity" συνίσταται από τη σύμπτυξη των αγγλικών λέξεων tension (ένταση) και integrity (ακεραιότητα). Συγκεκριμένα εφελκυσμένα (προεντεταμένα καλώδια) και θλιβόμενα άκαμπτα μέλη (ράβδοι) συγκροτούν τις χωρικά εφελκυσμένες δομές. Ουσιαστικά, η διατήρηση της ισορροπίας έγκειται στη συνέργεια των αντίθετων τάσεων, στη στατική και δυναμική ισορροπία των εφελκυστικών και θλιπτικών μελών. Οι ράβδοι υφίστανται τις θλιπτικές τάσεις και τα προεντεταμένα καλώδια τις εφελκυστικές τάσεις, με αποτέλεσμα οι διατομές των ράβδων ν' αυξάνονται εφόσον η συμπίεση επιδρά στο κέντρο της μάζας του συνολικού στατικού συστήματος και οι διατομές των συρματόσχοινων να ελαττώνονται. Τα μέλη που συγκροτούν τη δομή είναι διατεταγμένα και στις τρεις

διευθύνσεις και επιτυγχάνουν μέγιστα ποσοστά αντοχής με μειωμένη μάζα ([2.16], [2.17], [2.18], [2.19]).

Με βάση το κριτήριο τυπολογικής κατηγοριοποίησης του ευθύγραμμου φορέα σε πλαίσια επίπεδα και χωρικά δικτύωματα, χωροδικτύωματα και υβριδικά δομικά συστήματα, ακολουθεί η περαιτέρω ανασκόπηση κτιριακών εφαρμογών και αναπτύξεων κινητικών συστημάτων στα υποκεφάλαια 2.4 και 2.5.

2.3 Εξελικτική πορεία σχεδιασμού κινητικών συστημάτων

Ο τομέας της έρευνας και ο σχεδιασμός των κινητικών δομών συγκροτήθηκε κυρίως με αφορμή τα χαρακτηριστικά της κοινωνίας, την τεχνολογική και οικονομική ανάπτυξη. Κύριοι συντελεστές επίδρασης στην προσέγγιση του γνωστικού πεδίου της κινητικής αρχιτεκτονικής αποτέλεσαν σε μεγαλύτερο βαθμό η βιομηχανική επανάσταση και ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος. Η επιτακτική ανάγκη μιας εκτεταμένης και ταχείας δόμησης με την εφαρμογή της επιστημονικής γνώσης καθώς και της βιομηχανικής παραγωγής, υπήρξαν η αφετηρία για τη σύσταση της κινητικής αρχιτεκτονικής.

Ιδιαίτερη υπόσταση παρουσιάζει η ανάλυση των αρχιτεκτονικών σχεδιαστικών προτάσεων της χρονικής περιόδου του '60, με απώτερο σκοπό την έκθεση της μεταβολής ως κατασκευαστική διαδικασία στο χώρο. Το εισερχόμενο ερέθισμα ή δράση σ' αυτά τα παραδείγματα προέρχεται και εκπληρώνεται αντίστοιχα από τον ίδιο το χρήστη, χωρίς την εφαρμογή τεχνολογικών συστημάτων στον τομέα της κατασκευής. Το κίνημα του στρουκτουραλισμού επιχείρησε να προβάλλει την ενεργή συμμετοχή του χρήστη σ' ένα ευέλικτο πλαίσιο σχεδιασμού με πρωτοστάτες τους Μεταβολιστές, Archigram και Yona Friedman. Βασικές αρχές σχεδιασμού του στρουκτουραλισμού στηρίζονται στην ανάγνωση του δομημένου περιβάλλοντος ως ευμεταβλητές δομές που συγκροτούνται από αλληλένδετα στοιχεία καθιστώντας τη μεταβλητότητα και την ευελιξία καίριους παράγοντες [2.21].

Ο Yona Friedman επηρεαζόμενος από τον Buckminster Fuller για την εφημερότητα και τη μεταβλητότητα των κατασκευών, προτείνει την «La Ville Spatial», το 1960. Η μεταπολεμική περίοδος του Β' Παγκόσμιου Πολέμου (1939-45) καθόρισε την πορεία του

Friedman δίδοντας βαρύτητα στις βασικές ανάγκες των ανθρώπων. Η περίοδος της μαζικής παραγωγής και η ανάγκη για καταμερισμό της παραγωγικής διαδικασίας με στόχο την αυτοματοποίηση της παραγωγής των προϊόντων, εφοδίασε τις διαδικασίες της έρευνας για προκατασκευασμένα, τυποποιημένα και κινητά στοιχεία με κριτήρια οργάνωσης την αλυσίδα συναρμολόγησης και τη γραμμή παραγωγής [2.22].

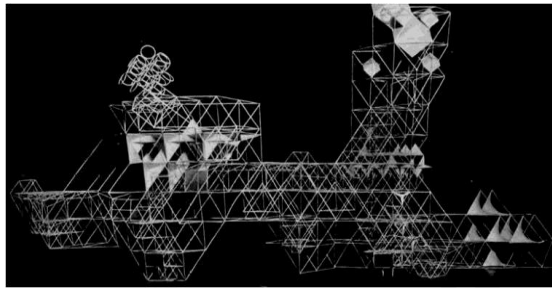
Η παραδοσιακή πόλη κατά τον Friedman (εικόνα 2.4) δεν ήταν επαρκώς εξοπλισμένη για την καινούργια κοινωνία. Η αρχιτεκτονική θα έπρεπε να προωθεί μόνο ένα «πλαίσιο εργασίας» (framework), στο οποίο οι κάτοικοι θα έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζουν την οικία τους βασισμένοι στις ανάγκες και ιδέες τους, ελεύθεροι από κάθε περιορισμό. Τα φθηνά προκατασκευασμένα και υψηλού βαθμού ευμετάβλητα στοιχεία θ' ανταποκρίνονταν στις κινητές, ελαφριές και εφήμερες κατασκευές και θα ενδυνάμωναν την «κινητή» κοινωνία. Οι χώροι είναι ευμετάβλητοι με ιδιότητες συναρμολόγησης, αποσυναρμολόγησης, μετακίνησης ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των χρηστών. Το σχεδιαστικό αποτέλεσμα αφορά μια ανεξάρτητη κατασκευή πάνω από την υφιστάμενη πόλη προτείνοντας ένα σταθερό πλαίσιο ανάπτυξης και διαμόρφωσης της κατοικίας από τους χρήστες [2.22].



Εικόνα 2.4 Σχεδιαστική πρόταση για τη «La Ville Spatial» [2.22].

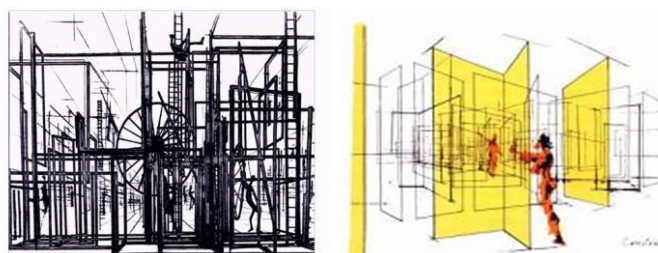
Συντελεστές επιρροής της σχεδιαστικής πρότασης του Fielitz (εικόνα 2.5) αποτελούν η άντληση δυνατοτήτων της τεχνολογίας για ανέλιξη σχεδιασμού της πόλης, η τάση προς τη μαζική παραγωγή, η αυτοματοποίηση της παραγωγής, η χειραγώγηση και η εκμετάλλευση της τεχνολογίας για παραγωγή ποιότητας και όχι μόνο ποσότητας (τυποποίηση), όπου θα εμπλούτιζε τον τρόπο ζωής της ελεύθερης κοινωνίας, βάσει των νέων υλικών και συστημάτων. Η αύξηση βιοτικού επιπέδου και η μονοτονία που χαρακτηρίζει το

βιομηχανικά κατασκευασμένο περιβάλλον, περιορίζοντας την ελευθερία και τη λήψη αποφάσεων των χρηστών, αναιρείται από την ευέλικτη, πολυλειτουργική και γενικής χρήσης χωρική κατασκευή που επιτρέπει διαφορετικούς σχηματισμούς μέσω των συναρμολογούμενων και ευμετάβλητων χώρων, σύμφωνα με την ίδια συμμετοχή του χρήστη ([2.23], [2.24]).



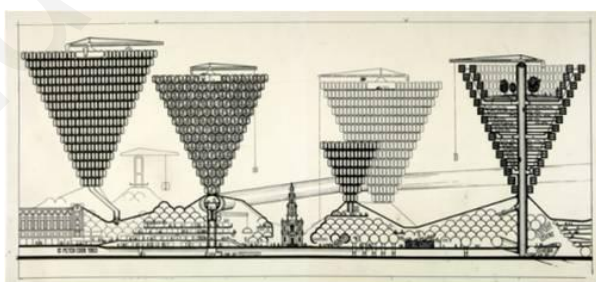
Εικόνα 2.5 Χωρική Κατασκευή με συναρμολογούμενους χώρους [2.23].

Στο ίδιο πεδίο ανάλυσης κατατάσσεται η προσέγγιση της «Νέας Βαβυλώνας» του Constant Nieuwenhuys, το 1960 (εικόνα 2.6). Πρόκειται για ένα είδος «ξενοδοχείου» μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα που επιτρέπει τη συχνή αλλαγή της κατοικίας ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη/κάτοικου. Ο Constant επιδέχθηκε επίδραση από τη μαζική παραγωγή, το κίνημα των Καταστασιακών και το νομαδικό και δημιουργικό τρόπο ζωής. Η αυτοματοποίηση οδήγησε στη μη δημιουργική εργασία αλλά και στην απελευθέρωση των εργαζομένων από την εργασία. Ωστόσο, «η σύγχρονη πόλη είναι νεκρή και μόνο στη Νέα Βαβυλώνα θα μπορούσε να ζήσει κανείς και να ζει - ταυτίζεται με το να είναι δημιουργικός» σύμφωνα με τον Constant [2.25]. Ο πειραματικός, δημιουργικός και νομαδικός τρόπος ζωής των κατοίκων υποστήριξε τη δημιουργία εναλλακτικών εμπειριών με σκοπό την αλλαγή της καθημερινότητας των πολιτών και την κοινωνικοποίησή τους ([2.25],[2.26]).



Εικόνα 2.6 Χωρική κατασκευή με συναρμολογούμενους χώρους, «Νέα Βαβυλώνα» [2.25].

Η ομάδα των Archigram πρόβαλλαν μια διαφορετική αντίληψη της έννοιας της μεταβολής, προτείνοντας κινητές μονάδες και δίδοντας ευχέρεια στους χρήστες να επιλέγουν την τοποθεσία της μονάδας βάσει των επιθυμιών τους (εικόνα 2.7). Η μεταβαλλόμενη κατάσταση εμπνέει τη μαζική κοινωνία για μια πιο ζωντανή, δημιουργική και αναθεωρημένη κοινωνία. Πρόκειται για προκατασκευασμένες κάψουλες οι οποίες συνδέονται σ' ένα δίκτυο υποδομής που παρέχει τις απαραίτητες λειτουργικές υπηρεσίες. Η αρχιτεκτονική ομάδα εμπνεύστηκε από το high-tech, το κίνημα Pop Art, τη μαζική παραγωγή, τη μονοτονία της βιομηχανικής αστικής ζωής, την καταναλωτική κοινωνία και το νομαδικό τρόπο ζωής. Το σχεδιαστικό εγχείρημα στηριζόταν στη μεταβαλλόμενη κατάσταση που θα έμπνεε τη μαζική κοινωνία για μια αναθεωρημένη, ζωντανή και δημιουργική ζωή απολαμβάνοντας την εμπειρία και τη διασκέδαση και αποφεύγοντας τη μονοτονία της βιομηχανικής αστικής ζωής [2.27].



Εικόνα 2.7 Κινητές προκατασκευασμένες κάψουλες [2.27].

Με παρόμοιο σχεδιαστικό τρόπο και ερεθίσματα ο Gunther Domeniq και Eilfried Huth παρουσίασαν την κατασκευή – χωροδικτύωμα «Raqnitz» (εικόνα 2.8) ([2.28],[2.29]). Η εξέλιξη της τεχνολογίας, η μαζική παραγωγή και κουλτούρα, η ευέλικτη και απελευθερωμένη κοινωνία κατεύθυναν το σχεδιασμό μιας στατικής χωροκατασκευής που

επιτρέπει τη σχετική διαμόρφωση από το χρήστη ανάλογα με τις επιθυμίες του. Η ισορροπία των δημόσιων και ιδιωτικών χώρων, η κοινωνική αλληλοσυσχέτιση και αλληλεγγύη, κατευθύνει τον άξονα σχεδιασμού σε ένα χωροδικτύωμα που εντάσσει τους άξονες κυκλοφορίας ως δευτερεύον σύστημα και μια ικανοποιητική χωροκατασκευή για μια ευέλικτη κοινωνία.



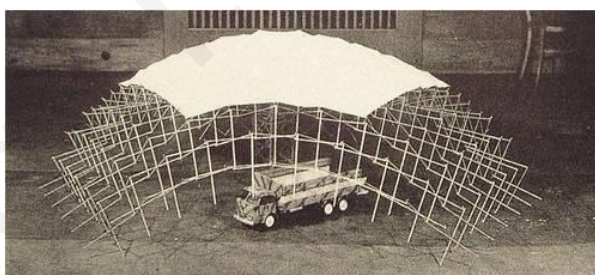
Εικόνα 2.8 Χωροδικτύωμα «Raqnitz» [2.29].

Η τεχνολογική προσέγγιση σε συνδυασμό της αρχιτεκτονικής με τους βιολογικούς οργανισμούς προκηρύχθηκε από το κίνημα του Μεταβολισμού [2.30]. Αναφορικά με τις δημοσιεύσεις τους στο κείμενο Μεταβολισμός 1960 – Πρόταση για μια νέα πολεοδομία υποστήριζαν ότι: «Θεωρούμε την ανθρώπινη κοινωνία ως ζωτική λειτουργία... Δεν πιστεύουμε ότι μόνο ο Μεταβολισμός υποδεικνύει την αποδοχή των φυσικών και ιστορικών διεργασιών προσπαθούμε να ενθαρρύνουμε τη δραστική ανάπτυξη της κοινωνίας μέσω των μεταβολιστικών μας προτάσεων.» [2.30]. Ο Kisho Kurokawa στο βιβλίο του Μεταβολισμός στην Αρχιτεκτονική εξηγεί ότι: «Εάν οι νέες τεχνολογίες αναμειχθούν με ένα σύστημα αναζωογόνησης και μεταβολισμού, ανάλογο προς εκείνο της φύσης, το αποτέλεσμα θα είναι όχι μόνο λογικές λύσεις για τα προβλήματα του πολιτισμού και του αστικού περιβάλλοντος, αλλά επίσης μοντέλα για τον έλεγχο μιας αυτοματοποιημένης τεχνολογίας και μια κουλτούρα των όλο και πιο γρήγορων μεταμορφώσεων.» [2.30]. Ο Arata Isozaki με τη σχεδιαστική του πρόταση «Clusters in the Air» (εικόνα 2.9), εισηγείται το χαμηλό κόστος κατοίκησης διαμέσου προκατασκευασμένων μονάδων. Η μαζική κοινωνία αποτέλεσαν τους πυλώνες σχεδιασμού για ευέλικτα και εξελισσόμενα δομικά συστήματα τα οποία ανταποκρίνονται στη διαδικασία της οργανικής ανάπτυξης και βιωσιμότητας [2.30].



Εικόνα 2.9 Σχεδιαστική πρόταση «Clusters in the Air» [2.30].

Σε αντιδιαστολή με τα πιο πάνω, καθοριστικής σημασίας υπήρξε η τεχνολογία και η οικονομική ανάπτυξη στην έρευνα και τον σχεδιασμό κινητικών δομών για τον Buckminster Fuller και σε μεταγενέστερο στάδιο τον Emilio Perez Pinero. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδουν στη διαλεκτική δυναμική της μορφής και της λειτουργίας των κινητικών δομικών κατασκευών μέσω πρωτοτύπων. Αξίζει να τονισθεί ότι, ενώ οι περισσότεροι εστιάζονταν στην αρχιτεκτονική θεωρία της κινητικής αρχιτεκτονικής και σε σχεδιαστικές ουτοπικές προτάσεις, χωρίς κάποια αναφορά σε κατασκευαστική λεπτομέρεια, στο ίδιο χρονικό πλαίσιο ο Perez προσπαθούσε να επιλύσει κατασκευαστικά ζητήματα στις ψαλιδωτές δομές (εικόνα 2.10) ([2.31], [2.32]).



Εικόνα 2.10 Πρωτότυπο μεταβαλλόμενου κινητού Θεάτρου [2.31].

Συμπερασματικά, «η τεχνολογία δεν είναι ένα φαινόμενο αυτοτελές και αποκομμένο από τη ζωή, αλλά βρίσκεται ως κοινωνική και οικονομική διεργασία σε αλληλεπίδραση με γενικότερες πολιτικές - κοινωνικές εξελίξεις και επηρεάζεται από απρόβλεπτα και αναμενόμενα γεγονότα, όπως οι κοινωνικές ανάγκες, πόλεμος». Μέσα από την ανάλυση των πιο πάνω προαναφερθέντων, αναπτύσσονται διαφορετικές και αλληλένδετες σχέσεις μεταξύ της τεχνολογίας, της κοινωνίας, του δομημένου περιβάλλοντος και του χρήστη, οι οποίες αποδίδονται κυρίως με ερευνητικές και σχεδιαστικές προτάσεις. Η μη δημιουργική

κοινωνία, η μαζική παραγωγή, η μαζική κοινωνία, η αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας έχει επιφέρει περιορισμό στην ελευθερία, στη δημιουργικότητα (μη χειρωνακτική εργασία) και στη λήψη αποφάσεων των μελών της κοινωνίας. Η μονότονη αστική βιομηχανική ζωή απαιτεί το δημιουργικό σχεδιασμό ενός μεταβαλλόμενου χώρου από τους ίδιους τους χρήστες ενεργοποιώντας με αυτό τον τρόπο τη συμμετοχή τους. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει άμεση επαφή του χρήστη με τεχνολογικά μέσα αφού δεν υπήρχαν, παρά μόνο η τεχνολογία του προσφέρει ευέλικτες, κινητές και προκατασκευασμένες μονάδες. Η ιδέα της μηχανής και των μηχανοκίνητων μελών (ευελιξία), τα προκατασκευασμένα και κινητά στοιχεία με κριτήρια οργάνωσης την αλυσίδα συναρμολόγησης και εισαγωγή κατεργασιών σε σειρά, εντάσσονται στο σταθερό και άκαμπτο δομημένο χώρο και υποστηρίζουν ότι «κτήριο δεν είναι αντικείμενο αλλά μια παραγωγική διαδικασία» κατά τον Friedman [2.22].

Με υπέρμετρη λατρεία της τεχνολογικής ανάπτυξης και αδιαφορία του βιώσιμου χώρου κατακρίθηκαν οι ουτοπικές μελέτες, βασιζόμενοι στη σαγηνευτική εικόνα, στην ευελιξία και στην τυποποίηση της κατασκευής πάρα για τις πραγματικές ανάγκες του χρήστη και την ανάλυση της συμπεριφοράς των κινητικών δομικών συστημάτων ([2.33], [2.34]). Παρουσιάζεται δυσκολία στην αποτύπωση των κινητικών δομικών κατασκευών λόγω και της μη χρήσης του ψηφιακού σχεδιασμού. Η εξέλιξη της δομικής μορφολογίας εντείνεται μέσω φυσικών πρωτοτύπων. Η τεχνολογία επηρέασε τον τρόπο αντίληψης του δομημένου περιβάλλοντος, όχι όμως σε δραστικό βαθμό στο επίπεδο της σύνταξης της κατασκευής του δομημένου περιβάλλοντος.

Η αλληλένδετη σχέση κοινωνίας, τεχνολογίας και αρχιτεκτονικής διεύρυνε το πεδίο έρευνας, σχεδιασμού και εφαρμογής υβριδικών δομικών συστημάτων με άξονα τη μεταβολή και την προσαρμογή ως κατασκευαστική διαδικασία του σχεδιαστικού αποτελέσματος, αξιοποιώντας την εξέλιξη και τις ποικιλόμορφες ανάγκες των χρηστών. Το πεδίο των Τεχνών εμπνέει και επηρεάζει άμεσα το σχεδιασμό των μεταβαλλόμενων και διαδραστικών κατασκευών. Ο καλλιτέχνης και γλύπτης κινητικών κατασκευών Theo Jansen, προσπαθεί να εντάξει την έννοια της μεταβολής, της κίνησης και της διάδρασης στα πλαίσια της κατασκευαστικής σχεδιαστικής δημιουργίας σε κλίμακα 1:1. Ασχολήθηκε σε μεγάλο βαθμό με τη δημιουργία ενεργειακά αυτόνομων κινητικών γλυπτών. Επιπλέον,

τα κινητικά γλυπτά δεν περιορίζονται στην κίνηση, αλλά επεκτείνονται και στο βαθμό λογικής, εφόσον είναι ικανά ν' ανιχνεύουν και ν' αναγνωρίζουν τον κίνδυνο (υγρό στοιχείο), προκειμένου ν' αλλάζουν την πορεία κατεύθυνσης τους. Ο κινητικός μηχανισμός (4 - bar linkage) αποτελείται από μέλη αρθρωτά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Οι δυνατότητες του μηχανισμού προδιαγράφουν πλήρη κίνηση ενός μέλους (rocker) και μερική περιστροφή των υπόλοιπων μελών εξουσιοδοτώντας τη συνέργεια των μελών [2.35].

Ο William Zuk και ο Roger H. Clark επιδεικνύουν την ανάγκη για μια οργανική αρχιτεκτονική που έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται σε χρονικές αλλαγές μέσω αρθρωτών συστημάτων, ενσωματώνοντας μηχανισμούς κίνησης. Η ανάλυση σε επίπεδο ευελιξίας, τροποποίησης, συναρμολόγησης - αποσυναρμολόγησης ενός συστήματος δεν αντανακλά αποκλειστικά τα σύγχρονα κοινωνικά ζητήματα. Κρίνεται εξίσου επιβεβλημένη η εφαρμογή της διάδρασης ως ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που υποστηρίζει, ενδυναμώνει και ελέγχει την ανταπόκριση σ' ερεθίσματα, αποφεύγοντας την απλή δράση και τη γραμμική ακολουθία συμπεριφορών ([2.36], [2.37]). «Το στοιχείο που δίνει την εντύπωση της ευφυΐας δεν είναι η φυσική υπόσταση του χώρου αλλά η συμπεριφορά του, δηλαδή η αντίδραση που επιδεικνύει και ο έλεγχος της αντίδρασης αυτής» [2.37].

Οι συγγραφείς δηλώνουν μια αρχιτεκτονική η οποία αναγνωρίζει τη ρευστότητα των διάφορων δυνάμεων και ανταποκρίνεται μέσω των τεχνολογικών αρχιτεκτονικών συστημάτων που προσαρμόζονται σε συνεχή και μεταβαλλόμενες συνθήκες με νέα αισθητική και μορφολογία. Επηρεάζονται από τη φύση, τη ζωή – ζωντανούς οργανισμούς και υποστηρίζουν τη γένεση της κινητικής αρχιτεκτονικής με ισχυρή φιλοδοξία ότι θα παρουσιάσει θετική επιρροή ο τομέας αυτός στην οικονομία, επικοινωνία, ενέργεια, περιβάλλον, κοινωνία και τη τεχνολογία [2.36].

Συμβολική είναι επίσης, η επίδραση των φουτουριστών του 21^{ου} αιώνα, οι οποίοι οραματίζονται μια ρευστή αρχιτεκτονική. Προτείνεται η αντικατάσταση της σταθερότητας με μια παραμετρική μεταβλητότητα, όπου οι μεταβαλλόμενες τοπολογίες θα ενσωματώνουν ευφυή αρχιτεκτονική και θα εκτελούν όχι μόνο διαδραστικές συμπεριφορές αλλά θα είναι ικανές να μεταμορφώσουν τον ίδιο το χρήστη. Η

αρχιτεκτονική και η πόλη θα ενεργούν ζωντανά σύμφωνα με τις τεχνολογικές καινοτομίες στοχεύοντας σε υψηλά επίπεδα επικοινωνίας ενός χώρου με τους χρήστες [2.38]. Διακρίνεται η τάση για καινοτομία στη ρομποτική και στην κατασκευαστική βιομηχανία, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον σε νέα υλικά, ευφυή συστήματα και κατασκευαστικές μεθόδους, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση και τη μείωση του κόστους του κτιρίου όχι μόνο κατά την κατασκευαστική υλοποίηση αλλά και κατά τη διαδικασία λειτουργίας του. Η επίδραση της τεχνολογίας στην κοινωνία θ' απαιτεί την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής που θα υποστηρίζει τις πρακτικές ανάγκες της κοινωνίας και θα δράσει ως ενεργό αναπόσπαστο συμμετοχικό μέλος της κουλτούρας της [2.39].

Έναυσμα στην ενοποιημένη σχεδιαστική υλοποίηση των ευμετάβλητων και διαδραστικών δομών αποτελούν τα σύγχρονα ζητήματα για παραγωγικότητα, αποτελεσματικότητα, αποδοτικότητα, οικολογική και περιβαλλοντική συνείδηση, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, του οικονομικού κόστους, της κτιριακής μάζας, αειφόρο αρχιτεκτονική κ.ο.κ. ([2.35], [2.40]). Η κινητική και διαδραστική αρχιτεκτονική ανταποκρίνεται στα ζητήματα αυτά και επιτυγχάνει τη βέλτιστη κτιριακή απόδοση απέναντι σε συνθήκες περιβαλλοντικές ή/και λειτουργικές ([2.41], [2.42]).

Ο διαδραστικός και προσαρμοστικός χώρος βασίζεται στη σύγκληση της φυσικής απόδοσης μηχανισμών και συστημάτων που προδιαγράφουν μεταβαλλόμενες συνθήκες (kinetic systems) και της ενσωμάτωσης ενός αυτόματου ενεργού ελέγχου (embedded computation). Ένα ακριβές διαδραστικό σύστημα ορίζεται ως ένα πολλαπλό κύκλωμα (multiple loop), στο οποίο μπορεί να εισέλθει ένας, ή και περισσότεροι παράγοντες που προβαίνουν σε συνεχή και επικοινωνιακή ανταλλαγή πληροφοριών με το αρχιτεκτονικό σύστημα [2.43]. Η αντίδραση σε πραγματικό χρόνο, η δυνατότητα επανατροφοδότησης και επαναπροσδιορισμού (σύστημα εκμάθησης με υποκειμενική λειτουργία χωρίς δεδομένο μοντέλο συμπεριφοράς και επανάληψη των αντιδράσεων σ' ερεθίσματα) και η δυνατότητα έκφρασης (δημιουργία πολλαπλών ερεθισμάτων και εφαρμογή ανθρώπινου τρόπου επικοινωνίας) συγκροτούν τα βασικά χαρακτηριστικά που παράγουν ένα ολοκληρωμένο διαδραστικό σύστημα ([2.35], [2.44]).

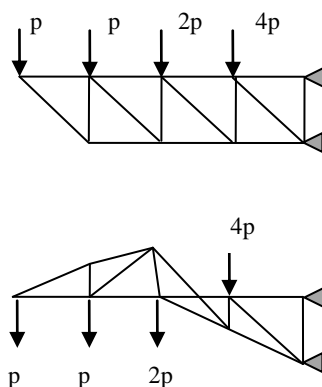
Τα κριτήρια ενός αυτόματου ενεργού ελέγχου καθορίζονται από το σύστημα εισερχόμενων ερεθισμάτων όπου παραλαμβάνεται η πληροφορία από τους εξωγενείς παράγοντες μέσω αισθητήρων (input system: sensors). Συγχρόνως, η μεταβολική διαδικασία και η ανάλυση της πληροφορίας ελέγχονται από ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου (control system), το οποίο ενσωματώνει ικανότητες επεξεργασίας της πληροφορίας, εκμάθησης και μνήμης προκειμένου να παράγεται μια συγκροτημένη αντίδραση και συμπεριφορά της μεταβαλλόμενης δομής. Το εξερχόμενο σύστημα ενεργοποιητών (output system: actuators) αντιδρά στα εισερχόμενα ερεθίσματα υποστηρίζοντας ένα δυναμικό πεδίο αυτοματισμού όσον αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος σε συνάρτηση με πολύπλοκα επίπεδα συνθηκών ([2.35], [2.37], [2.40]). «Η αρχιτεκτονική δεν ορίζεται πια από το χώρο που προτείνει αλλά και από τον αριθμό και τα χαρακτηριστικά υπηρεσιών που προσφέρει, από την ιδιότητά της να μετατρέπεται όσο το δυνατό πιο γρήγορα, ν' αποδέχεται τα πάντα χωρίς ν' αντιφάσκει. Το κτίριο από μόνο του γίνεται υπηρεσία, με την αξία του να συνδέεται και ν' ανταποκρίνεται στο μέγιστο αριθμό απαιτήσεων» [2.45].

Αφ' ετέρου ο ενοποιημένος σχεδιασμός των ανταποκρινόμενων δομών δεν οργανώνεται αποκλειστικά από τη συμβολή της διάδρασης. Καταλυτικό παράγοντα αποτελεί η ενσωμάτωση των κινητικών μηχανισμών σε δομικά συστήματα που συντάσσουν ένα ολοκληρωμένο σχεδιασμό και προϋποθέτουν ενιαία λειτουργία σε δυναμικούς αρχιτεκτονικούς χώρους. Αξίζει να τοποθετηθεί ο ορισμός της κινητικής αρχιτεκτονικής, όπως αναφέρει ο Michael A. Fox σε επιστημονικό άρθρο, «ορίζεται γενικώς ως τα κτίρια ή/και τα κτιριακά στοιχεία με ευμετάβλητη κίνηση, γεωμετρία ή τοποθεσία» ([2.46], [2.47]). Η κατηγοριοποίηση των ποικίλων μετασχηματισμών ρυθμίζεται βάσει των συμπεριφορών που ενεργούνται, δηλαδή τα επίπεδα μεταβολής που παρουσιάζουν οι μηχανισμοί (ευέλικτο, ενεργό, δυναμικό, διαδραστικό, έξυπνο, ευφυές) [2.46]. Ο Chris Hoberman αναφέρει ότι η δύναμη που ασκείται σ' ένα σύστημα μεταφράζεται ως κίνηση. Εμπνέεται από τη φύση και αναλύει συμπεριφορές όπως την επέκταση, αναδίπλωση, μετασχηματισμό, συρρίκνωση κ.ο.κ. ([2.48], [2.49], [2.50], [2.51]).

Αρρηκτα συνυφασμένα με τα πιο πάνω, είναι η οργανική θεωρία που αναδύεται από το φυσικό περιβάλλον όπως περιγράφει ο Gary Brown [2.52]. Πρόκειται για μια παραγωγή

μορφών ανάπτυξης και στρατηγικές συμπεριφοράς που βελτιστοποιούν τη δομή τους και ανταποκρίνονται στην περιβαλλοντική ροή, διακύμανση και πολλαπλότητα του χώρου – χρόνου – αντικειμένου. Η αντίληψη για ένα στατικό, καθοριστικό, αυτόνομο, απόλυτο και ομογενοποιημένο χώρο και χρόνο καταρρίπτεται από ένα δυναμικό, εξελισσόμενο, ετερογενή, συμμετοχικό και δημιουργικό χώρο – χρόνο [2.52]. Οι πολύπλοκες μορφές των ζωντανών οργανισμών αποδίδουν το μετασχηματισμό τους όχι μόνο στην ιδιότητα της μετάλλαξης της μορφής τους, αλλά υπόκεινται σε διαδικασία εξέλιξης και βρίσκονται άμεσα συσχετιζόμενα με ποικιλόμορφες εξωτερικές συνθήκες [2.53]. Παράλληλα, η Juri Lebedew γνωστοποιεί ότι η αρχή του ενοποιημένου σχεδιασμού (λειτουργία, μορφή και δομή) που συστηματοποιεί τους ζωντανούς οργανισμούς είναι αλληλένδετη με το φυσικό περιβάλλον [2.54].

«Οι κατασκευές ολοκληρώνονται με βάση το σχήμα, ή τη γεωμετρική μορφή και με την ενδότερη δομή. Μορφή και δομή τίθενται σε λειτουργία σύμφωνα με μια κοινή διαδικασία ανάπτυξης, εξαρτώμενη από τις φυσικές, χημικές αρχές, ή τη δυνατότητα ανθρώπινης σχεδίασης» υποστηρίζει ο Frei Otto [2.55]. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται αδυναμία στην καταγραφή των παραγόντων και των κριτηρίων βελτιστοποίησης της δομής των ζωντανών οργανισμών προκειμένου να οριστεί μια αντικειμενική διατύπωση. Ωστόσο, η βελτιστοποίηση στις τεχνολογικές δομές διενεργείται μέσω δυναμικών υπολογιστικών προγραμμάτων, βασισμένα στην εξελικτική στρατηγική όπως φαίνεται στο διάγραμμα (εικόνα 2.11) η βελτιστοποίηση ενός δικτυωτού προβόλου [2.56].



Εικόνα 2.11 Βελτιστοποίηση δικτυωτού φορέα [2.56].

Ο Donald Ingber διαπιστώνει μέσω ερευνητικών πορισμάτων την εξελικτική διαδικασία ως μια ξεχωριστή θεματική που δεν θα αποκτούσε νόημα η επιστήμη της βιολογίας αν δεν επικρατούσε ως αρχή. Υποστηρίζει την αλληλεξάρτηση της τεχνολογίας με την αρχιτεκτονική θεμελιώνοντας τη γνωμάτευση του, αναφέροντας βασικά χαρακτηριστικά ζωντανών οργανισμών και πως αντικατοπτρίζονται σε δομικές κατασκευές. Ουσιαστικές αρχές των ζωντανών οργανισμών απαρτίζονται από την πολυλειτουργικότητα, την ιεραρχική οργάνωση, τη βελτιστοποίηση και την προσαρμοστικότητα ([2.57], [2.58]).

Σημαντική πορεία σύνδεσης της επιστήμης της βιολογίας, βιομηχανικής και της αρχιτεκτονικής αποτελούν οι έρευνες του Ingber για την αρχιτεκτονική της ζωής. Τονίζεται η εφαρμογή των χωρικά εφελκόμενων δομών σε πολλαπλά επίπεδα κλίμακας στο ανθρώπινο σώμα και η μεταφορά της λογικής των μηχανισμών αυτών σ' ένα αρχιτεκτονικό σύστημα που η δομή του θα σταθεροποιείται και θα ισορροπεί τις αντιδράσεις θλίψης και εφελκυσμού. Ταυτόχρονα, δίνεται έμφαση στο μηχανισμό λειτουργίας της κίνησης του ανθρώπινου σώματος. Οι αρθρώσεις γενικότερα στα σπονδυλωτά ζώα και στον άνθρωπο διατηρούν την ευκαμψία, τη σταθερότητα, επιτρέπουν και καθορίζουν τον τρόπο κινήσεων στους οργανισμούς ([2.58], [2.60]).

Η προκείμενη μελέτη εστιάζεται στην ανάλυση στατικών και κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων. Άξονα ανάπτυξης της μελέτης αποτελεί η τυπολογική βελτιστοποίηση των δομικών συστημάτων (πίνακας 2.1). Με αφορμή την αλληλένδετη συνέργεια καμπτικών και αξονικών καταπονήσεων, αποδίδοντας μείωση των καμπτικών και αύξηση των αξονικών καταπονήσεων, παρουσιάζονται στατικά δομικά συστήματα που ανάγονται από τον υφιστάμενο αρχιτεκτονικό χώρο. Η κατασκευή και η τυπολογία των δομών κεντρίζουν το ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάλυση των τεχνικών μεθόδων και την αξιολόγηση, ή την πρόνοια μελλοντικής δυνατότητας για ευελιξία. Κατ' επέκταση δίδεται εξίσου βαρύτητα στην ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων μ' έμφαση στη μορφολογία, στη γεωμετρική και κατασκευαστική τυπολογία, ενσωματώνοντας παράλληλα μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης και ενεργό σύστημα ελέγχου.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά γεωμετρίας και μηχανικής συμπεριφοράς στατικών συστημάτων.

Τυπολογία δομικών συστημάτων	Αμφιέριστη δοκός	Δικτυώματα	Υβριδικά δομικά συστήματα
Αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές	$N=0, M_{max}=ql^2/8$	$N_{max}>0, M=0$	$N_{max}>0, M_{max}>0$
Μεγάλα ανοίγματα	+	++	++
Διατομές	++	+	+
Ιδιοβάρος	++	++	+
Καμπτικές και διατμητικές καταπονήσεις	+++	++	+
Αξονικές τάσεις	0	++	+
Ευελιξία	0	+	++

2.4 Δομικά συστήματα κτιριακών εφαρμογών

Μέσα από την ανάλυση στατικών και κινητικών δομικών συστημάτων διαφαίνεται η τυπολογική, μορφολογική και κατασκευαστική βελτιστοποίηση τους, με απώτερο σκοπό τη μείωση των καταπονήσεων, των διατομών, του ιδιοβάρους και του οικονομικού κόστους της κατασκευής. Κατάληξη της συστηματικής διερεύνησης και απόδοσης της βέλτιστης τυπολογίας π.χ. αμφιέριστης δοκού υπό ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση, αποτελεί ο ιχθυόμορφος στατικός φορέας. Τα υβριδικά δομικά συστήματα προδιαγράφουν ισχυρές δυνατότητες και προοπτικές για μελλοντική ανάπτυξη δομικών συστημάτων με υψηλή απόδοση στο μηχανικό και αρχιτεκτονικό τομέα παρόλο του μειωμένου ποσοστού εφαρμογής τους. Η κατηγοριοποίηση των κτιριακών εφαρμογών των δομικών συστημάτων βασίζεται στα πλαισιωτά επίπεδα δικτυώματα, πλαισιωτά χωρικά δικτυώματα, χωροδικτυώματα και υβριδικά δομικά συστήματα.

Αντίστοιχα της κατηγορίας του πλαισιωτού επίπεδου δικτυώματος, αποτελεί το δομικό σύστημα του βρετανικού αρχιτεκτονικού γραφείου Hopkins (εικόνα 2.12) στεγάζεται σε δυο αλληλοσυνδεδεμένα κτίρια με άξονα τον αποδοτικό χώρο εργασίας φιλοξενώντας 120 εργαζόμενους. Η μονώροφη κατασκευή του κελύφους χαρακτηρίζεται από ευελιξία χορηγώντας τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης, συναρμολόγησης και επαναχρησιμοποίησης. Αρχιτεκτονική πρόθεση αποτελούσε η εφαρμογή της έννοιας της

αντιστρεψιμότητας ως δυνατότητα των χαλύβδινων κατασκευών, η υποστήριξη του μεγάλου ανοίγματος με μικρές διατομές και κατ' επέκταση του ιδιοβάρους.

Προκατασκευασμένα μεταλλικά πάνελα ή μεταλλικά πλαίσια ανοιγμάτων συνθέτουν την πλαγιοκάλυψη και την επικάλυψη της οροφής μέσω προτύπων συνδέσεων. Τοποθετούνται εσωτερικά με σκοπό την προστασία της κατασκευής από φωτιά και την επιβράδυνση χρόνου, επιπλέον ανά τριάντα λεπτά από τα συνηθισμένα όρια. Το πρωτεύον χαλύβδινο δομικό σύστημα του κτιρίου τοποθετείται εξωτερικά του κελύφους και υποστηρίζει χώρο συνολικού εμβαδού 700 m². Απαρτίζεται από την ανάπτυξη ενός πλαισιωτού φορέα επίπεδων δικτυωμάτων με σωληνοειδείς διατομές.

Η πρωτεύουσα δομική κατασκευή λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες με σύστημα τριών αρθρώσεων, για εύκολη μεταχείριση και εφαρμογή των δομικών δικτυωμάτων, και σταθερό πλαισιωτό φορέα ενισχύοντας τη δυνατότητα για μικρές διατομές. Η κεντρική άρθρωση στον εγκάρσιο άξονα του δικτυωτού φορέα ενσωματώνει εφελκόμενα μέλη με σκοπό την άμεση ανταπόκριση υπό φορτία ανέμου και θερμοκρασιακές μεταβολές. Ο πλαισιωτός φορέας σε συνδυασμό με τις τεγίδες και τους τριγωνισμούς καλωδίων επιτυγχάνουν τη διαφραγματική λειτουργία και καθορίζουν το δομικό σύστημα ευσταθές. Το πρωτεύον δομικό σύστημα δεν παρουσιάζει καμπτικές καταπονήσεις και οι διατμητικές τάσεις παραλαμβάνονται μέσω των διαγωνίων. Η συνδεσμολογία όλων των μελών των προκατασκευασμένων τμημάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος συστήματος επιτυγχάνεται μέσω συγκολλήσεων [2.61].



Εικόνα 2.12 Επίπεδο πλαισιωτό δικτύωμα: Αρχιτεκτονικό γραφείο Hopkins, Ηνωμένο Βασίλειο [2.61].

Το αθλητικό κέντρο "IBM Sport Hall" (εικόνα 2.13) χαρακτηρίζεται μορφολογικά από το εξωσκελετικό δομικό σύστημά του. Λειτουργικά ζητήματα για την ομαλή διεξαγωγή των χρήσεων (ενιαίος χώρος χωρίς να παρεμβάλλονται κατακόρυφα στοιχεία) του αθλητικού κέντρου επιλύονται με την ανάπτυξη της τυπολογίας του συστήματος. Διαφαίνεται η επιτυχής και αρμονική συνύπαρξη της κατασκευής, της λειτουργίας και της μορφής μέσω του δομικού συστήματος.

Πέντε πλαισιωτοί φορείς χωρικών δικτυωμάτων (άνοιγμα 18 m) που εδράζονται σε στηρίξεις αρθρώσεων, οργανώνουν την πρωτεύουσα δομική κατασκευή. Η διαφραγματική λειτουργία στο επίπεδο της οροφής και στο κατακόρυφο επίπεδο εξασφαλίζονται από το δευτερεύον δομικό σύστημα, τη δικτύωση ακαμψίας που συνδέεται αρθρωτά με το δικτυωτό φορέα, ενώ οι υπόλοιπες συνδέσεις επιτυγχάνονται με συγκολλήσεις. Το κέλυφος του κτιρίου δομείται από προκατασκευασμένα πάνελα ενισχύοντας τη ιδιότητα της κατασκευής να αποσυναρμολογείται και να συναρμολογείται [2.62].



Εικόνα 2.13 Χωρικό πλαισιωτό δικτύωμα: Αθλητικό κέντρο "IBM", Ηνωμένο Βασίλειο [2.62].

Το κέντρο εικαστικών τεχνών "Sainsbury" (εικόνα 2.14) είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας για τη δημιουργία ενός ακαδημαϊκού και κοινωνικού κέντρου στην πανεπιστημιούπολη. Η Σχολή Εικαστικών Τεχνών ενσωματώνει μια ποικιλία δραστηριοτήτων: εκθεσιακό χώρο, εστιατόριο, καφετέρια, τμήμα Καλών Τεχνών, εστίες, βιβλιοθήκη, βοηθητικούς και εργασιακούς χώρους. Η ελαφριά, ευέλικτη δομή και η οργάνωση διαφορετικών λειτουργιών σε μια ενιαία κάτοψη προσφέρει ένα μεταβαλλόμενο λειτουργικό πρόγραμμα. Η σχεδιαστική προσέγγιση χαρακτηρίζεται πρωτοποριακή στην ιστορία του μοντέρνου σχεδιασμού. Βασική αρχή αποβαίνει στην τυποποίηση και προκατασκευή των μελών της κατασκευής με προδιαγραφές συναρμολόγησης επί του εργοταξίου.

Το χωροδικτύωμα της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής υποστηρίζει τις λειτουργικές απαιτήσεις του κτιρίου (εσωτερικό άνοιγμα 28.8 m) και διαμορφώνει διπλό κέλυφος ενσωματώνοντας στη ζώνη αυτή τα τεχνικά συστήματα. Εξωτερικά και εσωτερικά του χωροδικτυώματος εφαρμόζονται προκατασκευασμένα πάνελα διαμορφώνοντας την επικάλυψη της οροφής, την πλαγιοκάλυψη και τον εσωτερικό χώρο. Ο φωτισμός των λειτουργικών χώρων επιτυγχάνεται από τις ζώνες υαλοπινάκων που τοποθετούνται στο περίβλημα και στο επίπεδο της οροφής. Η πρωτεύουσα δομική κατασκευή μορφοποιείται από στρογγυλές διατομές και τα μέλη ενοποιούνται προκειμένου να διατηρηθεί η ακαμψία του συστήματος. Οι κόμβοι της πρωτεύουσας κατασκευής καθορίζονται από συγκολλήσεις μεταφέροντας τα φορτία από το επίπεδο της οροφής στις στηρίξεις. Το επίπεδο της οροφής και τα κατακόρυφα επίπεδα διατηρούν την ακαμψία τους μέσω του χωροδικτυώματος [2.63].



Εικόνα 2.14 Χωροδικτύωμα: Κέντρο εικαστικών τεχνών "Sainsbury", Ηνωμένο Βασίλειο [2.63].

Με αφορμή τη θεματική της παγκόσμιας ετήσιας έκθεσης ο αρχιτέκτονας Kenzo Tange προβάλλει την χωρική εμπειρία της πλατείας ως δημιουργικό σκηνικό (εικόνα 2.15). Η ανάγκη για ενιαία πλατεία και κάλυψη μεγάλου ανοίγματος (291 x 108 m), υποστηρίζεται δυναμικά από την πρωτεύουσα δομική κατασκευή χωροδικτυώματος. Έξι δικτυωτοί πυλώνες υποστηρίζουν τη δομική κατασκευή. Ο μηχανισμός μεταφοράς των φορτίων του χωροδικτυώματος βασίζεται σε τρεις διευθύνσεις και όλα τα μέλη του συνεισφέρουν για την ομαλή κατανομή και μεταφορά τους στις στηρίξεις. Ταυτόχρονα, το ποσοστό των παραμορφώσεων είναι μικρότερο έναντι των επίπεδων κατασκευών και συνεπώς μειώνονται οι διατομές και το κόστος των υποστυλωμάτων και των στηρίξεων.

Αποτελεσματική είναι η προσφορά του χωροδικτύωματος κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και τοποθέτησης λόγω των προκατασκευασμένων μελών και γενικότερα της τυποποίησης. Η καινοτομία του δομικού συστήματος έγκειται στην κατασκευή του κόμβου που λειτουργεί μεθοδικά στις αρθρωτές συνδέσεις μεταξύ των μελών χορηγώντας τη δυνατότητα να ενεργεί σαν ένα σώμα. Ο συγκεκριμένος κόμβος παρέχει ομόκεντρες συνδέσεις σε όλες τις διευθύνσεις. Η προσδοκία για διαφάνεια επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση της διαφανούς μεμβράνης στην εξωτερική επιφάνεια του χωροδικτύωματος, καθιστώντας το έργο παγκόσμια πρώτο στην εφαρμογή μεμβράνης σε μεγάλη κλίμακα [2.64].



Εικόνα 2.15 Χωροδικτύωμα: Ετήσια έκθεση 1970, Οσάκα [2.64].

Το σχεδιαστικό αποτέλεσμα για την Expo 2000, Αννόβερο (εικόνα 2.16), αποβαίνει στην υλοποίηση της θεώρησης του αρχιτέκτονα για ένα ευέλικτο κτίριο που προσαρμόζεται στις διαφορετικές λειτουργικές ανάγκες. Ο εσωτερικός χώρος της αίθουσας ($27,000 \text{ m}^2$) υποστηρίζεται από το άκαμπτο χωρικό δικτύωμα 12 m ύψους και 125 m πλάτους. Το χωρικό δικτύωμα μορφοποιείται από ορθογώνιο πλέγμα δοκών που διασταυρώνονται μεταξύ τους σε απόσταση 7.5 m.

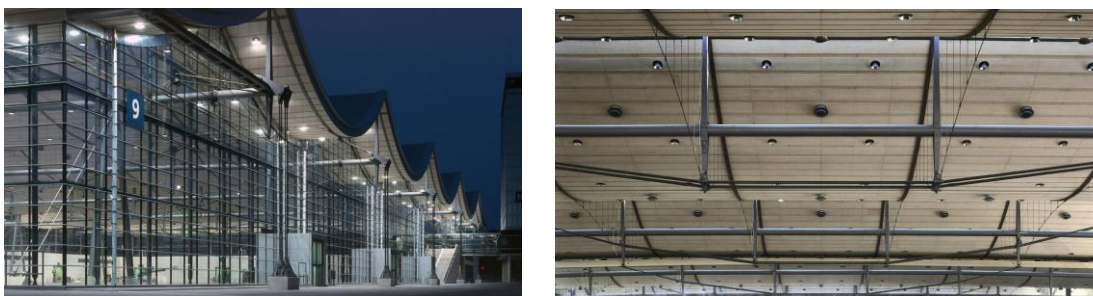
Η πρωτεύουσα δομική κατασκευή αποτελείται εξ ολοκλήρου από σωληνοειδείς διατομές που συνδέονται μέσω συγκόλλησης για αποτροπή περιστροφών. Σχεδιαστική πρόκληση αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός προκατασκευασμένου τυπικού κόμβου προκειμένου να διατηρεί ένα ολοκληρωμένο και ενοποιημένο σύστημα με στόχο την ομαλή κατανομή των φορτίων. Η κατασκευή υποστηρίζεται από έξι πυλώνες οπλισμένου σκυροδέματος, τοποθετημένοι περιμετρικά. Η δευτερεύουσα δομική κατασκευή αποτελείται από υποστυλώματα στρογγυλής διατομής, περιμετρικά τοποθετημένα. Το

γυάλινο περίβλημα διατηρείται σε ακαμψία μέσω της δευτερεύουσας δομικής κατασκευής και των τεσσάρων πλαισίων [2.65].



Εικόνα 2.16 Χωροδικτύωμα: Εκθεσιακός χώρος 13, Αννόβερο [2.65].

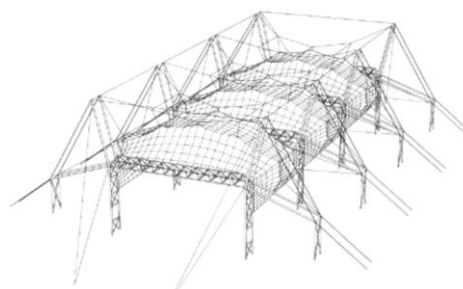
Ο εκθεσιακός χώρος 8/9, Αννόβερο (εικόνα 2.17), (137 x 240 m) συγκροτείται από την πρωτεύουσα δομική κατασκευή που αναπτύσσει κυρίως καταπονήσεις σε εφελκυσμό, επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση του υλικού και ακολούθως του ιδιοβάρους της. Η πρωτεύουσα υβριδική δομική μονάδα επαναλαμβάνεται σε πέντε διαστήματα αποσκοπώντας στη βιομηχανική τυποποίηση. Διαμορφώνεται από μια αμφιπρόεχουσα δοκό στρογγυλής διατομής (διατομής 70 cm), η οποία στηρίζεται σε δυο κεκλιμένους πυλώνες. Η ακαμψία του συστήματος εξασφαλίζεται με την αγκύρωση – πρόσδεση προεντεταμένων καλωδίων. Για αποφόρτιση του δομικού φορέα από τις καμπτικές καταπονήσεις εφαρμόζεται δευτερεύουσα κατασκευή ορθοστατών και εφελκυσμένων μελών. Η τυπολογία του υβριδικού δομικού συστήματος ανταποκρίνεται άμεσα και αποδοτικά υπό την εξάσκηση φορτίου αποσκοπώντας στη βέλτιστη στατική του λειτουργία. Το επίπεδο της οροφής φέρει ξύλινη επένδυση και υποστηρίζεται από δοκούς παραβολικής μορφολογίας. Προεντεταμένα καλώδια ενισχύουν την άλλη διεύθυνση και λειτουργούν διαφραγματικά [2.65].



Εικόνα 2.17 Υβριδικό δομικό σύστημα: Εκθεσιακός χώρος 8/9, Αννόβερο [2.65].

Η σχεδιαστική πρόκληση της ομάδας για το ερευνητικό κέντρο Schlumberger Cambridge (εικόνα 2.18) αποβαίνει στην ανάπτυξη εφελκυσόμενων δομών. Το λειτουργικό πρόγραμμα περιλαμβάνει ερευνητικά εργαστήρια, σταθμούς δοκιμών, γραφεία υπηρεσιακών χώρους, βιβλιοθήκη και εστιατόριο.

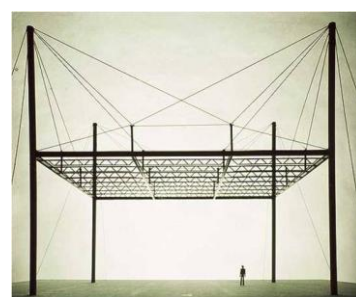
Η συνέργεια της μορφής, της λειτουργίας και της κατασκευής αντανακλάται μέσα από το πρωτεύον δομικό σύστημα και το κέλυφος του κτιρίου. Η πρωτεύουσα κατασκευή της οροφής διαχωρίζεται σε τρία τμήματα, 18 x 24 m. Η κάθε δομική ενότητα απαρτίζεται από πλαισιωτούς φορείς δικτυωμάτων. Οι δυο κατακόρυφες ράβδοι που υποστηρίζουν το δικτύωμα επεκτείνονται με ελαφριά κλίση προς τα εξωτερικά. Η τυπολογία που εξελίσσεται στις δυο ράβδους παρουσιάζεται και στις οριζόντιες δοκούς προκειμένου να μορφοποιηθεί ένα κλειστό κύκλωμα ανάρτησης του δομικού πλαισίου, ελαχιστοποιώντας έτσι τις καμπτικές καταπονήσεις των μελών. Ταυτόχρονα, η μεμβράνη αποτελεί το περίβλημα της οροφής του κτιρίου και υποστηρίζεται από το δευτερεύον σύστημα ανάρτησης με τριγωνισμούς. Η διαφραγματική λειτουργία του συστήματος επιτυγχάνεται από τη δευτερεύουσα δομική κατασκευή και την προεντεταμένη μεμβράνη [2.63].



Εικόνα 2.18 Υβριδικό δομικό σύστημα: Ερευνητικό κέντρο Schlumberger, Ηνωμένο Βασίλειο [2.63].

Ο σχεδιασμός του εργοστασιακού χώρου "Fleetguard" (εικόνα 2.19) θεμελιώνεται με την αρχή της ευελιξίας και της προσαρμογής, παρέχοντας τη δυνατότητα ν' ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες λειτουργίες και ανάγκες των χρηστών. Το πρωτεύον υβριδικό σύστημα υλοποιεί την αρχιτεκτονική πρόθεση με τη δημιουργία ενιαίου χώρου και την ελαχιστοποίηση της μάζας του κτιρίου. Ταυτόχρονα, οι δομικές ενότητες που συγκροτούν το πρωτεύον υβριδικό σύστημα, ενισχύουν την τυποποίηση και την ευελιξία της κατασκευής ως προς μελλοντικές πιθανές επεκτάσεις. Η τυπολογία της πρωτεύουσας υβριδικής δομικής ενότητας διαμορφώνεται από την αλυσίδα πλαισίων κάθετα διατεταγμένων μεταξύ τους, σε οριζόντιο τετραγωνικό κάναβο. Οριζόντιες δοκοί συνδέονται αρθρωτά με τους πυλώνες στρογγυλής διατομής και ενισχύονται με το δευτερεύον καλωδιωτό σύστημα που αναρτάται από την κορυφή του πυλώνα.

Η ανάπτυξη του εσωτερικού καλωδιωτού συστήματος και στις τέσσερις διευθύνσεις της δομικής ενότητας αποσκοπεί στη μείωση των καμπτικών και διατμητικών καταπονήσεων και ακολούθως του ιδιοβάρους της συνολικής κατασκευής. Επίπεδα δικτύωματα εξασφαλίζουν τη διαφραγματική λειτουργία του υβριδικού συστήματος. Οι δοκοί και οι πυλώνες που βρίσκονται στις ακρινές θέσεις της κατασκευής αγκυρώνονται, προκειμένου να μεταφέρονται οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο έδαφος. Προκατασκευασμένα πανέλα συμπληρώνουν την πλαγιοκάλυψη και την επικάλυψη της οροφής [2.63].

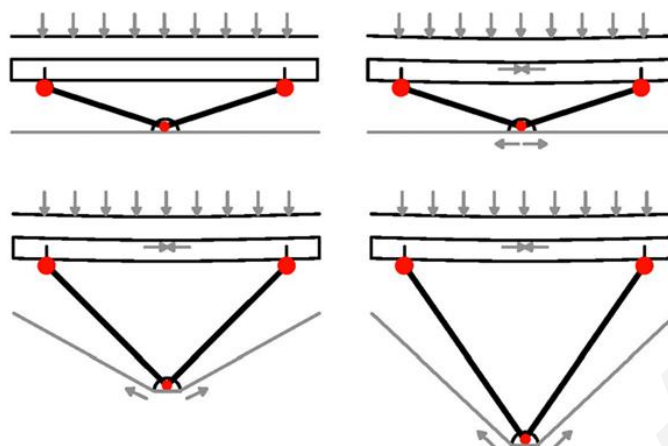


Εικόνα 2.19 Υβριδικό δομικό σύστημα: Εργοστασιακός χώρος Fleetguard, Γαλλία [2.63].

2.5 Κινητικές δομές

Το πεδίο των ερευνητικών θεματικών εξελίσσεται με την επικείμενη στροφή στην ανάπτυξη κινητικών συστημάτων. Ανταποκρινόμενες δομές ενισχύουν και τροφοδοτούν τη βελτιστοποίηση των δομικών συστημάτων. Οι καινοτόμες ερευνητικές προσεγγίσεις που ακολουθούν στο δεύτερο σκέλος της διερεύνησης των κινητικών δομών αντικατοπτρίζουν τις σύγχρονες τεχνολογικές επιτεύξεις και μεταβαλλόμενες ανάγκες της κοινωνίας. Η κατηγοριοποίηση των εξεταζόμενων παραδειγμάτων βασίζεται στην ανάλυση ευμετάβλητων επίπεδων δικτυωμάτων, χωρικών δικτυωμάτων και υβριδικών δομικών συστημάτων.

Με αφορμή την έρευνα ενός ανταποκρινόμενου κατασκευαστικού συστήματος αναπτύσσεται ένα επίπεδο κατασκευαστικό ρομποτικό δικτύωμα με ευμετάβλητη γεωμετρία που ανταποκρίνεται δυναμικά σε φορτία (εικόνα 2.20). Η κατασκευαστική τυπολογία των δικτυωμάτων και η πλεονεκτική τους θέση (μειωμένο ιδιοβάρος) έναντι άλλων τυπολογιών έμπνευσε τη δημιουργία του ευμετάβλητου γεωμετρικά δικτύωματος. Ο προβληματισμός εγείρεται στο γεγονός ότι τα δικτύωματα είναι υπερδιαστασιοποιημένα για μια ακραία φόρτιση. Σαφώς σε μικρότερες φορτίσεις το δίκτυωμα θ' απαιτεί μειωμένο στατικό ύψος. Η επίλυση του ζητήματος αποβαίνει στην εφαρμογή ενεργοποιητών έναντι στατικών διαγώνιων μελών. Ο κινητικός μηχανισμός απαρτίζεται από υδραυλικά πιστόνια αρθρωτά συνδεδεμένα μεταξύ τους, οργανώνοντας ένα δίκτυωμα τύπου "Warren". Τα πενήντα διαγώνια στοιχεία – υδραυλικά πιστόνια λειτουργούν ως ενεργοποιητές που προκαλούν την κίνηση, ενώ οι δεκαπέντε αισθητήρες ανιχνεύουν και μεταδίδουν τα ερεθίσματα στους ενεργοποιητές [2.66].



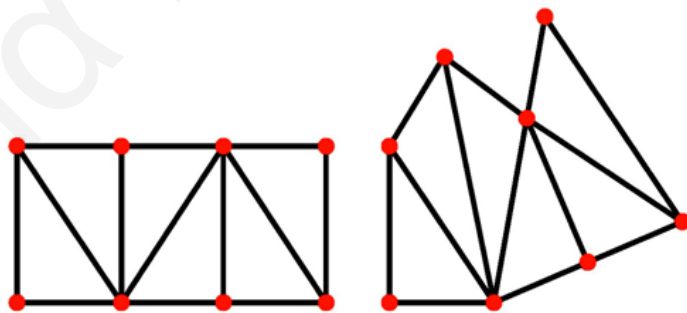
Εικόνα 2.20 Ευμετάβλητα επίπεδα δικτυώματα: Ενεργά ανταποκρινόμενο δικτύωμα [2.66].

Η κάθε μονάδα του δικτυώματος απαρτίζεται από δυο ενεργοποιητές και ένα αισθητήρα ανίχνευσης φορτίου τοποθετημένο στην άνω χορδή. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συνέργεια των μελών του δικτυώματος και στη συνολική λειτουργία του. Η άνω χορδή αποτελείται από μια συνεχόμενη δοκό και η κάτω χορδή του δικτυώματος, από ένα ελαστομερή σωλήνα που παραλαμβάνει τις εφελκυστικές καταπονήσεις και λειτουργεί ως ελατήριο. Ο σχεδιασμός εφαρμόζει ενεργό πρόγραμμα ελέγχου και θεμελιώνεται με βασικά χαρακτηριστικά όπως: αντίδραση σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα επανατροφοδότησης και επαναπροσδιορισμού, δυνατότητα έκφρασης – κίνησης. Το κλειστό κύκλωμα από αισθητήρες, ενεργοποιητές και πρόγραμμα ελέγχου εξασφαλίζει επικοινωνία μεταξύ των εξωτερικών ερεθισμάτων και της κατασκευής. Για παράδειγμα όταν αυξάνονται οι θλιπτικές καταπονήσεις στην άνω χορδή οι ενεργοποιητές επεκτείνονται προκειμένου να αυξήσουν το ύψος και να μειώσουν τις φορτίσεις. Σ' αντίθεση, όταν οι θλιπτικές τάσεις είναι μικρές, οι ενεργοποιητές συρρικνώνονται με σκοπό τη μείωση όγκου του δικτυώματος και του ιδιοβάρους [2.66].

Ο καθορισμός της θέσης του ευμετάβλητου επίπεδου δικτυώματος απαιτεί δυο βαθμούς ελευθερίας μεταδίδοντας αξονικά την κίνηση στους "X" και "Z" άξονες. Η απόπειρα ενσωμάτωσης του ενεργού προγράμματος ελέγχου στα πρωτεύοντα μέλη της δομής και η εξελικτική διαδικασία της δομής να προσαρμόζεται σύμφωνα με τα μεταβαλλόμενα ποσοστά φόρτισης καθιστούν την ερευνητική προσέγγιση πόλο αφομοίωσης των

σύγχρονων ζητημάτων για μείωση των διατομών και του ιδιοβάρους χωρίς ν' απαιτείται μείωση του συνολικού ανοίγματος. Ωστόσο, επιτακτική ανάγκη αποτελεί ο ακριβής και σαφής προσδιορισμός των πρωτευόντων μελών· για παράδειγμα η κάτω χορδή θα πρέπει ν' αντικατασταθεί με γραμμικούς ενεργοποιητές προκειμένου να προσαρμόζεται ελεγχόμενα σε διάφορα μήκη. Παράλληλα, η ομάδα μελέτης στοχεύει σε εφαρμογές πρωτοτύπων και μελλοντικές βελτιώσεις, στην προσπάθεια εξακρίβωσης της δυναμικής συμπεριφοράς του ευμετάβλητου συστήματος.

Το πρωτότυπο αφορά έναν κινητικό μηχανισμό (εικόνα 2.21), ο οποίος εξουσιοδοτεί μια πολύπλοκη και ποικιλόμορφη γεωμετρική, τυπολογική και κατασκευαστική μεταβολή. Το ευμετάβλητο γεωμετρικά δικτύωμα (Variable Geometry Truss - VGT) ορίζεται τυπολογικά από ένα δικτύωμα με πιθανότητες εφαρμογής στο επίπεδο, ή σε τρισδιάστατο χώρο. Γενικά, συγκροτείται από αρθρωτά συνδεδεμένες ράβδους με σταθερή διάσταση και ράβδους με δυνατότητα επέκτασης και συρρίκνωσης (υδραυλικά πιστόνια). Η θέση των ράβδων στο δικτύωμα (επίπεδο, ή χωρικό) καθορίζεται χορηγώντας τη δυνατότητα ποικίλων γεωμετριών, τυπολογιών και παραγόμενων μορφών. Η εφαρμογή των ράβδων με δυνατότητα επέκτασης στην κάτω χορδή ενός επίπεδου δικτύωματος αναπτύσσει κυματώδεις μορφολογίες, ενώ η εφαρμογή των ράβδων στην άνω και κάτω χορδή δημιουργεί αυξανόμενες παραβολικές μορφές [2.67].



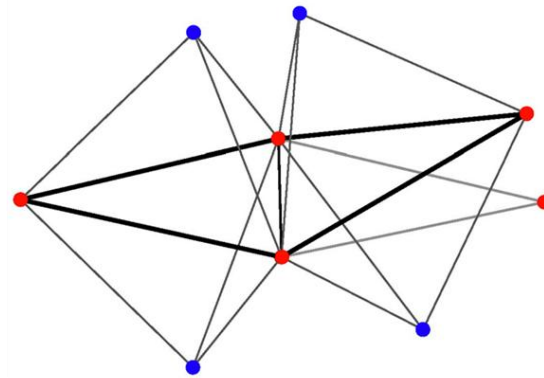
Εικόνα 2.21 Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: Μεταβαλλόμενη κατασκευαστική δομή [2.67].

Προτάσεις για πρακτικές εφαρμογές του ευμετάβλητου γεωμετρικά δικτύωματος υποδεικνύονται από τους μελετητές χωρίς να εξετάζεται η συμπεριφορά του κινητικού

συστήματος ανάλογα με το επερχόμενο ερέθισμα: ενδεικτικά αναφέρονται ο έλεγχος των καταπονήσεων και δυναμικών δονήσεων, ο έλεγχος της γεωμετρίας ενός κατασκευαστικού θόλου σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και εφήμερες κατασκευές με μεταβαλλόμενα στοιχεία δόμησης. Γενικότερα, η προσέγγιση παρουσιάζει την ενιαία ενσωμάτωση του ενεργού προγράμματος ελέγχου με την κατασκευαστική δομή και τις δυνατότητες που χαρακτηρίζουν την μεταβολική διαδικασία της συνολικής κατασκευής, αποφεύγοντας το γεωμετρικό μετασχηματισμό του δικτύωματος προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η δομή.

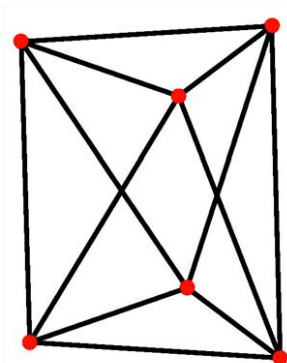
Η κατασκευαστική ιδιαιτερότητα των χωροδικτυωμάτων για ακαμψία με μειωμένο ιδιοβάρος τροφοδοτεί ερευνητικές προσεγγίσεις και διαστημικές εφαρμογές για ευμετάβλητες κατασκευές δικτυωμάτων. Η κινητική κατασκευή συγκροτείται από χωρικά δικτύωματα, εκ των οποίων κάποια μέλη αντικαθιστούνται από ενεργοποιητές (εικόνα 2.22). Προδιαγράφει κινήσεις λυγισμού, περιστροφής και κυματώδεις μορφολογίες. Ορίζεται από μονάδες τετράεδρων δικτυωμάτων με επιλογές σύνδεσης, σφαιρική άρθρωση, ή ενσωμάτωση ενός ενεργοποιητή. Η άρθρωση απαρτίζεται από δυο σφαιρικά κελύφη που δεν αντιπαραβάλλονται μεταξύ τους. Ενεργοποιητές από κράματα μετάλλων με μνημονικό μορφής (Shape Memory Alloys) εφαρμόζονται με δυνατότητες επέκτασης και συρρίκνωσης. Τα υπόλοιπα μέλη που συνιστούν την κατασκευή είναι σταθερές ράβδοι [2.24].

Η αλλοίωση της μορφής και του σχήματος απορρέει από τον ανάλογο αριθμό των ενεργοποιητών που ισοδυναμεί με το συνολικό βαθμό ελευθερίας. Η αποτελεσματική προσθήκη απεριόριστου αριθμού κυτταρικών μονάδων και η γένεση της κίνησης οφείλεται στη σφαιρική, ή αξονική άρθρωση. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζονται μηχανισμοί κίνησης στη θέση των πρωτεύοντων μελών που διέπουν τη δομή προκειμένου να εξασφαλιστεί η μετάδοση της κίνησης και η ποικιλόμορφη ανάπτυξη γεωμετριών. Παρόλα αυτά η προσέγγιση δεν στοχεύει στη βελτιστοποίηση της δομής των χωρικών δικτυωμάτων και στην ακριβή τοποθέτηση διατομών.



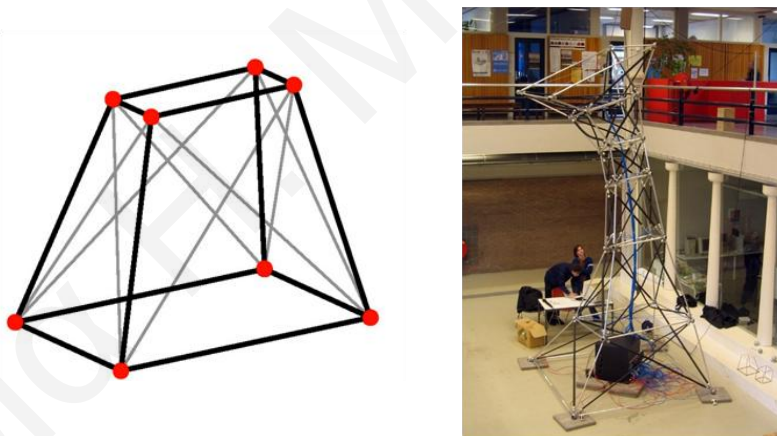
Εικόνα 2.22 Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα: Μεταβαλλόμενη κατασκευαστική αρθρωτή δομή [2.24].

Η σχεδιαστική πρόταση αφορά ένα ευμετάβλητο γεωμετρικά δικτύωμα (VGT) που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια του Συμποσίου Αεροδιαστημικών Μηχανισμών [2.68]. Θεμέλιο λίθο της τυπολογίας του κινηματικού μηχανισμού αποτελεί η επιμήκης εφαρμογή ενός οχτάεδρου (εικόνα 2.23). Βασικό μηχανικό χαρακτηριστικό έγκειται στα μέλη που συγκροτούν το τριγωνικό δικτύωμα. Τα οριζόντια μέλη προδιαγράφουν ευμετάβλητο μήκος, ενώ τα υπόλοιπα μέλη του χωρικού δικτύωματος έχουν σταθερό μήκος. Η σύνθεση μονάδων με διαφορετική μεταβολή μήκους στα μέλη συντελεί στη δημιουργία γραμμικών ή καμπυλόγραμμων μορφολογιών. Η πρόταση εξελίσσεται κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο με άξονα το κινητικό σύστημα χωρίς να βασίζεται στην ανάπτυξη του δικτύωματος σύμφωνα με το στατικό υπόβαθρο [2.68].



Εικόνα 2.23 Ευμετάβλητα χωρικά δικτύωματα [2.68].

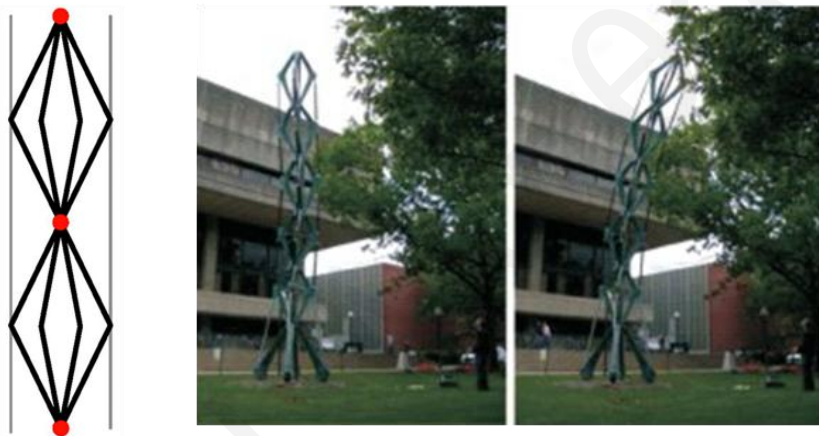
Το εκπαιδευτικό και ερευνητικό έργο από την ομάδα Hyperbody Research Group, αφορά ένα σύστημα από χωρικά εφελκόμενες μονάδες που αναπτύσσονται κατακόρυφα σε επιμήκη άξονα (εικόνα 2.24). Έξι διαφορετικές γεωμετρικές μονάδες (τραπεζοειδή πρίσματα) είναι αρθρωτά συνδεδεμένες και συγκροτούν τον πυρήνα. Συνεχείς θλιβόμενες ράβδοι διατηρούνται σε ευστάθεια με τη δικτύωση ακαμψίας (διαγώνιοι) μέσω ενεργοποιητών από ελαστομερή υλικά. Η ομαλή διεξαγωγή της κίνησης της κατασκευής οφείλεται εξίσου στους ελαστομερείς μύες που συνδέονται με τη σφαιρική άρθρωση. Η κινητική συμπεριφορά του πρωτότυπου δεν είναι διατυπωμένη, όμως εξετάζονται οι δυνατότητες ευελιξίας, περιστροφής, επέκτασης, συρρίκνωσης και μετάλλαξης της αρχικής μορφολογίας. Οι ενεργοποιητές είναι ικανοί να προσαρμόζουν τη δομή σε δεδομένα φορτία. Στο παρόν στάδιο δεν ενσωματώθηκαν αισθητήρες στο σύστημα. Πιθανές πρακτικές εφαρμογές του πρωτοτύπου είναι οι ευμετάβλητες όψεις, οι ανταποκρινόμενες οροφές και η δημιουργία δυναμικού χώρου ([2.69], [2.70]).



Εικόνα 2.24 Ευμετάβλητα χωρικά δικτυώματα: Muscle Tower II [2.70].

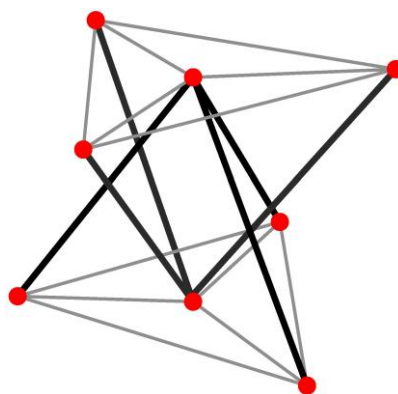
Ο κινητικός πύργος υλοποιείται σχεδιαστικά με αφετηρία τα βιομορφικά σχήματα και συγκεκριμένα τις αναλογίες της σπονδυλικής στήλης (εικόνα 2.25). Η κατασκευή προσδιορίζεται από την επανάληψη πέντε πανομοιότυπων μονάδων αρθρωτά συνδεδεμένων καθ' ύψος. Διατηρούνται σε ευστάθεια μέσω των κάθετων ελαστομερή μελών που διαπερνούν τα πρωτεύοντα δομικά στοιχεία. Διατομές γεωμετρίας “V” με ινοπλισμένα πολυμερή από γυαλί απαρτίζουν την κάθε δομική ενότητα. Το ενεργό σύστημα ελέγχου εξασφαλίζει την ανάπτυξη διαφορετικών χωρικών μεταβολών. Η άμεση

ανταποκρινόμενη αντίδραση οφείλεται στα ελαστομερή μέλη που χαρακτηρίζονται ως μύες και ασκούν δύναμη στα θλιβόμενα μέλη. Ενσωματωμένοι αποσβεστήρες ενέργειας είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή περιστροφικής κίνησης του συστήματος. Το αποτέλεσμα της δράσης μεταφράζεται ως κίνηση στην κατασκευή, μια «απρόβλεπτη κατασκευαστική χορογραφία» [2.71]. Οι ανάλογες ρυθμίσεις του συστήματος που αντανακλούν τις καταπονήσεις μεταδίδονται μέσω των ενεργοποιητών, χωρίς να εφαρμόζονται αισθητήρες και καθιστώντας έτσι τον κινητικό πύργο παθητικά ανταποκρινόμενο προς τα εξωτερικά ερεθίσματα.



Εικόνα 2.25 Ευμετάβλητα χωρικά δικτυώματα: MIT Tower [2.71].

Ευμετάβλητη χωρικά εφελκόμενη δομή (εικόνα 2.26) από αλουμίνιο προτάθηκε από τον Sterk προκειμένου ν' απαντήσει στα διάφορα ζητήματα ιδιοβάρους των κινητικών κατασκευών, ενσωμάτωση των ενεργών μελών στο πρωτεύον δομικό σύστημα, μεταφορά της ακαμψίας κατά την διαδικασία κίνησης κ.ο.κ. Η μεταβλητότητα της δομής επιτυγχάνεται μέσω των ενεργοποιητών που τοποθετούνται έναντι των θλιβόμενων ορθοστατών. Το δευτερεύον σύστημα καλωδίων είναι υπεύθυνο για τις εφελκυστικές δυνάμεις και για ενεργοποίηση της μονάδας με δυνατότητες μετασχηματισμού [2.72]. Πρόκειται για μια θεωρητική προσέγγιση χωρίς να δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα ενεργού ελέγχου. Σημαντική είναι η προσπάθεια ενσωμάτωσης των ενεργών μελών στο πρωτεύον δομικό σύστημα· παρόλα αυτά δεν γίνεται αναφορά για τη λειτουργία του δευτερεύοντος καλωδιωτού συστήματος.

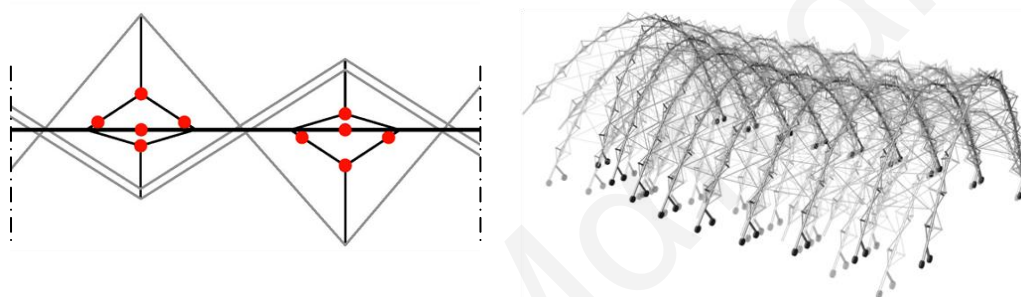


Εικόνα 2.26 Ευμετάβλητη χωρικά εφελκόμενη δομή [2.72].

Η ανάπτυξη της κινητικής κατασκευής εστιάζει το ενδιαφέρον στην ανάλυση της κινητικής και διαδραστικής αρχιτεκτονικής με ιδιαίτερη έμφαση στη μεταβολή ως κατασκευαστική και αλληλεπιδρώμενη διαδικασία. Η συγχώνευση των μηχανισμών κίνησης του ανθρώπινου σώματος όπως και η λογική των χωρικά εφελκόμενων δομών οδήγησαν στην ανάπτυξη του σχεδιαστικού τμήματος. Τα πρωτεύοντα μέλη του απαρτίζονται από αρθρωτά συνδεδεμένες θλιβόμενες δοκούς, ορθοστάτες και συνεχόμενα καλώδια (εικόνα 2.27). Οι δοκοί βρίσκονται σε συνέχεια μεταξύ τους και διατηρούνται σε ευστάθεια από το δευτερεύον σύστημα ενίσχυσης. Παράλληλα, η ακαμψία στο κατασκευαστικό πρωτότυπο επιτυγχάνεται μέσω των τριγωνισμών που αναπτύσσονται από τους ορθοστάτες και τα συρματόσχοινα. Εφαπτόμενα και ενδιάμεσα των δοκών εφαρμόζονται συμπαγείς σφαίρες για σκοπούς ευελιξίας των χωρικών μετακινήσεων. Στο επίπεδο της οροφής η διαφραγματική λειτουργία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή συρματόσχοινων και ελατηρίων που επιτρέπουν την προσαρμογή των μελών στις σχετικές μεταβολές των κύριων επίπεδων κινητικών συστημάτων.

Οι στηρίξεις του πρωτότυπου δεν είναι ταυτόσημες και διεκπεραιώνουν διαφορετικές λειτουργίες. Το ένα άκρο αποτελεί σταθερή στήριξη και εκτελεί τον έλεγχο της ελευθερίας του συρματόσχοινου, ενώ το άλλο άκρο χαρακτηρίζεται ως κινητή στήριξη με αγκυρωμένα τα συρματόσχοινα στις δοκούς. Συγχρόνως της σχεδιαστικής ανάπτυξης διερευνήθηκε η πιθανή εφαρμογή μεμβράνης στο σύστημα, μ' απώτερο στόχο την προστασία του εσωτερικού χώρου από τις καιρικές συνθήκες. Ένα ενεργό σύστημα ελέγχου (active control system), το οποίο λειτουργεί ως το νευρικό σύστημα της

κατασκευής είναι υπεύθυνο για κάθε μεταβολική διαδικασία. Το σύστημα συγκροτείται από αισθητήρες, λογισμικό πρόγραμμα και ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές εξυπηρετούν στην ανίχνευση της κλίσης των δοκών και αντίστοιχα στην ενεργοποίηση της κάθε συνθήκης. Χρηστικοί και εξωτερικοί παράμετροι (θερμοκρασία, καιρικές συνθήκες, φορτία ανέμου) μπορούν ν' αποτελέσουν τον κύριο παράγοντα ανάπτυξης των συνθηκών στις μεταβολές του συστήματος [2.73]. Η ερευνητική προσέγγιση εστιάζεται στην ενσωμάτωση των στοιχείων ενίσχυσης της πρωτεύουσας κατασκευής, τα οποία παράλληλα επιφέρουν τον κινηματικό μηχανισμό του συστήματος.



Εικόνα 2.27 Ευμετάβλητα υβριδικά συστήματα: Κινητική δομή [2.73].

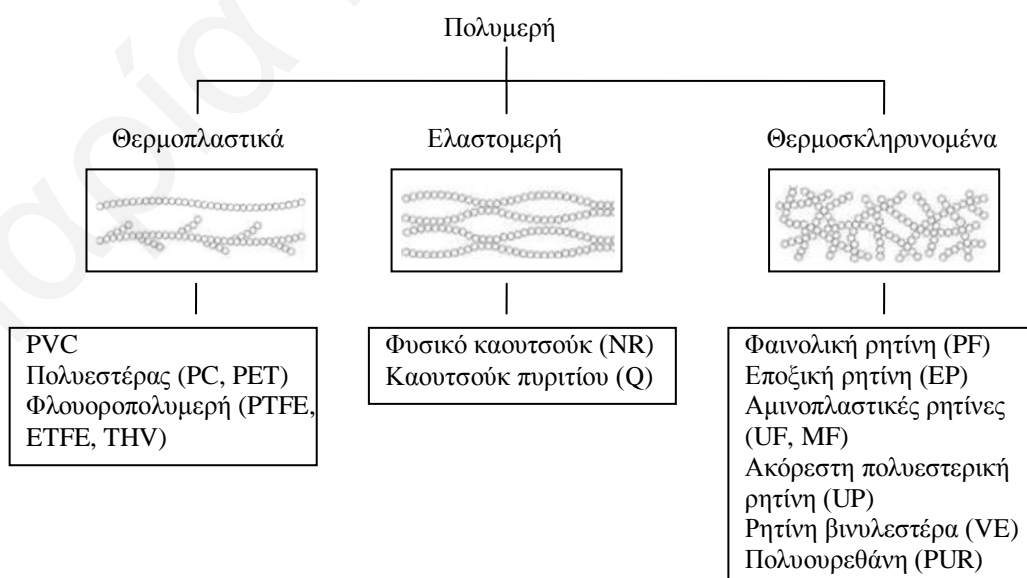
2.6 Κατασκευαστικό περίβλημα

Σύνθετα τεχνολογικά και πρωτοποριακά υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε εξωτερικά περιβλήματα, ανταποκρινόμενα σε υψηλές αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Η εφαρμογή ενός ευέλικτου περιβλήματος σε μια μεταβαλλόμενη κινητική δομική κατασκευή αποτελεί μια αποδοτική προσέγγιση σε συνάρτηση με τον αντίστοιχο κινητικό μηχανισμό. Η ελαφρότητα και η ευελιξία που χαρακτηρίζουν τις μεμβράνες, τις καθιστούν ιδανικές για εφαρμογή σε εφήμερες και μετατρέψιμες δομές. Γενικότερα, η επιλογή του κατάλληλου υλικού στο κατασκευαστικό περίβλημα προσδιορίζεται από τις μηχανικές (ελαστικότητα, αντοχή, ανθεκτικότητα) και φυσικές ιδιότητες του υλικού [2.74].

Ενδεικτικά σύνθετα υλικά τα οποία πληρούν προδιαγραφές για εφαρμογή σε μεταβαλλόμενες δομές είναι τα επικαλυμμένα και μη (coated και uncoated) PTFE (Πολυτετραφλουοροαιθυλένιο), ETFE (Αιθυλένιο Τετραφλουοροαιθυλένιο) και THV (Τετραφλουοροαιθυλένιο εξαφλουοροπροπυλένιο βινυλιδένιο φθοριούχο τερπολυμερές).

Η ιδιαίτερη ικανότητα στην αναδίπλωση λόγω αυξημένου μέτρου ελαστικότητας και της ευελιξίας, το μειωμένο ιδιοβάρος, το υψηλό επίπεδο αντοχής, ο ελεγχόμενος συντελεστής διαφάνειας και ο μειωμένος συντελεστής θερμοπερατότητας, υποδεικνύουν ότι τα πιο πάνω σύνθετα πολυμερή υλικά κρίνονται κατάλληλα για συνθήκες μεταβαλλόμενης δομικής κατασκευής [2.74]. Η σχεδιαστική αντιμετώπιση του κατασκευαστικού περιβλήματος εξασφαλίζει επαρκώς την προστασία της κατασκευής και του εσωτερικού χώρου από τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Επιτυγχάνεται παράλληλα, η αντοχή του υλικού κατά τις δυο φάσεις της κατασκευής: στην περίοδο λειτουργίας της κατασκευής και στη μεταβλητότητα της μορφής της κατασκευής χωρίς να επιδρά στην κύρια κατασκευή.

Τα πολυμερή ως συνθετικά υλικά αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες με κύριο σχηματισμό τις μακριές αλυσίδες (εικόνα 2.28). Η ταξινόμηση βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο τα μόρια ορίζουν τη χημική ένωση και επηρεάζουν την αντοχή και τα χαρακτηριστικά τήξης. Τρεις κατηγορίες συγκροτούν τα πολυμερή με άξονα το βαθμό διασταύρωσης: θερμοπλαστικά, ελαστομερή και θερμοσκληρυνόμενα. Οι ιδιότητες των πολυμερή υλικών ποικίλουν έναντι των παραδοσιακών υλικών όπως ξύλο, μέταλλο και σκυρόδεμα και διαφέρουν ανάλογα με το καθορισμό των μηχανικών, χημικών χαρακτηριστικών και της διαδικασίας παραγωγής [2.74].



Εικόνα 2.28 Ταξινόμηση των πολυμερή υλικών βάσει των χημικής σύστασής τους [2.74].

Η δομή των θερμοπλαστικών αποτελείται από μη διασταυρωμένα μόρια με σχετικά χαμηλή αντοχή και αντίσταση στη θερμότητα. Θεωρούνται κατάλληλα για τήξη με θέρμανση, στερεοποίηση με ψύξη και με δυνατότητες επανάληψης της διαδικασίας (PS, PE, PVC). Τα φλουοροπολυμερή διαφέρουν από τις άλλες κατηγορίες των θερμοπλαστικών λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους και ταξινομούνται σε πιο χαμηλή θέση ως κατασκευαστικό υλικό, με εξαίρεση τα πνευματικά προεντεταμένα πολυμερή (ETFE, THV) και τα PTFE υφάσματα (fabrics). Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντίσταση στις καιρικές συνθήκες και στην ηλιακή ακτινοβολία και δεν είναι εύφλεκτα.

Γνωστό πολυμερές της κατηγορίας των θερμοπλαστικών είναι το Teflon®, το εμπορικό όνομα του PTFE (Πολυτετραφλουοροαιθυλένιο). Το PTFE χρησιμοποιείται συχνά ως μεμβράνη με επικάλυψη (coating). Το ETFE (Αιθυλένιο Τετραφλουοροαιθυλένιο) καθίσταται σε συναφές επίπεδο με το PTFE, καθώς η χημική δομή και ιδιότητες του είναι παρόμοιες. Σε σύγκριση με το τελευταίο, το ETFE συμπεριφέρεται πιο θερμοπλαστικά. Η προσθήκη αιθυλενίου αυξάνει την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας διακρίνοντάς το για την ισοτροπική σχεδόν συμπεριφορά του. Το ETFE είναι πιο διαφανές από ότι το PTFE και είναι κοινώς γνωστό για τον υψηλό δείκτη διαφάνειας και για τα αποθητικά φύλλα σκόνης. Ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται για ενίσχυση του ETFE με υψηλές μηχανικές απαιτήσεις. Το THV (Τετραφλουοροαιθυλένιο εξαφλουοροπροπυλένιο βινυλιδένιο φθοριούχο τερπολυμερές) αποτελείται από τρία φλουοροπολυμερή και συμπεριφέρεται θερμοπλαστικά. Σημαντικό χαρακτηριστικό πλεονέκτημα του συνθετικού υλικού THV είναι η μετάδοση του φωτός με 97 % για 100 μm φύλλου ενώ η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι πιο χαμηλή από το ETFE [2.74]. Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει ιδιότητες των πιο πάνω υλικών (πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες επιλεγμένων πολυμερών υλικών: PTFE και ETFE [2.74].

Χαρακτηριστικά	Τύπος πολυμερή (θερμοπλαστικά)	
	PTFE (Πολυτετραφλουορο- αιθυλένιο)	ETFE (Αιθυλένιο Τετραφλουοροαιθυλένιο)
Μηχανική συμπεριφορά	εύπλαστο	εύπλαστο
Πυκνότητα [g/cm ³]	2.17	1.75
Θερμοκρασία συντήρησης μακρά/μικρή [°C]	250/300	150/220
Εφελκυστική αντοχή [N/mm ²]	25-36	35-54
Μέτρο Ελαστικότητας [N/mm ²]	410	1100
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής 10 ⁻⁶ /K	120-250	40
Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	0.25	0.23

Τα ελαστομερή αποτελούνται από διασταυρωμένες δομές δικτύου με μεγάλη δυνατότητα παραμόρφωσης και επανάκαμψης, λόγω του μεγάλου βαθμού ευελιξίας των αλυσίδων (π.χ. το φυσικό καουτσούκ). Βάσει της δομικής σύνθεσής τους δεν μπορούν να προβούν στη διαδικασία τήξης εφόσον έχουν παραχθεί.

Τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά παρουσιάζονται σαν μόρια μακριάς αλυσίδας με δυνατούς δεσμούς διασταύρωσης. Χαρακτηρίζονται για τη μεγάλη αντοχή, την ανθεκτικότητα και τη σχετικά μεγάλη αντίσταση στη θερμότητα. Η δομή τους δύναται να αντιδρά και να σκληραίνεται συνήθως υπό θέρμανση και πίεση, ενώ δεν μπορούν να επιστρέψουν στη ρευστή τους μορφή.

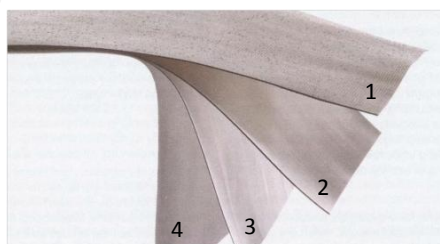
Τα χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερή υλικών ενισχύονται με επικαλύψεις στη βιομηχανική παραγωγή, ώστε η συμπεριφορά του υλικού να ανταποκρίνεται στις υψηλές απαιτήσεις της εκάστοτε αρχιτεκτονικής εφαρμογής όπως:

- Μηχανική αντοχή (υψηλή αντοχή στις εφελκυστικές τάσεις, υψηλή αντίσταση στη διάτμηση, ίδια αντοχή και στις δυο διευθύνσεις (warp and weft), υψηλή επιμήκυνση κατά τη θραύση, χαμηλή παραμόρφωση υπό υψηλή φόρτιση μακράς διάρκειας,

- Αντίσταση στην ευελιξία (αναδίπλωση, αποφυγή θραύσης ινών υπό θλιπτική φόρτιση), προστασία έναντι στις καιρικές συνθήκες (αντοχή σε χημικές και βιολογικές επιδράσεις, σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία),
- Χαρακτηριστικά επιφάνειας (ικανότητα συγκόλλησης, αυτοκαθαριζόμενα, αντί-κολλητικές επιφάνειες, κατάλληλο για επιστρώσεις, αισθητικοί παράμετροι),
- Προστασία φωτιάς (μη εύφλεκτα, ελάχιστες αναθυμιάσεις (τοξικότητα),
- Συντελεστής διαφάνειας (επιθυμητή διαφάνεια, επιθυμητή αντανάκλαση),
- Οικονομία (χαμηλό κόστος πρώτων υλών, χαμηλό κόστος παραγωγής, μακρά διάρκεια) [2.74]

Ο συνδυασμός επικαλύψεων επιφέρει μέγιστη απόδοση στα πολυμερή υλικά. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται:

- Προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία, ατμόσφαιρα και τριβή
- Υγρομόνωση και προστασία από την υγρασία
- Σταθεροποίηση ασταθή γεωμετριών
- Παροχή υλικού ώστε να εξασφαλιστεί η θερμικά σφραγισμένη ραφή
- Διάρκεια ζωής του υλικού και απομάκρυνση σκόνης



Εικόνα 2.29 PTFE/υαλοβάμβακας 1, PVC/πολυεστέρας 2, Επικαλυμμένο PTFE 3, Μη επικαλυμμένο PTFE 4 [2.74].

Αναφορικά με την εικόνα 2.29 υποδεικνύεται ότι το PTFE είναι το πιο ευέλικτο υλικό έναντι των τριών τυπικών υλικών μεμβράνης (PVC, επικαλυμμένο PTFE και μη επικαλυμμένο PTFE). Καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή σχεδιασμού μετατρέψιμων μεμβρανών είναι η αναδίπλωση, η αντίσταση στην ευελιξία και ο συντελεστής διαφάνειας. Επιπρόσθετα, ουσιώδεις συντελεστές αποτελούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, συνθήκες φόρτισης (άνεμος, χιόνι, βροχή, θερμοκρασία, χαλάζι), ο αριθμός των προβλεπόμενων κύκλων εντός της διάρκειας ζωής του υλικού, και το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας (νερό, άνεμος, ήλιος, θερμοκρασία).

Για μετατρέψιμες οροφές μεμβρανών με μικρές απαιτήσεις υγρομόνωσης συνήθως χρησιμοποιείται το PTFE χωρίς επικάλυψη. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αντίσταση ευελιξίας (flex cracking resistance) απ' ότι ένα PVC επικαλυμμένο με πολυεστέρα και ένα επικαλυμμένο PTFE. Είναι ελαφρύ υλικό με αντικολλώδη επιφάνεια και υψηλό συντελεστή μετάδοσης φωτός. Γενικότερα, είναι πιο ευέλικτο από το επικαλυμμένο PTFE παρουσιάζοντας καλή συμπεριφορά αναδίπλωσης διατηρώντας ανέπαφη τη δομή του ακόμα και μετά από 10,000 κύκλους αναδίπλωσης. Παρόλα αυτά, είναι ακριβό και εξασφαλίζει μόνο το μισό επίπεδο αντοχής απ' ότι το επικαλυμμένο πολυεστέρα PVC [2.74].

Το THV εκφέρει παρόμοια χαρακτηριστικά με το ETFE. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει υψηλή διαφάνεια και συνεπώς καλύτερη μετάδοση του φωτός παρέχοντας αντηλιακή προστασία. Λόγω της χημικής σύστασης του είναι αυτοκαθαριζόμενο και δεν είναι εύφλεκτο. Προσφέρει καλύτερη αντίσταση στις καιρικές συνθήκες και είναι πιο ελαστικό από το ETFE. Η χαμηλή αντίσταση στη διάτμηση σε σχέση με το ETFE το περιορίζει σε εφαρμογές για μικρά ανοίγματα. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι το μεγάλο βάρος σε συνάρτηση με την αντοχή του [2.74].

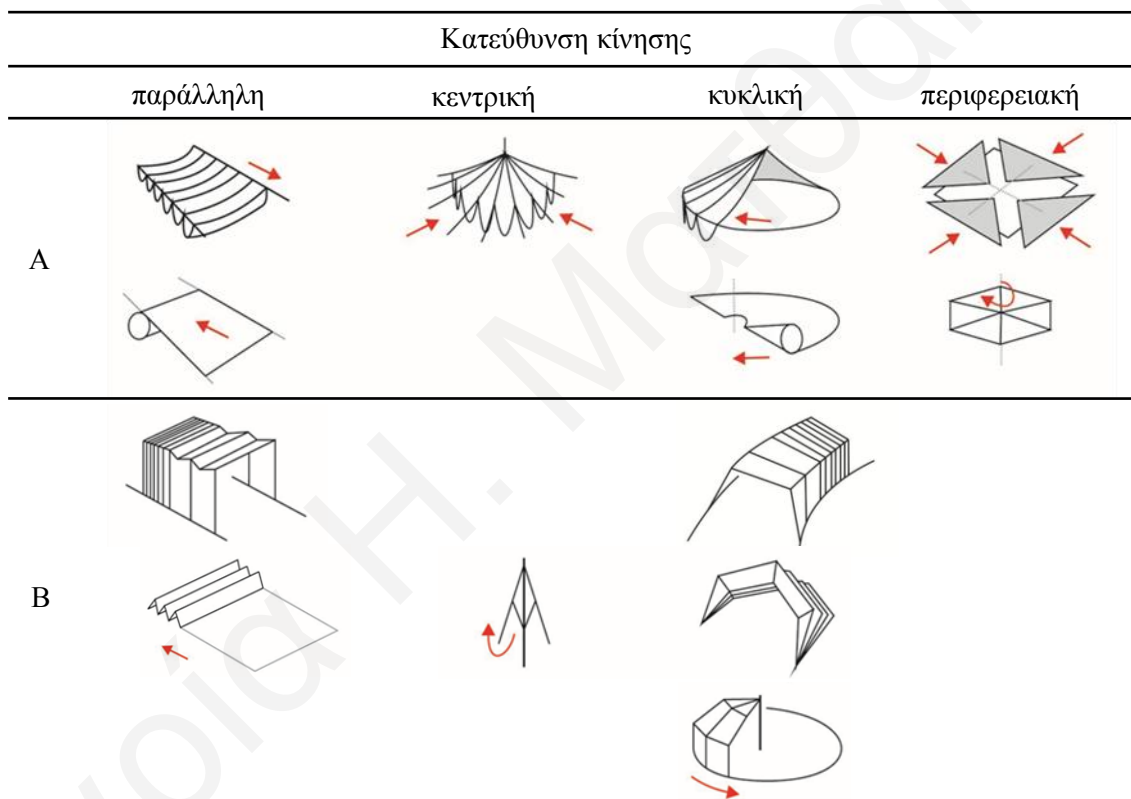
Η πρωτοποριακή τεχνολογική πρόταση Precontraint της Serge Ferrari για σύνθετες μεμβράνες αντεπεξέρχεται σε διάφορα τεχνικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά ζητήματα προτάσσοντας την επιλογή για μετατρέψιμες κατασκευές. Η δομή της συνθετικής μεμβράνης είναι κατασκευασμένη από ένα πλέγμα μικρο-καλωδίων επενδυμένα με πολλαπλά στρώματα υψηλής απόδοσης πολυμερή υλικών. Το συνθετικό υλικό

Preconstraint εντείνεται και στις δυο διευθύνσεις κατά τη διάρκεια επικάλυψης έναντι άλλων συμβατικών επικαλυμμένων υφασμάτων (coated fabric) που εντείνονται σε μια μόνο διεύθυνση. Η ισορροπημένη επιμήκυνση και ισοτροπική συμπεριφορά φέρει ως αποτέλεσμα το χαμηλό επίπεδο επιμήκυνσης και πτύχωσης, πολύ ομαλή επιφάνεια και σταθερότητα. Η επένδυση 240 microns επιφέρει καλύτερη προστασία απέναντι στην ηλιακή ακτινοβολία, διάβρωση και τριβή διατηρώντας γενικότερα τη μηχανική αντίσταση για περισσότερο χρονικό διάστημα. Το Preconstraint είναι ελαφρύ και ανακυκλώσιμο υλικό με αντίσταση και ανθεκτικότητα στην αναδίπλωση. Παράλληλα, παρουσιάζει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες με χαμηλή εκπεμπτικότητα. Η επίστρωση Fluotop T2 με το PVDF-ακρυλικό μίγμα αυξάνει τις ιδιότητες αυτοκαθαρισμού και βελτιώνει το χρόνο ζωής του υλικού [2.75].

Πίνακας 2.3 Μηχανικές ιδιότητες των κοινών συνθετικών υλικών για εφαρμογή σε μετατρέψιμες και αναδιπλωμένες οροφές μεμβρανών (1 Μέσος όρος, 2 Σε σύγκριση με το μέσο όρο τιμής PTFE/γαλαλί 100 %) [2.74].

	ΤΗV-επικαλυμμένος πολυεστέρας		Επικαλυμμένο PTFE	Μη επικαλυμμένο PTFE	Precontraint 1202 S
	Τύπος I	Τύπος II			
Βάρος ανά μονάδα ¹ DIN 55 352 [g/m ²]	1150	1200	1080	320 530	1050
Αντίδραση στη φωτιά (DIN 4102)	B1	B1 S1-d0 (EN 13 501)	B1 S1-d0 (EN 13 501)	Αντίδραση στη φωτιά DIN 4102	B1
Αντοχή σε εφελκυσμό ¹ (warp/weft) DIN 53 354 [N/50 mm]	3500/3000	5000/4500	4000/4000	2000/2050 4000/3700	5600/5600
Αντίσταση στη διάτμηση ¹ (warp/weft) DIN 53 363 [N]	700/700	600/600	798/752	365/330 669/550	800/650
Επιμήκυνση Αστοχίας σε πάχη υλικού όμοιας αντοχής, μοναξονικού εφελκυσμού σε θερμοκρασία εξωτερικού χώρου	-	-	28 %	10,5 %	-
Διάρκεια ζωής	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα		>25	>30	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα
Κόστος πρώτων υλών ²	60-140 %		100-140 %	120-170 %	Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα

Στο πλαίσιο αναφοράς αρχιτεκτονικών παραδειγμάτων βασισμένα σε αρχές σχεδιασμού μεταβλητότητας, ο Frei Otto κατηγοριοποίησε τις δομές βάσει της ανάπτυξης της κίνησης σε ευμετάβλητες οροφές μεμβρανών με σταθερό και μεταβαλλόμενο δευτερεύον σύστημα (εικόνα 2.30) [2.76]. Τα ακόλουθα αρχιτεκτονικά παραδείγματα αφορούν ενδεικτικές εφαρμογές των υλικών που εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό και εστιάζονται στην ανάλυση ευμετάβλητων οροφών μεμβράνης με αναδίπλωση στο οριζόντιο άξονα με σταθερό δευτερεύον σύστημα, αναδίπλωση στο οριζόντιο άξονα με μεταβλητό δευτερεύον σύστημα και αναδίπλωση στο κάθετο άξονα με μεταβλητό δευτερεύον σύστημα.



Εικόνα 2.30 Κατηγοριοποίηση μετατρέψιμων οροφών μεμβράνης: A) σταθερό δευτερεύον σύστημα και B) ευέλικτο δευτερεύον σύστημα [2.76].

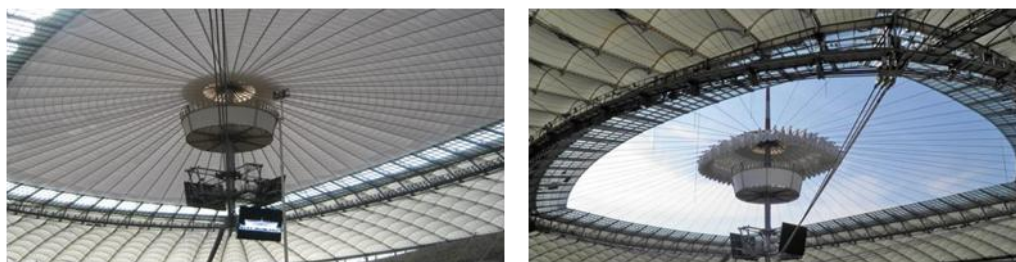
Η αρχιτεκτονική επίλυση του αίθριου χώρου στο Μεσαιωνικό οχυρωματικό έργο Josefsburg στην Αυστρία, αντιμετωπίζει τα καιρικά ζητήματα με την κατασκευή της μεταβαλλόμενης οροφής επιτρέποντας τη διεξαγωγή εκδηλώσεων ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών και παράλληλα διατηρώντας την αξία του ιστορικού μνημείου (εικόνα 2.31). Ο σχεδιασμός έγκειται στη ακτινωτή καλωδιωτή κατασκευή με επικαλυμμένη

μεμβράνη PTFE που καλύπτει μια κυκλική επιφάνεια 2.000 m^2 . Η φέρουσα δομική κατασκευή ορίζεται από δεκαπέντε μεταλλικές δοκούς που σχηματίζουν πολυγωνικό δακτύλιο σε κάτοψη και υποστηρίζονται από δέκα μεταλλικά υποστυλώματα. Η επέκταση και η συρρίκνωση της μεμβράνης επιτυγχάνεται με την κίνηση δεκαπέντε μηχανικών οδηγών και υδραυλικών κυλίνδρων, εκ των οποίων οι τελευταίοι ενεργοποιούν την κίνηση των οδηγών. Αισθητήρες εποπτεύουν τη συμπεριφορά, την κίνηση και το τέντωμα της μεμβράνης, ώστε να βρίσκεται στην επιθυμητή τελική θέση. Η συμπυκνόμενη μεμβράνη τοποθετείται στο κέντρο του πολυγωνικού δακτυλίου σε ακτίνα 26 m και ο χρόνος που καταγράφεται για την επέκτασή της είναι τέσσερα λεπτά ([2.74], [2.77]).



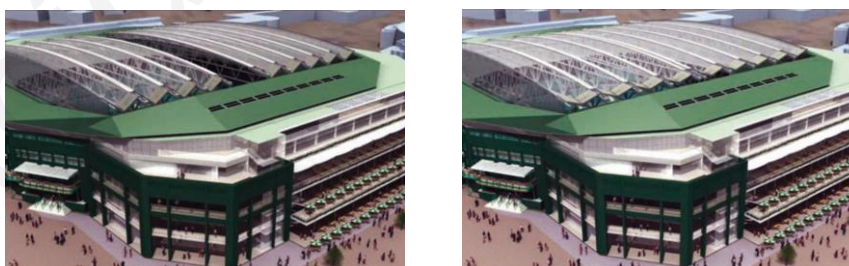
Εικόνα 2.31 Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Μεσαιωνικό οχυρωματικό Josefsburg, Αυστρία, 2006 [2.77].

Το διεθνές στάδιο Warsaw στην Πολωνία κατασκευάστηκε το 2011 με γνώμονα τη φιλοξενία των Ευρωπαϊκών αγώνων πρωταθλήματος το 2012 από την ομάδα αρχιτεκτόνων JSK και πολιτικών μηχανικών Schlaich Bergermann και συνεργάτες (εικόνα 2.32). Χαρακτηριστικό στοιχείο του κατασκευαστικού έργου αποβαίνει στη μεταβαλλόμενη οροφή και στην εφαρμογή του συνθετικού υλικού Preconstraint Serge Ferrari. Εξήντα ακτινωτά καλώδια υποστηρίζουν τη μεταβαλλόμενη δομή της μεμβράνης. Σχεδιασμένο ν' ανταποκρίνεται στις ανεμοπιέσεις και στη λειτουργία της αναδίπλωσης το συνθετικό υλικό Preconstraint 1302 S κρίθηκε κατάλληλο για την εφαρμογή αυτή. Η μεμβράνη σφραγίζεται στην περίμετρο της κατασκευής κατά την επέκτασή της για σκοπούς υδατοστεγανότητας. Ο συνολικός χρόνος επέκτασης και συρρίκνωσης της μεμβράνης είναι είκοσι λεπτά και υποστηρίζεται από ένα κινητήρα που ενεργοποιεί την κίνηση της μεμβράνης σε συνδυασμό με 15 οδηγούς κύλισης [2.75].



Εικόνα 2.32 Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Στάδιο Warsaw, Πολωνία, 2012 [2.75].

Η αρχιτεκτονική ομάδα Populus σε συνεργασία με τους πολιτικούς μηχανικούς της Capita Symonds ανέλαβαν τη σχεδιαστική και κατασκευαστική αναβάθμιση του αθλητικού κέντρου Wimbledon στο Λονδίνο, 2009. Σημαντικά αιτήματα του ομίλου αποτελούσαν η προσθήκη εκθεσιακού και υπηρεσιακού χώρου, η κατασκευή μιας αναπτυσσόμενης - συμπυκνωμένης οροφής (σε παράλληλη κίνηση) ώστε να προσαρμόζεται στις καιρικές συνθήκες (εικόνα 2.33). Η επικαλυμμένη μεμβράνη PTFE στεγάζει 5.200 m² και διαχωρίζεται σε δυο τμήματα, εκ των οποίων το ένα αποτελείται από τέσσερα μεταλλικά δικτύωματα και το άλλο, πέντε. Η φέρουσα κατασκευή υποστηρίζεται από εννέα μεταλλικά δικτύωματα (77 m) που μεταφέρουν τα φορτία του ανέμου και του χιονιού στις δοκούς και στα υποστυλώματα, κυρίως όταν η οροφή βρίσκεται σε ανάπτυξη. Ο έλεγχος της μετακίνησης των μεταλλικών δικτυωμάτων προκύπτει μέσα από τους ενεργοποιητές και η μετακίνηση από τους μηχανικούς οδηγούς. Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση της ανάπτυξης είναι δέκα λεπτά [2.78].



Εικόνα 2.33 Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Στάδιο Wimbledon, Λονδίνο, 2009 [2.78].

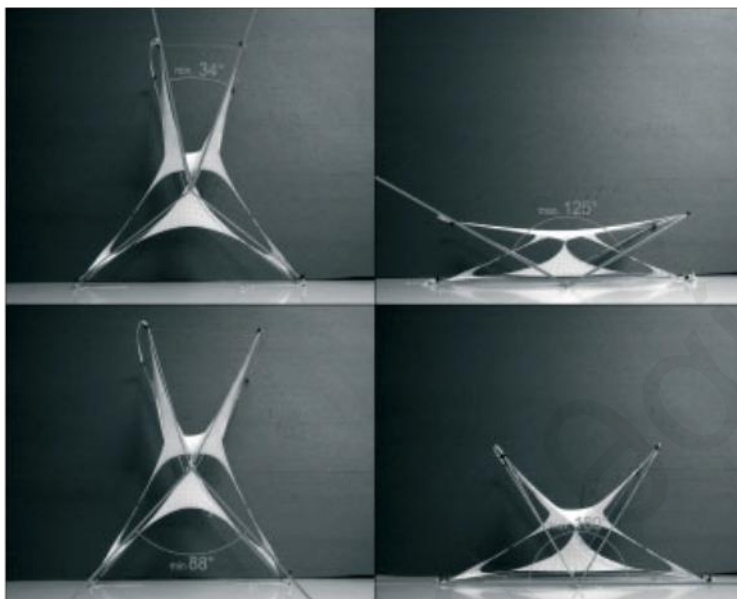
Η ανάγκη των προσκυνητών για επισκίαση του αίθριου χώρου κατά τη διάρκεια προσευχής στη Μεδίνα, Σαουδική Αραβία, οδήγησε στο σχεδιασμό ενός ευέλικτου συστήματος από την ομάδα SL-Rasch διατηρώντας το χαρακτήρα του ανοιχτού και οικείου χώρου (εικόνα 2.34). Πρόκειται για την εφαρμογή δώδεκα σε αριθμό ομπρέλλων με διάμετρο 24m και ύψος 14m. Η τυπική μορφή της ομπρέλλας χαρακτηρίζεται από μια κωνική, διπλή και καμπυλωτή μεμβράνη PTFE (βιομηχανικό προϊόν Teflon®). Η μεταβολή της δομικής κατασκευής της μεμβράνης επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των υδραυλικών κυλινδρικών οδηγών και η κίνηση γίνεται στον κάθετο άξονα. Η ελεγχόμενη μεταβλητή κατάσταση των συστημάτων της ομπρέλλας προσφέρει θερμοκρασιακή ισορροπία στον αίθριο χώρο, ρύθμιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτηρίου και μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης [2.79].



Εικόνα 2.34 Μετατρέψιμη οροφή μεμβράνης, Χώρος προσκυνητών, Σαουδική Αραβία, 1992 [2.79].

Επιτακτική ανάγκη σχεδιασμού ενός συντακτικού με ευμετάβλητη υποστηρικτική δομή μεμβρανών και κριτήρια βελτιστοποίησης, εντείνουν την εισαγωγή ελαστικών προσαρμόσιμων μεμβρανών που ανταποκρίνονται σε οποιαδήποτε αλλαγή των καταπονήσεων, επιχειρώντας το σχηματισμό μειωμένης επιφάνειας υλικού και εξασφαλίζοντας συγχρόνως την ισορροπία εφελκυστικών δυνάμεων καθιστώντας τις ενεργές δομές (form-active). Αντιπροσωπευτικό παραδείγμα διεκπεραιώθηκε στα πλαίσια ενός εργαστηρίου με καθηγητές τους Hensel και Menges, και αφορά την ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου με σκοπό την ανάλυση της συμπεριφοράς της μεμβράνης σε διαφορετικά στάδια σχηματισμού της επιφάνειας βάσει σχετικής παραμετρικής μοντελοποίησης (εικόνα 2.35). Συντελεστές σχεδιασμού αποτέλεσαν ο βαθμός και η κατεύθυνση της

κίνησης της υποστηρικτικής δομής, τα οποία κρίνονται σημαντικά για την ανάπτυξη εφελκυστικών δυνάμεων στη μεμβράνη [2.80].

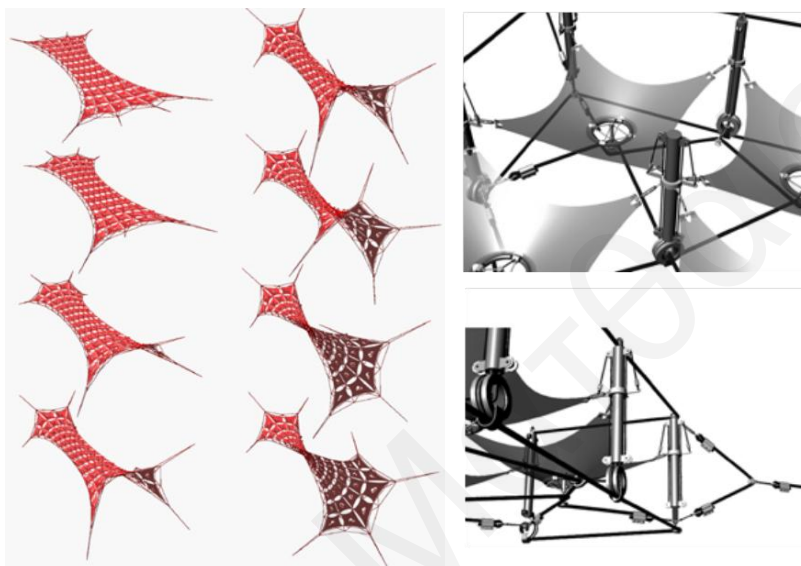


Εικόνα 2.35 Πιθανοί γεωμετρικοί μετασχηματισμοί πρωτοτύπου μεμβράνης [2.80].

Στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς προτείνεται ένα σύστημα μεμβρανών με κινητική ενεργή δομή (form-active) με άξονα ένα ανοιχτό κύκλωμα μεθοδολογίας σχεδιασμού, αποφεύγοντας τη γραμμική διαδικασία ανάπτυξης δομικών τυπολογιών (εικόνα 2.36). Οι μεμβράνες συνθέτουν το βασικότερο στοιχείο του υβριδικού συστήματος ενώ οποιαδήποτε μετατροπή της μορφής επιτυγχάνεται με σύστημα καλωδίων και ορθοστατών, τροποποιώντας το σχηματισμό των μεμβρανών και διατηρώντας παράλληλα την ακαμψία του συστήματος. Σε κάθε μετασχηματισμό του υβριδικού συστήματος οι μεμβράνες και το δευτερεύον καλωδιωτό σύστημα συνδράμουν βάσει της μεταφοράς των φορτίων. Η εισαγωγή αξονικών δυνάμεων στο δευτερεύον σύστημα ενεργοποιεί την ακαμψία και σχετίζεται με τη μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις μονάδες της μεμβράνης.

Η συνολική διάσταση του πρωτοτύπου ορίζεται ως 4.8 x 9.6 m. Ο κάθε ορθοστάτης κυλινδρικής διατομής 30 mm και ύψους 0.80 m συνδέει τέσσερις γειτονικές μονάδες μεμβρανών, και υποστηρίζεται από δυο διασταυρωμένα καλώδια διαμέτρου 10 mm που βρίσκονται στο κάτω μέρος των ορθοστατών. Η αλλαγή κλίσης καλωδίων επιτυγχάνεται

με περιστρεφόμενους δίσκους στο οριζόντιο ιδεατό επίπεδο των μονάδων της μεμβράνης. Τα καλώδια είναι αρθρωτά συνδεδεμένα στις γωνιές των ορθοστατών προκειμένου σε κάθε αντίστοιχο ζεύγος, όταν το ένα εφελκόμενο μέλος είναι σταθερό, το άλλο είναι ελεύθερο επιτρέποντας μεταβολή μήκους και γενικότερα το τοπικό ή συνολικό μετασχηματισμό του συστήματος [2.81].



Εικόνα 2.36 Πιθανά στάδια μετασχηματισμού του συστήματος με οχτώ μετακινήσεις στηρίξεων [2.81].

2.7 Συμπεράσματα

Οι εφαρμογές ραβδωτών δομικών συστημάτων σε κτιριακό πλαίσιο επικεντρώνονται κυρίως σε κριτήρια μείωσης του ιδιοβάρους, βελτιστοποίησης των δομών, μορφών, συνδεσμολογίας και αντίστοιχα της στατικής συμπεριφοράς. Επιπλέον παράμετροι όπως η καθαρότητα, η ειλικρίνεια της μορφής, η ομαλή μεταφορά των φορτίων και η ενοποιημένη ανάπτυξη της δομικής κατασκευής σε ευρύτερο αρχιτεκτονικό και οικολογικό πλαίσιο κρίνονται εξίσου σημαντικοί. Συνεπώς, χαρακτηριστικά βιομηχανοποίησης, προκατασκευής και τυποποίησης των μελών πλαισιώνουν το συντακτικό σχεδιασμού των στατικών δομικών συστημάτων.

Η μετατροπή ραβδωτών δομικών συστημάτων σε κινητικά συστήματα επιτυγχάνεται με βάση τα προαναφερθέντα παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία σε κυρίως δυο

κατευθύνσεις: μέσω προσθετικής ένταξης στοιχείων ενεργοποίησης κινητικού μηχανισμού, ή μέσω αντικατάστασης κύριων μελών της δομικής κατασκευής με απαιτούμενους ενεργοποιητές και αντίστοιχη ανάπτυξη των αρθρώσεων. Επιπλέον, το κτιριακό ή κατασκευαστικό περίβλημα φέρει μέσω του μειωμένου ιδιοβάρους, της αυξημένης ελαστικότητας και της αντοχής του υλικού την ικανότητα μεταξύ άλλων, προσαρμογής του στις σχετικές μετατοπίσεις, οι οποίες ορίζονται από την κύρια κατασκευή. Στα πλαίσια αυτά, η παρούσα ερευνητική εργασία στοχεύει μέσω της ανάπτυξης υβριδικού πρωτοτύπου κατασκευής στην ενοποιημένη ανάπτυξη του στατικού και κινητικού συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

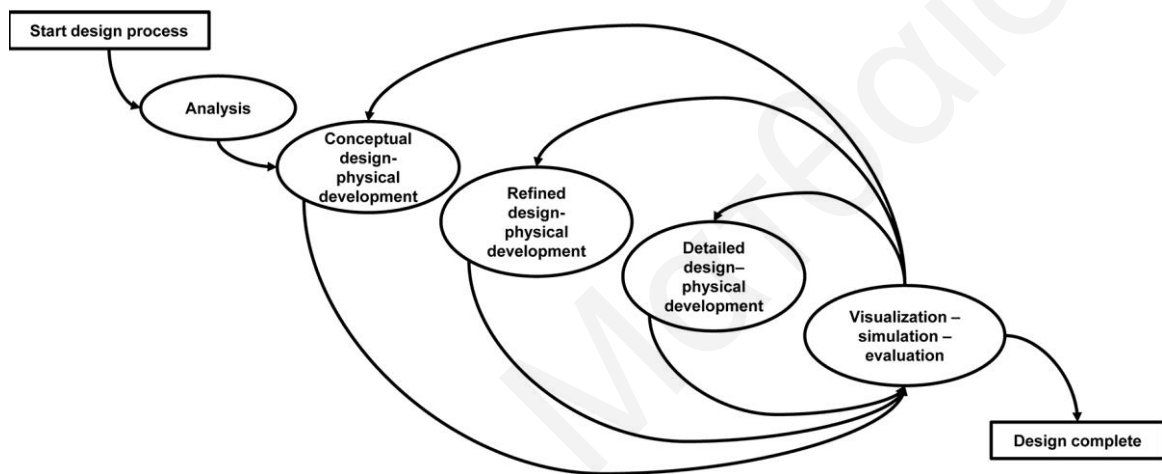
3.1. Εισαγωγή

Οι σύγχρονοι μελετητές εκδηλώνοντας ευαισθησία στα ζητήματα της αειφορίας, εντείνουν την έρευνα και το σχεδιασμό των κινητικών δομικών συστημάτων σε διάφορες κλίμακες και επίπεδα του δομημένου περιβάλλοντος με κύρια αρτηρία την ολιστική προσέγγιση συνδυάζοντας την αρχιτεκτονική - μηχανική. Εργαλεία προώθησης της έρευνας, σχεδιασμού και υλοποίησης των κινητικών δομικών συστημάτων αποτέλεσαν τα λογισμικά παραμετρικής ανάλυσης και κατ' επέκταση ο ψηφιακός σχεδιασμός. Η επεξεργασία της συμπεριφοράς μέσα από τη μοντελοποίηση αλληλένδετων μελών συνείσφερε δραματικά στην ανάπτυξη της δομικής σύστασης των κινητικών συστημάτων.

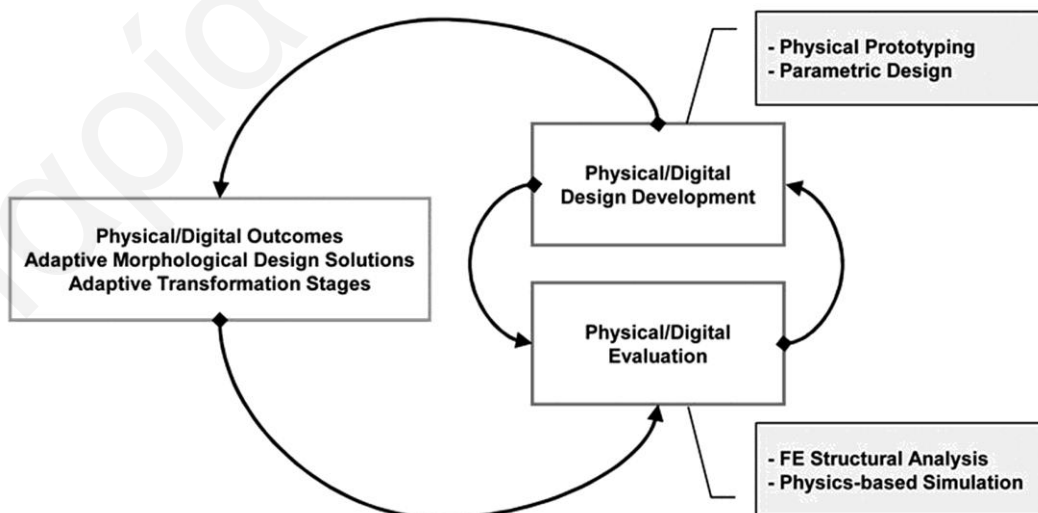
3.2. Μεθοδολογίες σχεδιασμού κινητικών συστημάτων

Ο ψηφιακός σχεδιασμός υποστηρίζει τη βελτιστοποίηση μιας κτιριακής δομής μέσω δυο προσεγγίσεων που χαρακτηρίζουν την ολιστική διαδικασία σχεδιασμού μιας μη γραμμικής ανάπτυξης. Στην πρώτη περίπτωση βασικό άξονα αποτελεί ο ενοποιημένος σχεδιασμός μη γραμμικής ανάπτυξης μέσω αλληλένδετων τεχνολογικών θεμάτων, τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά την αρχιτεκτονική διαδικασία σχεδιασμού. Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει στον ενοποιημένο ολιστικό σχεδιασμό, παρόλο που ακολουθεί μια διαδικασία ανάπτυξης κλειστού κυκλώματος, και υποστηρίζεται δυναμικά στα διακριτά στάδια της ανάλυσης μέσω της τεχνολογίας για την ανάληψη της τελικής πρότασης [3.1]. Το ανοικτό κύκλωμα της διαδικασίας σχεδιασμού περιγράφεται ως η προσέγγιση που χρησιμοποιεί τον τεχνολογικό ψηφιακό σχεδιασμό μέσω ενοποιημένου πειραματικού και ερευνητικού σχεδιασμού. Το σχεδιαστικό αποτέλεσμα είναι αντιπροσωπευτικό της αρχιτεκτονικής, προδιαγράφοντας την ομοιογένεια απέναντι σε ζητήματα υλικότητας, μορφής και δομής καθώς επίσης, έγκειται σε αλληλεπίδραση με εσωτερικές και εξωτερικές επιρροές [3.2]. Κατά κανόνα η σχεδιαστική ανάπτυξη στηρίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια και περιοχές έρευνας και πειραματισμού που πιθανόν να αφορούν μεταβλητές της γεωμετρίας,

λειτουργιών, κατασκευής και περιβαλλοντικών συνθηκών. Σε περίπτωση που η ανάπτυξη στηρίζεται στις τεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού, η προσέγγιση χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική διαδικασία βελτιστοποίησης, (performance-based), (εικόνα 3.1) [3.3]. Σε περίπτωση που η ανάπτυξη ορίζεται σε πρωταρχικό στάδιο από μεταβαλλόμενες συνθήκες χρήσης και περιβάλλοντος, η προσέγγιση σχεδιασμού ακολουθεί μια μη γραμμική διαδικασία επιλογής των καταλληλότερων σεναρίων επίλυσης, (performance-oriented), (εικόνα 3.2) [3.4].



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα μη γραμμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης (performance-based) [3.3].



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα της διαδικασίας ανάπτυξης ανταποκρινόμενων δομών (performance-oriented) [3.4].

Το δυναμικό πεδίο που ορίζεται από τις αλληλένδετες σχέσεις μεταξύ της έρευνας και του σχεδιασμού, συντάσσοντας ένα πολύπλοκο δίκτυο βασικών αρχών βρίσκεται σε αλληλεξάρτηση με το ψηφιακό σχεδιασμό λόγω της δυνατότητας να επεξεργαστούν, να ερευνηθούν και να αναπαραστήσουν τη κτιριακή δομή με μεγάλη ακρίβεια. Βασικές αρχές αποτελούν οι πολλαπλό-διεπιστημονικότητα (multidisciplinarity), πολύ-διεπιστημονικότητα (pluridisciplinarity), δια-διεπιστημονικότητα (crossdisciplinarity), διεπιστημονικότητα (interdisciplinarity) και ενδο-επιστημονικότητα (transdisciplinarity) [3.5]. Πολλαπλό-διεπιστημονικότητα (multidisciplinarity) ορίζεται ως η ποιικιλία των κλάδων που αναλύονται σε παράλληλο επίπεδο χωρίς να υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ τους, πολύ-διεπιστημονικότητα (pluridisciplinarity) αναφέρεται ως η ομαδοποίηση των διαφορετικών κλάδων με σκοπό τη συνεργασία μεταξύ τους, δια-διεπιστημονικότητα (crossdisciplinarity) αρχή στηρίζεται στη διασταύρωση γνώσεων και στόχων από διάφορους κλάδους με αποτέλεσμα όμως την ιεραρχία ενός μεμονωμένου κλάδου, διεπιστημονικότητα (interdisciplinarity) ως η συνεργασία συναφών κλάδων με προτεραιότητα ενός κοινού και συντονισμένου σκοπού, ενδο-επιστημονικότητα (transdisciplinarity), ως η συντονισμένη και διεπιστημονική συνεργασία λαμβάνοντας υπόψη τους κοινούς στόχους με κατεύθυνση ένα κοινό προτεινόμενο σύστημα [3.5].

Όσον αφορά τη διαδικασία σχεδιασμού κινητικών δομικών κατασκευών διαφαίνεται ότι υποστηρίζεται μέσω διαφορετικών μεθοδολογιών. Ο καθορισμός της αρχικής και τελικής θέσης ενός συστήματος βάσει των θλιβόμενων μελών που θα αποδώσουν την κίνηση ορίζουν τη μεθοδολογία bottom-up. Ο σχεδιασμός της κινητικής δομικής κατασκευής βελτιστοποιείται στα διακριτά στάδια της διαδικασίας ανάπτυξης. Η μεθοδολογία top-down βασίζεται στον ορισμό της επιθυμητής θέσης ως αρχικό σχεδιαστικό ζήτημα, ενώ η επιλεγμένη κινηματική επίλυση καθορίζει τον επιτυχημένο σχεδιασμό και τη θέση των μελών. Η τελευταία προσέγγιση αντιπροσωπεύει τη θεωρία των μηχανισμών και συστήνεται σε μελέτες όπου επικεντρώνονται στην ανάλυση της κίνησης [3.6].

Ο Κωνσταντίνος Ουγγρίνης αναφέρει ότι οι μελετητές που προτίθενται να υιοθετήσουν μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά σε μια δομική κατασκευή θα πρέπει αρχικά να προχωρήσουν στην καταγραφή των διακυμάνσεων που υπάρχουν μεταξύ των πολλαπλών

συνθηκών σε διαφορετικά χρονικά σημεία [3.7]. Βασική προϋπόθεση αποτελεί ο καθορισμός των σχέσεων μεταξύ των χώρων, οι σχέσεις με το άμεσο και έμμεσο περιβάλλον μέσω χωροχρονικών διαγραμμάτων, καθώς και ο σχεδιασμός των κατασκευαστικών λεπτομερειών, των υλικών και μηχανισμών κίνησης ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στα πλαίσια ενός προϋπολογισμού [3.7].

Η σχεδιαστική πρόταση για μια κινητική υβριδική δομή περιβλήματος αντανακλά την προαναφερόμενη αρχή στο πεδίο των ελαφριών δομών, των βιολογικών οργανισμών (αποτελεσματικότητα των υλικών και αυτόνομη προσαρμογή σε εξωτερικές συνθήκες), των ψαλιδωτών δομών και συντάσσεται με κανόνες ενοποιημένης ανάπτυξης και συνέργειας της στατικής και κινητικής λειτουργίας [3.8]. Η επίλυση του σχεδιαστικού ζητήματος επιτυγχάνεται μέσω των ενεργών καμπτόμενων μελών και της δυαδικής συμπεριφοράς των καλωδίων να διατηρούν σε ευστάθεια το σύστημα και παράλληλα να ενεργοποιούν την κίνηση μεταβάλλοντας το μήκος τους. Η διαδικασία του ενοποιημένου σχεδιασμού ορίζεται από αλληλένδετα κεφάλαια ανάπτυξης του μετασχηματισμού του συστήματος, της δομικής κατασκευής, του γεωμετρικού σχεδιασμού, της στατικής και κινητικής συμπεριφοράς [3.8].

Ο Masier Asefi υποστηρίζει ότι είναι δύσκολο να επιλέξεις και να σχεδιάσεις το ανάλογο μεταβαλλόμενο δομικό σύστημα που ανταποκρίνεται σε σχεδιαστικές απαιτήσεις [3.8]. Με γνώμονα της αξιολόγηση της καλύτερης επίλυσης από μια πληθώρα υλοποιημένων παραδειγμάτων, υποστηρίζει ότι τα σχεδιαστικά κριτήρια θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού των αντίστοιχων δομικών κατασκευών. Ο σχεδιασμός, η δομική κατασκευή και η λειτουργία, το οικονομικό κόστος, η συντήρηση και η κλίμακα εφαρμογής αποτέλεσαν τις τέσσερις κατηγορίες σχεδιαστικών κριτηρίων ανάπτυξης μιας κινητικής δομής ([3.9], [3.10]).

Η παιδαγωγική σχεδιαστική προσέγγιση για τη δημιουργία ανταποκρινόμενων συστημάτων που εφάρμοσαν ο Michael Fox και η Catherine Hu, ενισχύει το πεδίο της έρευνας μέσω σχεδιασμού (research based design) εστιάζοντας στη μικρή κλίμακα ανάλυσης. Πολλαπλά πειραματικά μοντέλα υποστηρίζουν το σχεδιαστικό αποτέλεσμα ανταποκρινόμενων περιβαλλόντων λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους της ανθρώπινης

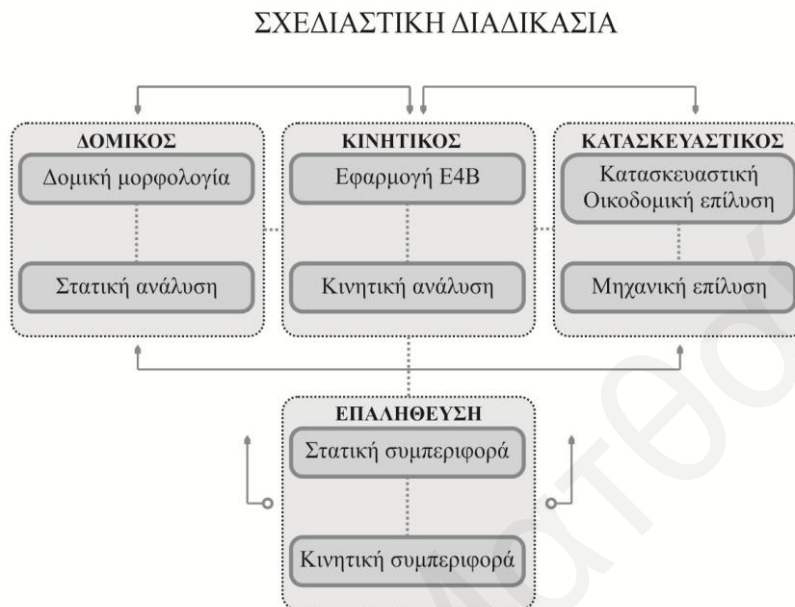
συμπεριφοράς και του περιβάλλοντος, την ενσωματωμένη υπολογιστική υποδομή, τα κινητικά και μηχανικά συστήματα και το φυσικό έλεγχο των μηχανισμών. Ισχυρό άξονα αποτελεί ο σχεδιασμός μηχανικών δομών και η ανάπτυξη ενός ενεργού συστήματος παρά η γραμμική ανάπτυξη σχεδιασμού εντοπίζοντας το σχεδιαστικό πρόβλημα, ερευνώντας τις πιθανές εναλλακτικές προτάσεις και σχεδιάζοντας το τελικό αποτέλεσμα ([3.10], [3.11]).

Στα πλαίσια της διαλεκτικής σχέσης της προσαρμοστικής σχεδιαστικής διαδικασίας και του υπολογισμού των φυσικών δεδομένων αναπτύσσονται διαφορετικές στρατηγικές με κύριο παρανομαστή την προσαρμοστική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι ζωντανοί οργανισμοί. Η πληροφορία από τα φυσικά δεδομένα (εσωτερικοί και εξωτερικοί παράμετροι) αναγνωρίζεται μέσω αισθητήρων, αποκωδικοποιείται και επεξεργάζεται μέσω συστημάτων ελέγχου, ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία μέσω ενεργοποιητών, αποδίδοντας την αρχική πρόθεση για την ανάπτυξη διαδραστικών σχέσεων μεταξύ των διαφόρων παραγόντων. Η διαδικασία αυτή σκιαγραφεί την προσαρμοστικότητα, καθώς αναπτύσσεται ένας μηχανισμός ανάδρασης όπου κυκλικά επαναλαμβάνεται μεταξύ της κατασκευαστικής παραγωγής και αξιολόγησης του σχεδιασμού και των πρωτοτύπων. Δυο στρατηγικές ορίζουν την προσέγγιση αυτή. Η πρώτη αφορά τα ψηφιακά δεδομένα ως εισερχόμενα ερεθίσματα της ανθρώπινης συμπεριφοράς στην προσαρμοστική ψηφιακή σχεδιαστική διαδικασία. Στη δεύτερη, η ανθρώπινη συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη ως εισερχόμενη πληροφορία για την ενεργοποίηση του διαδραστικού πεδίου μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού περιβάλλοντος κατά την προσαρμοστική σχεδιαστική διαδικασία [3.12].

3.3. Μεθοδολογία σχεδιασμού προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής

Η μεθοδολογία ανάπτυξης της κινητικής υβριδικής δομής απορρέει από τη σύγκλιση διαφορετικών κλάδων με κύρια πυξίδα τους κοινούς στόχους για την ανάπτυξη ενός βέλτιστου κινητικού δομικού συστήματος που θα εκπλειρώνει αρχιτεκτονικά, κατασκευαστικά, οικοδομικά, μηχανικά και κινητικά ζητήματα (εικόνα 3.3). Η διαδικασία μη γραμμικής ανάπτυξης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού αφορά μια ενδεδειγμένη ενημέρωση της έρευνας κατά τα διακριτά στάδια επεξεργασίας της σύνθεσης και προδιαγράφει τα

χαρακτηριστικά ενός ενοποιημένου σχεδιασμού, εφόσον διατηρείται η συντονισμένη και η διαδραστική σχέση μεταξύ των διαφορετικών ενοτήτων.



Εικόνα 3.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής.

Η ερευνητική διαδικασία σχεδιασμού εστιάζεται στη διερεύνηση της δομικής σύστασης, της κατασκευαστικής, της οικοδομικής και της κινητικής επίλυσης σε μικρο – κλίμακα σε αντίθεση με τη στρατηγική σχεδιασμού της ανάληψης ενός σχεδιαστικού ζητήματος, της αποτύπωσης των παραμέτρων χωροχρονικά και κατ' επέκταση του ορισμού της αρχικής και τελικής θέσης μιας κινητικής δομής, ως απάντηση στο σχεδιαστικό ζήτημα. Κοινό στόχο αποτελούσε η επιλεγμένη κινητική επίλυση σύμφωνα με την εφαρμογή του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων και τη δυαδική συμπεριφορά των δευτερεύοντων μελών, ώστε να καθορίσουν την επιθυμητή θέση του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τους κατασκευαστικούς και κινητικούς περιορισμούς, την επιλογή ενός βέλτιστου αλγορίθμου και την κινηματική επίλυση, η κινητική υβριδική δομή θα μπορούσε να λάβει διαφορετικούς μετασχηματισμούς.

Θεμέλιο της παρούσας έρευνας στο σχεδιασμό αποτέλεσε η δομική και κινητική συνέργεια, μέσω της εστίασης στις διαφορετικές ενότητες και της συγχρονικής σχέσης τους προκειμένου να οριστεί η βέλτιστη δομή. Οι ενότητες αυτές συγκροτούνται από την στατική ανάλυση της δομικής μορφολογίας της προτεινόμενης δομής, την εφαρμογή του

ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων, το σχεδιασμό της κίνησης και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της κινητικής υβριδικής δομής, την οικοδομική και κατασκευαστική επίλυση βάσει των μηχανικών συστημάτων και την επαλήθευση της λειτουργίας της κίνησης.

Η ανάλυση της υφιστάμενης γνώσης σε δομικά συστήματα κτιριακών εφαρμογών, κινητικές δομές και κατασκευαστικό περιβάλημα (Κεφ. 2) κατεύθυνε και περιόρισε το πεδίο διερεύνησης και σχεδιασμού κινητικών δομικών συστημάτων. Η εξέλιξη της δομικής μορφολογίας μέσω πολλαπλών περιπτώσεων και η παραμετρική στατική ανάλυση (Κεφ. 4 και 5) ενισχύουν τη συνεργασία της δομικής, της κατασκευαστικής και της κινητικής ενότητας, εξαιτίας του κοινού στόχου για τη δυαδική συμπεριφορά των δευτερεύοντων μελών (διατήρηση της ευστάθειας και συγχρόνως ενεργοποίηση της κίνησης) αποφεύγοντας την προσθήκη επιπρόσθετων μελών και συνεπώς μειώνοντας τον αριθμό των ενεργοποιητών. Η επιλογή μιας βέλτιστης δομικής τυπολογίας εξετάζεται στην επόμενη ενότητα όσον αφορά το σχεδιασμό της κίνησης (Κεφ. 5). Στην φάση αυτή ανάγονται τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί για την ομαλή ανάπτυξη των μοτίβων ακολουθίας και λαμβάνονται επίσης υπόψη στην κατασκευαστική επίλυση. Αξίζει να αναφερθεί, ότι ο σχεδιασμός της κίνησης και η λειτουργία της δομικής κατασκευής αποτελούν μια διαδραστική διαδικασία ανάπτυξης, όπου η κάθε ενότητα ενημερώνει την άλλη με κοινό στόχο τη βέλτιστη απόδοση της δομής. Η μοντελοποίηση και η ανάλυση της κίνησης, επιχειρεί να αξιολογήσει τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της κινητικής υβριδικής δομής, ανάγοντας ζητήματα πιο πρακτικής φύσεως (Κεφ. 7). Ο σχεδιασμός του κατασκευαστικού περιβλήματος (Κεφ. 8) στηρίζεται στην προσαρμοστικότητα του πρωτεύοντος συστήματος.

3.4. Συμπεράσματα

Οι ψηφιακές πλατφόρμες ως επί των πλείστων υποστηρίζουν την ερευνητική διαδικασία εξετάζοντας τη συμπεριφορά της κινητικής δομικής κατασκευής και αποδίδουν μια ολιστική προσέγγιση σε αρχιτεκτονικά, κατασκευαστικά και μηχανικά ζητήματα χωρίς να περιορίζονται στην δυναμική απεικόνιση και αναπαράσταση, αλλά επικεντρώνονται στην αποτύπωση της δομής και της κίνησης, ενισχύοντας την ενοποιημένη μη γραμμική

διαδικασία σχεδιασμού. Στα πλαίσια αυτά η ενοποίηση πετυχαίνεται με δυο τρόπους: με την ενσωμάτωση της γνώσης κατά τη σχεδιαστική διαδικασία και το διεπιστημονικό σχεδιασμό μέσα από την ενημέρωση γνώσης από άλλους κλάδους. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός κινητικών δομικών κατασκευών υποστηρίζεται με διαφορετικές στρατηγικές μεθοδολογίας ακολουθώντας τη μη γραμμική κυκλική διαδικασία, είτε με την αναφορά σ' ένα σχεδιαστικό ζήτημα και συνεπώς την ανταπόκριση της δομής σ' αυτό, είτε με την πιο γενικευμένη κινητική επίλυση του συστήματος και τη μεταγενέστερη διερεύνηση εφαρμογής του.

Η ερευνητική διαδικασία σχεδιασμού της προτεινόμενης υβριδικής δομής ενισχύεται με τη συνέργεια των κλάδων, ακολουθώντας συχνά μια ενδο-επιστημονική (transdisciplinarity) προσέγγιση. Η μη γραμμική ανάπτυξη της δομής και η κυκλική διαδικασία σχεδιασμού ορίζει τα διακριτά στάδια επεξεργασίας της δομής μέσα από τους τομείς της κατασκευής, της οικοδομικής και της κινητικής, όπως επίσης και την αλληλένδετη σχέση που παρουσιάζεται μεταξύ τους στο χρονικό όριο που ορίζει ο σχεδιασμός και η κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΥΠΟΛΟΓΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η προκείμενη μελέτη επιχειρεί ν' αναδείξει τη βέλτιστη τυπολογική δομή ενός υβριδικού κινητικού συστήματος. Αφετηρία ανάπτυξης αποτέλεσε η εξέταση και η αξιολόγηση των στατικών και κινητικών ιδιοτήτων συγκεκριμένης δομής, υιοθετώντας την παραμετρική στατική ανάλυση ενός υβριδικού κινητικού συστήματος. Καθοριστικής σημασίας αποτελούν οι παράγοντες διερεύνησης της μορφολογίας, της γεωμετρίας και των συνθηκών σύνδεσης των μελών του συστήματος για τη βελτιστοποίηση της δομής. Το πρώτο επίπεδο ανάλυσης ενός εννιαμελούς συστήματος οργανώνεται με βάση το εύρος δυνατοτήτων μετάλλαξης της τυπολογικής δομής και της γενικότερης απόδοσης του συστήματος. Ο άξονας της ανάλυσης εξελίσσεται παραμετρικά και στηρίζεται στην επιλογή μιας δομικής τυπολογίας, η οποία αποδίδει τα ιδανικότερα χαρακτηριστικά ως προς την ακριβή μοντελοποίηση του κινητικού μηχανισμού. Η παραμετρική ανάλυση αναφέρεται στο διευρυμένο πλαίσιο πιθανών επιλογών, οι οποίες διερευνούνται στα πλαίσια της εξελικτικής διαδικασίας διερεύνησης και βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση του συστήματος στα πλαίσια αυτά ορίζεται σε σχεδιαστικό και αναλυτικό πλαίσιο ανάπτυξης βάσει κριτηρίων οικοδομικού σχεδιασμού, δομικής λειτουργίας, κινηματικής απόδοσης του συστήματος και των μελών του.

Αναλυτικότερα, οι μεταλλασσόμενες γεωμετρικά τυπολογίες εντάσσονται στο πεδίο των υβριδικών δομικών συστημάτων. Μέσα από την ερευνητική ανασκόπηση, διαφαίνεται η ιδιαιτερότητα των συστημάτων να λειτουργούν ενιαία και αποδοτικά με μειωμένες διατομές και ιδιοβάρος, λόγω της ανάπτυξης ενός δευτερεύοντος συστήματος για την παραλαβή των αξονικών τάσεων, την εξασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης αυτόματου ενεργού ελέγχου. Η βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος έγκειται στην τυπολογική και στατική διερεύνηση. Οι εξελικτικές γεωμετρίες της δομής οργανώνονται σύμφωνα με την αρχή ανάπτυξης δυο συστημάτων που συνδράμουν δυναμικά και αποκτούν μια διαδραστική σχέση. Τα κατασκευαστικά

πλεονεκτήματα των υβριδικών δομικών συστημάτων θεμελιώνονται στην εφαρμογή ενός δευτερεύοντος ραβδωτού συστήματος, το οποίο μέσω αξονικών δυνάμεων αποφορτίζει το πρωτεύον σύστημα που είναι υπεύθυνο για τις καμπτικές καταπονήσεις. Η σύνταξη της τυπολογίας των δομών παρουσιάζει επιπρόσθετα ετερογενή υβριδικά δομικά συστήματα με παραλλαγές στο μήκος των θλιβόμενων μελών. Έναυσμα αποτέλεσε η διαφοροποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ραβδωτού συστήματος, η συνδεσμολογία του με το πρωτεύον δομικό σύστημα και η δυνατότητα λειτουργίας ενός κινητικού μηχανισμού.


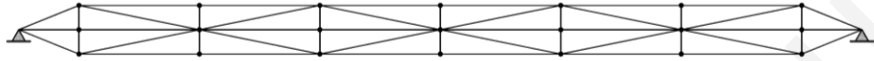





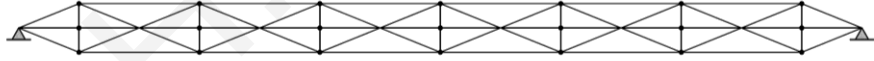



4.2 Μορφολογική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων

Η κατηγοριοποίηση εναλλακτικών τυπολογιών εστιάζεται στην αξιολόγηση υβριδικών δομικών συστημάτων και ορίζεται από τη γεωμετρική και κατασκευαστική σύνθεση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος συστήματος. Θεμέλιο λίθο σχεδιασμού αποτέλεσε η κατασκευαστική δυνατότητα της δομής να προδιαγράφει ευελιξία μετακίνησης των μελών που τη συγκροτούν στο επίπεδο. Οι στηρίξεις του πρωτεύοντος συστήματος θεωρούνται αρθρώσεις.

Εξετάζονται πέντε ζεύγη υβριδικών δομικών συστημάτων (βλ. πίνακας 4.1 και πίνακας παραρτήματος I.30), εκ των οποίων ένα σύστημα από κάθε ζεύγος διαμορφώνεται με διακυμάνσεις στο ύψος των ορθοστατών. Η στατική ανάλυση των τυπολογιών αναπτύσσεται σε οριζόντιο δυσδιάστατο επίπεδο, δεδομένου ότι τα απορρέοντα επίπεδα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν βάσει της οριζόντιας γεωμετρίας τους, τις δυσμενέστερες αποκρίσεις των εσωτερικών εντατικών μεγεθών. Η περαιτέρω υλοποίηση του επιλεγμένου στατικού συστήματος προς διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς του ακολουθεί καμπυλόμορφη τυπολογία. Η σύνθεση του πρωτεύοντος δομικού συστήματος συγκροτείται από δυο ολόσωμες δοκούς διατομής UPN 320 που βρίσκονται σε παραλληλία και είναι αρθρωτά συνδεδεμένες, οργανώνοντας συνολικό άνοιγμα 17.5 m. Το συνολικό άνοιγμα της κατασκευής καθορίζεται με βάση στατικά κριτήρια εφαρμογής ανοιγμάτων υβριδικών δομικών συστημάτων. Ο συνολικός αριθμός τμηματοποίησης των μονάδων καθορίζεται με βάση αντίστοιχα κριτήρια κινηματικής του συστήματος. Τα κατακόρυφα μέλη (ορθοστάτες) ορθογώνιας κοίλης διατομής, 85 x 40 x 3.2 mm, βρίσκονται κάθετα διατεταγμένα επί των οριζόντιων δοκών και επαναλαμβάνονται ανά

σταθερά διαστήματα, 2.5 m. Τα δευτερεύοντα καλώδια διαμέτρου 40 mm διενεργούν διπολικά στη σύνθεση της δομής αποδίδοντας δομική ακεραιότητα και εξασφάλιση λειτουργίας του μηχανισμού κίνησης μέσω των τριγωνισμών που αναπτύσσονται με τα υπόλοιπα μέλη του συστήματος. Η συνέργεια των δυο συστημάτων συνθέτει την ενοποιημένη σύσταση της δομής, χωρίς να επιτρέπει ανεξάρτητες τοπικές συμπεριφορές. Ο πίνακας 4.1 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των υβριδικών δομικών συστημάτων, τα οποία έχουν διερευνηθεί σε πρωταρχικό στάδιο ως προς τη στατική τους συμπεριφορά.

Πίνακας 4.1 Κατηγοριοποίηση υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.

Κατηγορία	Γεωμετρία
A-1-1	
B-1-1	
B-2-1	
Γ-1-1	
Γ-2-1	
Δ-1-1	
Δ-2-1	
Ε-1-1	
Ε-2-1	
ΣΤ-1-1	
ΣΤ-2-1	

Προκειμένου να παρουσιαστεί η βελτιστοποίηση της δομής εξετάστηκε η συμπεριφορά μιας αμφιαρθρωτής δοκού (A-1-1) έναντι των ποικιλόμορφων τυπολογιών (βλ. πίνακα 4.1 και πίνακας παραρτήματος I.30), οι οποίες απορρέουν από την εισαγωγή εσωτερικών αρθρώσεων στη ολόσωμη δοκό, στα σημεία τομής με τους κατακόρυφους ορθοστάτες του δευτερεύοντος συστήματος. Το εγχείρημα αποβαίνει στην ανάπτυξη του δευτερεύοντος συστήματος, επιτυγχάνοντας σε πρώτη φάση τη μείωση των καμπτικών ροπών δεδομένου του σταθερού συνολικού ανοίγματος (17.5 m).

Τα συστήματα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- α) συνεχόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη (B-1-1, B-2-1, Γ-1-1, Γ-2-1, Δ-1-1, Δ-2-1, E-1-1, E-2-1)
- β) διακοπτόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη (ΣΤ-1-1, ΣΤ-2-1)

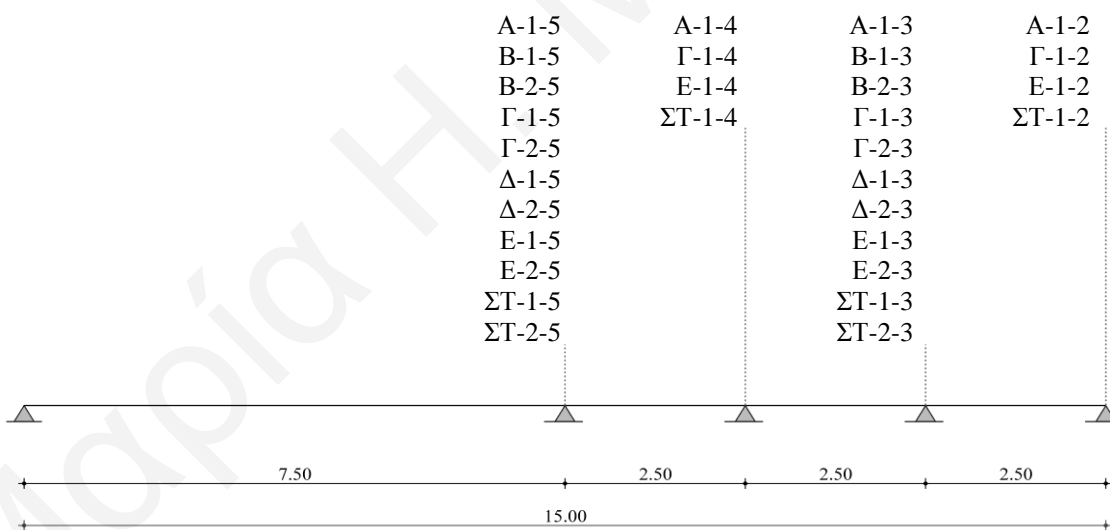
Οι κατηγορίες (B-1-1) και (B-2-1) οργανώνονται με βάση τους τριγωνισμούς που αναπτύσσονται από τα άνω και κάτω σημεία των ορθοστατών και καταλήγουν κεντρικά στους εκάστοτε γεινιάζοντες ορθοστάτες δημιουργώντας μισά τμήματα ρόμβων. Ο κατοπτρισμός των τριγωνισμών με άξονα τους ορθοστάτες συγκροτεί τις μονάδες καλωδίων. Η κατηγορία (B-2-1) διαφοροποιείται ως προς το μέγιστο γεωμετρικό ύψος του κεντρικού ορθοστάτη με 1.40 m έναντι της (B-1-1) όπου οι ορθοστάτες διατηρούνται με ύψος 1m.

Η μορφολογία των συστημάτων (Γ-1-1) και (Γ-2-1) οφείλεται στο ρυθμό επανάληψης μιας μονάδας τριγωνισμών που σχηματίζουν ρόμβο και εφαρμόζονται σε κάθε άξονα του ορθοστάτη, θέτοντας την κάθετη διαγώνια του ρόμβου ως τον ορθοστάτη. Η διαφοροποίηση του συστήματος (Γ-1-1) με μεταβολή στο γεωμετρικό ύψος των ορθοστατών (μέγιστο 1.40 m) ορίζει το σύστημα (Γ-2-1). Τα συστήματα (Δ-1-1) και (Δ-2-1) οργανώνονται με αρχή το πρωτεύον δομικό σύστημα, την προσθήκη της άνω και κάτω χορδής καλωδίων και της επανάληψης των τριγωνισμών, με εναλλάξ εφαρμογή σε κάθε ορθοστάτη. Οι τυπολογίες (E-1-1) και (E-2-1) παραπέμπουν σε χωρικά εφελκόμενες δομές μέσω των καλωδίων που στηρίζονται στο άνω σημείο των ορθοστατών και

ακολουθώς στο κάτω σημείο των επόμενων ορθοστατών. Η δομή συμπληρώνεται από δυο χορδές καλωδίων στην άνω και κάτω ζώνη του συστήματος.

Σ' εγγενή διάσταση με τα συστήματα (E-1-1) και (E-2-1) βρίσκονται τα συστήματα (ΣΤ-1-1) και (ΣΤ-2-1) με διακριτική διαφοροποίηση, την αφαίρεση των άνω και κάτω χορδών των καλωδίων. Η τυπολογία των υπόλοιπων (Δ-2-1), (E-2-1) και (ΣΤ-2-1) έγκειται στις παραλλαγές των ομογενών τους αντίστοιχων συστημάτων (Δ-1-1), (E-1-1) και (ΣΤ-1-1) με παράμετρο μεταβολής το ύψος των ορθοστατών. Η δυσδιάστατη μοντελοποίηση αφορά αρθρωτή συνδεσμολογία σε όλα τα μέλη, και τα καλώδια των συστημάτων προσομοιώνονται χωρίς να διακόπτονται στο επίπεδο της δοκού. Τα μέλη των ορθοστατών διαχωρίζονται σε δυο τμήματα και συνδέονται αρθρωτά με τις οριζόντιες συνεχόμενες δοκούς σε όλα τα συστήματα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε τυπολογίας προσομοιώνονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, SAP2000, και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 και στον πίνακα 4.2.





Πίνακας 4.2 Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων.



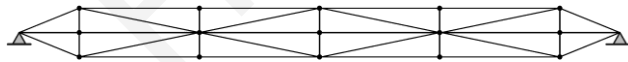

Αξίζει ν' αναφερθεί ότι τα συστήματα (B-1-3), (B-1-4), (B-2-2), (B-2-4), (Γ-2-2), (Γ-2-4), (Δ-1-2), (Δ-1-4), (Δ-2-2), (Δ-2-4), (E-2-2), (E-2-4), (ΣΤ-2-2) και (ΣΤ-2-4) δεν εξετάζονται ως προς τη στατική τους συμπεριφορά, διότι η μείωση του συνολικού ανοίγματος αποδίδει μη συμμετρικές γεωμετρίες. Ο γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων (βλ. πίνακα 4.1) παρουσιάζει τα συστήματα που εξετάζονται σύμφωνα με το συνολικό τους άνοιγμα. Οι πίνακες 4.2 έως 4.13 απεικονίζουν τη γεωμετρία της κάθε

ομάδας συστημάτων δεδομένης της μείωσης του συνολικού ανοίγματος. Η διαφορετική προσέγγιση της προσομοίωσης κατηγοριοποίησε τις δομές σε διακοπτόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη και ορθοστάτη σε δοκό - δοκό σε ορθοστάτη.

Πίνακας 4.3 Γεωμετρία συστημάτων (A-1-2), (A-1-3), (A-1-4) και (A-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
A-1-2	
A-1-3	
A-1-4	
A-1-5	

Πίνακας 4.4 Γεωμετρία συστημάτων (B-1-3) και (B-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
B-1-2	
B-1-3	
B-1-4	
B-1-5	

Πίνακας 4.5 Γεωμετρία συστημάτων (B-2-3) και (B-2-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
B-2-2	
B-2-3	
B-2-4	
B-2-5	

Πίνακας 4.6 Γεωμετρία συστημάτων (Γ-1-2), (Γ-1-3), (Γ-1-4) και (Γ-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
Γ-1-2	
Γ-1-3	
Γ-1-4	
Γ-1-5	

Πίνακας 4.7 Γεωμετρία συστημάτων (Γ-2-3) και (Γ-2-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
Γ-2-2	
Γ-2-3	
Γ-2-4	
Γ-2-5	

Πίνακας 4.8 Γεωμετρία συστημάτων (Δ-1-3) και (Δ-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
Δ-1-2	
Δ-1-3	
Δ-1-4	
Δ-1-5	


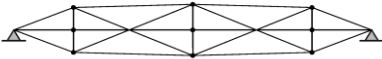
Πίνακας 4.9 Γεωμετρία συστημάτων (Δ-2-3) και (Δ-2-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
Δ-2-2	
Δ-2-3	
Δ-2-4	
Δ-2-5	




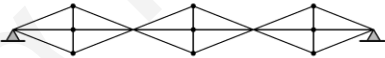
Πίνακας 4.10 Γεωμετρία συστημάτων (E-1-2), (E-1-3), (E-1-4) και (E-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
E-1-2	
E-1-3	
E-1-4	
E-1-5	

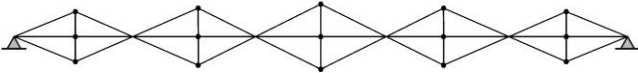

Πίνακας 4.11 Γεωμετρία συστημάτων (E-2-3) και (E-2-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
E-2-2	
E-2-3	
E-2-4	
E-2-5	

Πίνακας 4.12 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ-1-2), (ΣΤ-1-3), (ΣΤ-1-4) και (ΣΤ-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ-1-2	
ΣΤ-1-3	
ΣΤ-1-4	
ΣΤ-1-5	

Πίνακας 4.13 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ-2-3) και (ΣΤ-2-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ-2-2	
ΣΤ-2-3	
ΣΤ-2-4	
ΣΤ-2-5	

4.3 Στατική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων

Ο έλεγχος της στατικής συμπεριφοράς των δομικών συστημάτων προσδιόρισε το ποσό κατανομής των εσωτερικών εντατικών μεγεθών (M: καμπτικές ροπές, N: αξονικές δυνάμεις, Q: τέμνουσες δυνάμεις) στα μέλη του φέροντος συστήματος και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις που προκύπτουν από την ασκούμενη κατακόρυφη φόρτιση. Η γεωμετρία και οι ιδιότητες του δομικού συστήματος αποτέλεσαν κριτήρια για την αξιόπιστη προσομοίωση στο λογισμικό πρόγραμμα, SAP2000, και τη δυνατότητα διαστασιολόγησης των μελών σύμφωνα με τη μη γραμμική ανάλυση και τα πρότυπα του Ευρωκώδικα 3. Η αρχή των αναπτυσσόμενων τάσεων καταπόνησης στον ελαστικό τομέα καθόρισε την επιλογή των διατομών. Οι οριζόντιες δοκοί υπόκεινται σε εξωτερική κατακόρυφη ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 2.5 kN/m. Τα μέλη που διαστασιολογήθηκαν διακρίνονται στις οριζόντιες δοκούς, κατακόρυφους ορθοστάτες και καλωδιωτά στοιχεία. Τα καλωδιωτά στοιχεία έχουν προσομοιωθεί ως ραβδωτά στοιχεία με μηδενικό όριο θλίψης (frame elements με zero compression limit). Τ' αποτελέσματα που προκύπτουν από τη φόρτιση των δομικών συστημάτων αναλύονται και αξιολογούνται συγκριτικά ως προς τις μέγιστες ροπές κάμψης και τις αξονικές δυνάμεις που παρουσιάζουν οι οριζόντιες δοκοί και τα δευτερεύοντα στοιχεία σύμφωνα με τη μορφολογία του εκάστοτε συστήματος, τις συνθήκες σύνδεσης των μελών και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (βλ. πίνακες παραρτήματος I.32 - I.41).

Εξετάζοντας συγκριτικά τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν στη στατική ανάλυση των υβριδικών δομικών συστημάτων (B-1-1), (B-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (E-1-1), (E-2-1), (ΣΤ-1-1) και (ΣΤ-2-1) με την αμφιαρθρωτή δοκό (A-1-1), δίδεται έμφαση στην ανάλυση ποσοστών των κριτηρίων συμπεριφοράς όσον αφορά τις τέμνουσες δυνάμεις, τις καμπτικές ροπές και τις μετατοπίσεις. Γενικότερα, διαφαίνεται μια σημαντική μείωση της τάξης του 85.71% στα συστήματα (B-1-1), (B-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (E-1-1) και (E-2-1), με κριτήριο τις τέμνουσες δυνάμεις έναντι της αμφιαρθρωτής δοκού (A-1-1). Αντιθέτως, τα συστήματα (ΣΤ-1-1) και (ΣΤ-2-1) παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση της τάξεως του 273.22 και 276.33% αντίστοιχα. Μείωση των καμπτικών ροπών της τάξεως του 98.04% παρατηρείται στα συστήματα: (B-1-1), (B-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (E-1-1) και (E-2-1). Μικρή αύξηση της τάξεως του

4.49% σημειώθηκε στο σύστημα (ΣΤ-1-1) και 5.70% στο σύστημα (ΣΤ-2-1). Είναι σημαντικό ν' αναφερθεί ότι παρατηρείται μείωση σχεδόν σε όλα τα μεικτά συστήματα ανάλυσης με παράμετρο τη μετατόπιση. Στην περίπτωση του συστήματος (Β-1-1) παρατηρείται μείωση της τάξεως του 26.61 και 74.04% στο σύστημα (Β-2-1), αύξηση της τάξεως του 10.28% στο σύστημα (Γ-1-1), μείωση της τάξεως του 49.77% στο σύστημα (Γ-2-1), 36.83% στο σύστημα (Δ-1-1), 76.08% στο σύστημα (Δ-2-1), 31.23% στο σύστημα (Ε-1-1), και 75.99% στο σύστημα (Ε-2-1), αύξηση της τάξεως του 3.77% στο σύστημα (ΣΤ-1-1) και μείωση της τάξεως του 1.39% στο σύστημα (ΣΤ-2-1).

Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται μειωμένες αξονικές δυνάμεις και μετατοπίσεις στα συστήματα με αυξημένο το γεωμετρικό ύψος των ορθοστατών (Β-2-1), (Γ-2-1), (Δ-2-1), και (Ε-2-1). Οι αντίστοιχες σχετικές μειώσεις οφείλονται κυρίως στη διατήρηση της αναλογίας του γεωμετρικού ύψους και του συνολικού ανοίγματος των συστημάτων (1/12). Τα συστήματα (Β-1-1), (Β-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (Ε-1-1) και (Ε-2-1) ομαδοποιούνται επειδή παρουσιάζουν σταθερή και ομοιογενή συμπεριφορά στις ροπές κάμψης και διατμητικές τάσεις, ανεξαρτήτως των κριτηρίων μείωσης του συνολικού ανοίγματος και της αύξησης του γεωμετρικού ύψους των ορθοστατών. Μέσω της ανάλυσης των εσωτερικών εντατικών μεγεθών διαπιστώνεται ότι το δευτερεύον σύστημα διενεργεί ενισχυτικά στο πρωτεύον σύστημα αυξάνοντας την ακαμψία του. Αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει το σύστημα (ΣΤ-2-1) με αυξανόμενα ποσοστά ροπών κάμψης και διατμητικών τάσεων καθώς αυξάνεται το γεωμετρικό ύψος των ορθοστατών έναντι των υπολοίπων (Β-1-1), (Β-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (Ε-1-1) και (Ε-2-1). Κυρίως οφείλεται στην ανάπτυξη της τυπολογίας του δευτερεύοντος συστήματος, το οποίο δεν λειτουργεί αποδοτικά στη μείωση των ροπών κάμψης. Το δευτερεύον σύστημα συμπιέζει τις οριζόντιες δοκούς στο κέντρο της μάζας τους, μ' αποτέλεσμα τη συγκέντρωση της μέγιστης ροπής κάμψης κεντρικά της δοκού. Σ' αντίθεση το σύστημα (ΣΤ-1-1) τείνει να διενεργεί με μειωμένη ροπή κάμψης και αυξημένες μετατοπίσεις έναντι του (ΣΤ-2-1), λόγω του μειωμένου στατικού ύψους των ορθοστατών. Κατασκευαστική ιδιαιτερότητα παρουσιάζουν τα συστήματα (Β-1-1), (Β-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (Ε-1-1) και (Ε-2-1) κυρίως επειδή η τυπολογία που συνθέτει τη δομή διενεργεί ανομοιόμορφα στους κατακόρυφους ορθοστάτες ως προς τις αξονικές τάσεις που αναπτύσσονται, σύμφωνα με

τη μείωση του ανοίγματος και την αύξηση του γεωμετρικού ύψους των ορθοστατών. Σ' αντίθετη διάσταση βρίσκονται τα συστήματα (Γ-1-1), (Γ-2-1), (ΣΤ-1-1) και (ΣΤ-2-1) που παρουσιάζουν μειωμένα ποσοστά καθώς μειώνεται το άνοιγμα και αυξάνεται το γεωμετρικό ύψος των ορθοστατών.

Τα υβριδικά συστήματα ομαδοποιούνται σε τρεις ενότητες:

- α) Ολόσωμος φορέας όπου διενεργεί ως αμφιαρθρωτή δοκός (Α-1-1)
- β) Δομικά συστήματα με αποδοτική συμπεριφορά του δευτερεύοντος συστήματος βελτιστοποιώντας τη δομή των αρθρωτά συνδεδεμένων δοκών (Β-1-1), (Β-2-1), (Γ-1-1), (Γ-2-1), (Δ-1-1), (Δ-2-1), (Ε-1-1) και (Ε-2-1)
- γ) Δομικά συστήματα που δεν λειτουργούν αποδοτικά και δεν προσφέρουν βελτιστοποίηση της δομής έναντι της αμφιαρθρωτής δοκού, διότι οι εσωτερικές αρθρώσεις σε συνδυασμό με την τυπολογία του καλωδιωτού συστήματος καταπονούν το κέντρο μάζας της οριζόντιας δοκού αυξάνοντας αντίστοιχα τις ροπές κάμψης.

Κριτήρια επιλογής ενός υβριδικού συστήματος αποβαίνουν στην ενιαία στατική συμπεριφορά, στην αποδοτική στατική λειτουργία του δευτερεύοντος συστήματος ενίσχυσης και στην εξασφάλιση της δομικής ακεραιότητας, καθώς ενεργοποιούνται οι ενδεχόμενες μεταβολές. Απαραίτητο συστατικό αποτελεί η ευνοϊκή συνέργεια των δυο συστημάτων για την ανάπτυξη της βέλτιστης τυπολογίας. Η ενσωμάτωση του δευτερεύοντος συστήματος θα πρέπει να προτάσσει ακαμψία, μείωση των ροπών κάμψης και του ιδιοβάρους και να εξασφαλίζει τις ιδιότητες των υβριδικών δομικών συστημάτων.

4.4 Μορφολογική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων

Σε συνέχεια της πρώτης φάσης μορφολογικής και στατικής ανάλυσης, η κατεύθυνση της δεύτερης φάσης ανάγεται στη βελτιστοποίηση ενός δομικού συστήματος (ΣΤ1-1-1) και είναι βασισμένη στην εγγενή προσομοίωση του πιθανού κινητικού μηχανισμού. Η επιλογή του συστήματος (ΣΤ1-1-1) έγκειται στην καθαρότητα της δομής διατηρώντας δυο σειρές καλωδίων που συγκροτούν το δευτερεύον δομικό σύστημα, στην αποτελεσματική χρήση του δευτερεύοντος συστήματος για στατική ευστάθεια και στην ικανότητα να

μετασηματίζει τη δομή. Αντικείμενο της έρευνας είναι η στατική ανάλυση δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων για τη δομική συμπεριφορά πέντε υβριδικών δομικών συστημάτων (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), (ΣΤ4-1-1) και (ΣΤ5-1-1) (βλ. πίνακα 4.14 και πίνακα παραρτήματος Ι.42), όπου βασική διαφοροποίηση αποτελεί η εισαγωγή εσωτερικών αρθρώσεων στη δοκό, στα σημεία τομής με τους ορθοστάτες του δευτερεύοντος συστήματος (βλ. πίνακα 4.14).

Η διαφορετική προσέγγιση της προσομοίωσης κατηγοριοποίησε τις δομές σε:

- α) συνεχόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη (ΣΤ1-1-1)
- β) διακοπτόμενα καλώδια από ορθοστάτη στο μέσο της οριζόντιας δοκού και συνευθειακά από τη δοκό στον ορθοστάτη (ΣΤ2-1-1)
- γ) εφαρμογή μηχανισμού περιστρεφόμενου δίσκου πάνω σε κάθε ορθοστάτη με συνεχόμενα καλώδια (ΣΤ3-1-1)
- δ) εφαρμογή μηχανισμού περιστρεφόμενου δίσκου πάνω σε κάθε ορθοστάτη με διακοπτόμενα καλώδια αρθρωτά συνδεδεμένα στη δοκό (ΣΤ4-1-1)
- ε) εφαρμογή μηχανισμού περιστρεφόμενου δίσκου στο μέσο της κάθε οριζόντιας δοκού (ΣΤ5-1-1).

Η ιδιαιτερότητα του μηχανισμού του περιστρεφόμενου δίσκου έγκειται στην αξιόπιστη προσομοίωση που παρουσιάζει τρεις βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο ανάλυσης. Η κατασκευαστική υλοποίηση του κινητικού πρωτοτύπου θα πρέπει να ενσωματώνει συστήματα μετάδοσης της κίνησης των καλωδίων. Τα συστήματα διατηρούν σταθερό στατικό ύψος των ορθοστατών, 1m, και οι διατομές που εφαρμόστηκαν είναι οριζόντιες δοκοί, UPN 320, κατακόρυφοι ορθοστάτες ορθογώνιας διατομής 85 x 40 x 3.2 mm και καλωδιωτά στοιχεία, διαμέτρου 40 mm. Οι περιστρεφόμενοι δίσκοι μοντελοποιήθηκαν βάσει της σύνθεσης δυο μικρού μεγέθους άκαμπτων μελών. Οι στηρίξεις των συστημάτων και η συνδεσμολογία των πρωτευόντων και δευτερευόντων μελών ορίζονται ως αρθρώσεις. Η παραμετρική ανάλυση εξελίσσεται με κριτήριο μεταβολής το άνοιγμα του δομικού συστήματος προκειμένου να εξεταστούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις (βλ. πίνακες

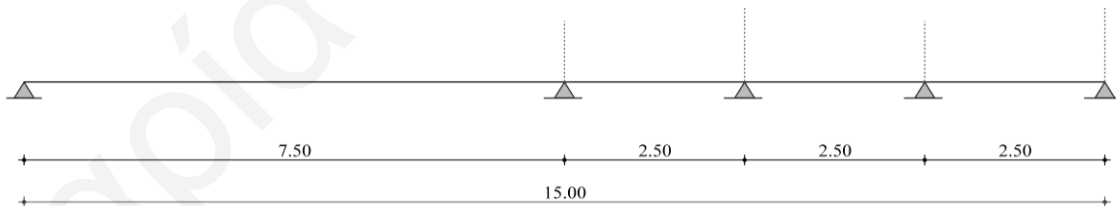
4.16-4.20). Ο γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων (βλ. πίνακα 4.15) παρουσιάζει τα συστήματα που εξετάζονται σύμφωνα με τη μείωση του συνολικού ανοίγματος.

Πίνακας 4.14 Κατηγοριοποίηση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ1-1-1	
ΣΤ2-1-1	
ΣΤ3-1-1	
ΣΤ4-1-1	
ΣΤ5-1-1	

Πίνακας 4.15 Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων.

ΣΤ1-1-5	ΣΤ1-1-4	ΣΤ1-1-3	ΣΤ1-1-2
ΣΤ2-1-5	ΣΤ2-1-4	ΣΤ2-1-3	ΣΤ2-1-2
ΣΤ3-1-5	ΣΤ3-1-4	ΣΤ3-1-3	ΣΤ3-1-2
ΣΤ4-1-5	ΣΤ4-1-4	ΣΤ4-1-3	ΣΤ4-1-2
ΣΤ5-1-5	ΣΤ5-1-4	ΣΤ5-1-3	ΣΤ5-1-2



Πίνακας 4.16 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ1-1-2), (ΣΤ1-1-3), (ΣΤ1-1-4) και (ΣΤ1-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ1-1-2	
ΣΤ1-1-3	
ΣΤ1-1-4	
ΣΤ1-1-5	

Πίνακας 4.17 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ2-1-2), (ΣΤ2-1-3), (ΣΤ2-1-4) και (ΣΤ2-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ2-1-2	
ΣΤ2-1-3	
ΣΤ2-1-4	
ΣΤ2-1-5	

Πίνακας 4.18 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3-1-2), (ΣΤ3-1-3), (ΣΤ3-1-4) και (ΣΤ3-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3-1-2	
ΣΤ3-1-3	
ΣΤ3-1-4	
ΣΤ3-1-5	

Πίνακας 4.19 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ4-1-2), (ΣΤ4-1-3), (ΣΤ4-1-4) και (ΣΤ4-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ4-1-2	
ΣΤ4-1-3	
ΣΤ4-1-4	
ΣΤ4-1-5	

Πίνακας 4.20 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ5-1-2), (ΣΤ5-1-3), (ΣΤ5-1-4) και (ΣΤ5-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ5-1-2	
ΣΤ5-1-3	
ΣΤ5-1-4	
ΣΤ5-1-5	

4.5 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων

Αξιοποιώντας τ' αποτελέσματα του αντικείμενου ανάλυσης παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην τυπολογία προσομοίωσης των υβριδικών κινητικών δομικών συστημάτων. Η σύνταξη της δομής του κάθε συστήματος αξιολογείται με στόχο την ανάληψη ξεκάθαρης άποψης για την επιλογή ενός δομικού συστήματος που προσεγγίζει την ανάλογη πρακτική εφαρμογή του πρωτότυπου.

Τα μέγιστα ποσά αξονικών δυνάμεων, τεμνουσών δυνάμεων, καμπτικών ροπών και μετατοπίσεων (βλ. πίνακες παραρτήματος I.43 - I.47) των κινητικών υβριδικών συστημάτων (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), και (ΣΤ4-1-1) αξιολογούνται συγκριτικά με την αμφιαρθρωτή δοκό (Α-1-1) και το σύστημα αρθρώσεων (ΣΤ-1-1). Το σύστημα (ΣΤ5-1-1) αποτελεί κινηματικό μηχανισμό και δεν εξετάζεται συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα αρθρώσεων.

Συγκρίνοντας το σύστημα (Α-1-1) με τα κινητικά υβριδικά συστήματα παρατηρούνται αυξανόμενα ποσοστά τεμνουσών δυνάμεων στο σύστημα (ΣΤ1-1-1) της τάξεως του 181.26%, στο σύστημα (ΣΤ2-1-1) της τάξεως του 273.45%, στα συστήματα (ΣΤ3-1-1) και (ΣΤ4-1-1) της τάξεως του 274.64%. Τα συστήματα (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), και (ΣΤ4-1-1) σε σχέση με την αμφιαρθρωτή δοκό (Α-1-1), εμφανίζουν μικρή αύξηση στις καμπτικές ροπές εκτός από το σύστημα (ΣΤ1-1-1) όπου παρατηρείται μείωση της τάξεως του 21.60%. Στο σύστημα (ΣΤ2-1-1) παρατηρείται αύξηση της τάξεως του 4.76%, στο σύστημα (ΣΤ3-1-1) της τάξεως του 5.08% και στο σύστημα (ΣΤ4-1-1) της τάξεως του 5.11%. Τα συστήματα (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), και (ΣΤ4-1-1) παρουσιάζουν σχετική αύξηση των μετατοπίσεων έναντι της αμφιαρθρωτής δοκού (Α-1-1). Το σύστημα (ΣΤ1-1-1) της τάξεως του 7.55%, το σύστημα (ΣΤ2-1-1) της τάξεως του 7.09%, τα συστήματα (ΣΤ3-1-1) και (ΣΤ4-1-1) αντίστοιχα της τάξεως του 5.34 και 1.69%.

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεμνουσών δυνάμεων και καμπτικών ροπών των κινητικών υβριδικών συστημάτων (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), και (ΣΤ4-1-1) σε σχέση με το σύστημα (ΣΤ-1-1). Η σύγκριση μεταξύ των συστημάτων όσον αφορά τις καμπτικές ροπές αποδίδει ότι το σύστημα (ΣΤ1-1-1) παρουσιάζει μείωση της τάξεως του 25.11%. Ελάχιστο ποσοστό αύξησης των καμπτικών ροπών παρατηρείται στα συστήματα (ΣΤ2-1-1) της τάξεως του 0.06%, (ΣΤ3-1-1) και (ΣΤ4-1-1) αντίστοιχα της τάξεως του 0.36 και 0.38%. Μείωση των τεμνουσών δυνάμεων εκτιμάται στο σύστημα (ΣΤ1-1-1) της τάξεως του 24.60% συγκριτικά με το σύστημα (ΣΤ-1-1). Οι τέμνουσες δυνάμεις αυξάνονται σχετικά με ελάχιστο ποσοστό στο σύστημα (ΣΤ2-1-1) της τάξεως του 2.24%, στα συστήματα (ΣΤ3-1-1) και (ΣΤ4-1-1) της τάξεως του 0.38%.

Συγκρίνοντας με το σύστημα (ΣΤ-1-1) όσον αφορά τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο δευτερεύον καλωδιωτό σύστημα παρατηρείται αύξηση του ποσοστού στα συστήματα (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1) και (ΣΤ4-1-1) αντίστοιχα της τάξεως του 0.03, 0.06 και 6.26%. Το σύστημα (ΣΤ3-1-1) παρουσιάζει μείωση της τάξεως του 6.3%. Οι κατακόρυφοι ορθοστάτες εμφανίζουν μείωση των αξονικών δυνάμεων της τάξεως του 0.13 και 0.01% αντίστοιχα των συστημάτων (ΣΤ1-1-1) και (ΣΤ3-1-1), και αύξηση της τάξεως του 0.06 και 0.04% αντίστοιχα στα συστήματα (ΣΤ2-1-1) και (ΣΤ4-1-1). Μειωμένη μετατόπιση παρατηρείται στο σύστημα (ΣΤ4-1-1) έναντι του συστήματος (ΣΤ-1-1) της τάξεως του 2.5%. Αντίθετα τα συστήματα (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1) και (ΣΤ3-1-1) εμφανίζουν αντίστοιχα αύξηση των μετατοπίσεων της τάξεως του 3.12, 2.68 και 1%.

Αξίζει να αξιολογηθούν τα εσωτερικά εντατικά μεγέθη των συστημάτων (ΣΤ1-1-1), (ΣΤ2-1-1) και (ΣΤ4-1-1) με τα εσωτερικά εντατικά μεγέθη του συστήματος (ΣΤ3-1-1). Σχετική μείωση των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών παρατηρείται αντίστοιχα της τάξεως του 24.93 και 25.38%, μικρό ποσοστό αύξησης των εφελκυστικών δυνάμεων παρατηρείται στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 6.70% και των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες της τάξεως του 0.57%. Το ποσοστό των μετατοπίσεων εκτιμάται με αύξηση της τάξεως του 2.10%. Συγκρίνοντας το σύστημα (ΣΤ2-1-1) και (ΣΤ3-1-1) παρατηρείται μείωση στις τέμνουσες δυνάμεις της τάξεως του 6.32% και στις καμπτικές ροπές της τάξεως του 0.30%, αύξηση στις εφελκυστικές δυνάμεις του καλωδιωτού συστήματος κατά 6.79% και των θλιπτικών δυνάμεων κατά 0.38%. Ελάχιστο ποσοστό αύξησης παρατηρείται στις μετατοπίσεις στο σύστημα (ΣΤ2-1-1) της τάξεως του 1.68%. Το σύστημα (ΣΤ4-1-1) ως προς το σύστημα (ΣΤ3-1-1) δεν παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις. Παρατηρείται αύξηση στις καμπτικές ροπές της τάξεως του 0.02%, αύξηση στις εφελκυστικές δυνάμεις της τάξεως του 0.03% και στις θλιπτικές δυνάμεις κατά 0.05%, ενώ οι μετατοπίσεις εμφανίζουν μείωση της τάξεως του 3.46%.

Διαφαίνεται μια γενικότερη σταθερή μείωση των καμπτικών καταπονήσεων και διατμητικών τάσεων που φορτίζουν τις οριζόντιες δοκούς, των αξονικών τάσεων που ασκούνται στους ορθοστάτες και στα καλωδιωτά στοιχεία σε σχέση με τη μείωση του ανοίγματος κάλυψης σε όλα τα συστήματα (ΣΤ-1-1), (ΣΤ2-1-1), (ΣΤ3-1-1), (ΣΤ4-1-1) και (ΣΤ5-1-1). Παράλληλα, το σύστημα (ΣΤ4-1-1) παρουσιάζει τις μικρότερες μετατοπίσεις

έναντι των υπολοίπων συστημάτων. Δραστική αύξηση των παραμορφώσεων παρουσιάζει το σύστημα (ΣΤ5-1-1) με την εν λόγω εφαρμογή των περιστρεφόμενων δίσκων στα μέσα των οριζόντιων δοκών όπου το σύστημα αποδίδει μειωμένες αξονικές, καμπτικές και διατμητικές τάσεις.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα επιλεγμένα δομικά συστήματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4.21.

Πίνακας 4.21 Μέγιστες τιμές των επιλεγμένων δομικών συστημάτων.

Τύπος	Μέλος	N_{max} [kN]	Q_{max} [kN]	M_{max} [kNm]	f [cm]
A-1-1	Αμφιέριστη Δοκός	-	29.61	129.42	15.37
ΣΤ-1-1	Δοκοί	112.91	110.51	135.49	16.56
	Ορθοστάτες	221.21			
	Καλώδια	298.01			
ΣΤ1-1-1	Δοκοί	90.30	110.26	135.20	16.53
	Ορθοστάτες	220.91			
	Καλώδια	297.92			
ΣΤ3-1-1	Δοκοί	104.49	110.93	135.99	16.19
	Ορθοστάτες	222.19			
	Καλώδια	279.22			

4.6 Μορφολογική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων με βάση το στατικό ύψος του ορθοστάτη

Η ερευνητική διαδικασία βελτιστοποίησης της δομής εξελίσσεται με βάση την επεξεργασία της τυπολογίας του συστήματος (ΣΤ-1-1) με περιστρεφόμενο δίσκο. Το γεωμετρικό ύψος των ορθοστατών αποτελεί παράμετρο για το σχεδιασμό και τη λειτουργία του υβριδικού κινητικού συστήματος με σκοπό τη μείωση των καμπτικών ροπών και αντίστοιχων μετατοπίσεων του πρωτεύοντος συστήματος.

Τα δομικά συστήματα που εξετάζονται είναι επτά (βλ. πίνακας 4.22, πίνακας παραρτήματος Ι.47), και στηρίζονται στη μοντελοποίηση διαφορετικών τυπολογιών με βάση την οργάνωση ενός εννιαμελούς συστήματος που διακρίνεται σε οριζόντιες δοκούς,

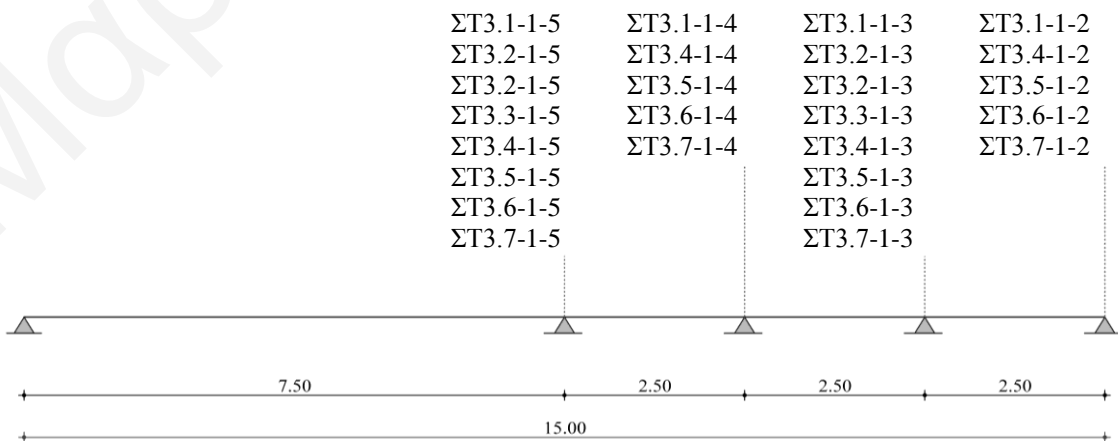
κατακόρυφους ορθοστάτες και καλωδιωτά στοιχεία. Εσωτερικές αρθρώσεις ενοποιούν τις οριζόντιες δοκούς και τους κατακόρυφους ορθοστάτες. Το συνολικό άνοιγμα του συστήματος είναι 17.5 m ενώ η κάθε δοκός έχει μήκος 2.5 m εκτός από τα ακραία μέλη, με μήκος 1.25 m. Η πρώτη εφαρμογή αφορά ένα ξεκάθαρο ρυθμό επανάληψης του στατικού ύψους των ορθοστατών από 0.5 σε 1 m στην άνω ζώνη της δομής (ΣΤ3.1-1-1). Το δεύτερο σε σειρά σύστημα (ΣΤ3.2-1-1) εξελίσσεται με μια διαφοροποίηση έναντι του πρώτου, διατηρώντας το στατικό ύψος, 1 m, εναλλάξ των ορθοστατών στην άνω ζώνη της δομής. Η επέκταση του στατικού ύψους σε 1 m βρίσκει εφαρμογή και στην κάτω ζώνη της δομής μέσω του συστήματος (ΣΤ3.3-1-1).

Η δυνατότητα του δομικού συστήματος ν' ανταποκρίνεται στα εσωτερικά εντατικά μεγέθη και να ενισχύει στατικά τη δομή παρουσιάζεται στα συστήματα (ΣΤ3.4-1-1) και (ΣΤ3.5-1-1). Οι τυπολογίες των συστημάτων (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1) διατηρούν σταθερό γεωμετρικό ύψος, 2 m, αυξημένο έναντι των υπολοίπων. Συνεχόμενα καλώδια εφαρμόζονται στα συστήματα (ΣΤ3.1-1-1), (ΣΤ3.2-1-1), (ΣΤ3.3-1-1), (ΣΤ3.5-1-1) και (ΣΤ3.6-1-1) ενώ διακοπτόμενα καλώδια εφαρμόζονται στα συστήματα (ΣΤ3.4-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1). Η προσομοίωση στο υπολογιστικό πρόγραμμα ανάλυσης διαφέρει στις δυο τυπολογίες μέσω των εσωτερικών αρθρώσεων που συνδέουν τις οριζόντιες δοκούς με τα καλώδια, οι οποίες εντάσσονται στο σύστημα (ΣΤ3.7-1-1). Ο γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων (βλ. πίνακας 4.23) οριοθετεί τις ομάδες συστημάτων που εξετάζονται σύμφωνα με τη μείωση του συνολικού ανοίγματος. Οι υπόλοιποι πίνακες 4.24 - 4.30 παρουσιάζουν τις γεωμετρίες της κάθε ομάδας συστημάτων βάσει της μείωσης του συνολικού ανοίγματος.

Πίνακας 4.22 Κατηγοριοποίηση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων σύμφωνα με τη μορφολογία τους.

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.1-1-1	
ΣΤ3.2-1-1	
ΣΤ3.3-1-1	
ΣΤ3.4-1-1	
ΣΤ3.5-1-1	
ΣΤ3.6-1-1	
ΣΤ3.7-1-1	

Πίνακας 4.23 Γενικός πίνακας κατάταξης των συστημάτων.



Η διαφορετική προσέγγιση της προσομοίωσης κατηγοριοποίησε τις δομές σε:

- α) συνεχόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη (ΣΤ3.1-1-1, ΣΤ3.2-1-1, ΣΤ3.3-1-1, ΣΤ3.5-1-1, ΣΤ3.6-1-1)
- β) διακοπτόμενα καλώδια από ορθοστάτη σε ορθοστάτη (ΣΤ3.4-1-1, ΣΤ3.7-1-1)

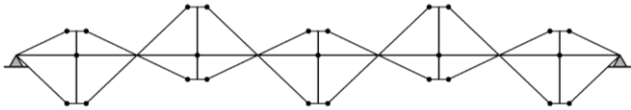
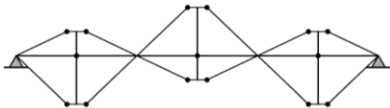
Πίνακας 4.24 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.1-1-2), (ΣΤ3.1-1-3), (ΣΤ3.1-1-4) και (ΣΤ3.1-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.1-1-2	
ΣΤ3.1-1-3	
ΣΤ3.1-1-4	
ΣΤ3.1-1-5	


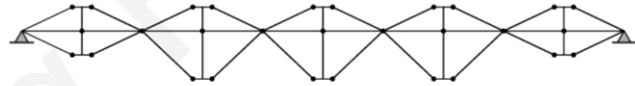

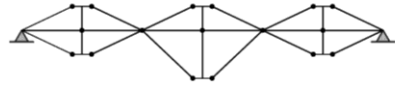
Πίνακας 4.25 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.2-1-3) και (ΣΤ3.2-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.2-1-2	
ΣΤ3.2-1-3	
ΣΤ3.2-1-4	
ΣΤ3.2-1-5	

Πίνακας 4.26 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.3-1-3) και (ΣΤ3.3-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.3-1-2	
ΣΤ3.3-1-3	
ΣΤ3.3-1-4	
ΣΤ3.3-1-5	

Πίνακας 4.27 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.4-1-2), (ΣΤ3.4-1-3), (ΣΤ3.4-1-4) και (ΣΤ3.4-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.4-1-2	
ΣΤ3.4-1-3	
ΣΤ3.4-1-4	
ΣΤ3.4-1-5	

Πίνακας 4.28 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.5-1-2), (ΣΤ3.5-1-3), (ΣΤ3.5-1-4) και (ΣΤ3.5-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.5-1-2	
ΣΤ3.5-1-3	
ΣΤ3.5-1-4	
ΣΤ3.5-1-5	

Πίνακας 4.29 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.6-1-2), (ΣΤ3.6-1-3), (ΣΤ3.6-1-4) και (ΣΤ3.6-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.6-1-2	
ΣΤ3.6-1-3	
ΣΤ3.6-1-4	
ΣΤ3.6-1-5	

Πίνακας 4.30 Γεωμετρία συστημάτων (ΣΤ3.7-1-2), (ΣΤ3.7-1-3), (ΣΤ3.7-1-4) και (ΣΤ3.7-1-5).

Κατηγορία	Γεωμετρία
ΣΤ3.7-1-2	
ΣΤ3.7-1-3	
ΣΤ3.7-1-4	
ΣΤ3.7-1-5	

4.7 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων με βάση το στατικό ύψος του ορθοστάτη

Τα κινητικά υβριδικά συστήματα με βάση το γεωμετρικό ύψος του ορθοστάτη συγκρίνονται με τ' αντίστοιχα συστήματα αρθρώσεων (ΣΤ-1-1), (ΣΤ1-1-1) και (ΣΤ3-1-1) και με την αμφιαρθρωτή δοκό (Α-1-1) (βλ. πίνακες παραρτήματος Ι.48 - Ι.51). Τα συστήματα (ΣΤ3.1-1-1), (ΣΤ3.2-1-1) και (ΣΤ3.5-1-1) αποτελούν κινηματικό μηχανισμό και δεν αξιολογούνται συγκριτικά.

Συγκριτικά με την αμφιαρθρωτή δοκό (Α-1-1) αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών παρατηρείται στο σύστημα (ΣΤ3.1-1-1) αντίστοιχα της τάξεως του 278.05 και 6.85%, όπως επίσης μείωση στις μετατοπίσεις της τάξεως του 2.41%. Αύξηση παρουσιάζεται στις τέμνουσες δυνάμεις της τάξεως του 278.59%, στις καμπτικές ροπές της τάξεως του 6.23% και στις μετατοπίσεις της τάξεως του 6.90% στο σύστημα (ΣΤ3.4-1-1) έναντι της αμφιαρθρωτής δοκού (Α-1-1). Σχετικά με την αμφιαρθρωτή δοκό οι τέμνουσες δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές των συστημάτων (ΣΤ3.4-1-1) και (ΣΤ2-1-1) εμφανίζουν αύξηση της τάξεως του 73.56% και 5.80% αντίστοιχα, ενώ οι μετατοπίσεις σημειώνουν μείωση της τάξεως του 32.79%. Παραβάλλοντας το σύστημα (ΣΤ3.6-1-1) με την αμφιαρθρωτή δοκό παρουσιάζεται αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του

281.29% και των καμπτικών ροπών της τάξεως του 7%, ενώ μείωση της τάξεως του 19.32% χαρακτηρίζει τις μετατοπίσεις. Το σύστημα (ΣΤ3.7-1-1) παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά στις τέμνουσες και καμπτικές ροπές με το σύστημα (ΣΤ3.6-1-1) ενώ διαφοροποιείται στις μετατοπίσεις με ποσοστό μείωσης 11.39%.

Αξιολογώντας τ' αποτελέσματα του συστήματος (ΣΤ3.3-1-1) και του συστήματος (ΣΤ-1-1) παρατηρείται μικρή αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του 1.29% και των καμπτικών ροπών της τάξεως του 1.31%, αύξηση των αξονικών δυνάμεων στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 5.42% και στους κατακόρυφους ορθοστάτες της τάξεως του 3.01%. Η συμπεριφορά του συστήματος όσον αφορά τις μετατοπίσεις παρουσιάζει μείωση της τάξεως του 6.43%. Συγκριτικά του συστήματος (ΣΤ3.4-1-1) με το σύστημα (ΣΤ-1-1) εκτιμάται μικρή αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του 1.44% και των καμπτικών ροπών της τάξεως του 1.46%, μείωση των αξονικών δυνάμεων στο δευτερεύον καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 42.55%, μικρή αύξηση θλιπτικών δυνάμεων στους κατακόρυφους ορθοστάτες της τάξεως του 1.46% και μείωση των μετατοπίσεων της τάξεως του 10.73%. Όμοια στατική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα συστήματα (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1) με διαφοροποίηση στις μετατοπίσεις. Μικρό ποσοστό αύξησης της τάξεως του 2.16 και 2.21% των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών παρατηρείται στα συστήματα αυτά. Οι εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο καλωδιωτό σύστημα μειώνονται κατά 42.05%, ενώ το ποσοστό των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες αυξάνεται κατά 2.26%. Οι μετατοπίσεις μειώνονται κατά 22.65% και 15.03% αντίστοιχα των συστημάτων (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1).

Παραλληλίζοντας τα συστήματα (ΣΤ3.3-1-1) και (ΣΤ1-1-1) παρατηρείται αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του 34.41% και των καμπτικών ροπών της τάξεως του 35.49%, μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 5.43% και μικρή αύξηση των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες της τάξεως του 1.49%. Σχετικά μικρή μείωση του ποσοστού των μετατοπίσεων της τάξεως του 9.26% παρουσιάζεται στο σύστημα (ΣΤ3.3-1-1). Το σύστημα (ΣΤ3.4-1-1) έναντι του αντίστοιχου αρθρωτού συστήματος (ΣΤ1-1-1) εμφανίζει αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του 34.61% και των καμπτικών ροπών της τάξεως του 35.49%, σημαντική μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούνται στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 42.53%,

μικρή αύξηση των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες της τάξεως του 1.49% ενώ οι μετατοπίσεις μειώνονται κατά 13.43%. Τα συστήματα (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1) παρουσιάζουν όμοια στατική συμπεριφορά έναντι του συστήματος (ΣΤ1-1-1). Αύξηση των τεμνουσών και καμπτικών ροπών της τάξεως του 35.57 και 36.48% αντίστοιχα, μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 42.03%, των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες κατά 2.39% όπως και των μετατοπίσεων της τάξεως του 24.98 και 17.61% αντίστοιχα των συστημάτων (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1).

Μειωμένο ποσοστό αύξησης των τεμνουσών δυνάμεων της τάξεως του 0.91%, των καμπτικών ροπών της τάξεως του 0.95%, των εφελκυστικών δυνάμεων στο καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 0.91%, των θλιπτικών δυνάμεων στους ορθοστάτες της τάξεως του 0.91% και μείωση των μετατοπίσεων της τάξεως του 7.35% παρατηρείται στο σύστημα (ΣΤ3.3-1-1) συγκριτικά με το (ΣΤ3-1-1). Η συμπεριφορά του συστήματος (ΣΤ3.4-1-1) αποδίδει αύξηση των τεμνουσών και καμπτικών ροπών της τάξεως του 1.06 και 1.10% αντίστοιχα. Μείωση παρατηρείται τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσει το καλωδιωτό σύστημα της τάξεως του 38.68%, αύξηση της τάξεως του 1.01% παρουσιάζουν οι θλιπτικές δυνάμεις στους ορθοστάτες και γενικότερα μείωση των μετατοπίσεων κατά 11.61%. Στα συστήματα (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1) παρατηρείται όμοια στατική συμπεριφορά με διαφοροποίηση στο ποσοστό των μετατοπίσεων αντίστοιχα της τάξεως του 23.41 και 15.87%. Μικρό ποσοστό αύξησης των τεμνουσών και καμπτικών ροπών της τάξεως του 1.77 και 1.83%, μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων κατά 38.15% και αύξηση των θλιπτικών δυνάμεων κατά 1.81%.

Μέσα από την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι η μοντελοποίηση των συστημάτων (ΣΤ3.1-1-1), (ΣΤ3.2-1-1) και (ΣΤ3.5-1-1) προσδίδει σε κάθε περίπτωση κινηματικό μηχανισμό. Διαφαίνεται ότι το καλωδιωτό σύστημα συμπιέζει τις οριζόντιες δοκούς στο κέντρο της μάζας τους και κατά συνέπεια παρατηρείται αυξητική τάση των καμπτικών ροπών. Η κατασκευαστική μειονεξία οφείλεται εξίσου στην τυπολογία και στη λειτουργία του καλωδιωτού συστήματος που καταπονεί το πρωτεύον σύστημα. Στις περιπτώσεις (ΣΤ3.1-1-1), (ΣΤ3.2-1-1) και (ΣΤ3.5-1-1) το καλωδιωτό σύστημα διατηρεί εκκεντρότητες σε σχέση με το πρωτεύον σύστημα. Το σύστημα (ΣΤ3.6-

1-1) αυξάνει το στατικό ύψος και η λειτουργία των καλωδίων εξασφαλίζει ενίσχυση και αποφόρτιση των δυνάμεων του πρωτεύοντος συστήματος διατηρώντας τις μικρότερες μετατοπίσεις.

Τ' αποτελέσματα της ανάλυσης των συστημάτων (ΣΤ3.3-1-1), (ΣΤ3.4-1-1), (ΣΤ3.6-1-1) και (ΣΤ3.7-1-1) εξασφαλίζουν την ακαμψία, τη δομική ακεραιότητα και τη συνέργεια του υβριδικού συστήματος. Στις τυπολογίες αυτές αποφεύγονται οι εκκεντρότητες μεταξύ των οριζόντιων δοκών και του καλωδιωτού συστήματος. Συγκεφαλαιώνοντας μέσα από τ' αποτελέσματα παράγονται δυο ομάδες όπου η αύξηση του στατικού ύψους επηρεάζει τα καλωδιωτά συστήματα:

- α) Δευτερεύοντα συστήματα που λειτουργούν αποδοτικά με τα πρωτεύοντα και διατηρούν μειωμένες ή μηδενικές εκκεντρότητες
- β) Δευτερεύοντα συστήματα που δεν λειτουργούν αποδοτικά με τα πρωτεύοντα και δεν διατηρούν μειωμένες ή μηδενικές εκκεντρότητες.

Οι αστάθειες στα συστήματα (ΣΤ3.1-1-1), (ΣΤ3.2-1-1) και (ΣΤ3.5-1-1) οφείλονται στην προσομοίωση και εφαρμογή των εν λόγω περιστρεφόμενων δίσκων. Η στατική λειτουργία των δομικών συστημάτων αναμένεται να διαφοροποιηθεί μέσω της περαιτέρω εφαρμογής μηχανισμού τροχαλιών στα άνω άκρα των ορθοστατών, σε αντικατάσταση των περιστρεφόμενων δίσκων. Συνεπώς, τα καλωδιωτά στοιχεία δεν θα διακόπτονται αλλά θα είναι συνεχόμενα και θα λειτουργούν ενιαία με την ίδια αξονική τάση. Η επαλήθευση της ανάλυσης του στατικού συστήματος εξετάζεται μέσω του δυσδιάστατου προγράμματος προσομοίωσης και ανάλυσης Working Model 2D, και περαιτέρω μέσω του δυναμικού προγράμματος μηχανικής μοντελοποίησης (SolidWorks Essentials), το οποίο προσδίδει ένα σχεδιαστικό περιβάλλον προσομοιώνοντας δυναμικά συστήματα με μηχανικό αυτοματισμό και προδιαγράφοντας την μετάδοση της κίνησης.

4.8 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα του αντικειμένου ανάλυσης, ο καθορισμός της δομής, γεωμετρίας και κατασκευής αποτέλεσε εφόδιο για την περαιτέρω παραμετρική ανάλυση του κινητικού πρωτότυπου. Η πρώτη φάση της μορφολογικής στατικής ανάλυσης

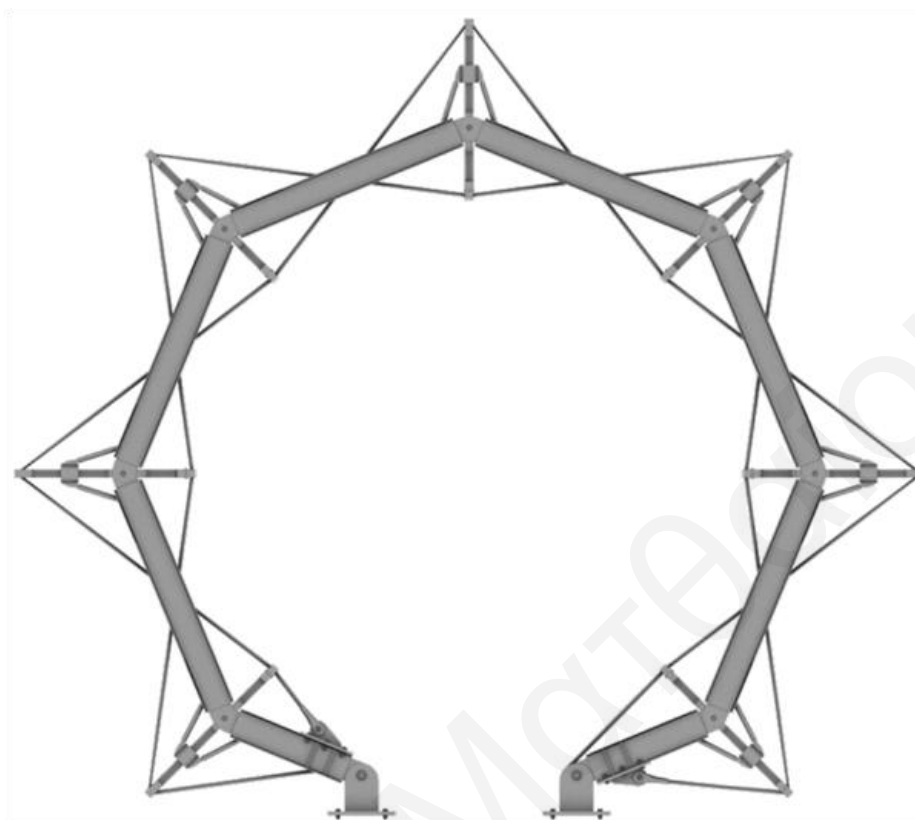
υβριδικών δομικών συστημάτων υπέδειξε την επιλογή δομικών τυπολογιών σύμφωνα με την καθαρότητα, την απλότητα και τη λειτουργία του δευτερεύοντος συστήματος ενίσχυσης για σκοπούς βελτίωσης της στατικής συμπεριφοράς του πρωτεύοντος συστήματος και λειτουργίας του κινητικού μηχανισμού (ΣΤ-1-1). Οι πολύπλοκες γεωμετρίες δομών δεν αποδίδουν την ιδανική εφαρμογή ενός κινητικού συστήματος. Η δεύτερη φάση στατικής ανάλυσης με βάση την εφαρμογή του κινητικού μηχανισμού αξιολόγησε τις περιπτώσεις που ενσωματώνουν σύστημα μετάδοσης της κίνησης καταλήγοντας στα συστήματα (ΣΤ3-1-1) και (ΣΤ4-1-1). Η διαδικασία βελτιστοποίησης εξελίσσεται στην τρίτη φάση ανάλυσης, όπου διερευνήθηκε η επιρροή του στατικού ύψους του ορθοστάτη ($l_1 \neq l_2$) στα υβριδικά δομικά συστήματα (ΣΤ3.1-1-1 - ΣΤ3.7-1-1). Το σύστημα (ΣΤ3.1-1-1) κρίνεται κατάλληλο για την κατασκευαστική ανάπτυξη του κινητικού υβριδικού πρωτοτύπου στην επόμενη φάση της έρευνας. Στα πλαίσια αυτά, ο ενοποιημένος σχεδιασμός με σκοπό το συγκερασμό της δομής, της κατασκευής, της μορφολογίας και της ενσωμάτωσης κινηματικών προδιαγραφών αποτέλεσε κριτήριο βελτιστοποίησης μιας κινητικής τυπολογίας δομών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Αξιολογώντας τα υβριδικά δομικά συστήματα βάσει της παραμετρικής μη γραμμικής στατικής ανάλυσης, το σύστημα (ΣΤ3.3-1-1) κρίνεται κατάλληλο για την κατασκευαστική ανάπτυξη της κινητικής υβριδικής δομής (εικόνα 5.1). Η τυπολογική ανάπτυξη της δομικής κατασκευής σχετικά με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των μελών της βασίζεται στην προκαταρκτική μη γραμμική στατική ανάλυση του δυσδιάστατου επίπεδου δομικού συστήματος υπό κατακόρυφη ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση 2.5 kN/m και η επιλογή των διατομών βασίζεται στον Ευρωκώδικα 3. Η σύνταξη της δομής προσδιορίζεται από δυο ανόμοια συστήματα όσον αφορά τη στατική τους συμπεριφορά. Το πρωτεύον δομικό σύστημα συγκροτείται από αρθρωτά συνδεδεμένα μέλη παραλαμβάνοντας κυρίως καμπτικές και διατμητικές καταπονήσεις. Το δευτερεύον δομικό σύστημα ενισχύει την κατασκευαστική τυπολογία αποφορτίζοντας το πρωτεύον σύστημα με την ενσωμάτωση ενός δικτύου συνεχόμενων διαγώνιων καλωδίων κλειστού κυκλώματος και ορθοστατών.

Ο μετασχηματισμός του αμφιαρθρωτού συστήματος πραγματώνονται μέσω του ενεργού συστήματος ελέγχου που αποτελείται από αισθητήρες, οι οποίοι ανιχνεύουν τη γωνιακή θέση της άρθρωσης και ενημερώνουν το σύστημα ελέγχου, δυο υδραυλικούς ενεργοποιητές στις στηρίξεις ελέγχοντας το μήκος των καλωδίων, και υδραυλικό γραμμικό σύστημα φρένων σε κάθε ορθοστάτη που συνδέονται με διαγώνια μέλη στις δοκούς με σκοπό τον έλεγχο ελευθερίας στις αρθρώσεις. Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί η δυαδική λειτουργία και συμπεριφορά του καλωδιωτού συστήματος βάσει στατικών και κινητικών κριτηρίων. Ακολουθεί λεπτομερής κατασκευαστική προσέγγιση της κινητικής υβριδικής δομής και η κατασκευαστική ενσωμάτωση του συστήματος ενεργού ελέγχου, υπεύθυνο για την ομαλή διεξαγωγή της κίνησης.



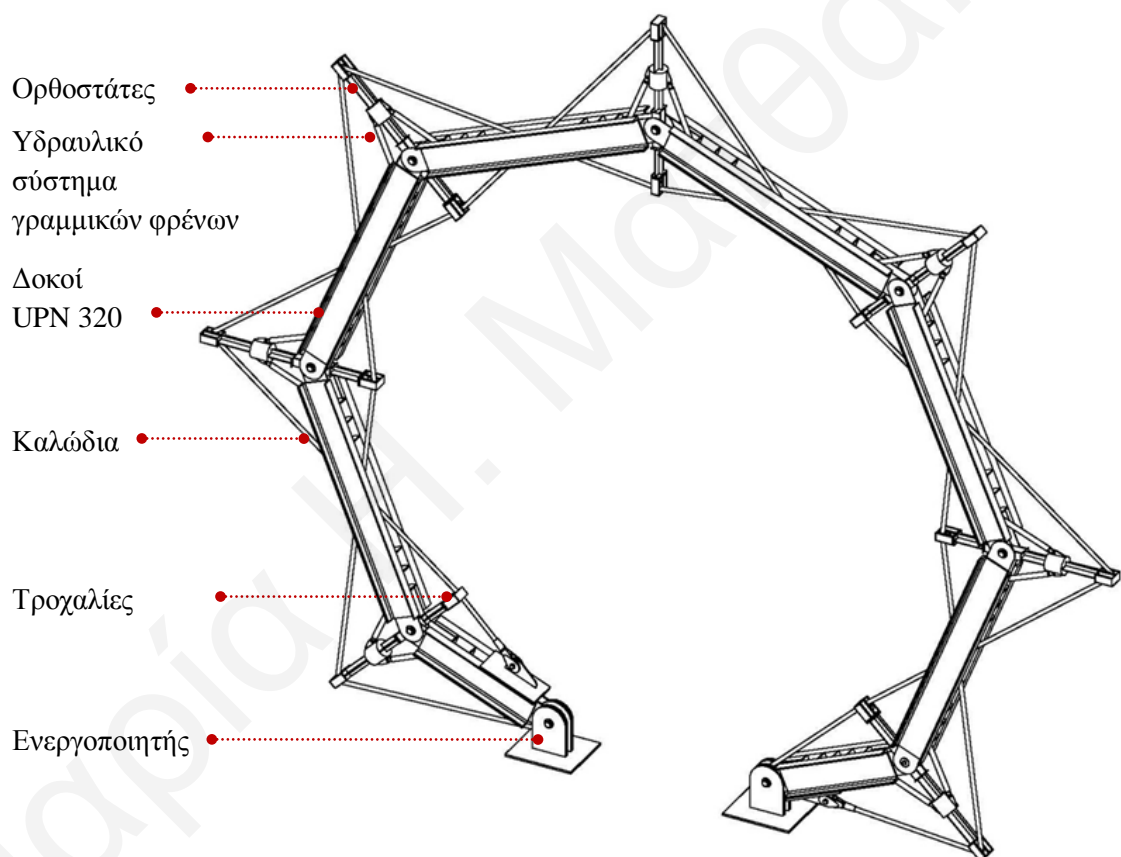
Εικόνα 5.1 Επίπεδο κινητικό υβριδικό σύστημα.

5.2 Κατασκευαστικός σχεδιασμός της υβριδικής κινητικής δομής

5.2.1. Επίπεδο κατασκευαστικό σύστημα

Η αμφιαρθρωτή επίπεδη κινητική υβριδική δομή ορίζεται από οχτώ αρθρωτά συνδεδεμένες δοκούς με ξεχωριστά μήκη των 2.5 m και 1.25 m εσωτερικά και στις εξωτερικές παρειές αντίστοιχα με συνολικό μήκος αναπτύγματος 17.5 m (εικόνα 5.2). Η πρωτεύουσα δομική κατασκευή διατηρείται σε σταθερότητα μέσω του δευτερεύοντος υβριδικού συστήματος από ορθοστάτες και συνεχόμενα καλώδια κλειστού κυκλώματος με κατευθυνόμενη κίνηση μέσω των τροχαλιών στις σχετικές συνδέσεις. Το συνολικό μήκος των ορθοστατών είναι 1.5 m όπου το αποτελεσματικό μήκος πάνω από τον άξονα των δοκών είναι 1.0 m βάσει της λειτουργίας της κίνησης του συστήματος. Οι δοκοί αποτελούνται από ζευγάρι διασυνδεδεμένων UPN 320 διατομών τοποθετημένων σε οριζόντια μετωπική απόσταση 12.5 cm. Οι ορθοστάτες αποτελούνται από σταυροειδή

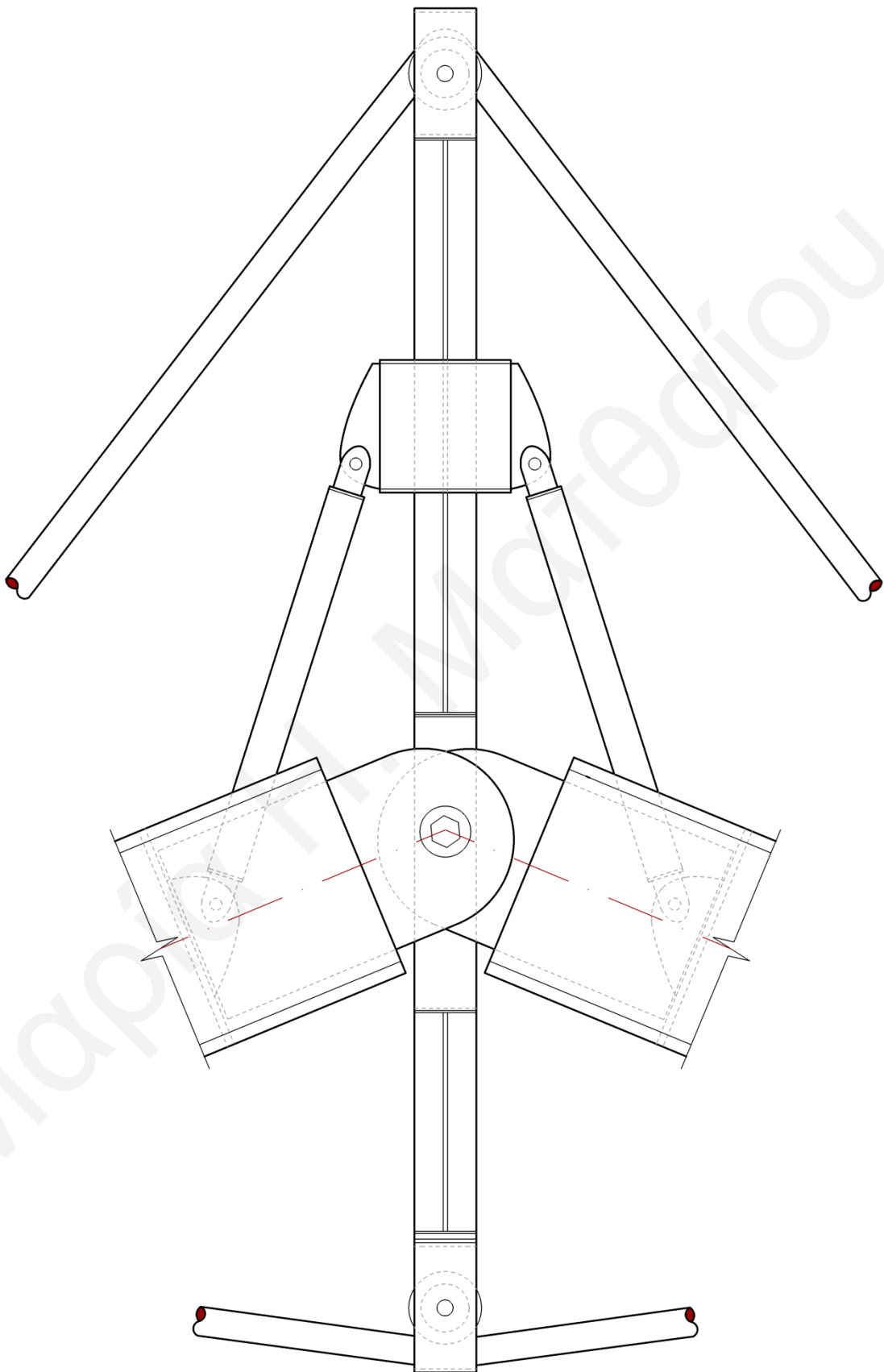
διατομές επίπεδων ελασμάτων με διαστάσεις 160/6 και 85/6 mm και η διάμετρος των καλωδίων είναι 40 mm. Η μετάδοση της κίνησης ενεργοποιείται μέσω των σχετικών μετατροπών στο μήκος των καλωδίων από τους ενεργοποιητές που βρίσκονται στις στηρίξεις εδάφους. Ένα υδραυλικό γραμμικό σύστημα φρένων τοποθετείται στην άνω ζώνη των ορθοστατών και συνδέεται μ' ένα ζευγάρι διαγώνιων στρογγυλής διατομής στην κάθε γειτονική δοκό, εξασφαλίζοντας το κεντράρισμα των ορθοστατών όπως επίσης και το κλείδωμα των αρθρώσεων κατά τους μετασχηματισμούς του συστήματος (εικόνα 5.3, εικόνα 5.4, εικόνα 5.5) ([5.1], [5.2], [5.3]).



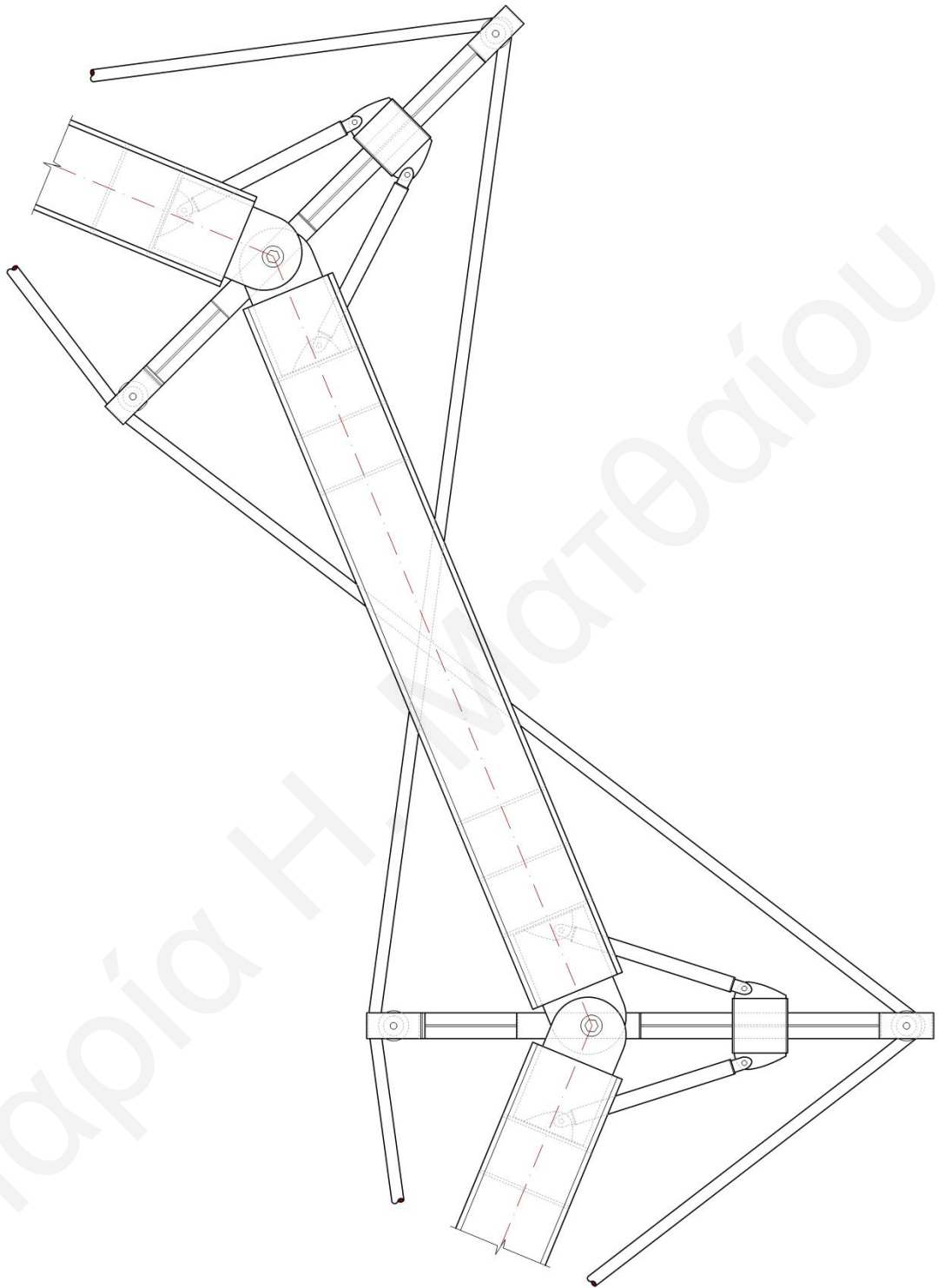
Εικόνα 5.2 Συναρμολογημένο CAD model του εννιαμελούς μηχανισμού.



Εικόνα 5.3 Κινητικό υβριδικό κατασκευαστικό πρωτότυπο: α) Στοιχεία σχεδιασμού β) πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία σύνδεσης με υδραυλικό σύστημα γραμμικών φρένων.



Εικόνα 5.4 Κατασκευαστική λεπτομέρεια κόμβου, Κλ. 1:8.

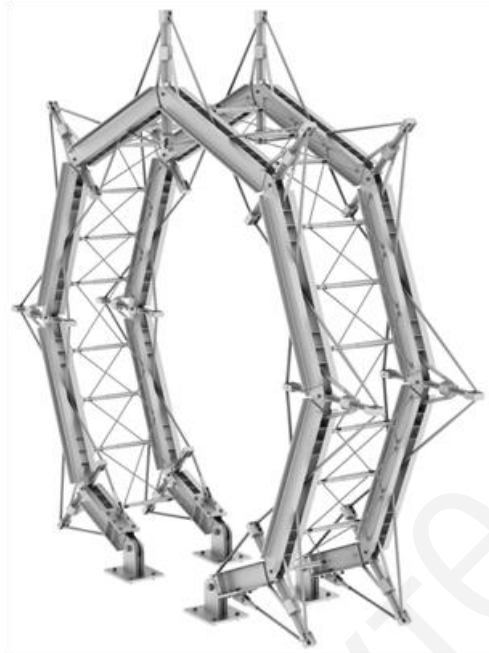


Εικόνα 5.5 Κατασκευαστική λεπτομέρεια μονάδας της κινητικής υβριδικής δομής,
Κλ. 1:16.

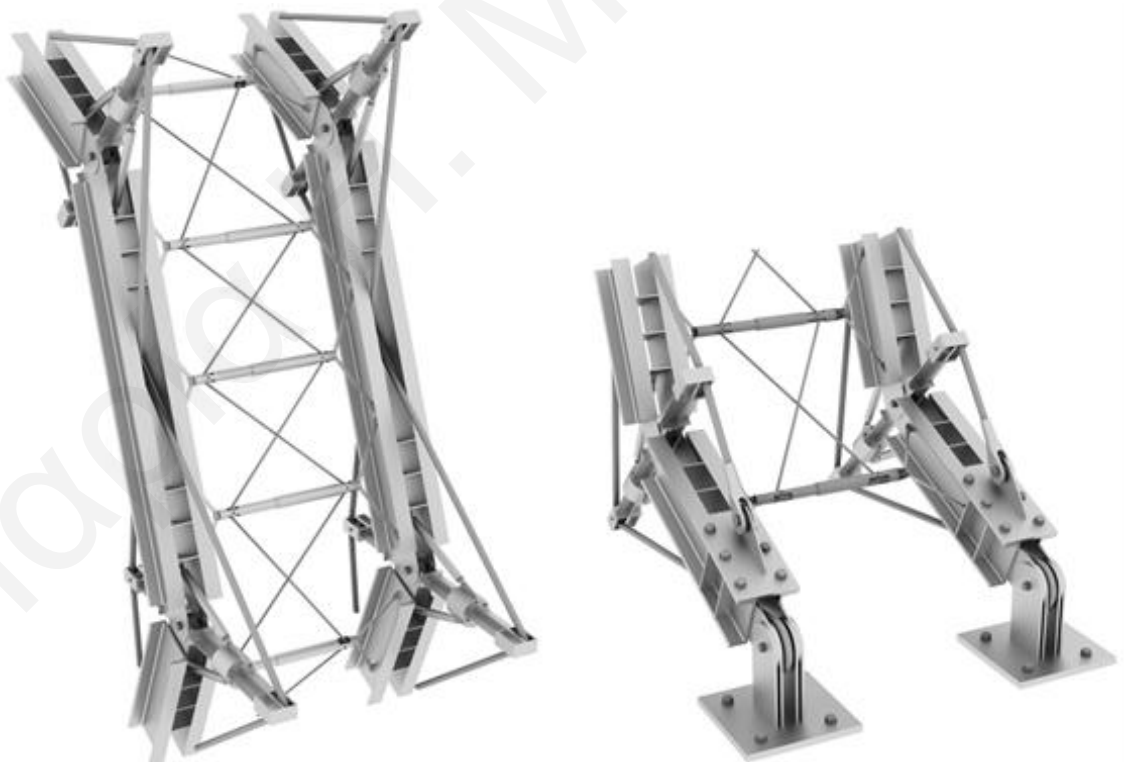
5.2.2. Χωρικό κατασκευαστικό σύστημα

Η τρισδιάστατη δομική κατασκευή ακολουθεί αρχές σχεδιασμού κίνησης με ιεραρχία στον ένα άξονα (εικόνα 5.6). Αναγκαία προϋπόθεση για το σχεδιασμό αποτέλεσε η χαρακτηριστική τροποποίηση του υβριδικού συστήματος προκειμένου να ακολουθήσει τους τοπικούς μετασχηματισμούς ρυθμίζοντας τη γενικότερη χωρική δομή. Η γραμμική συστοιχία της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής στο διαμήκη άξονα κατά 1.5 m, συγκροτεί το σύνολο της δομής. Οι δοκοί διασυνδέονται οριζόντια μέσω θλιβόμενων στοιχείων και τα διαγώνια καλώδια είναι υπεύθυνα για τη διαφραγματική λειτουργία στο επίπεδο της οροφής. Για εξασφάλιση της λειτουργίας βάσει των γεωμετρικών μετατοπίσεων ανάμεσα σε κάθε γειτονική άρθρωση, ειδικά σε περιπτώσεις μη συμμετρικών κινήσεων των ακολουθιών σε κάθε πρωτεύουσα δομική κατασκευή, τα οριζόντια μέλη απαιτείται να είναι γεωμετρικά μεταβλητά. Τα θλιβόμενα μέλη αποτελούνται από τηλεσκοπικούς κυλινδρικούς ράβδους μεταλλικής διατομής και είναι συνδεδεμένα με τις δοκούς της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής με επίπεδα διαγώνια στοιχεία και ελαστομερείς δακτυλίους στις αρθρώσεις. Τα δευτερεύοντα διαγώνια στοιχεία αποτελούνται αποκλειστικά από εφελκόμενα μέλη με κλειστό κύκλωμα: συνεχόμενα καλώδια συνδεδεμένα στα ακρινά σημεία των θλιβόμενων μελών σε μια σταθερή και ηλεκτρομαγνητικά ελεγχόμενη άρθρωση (εικόνα 5.7, εικόνα 5.8) ([5.1], [5.2], [5.3]).

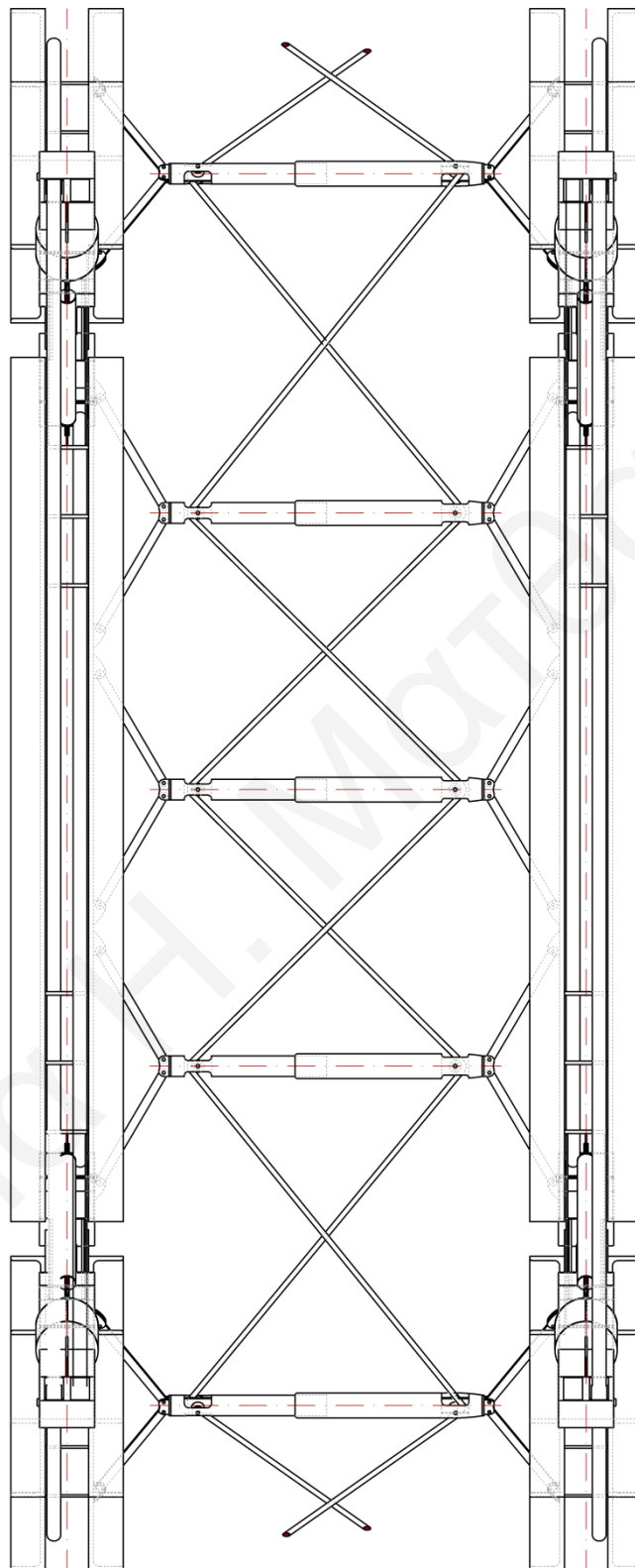
Η κατασκευαστική επίλυση επιτρέπει όλα τα οριζόντια μέλη να είναι ικανά ν' ακολουθήσουν τις μεταβολές της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής στο τρισδιάστατο χώρο τροποποιώντας το μήκος τους, όταν καθοριστεί ένας νέος μετασχηματισμός της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής, εξασφαλίζοντας επίσης, το διάφραγμα στο επίπεδο της οροφής.



Εικόνα 5.6 Οριζόντια δομή από δυο συνεχόμενες γραμμικές μονάδες.



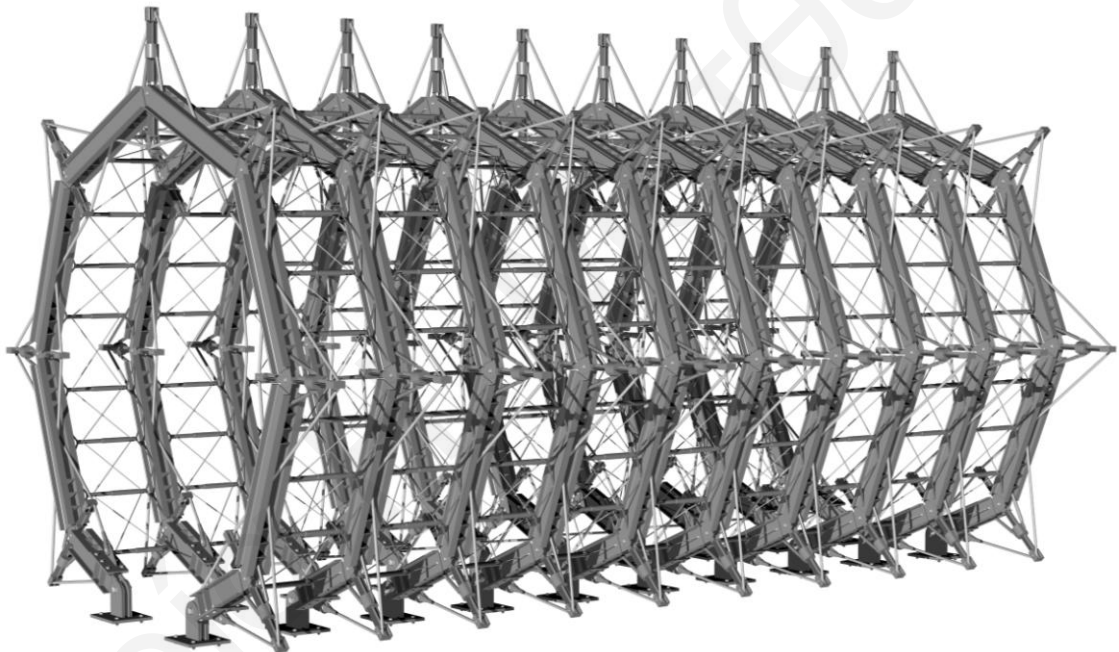
Εικόνα 5.7 Κατασκευαστική επίλυση και σχεδιασμός σύνδεσης των μελών.



Εικόνα 5.8 Κάτοψη κινητικού υβριδικού συστήματος, Κλ. 1:16.

5.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο πραγματώνεται ο σχεδιασμός της κατασκευαστικής και οικοδομικής επίλυσης της κινητικής υβριδικής δομής και κατ' επέκταση η δημιουργία χωρικής δομής, εξασφαλίζοντας τη διαφραγματική λειτουργία και συνάμα την άμεση τροποποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, προκειμένου να συμπεριφερθεί ευέλικτα και να προσαρμοστεί στα δεδομένα μετασχηματισμού (εικόνα 5.9). Στα πλαίσια ενοποιημένου σχεδιασμού επιτυγχάνεται συγχρόνως η ενσωμάτωση ενεργού συστήματος ελέγχου στο κατασκευαστικό κινητικό σύστημα.



Εικόνα 5.9 Ισομετρική άποψη κινητικού υβριδικού συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΚΙΝΗΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

6.1 Εισαγωγή

Η σχεδιαστική διαδικασία της κινητικής υβριδικής δομής εξελίχθηκε βάσει της σύνθεσης ενός μηχανισμού, με σκοπό την πραγμάτωση επιθυμητών κινήσεων. Μηχανισμός ορίζεται ένα σύστημα από συνδεδεμένα στοιχεία, τα οποία μεταδίδουν την κίνηση σε προκαθορισμένη διαμόρφωση. Η δυναμική συμπεριφορά της κινητικής υβριδικής δομής στηρίζεται στην εφαρμογή της σύνθεσης ενός επίπεδου μηχανισμού εννιά αρθρωτών ράβδων (9-bar linkage). Ευρεία εφαρμογή παρουσιάζει ο μηχανισμός τεσσάρων αρθρωτών ράβδων σε μηχανικές χωρικές κατασκευές (π.χ. εκσκαφέας, μηχανισμός εκφόρτωσης) που μεταβάλλουν τη φυσική τους γεωμετρία με το συνδυασμό επίπεδων συνδετικών μελών [6.1]. Ο σχεδιασμός, η ανάλυση και ο έλεγχος της κινητικής υβριδικής δομής υποστηρίζεται από τη ψηφιακή πλατφόρμα του δυσδιάστατου προγράμματος προσομοίωσης και ανάλυσης Working Model 2D, εξετάζοντας την κίνηση του συστήματος και τη συνέργεια των συνδετικών μελών.

6.2 Λειτουργία μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων

Αρθρωτά συνδεδεμένα μέλη συνθέτουν τη δομή ενός κινητικού μηχανισμού και προδιαγράφουν καθαρή περιστροφή (pure rotation), καθαρή μετατόπιση (pure translation) και σύνθετη κίνηση (complex motion) στα συνδετικά μέλη. Γενικότερα, ένας επίπεδος μηχανισμός αρθρωτών ράβδων παρουσιάζει $(n-3)$ βαθμούς ελευθερίας και ο έλεγχος κίνησης προκύπτει από την απαραίτητη εφαρμογή του ίσου αριθμού ενεργοποιητών. Με την εφαρμογή του κινητικού μηχανισμού σε ευμετάβλητα συστήματα επιτυγχάνεται μείωση του γενικότερου βάρους μιας κατασκευής, των κατασκευαστικών παραμορφώσεων και γενικότερα του οικονομικού κόστους, εντάσσοντάς τα στην κατηγορία των ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων. Ο λόγος οφείλεται κυρίως στην εγκατάσταση ενός ενεργοποιητή κίνησης (υδραυλικός ή ηλεκτρικός) σε μια άρθρωση του συστήματος, επιτυγχάνοντας ολοκληρωμένο έλεγχο της κίνησης μ' ένα βαθμό ελευθερίας

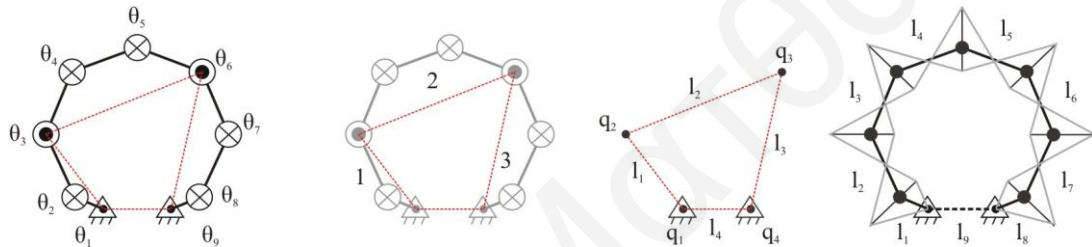
(1 DoF) σε ενεργούς μηχανισμούς τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (effective 4 - bar – E4B) κλειδώνοντας επιλεκτικά $(n - 4)$ αρθρώσεις. Μια ομάδα από συνεχείς κλειδωμένες αρθρώσεις οργανώνουν το ενεργό μέλος (effective link). Οι απαιτούμενες γεωμετρικές αναδιαμορφώσεις επιτυγχάνονται από το σύστημα ελέγχου που διαχειρίζεται τη λειτουργία των δυο ενεργοποιητών στις στηρίξεις του συστήματος. Σε κάθε ενεργό μηχανισμό τεσσάρων αρθρωτών ράβδων, οποιαδήποτε μια γωνία της άρθρωσης ρυθμίζεται στην επιθυμητή τιμή και διατηρείται κλειδωμένη σ' όλα τα επόμενα στάδια μέχρι την ολοκλήρωση του ανασχηματισμού. Η κινητική υβριδική δομή ορίζεται ως μια κλειστή αλυσίδα, εφόσον τα δυο άκρα στηρίζονται σε αρθρώσεις εδάφους και αποτελείται από συνδετικά στοιχεία (links) και αρθρώσεις (joints) ([6.2], [6.3]).

6.3 Σύστημα εννιά αρθρωτών ράβδων

Εννιά αρθρωτές ράβδοι και ένα δευτερεύον σύστημα από καλώδια και ορθοστάτες συνθέτουν το επίπεδο σύστημα ανάλυσης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστικού συστήματος διατηρούνται τα ίδια και στη διαδικασία ανάλυσης του κινητικού προσομοιωμένου μοντέλου. Ενδεικτικά αναφέρεται η μάζα των δοκών (2.5 m) 297.5 kg, των δοκών στις στηρίξεις (1.25 m) 148.75 kg, των ορθοστατών 6 kg και των καλωδίων περίπου (20m) 178 kg. Οι δυο γειτονικές δοκοί συνδέονται με κάθε ορθοστάτη του δευτερεύοντος συστήματος μέσω των κομβικών αρθρωτών ενώσεων. Η μετάδοση της κίνησης έγκειται στην αντίστοιχη ρύθμιση των καλωδίων μέσω των ενεργοποιητών στις στηρίξεις και στην εφαρμογή του υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων που τοποθετούνται αξονικά στους ορθοστάτες και συνδέονται με διαγώνια μέλη στις πρωτεύουσες δοκούς. Ο έλεγχος των περιστροφικών κινήσεων επιτυγχάνεται μέσω του υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας της άρθρωσης αποφεύγοντας τις ταλαντώσεις και εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική θέση του ορθοστάτη να διχοτομεί την κάθε άρθρωση σε οποιαδήποτε στάδιο μεταβολής.

Στην εικόνα 6.1 απεικονίζεται το E4B που ανταποκρίνεται σε μια συγκεκριμένη επιλογή κλειδωμένων αρθρώσεων. Το E4B αποτελείται από το μέλος εισόδου, το συνδετικό μέλος και το μέλος εξόδου. Η κάθε ράβδος ονομάζεται συνδετική ράβδος₁,

συνδετική ράβδος₂,...συνδετική ράβδος₉ (link₁, link₂,...link₉). Η κάθε γωνία της άρθρωσης ορίζεται από τον κανόνα $\theta \in T_n$ ως $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ και η γωνία των αρθρώσεων του E4B από τον κανόνα $\mathbf{q} \in T_4$ ως q_1, \dots, q_4 . Οι τέσσερις αυτές ελεύθερες γωνίες αρθρώσεων συνθέτουν το E4B με ένα βαθμό ελευθερίας. Όταν η συνδετική ράβδος₁ ενεργοποιεί τη γωνία άρθρωσης θ_1 τότε σχηματίζεται η γωνία \mathbf{q} του E4B. Το ορισμένο E4B συμπεριλαμβάνει την ενεργή άρθρωση και $n - 3$ ράβδοι ενός συστήματος αποδίδουν $\frac{(n-1)}{3}$ διαφορετικούς ενεργούς μηχανισμούς τεσσάρων αρθρωτών ράβδων κλειδώνοντας $(n - 4)$ αρθρώσεις από τις $(n - 1)$ αρθρώσεις $2, \dots, n$. ([6.1], [6.2], [6.4]).



Εικόνα 6.1 Ενεργός μηχανισμός τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (effective 4 - bar - E4B) σε σύστημα εννιά αρθρωτών ράβδων και καλώδια (\otimes : κλειδωμένη άρθρωση, \odot : ελεύθερη άρθρωση, \triangle : αρθρωτές στηρίξεις εδάφους), 1: μέλος εισόδου, 2: συνδετικό μέλος, 3: μέλος εξόδου.

Χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο ενεργοποιητή για την αντίστοιχη σειρά καλωδίων οποιαδήποτε γωνία της άρθρωσης του E4B μπορεί να ρυθμιστεί στην επιθυμητή τιμή και έπειτα να παραμένει κλειδωμένη στα υπόλοιπα στάδια της κίνησης. Για κάθε επιτυχημένο βήμα της ελεγχόμενης ακολουθίας ορίζεται ένα διαφορετικό E4B και μια γωνία της άρθρωσης ρυθμίζεται. Το τελικό E4B χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τις τέσσερις παραμένουσες αρθρώσεις. Θέτοντας ότι κατά τη διάρκεια του κάθε βήματος ρυθμίζεται μια άρθρωση, έπεται ότι η ολοκληρωμένη αναδιαμόρφωση του μηχανισμού αρθρωτών ράβδων απαιτεί συνολικά $(n - 3)$ βήματα. Σημαντική η διαδικασία επιλογής των E4B όπου πάντα η ενεργή άρθρωση πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο E4B. Η ενεργή άρθρωση για κάθε ενεργό μηχανισμό τεσσάρων ράβδων και η μηχανική επίτευξη της συνολικής θέσης του συστήματος ελέγχεται αντίστοιχα μέσω του υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων, εγκαταστημένων στους ορθοστάτες και των δυο ενεργοποιητών, τοποθετημένων στις στηρίξεις εδάφους [6.5].

Σημαντική είναι η δυαδική λειτουργία των καλωδίων στη συμπεριφορά της κινητικής υβριδικής δομής. Το καλώδιο ενεργοποιεί κάθε μεταβολική διαδικασία, λειτουργεί υπό φόρτιση και διατηρεί το σύστημα σε ευστάθεια. Η τροπή που θα ακολουθήσει η κατασκευή ορίζεται από το καλώδιο, στο οποίο αναπτύσσεται στατική δύναμη και είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση του μηχανισμού. Τροχαλίες βρίσκονται στα άνω και κάτω άκρα των ορθοστατών μεταφέροντας την κίνηση των καλωδίων.

6.4 Σχεδιασμός κίνησης

Οι αναδιαμορφώσεις του συστήματος βασίζονται στη μεθοδολογία του E4B που απαιτεί σχεδιασμό και προγραμματισμό της κίνησης για το προτεινόμενο παράδειγμα. Η αρχική θέση του συμμετρικού συστήματος με ίσες γωνίες αρθρώσεων $\theta_i = [157,5, 135, 135, 135, 135, 135, 157,5]^T$ εξυπηρετεί στην ποικιλομορφία των γεωμετρικών μεταβολών χωρίς να ευθυγραμμίζονται τα καλώδια και να παρουσιάζεται μηχανική αδυναμία στο σύστημα. Η τελική θέση διαμορφώνεται με τις ανάλογες τιμές των γωνιών των αρθρώσεων $\theta_f = [164.25, 133, 125, 138, 140, 138, 125, 133, 164.25]^T$. Εφόσον ορίστηκε η αρχική θέση και τελική θέση, τα ενδιάμεσα στάδια καθορίζουν την πορεία που εξαρτάται από τα μοτίβα κίνησης των ακολουθιών. Ο τύπος $\frac{(n-1)!}{(n-4)!}$ ορίζει τις διαφορετικές πιθανές ακολουθίες. Εννιά αρθρωτοί ράβδοι παρουσιάζουν $\binom{8}{5}$ διαφορετικούς μηχανισμούς και $8!/5!=336$ διαφορετικές κινητικές ακολουθίες με ένα βαθμό ελευθερίας. Υπάρχει πληθώρα πιθανών συνδυασμών και μια συστηματική επιλογή στρατηγικής παρουσιάζεται για το σύστημα ανάλυσης. Μείωση του αριθμού των συνδυασμών επιτυγχάνεται με κατασκευαστικούς και κινητικούς περιορισμούς όπως αναφέρονται πιο κάτω ([6.1], [6.4]).

Η συνολική αναδιαμόρφωση του συστήματος απαιτεί συγκεκριμένες ρυθμίσεις των γωνιών των αρθρώσεων και των δυνάμεων που απαιτούνται για κάθε n - σύνθεση ράβδων. Πρακτικά δεν είναι εφικτή η ρύθμιση όλων των γωνιών των αρθρώσεων και προτείνεται ο προγραμματισμός μιας γραμμικής διαδικασίας πολλαπλών σταδίων με σκοπό τη ρύθμιση μιας συγκεκριμένης γωνίας της άρθρωσης σε κάθε στάδιο. Η οργάνωση των ακολουθιών στηρίζεται στην παράμετρο της μηχανικής κίνησης του προσομοιωμένου συστήματος και στη λογική του E4B ότι πρέπει να διατηρούνται κλειδωμένες $(n-4)$ αρθρώσεις. Θεωρείται ότι κατά την κίνηση δεν αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις στα μέλη του συστήματος

με δεδομένο ότι η κίνηση του συστήματος θα είναι αργή (quasi static motion). Όσον αφορά το προσομοιωμένο σύστημα εφαρμόζονται σ' αυτό καλώδια, στα οποία οφείλεται η μετάδοση της κίνησης στο σύστημα. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των καλωδίων αποτελεί η μέγιστη τιμή κλίσης συνεχόμενων μελών των 175° προκειμένου να αποφευχθεί μηχανική ανικανότητα του συστήματος. Με γνώμονα τη λειτουργία των καλωδίων έπεται η οργάνωση των ακολουθιών που απαιτεί δυο συνεχόμενες ελεύθερες αρθρώσεις και δυο συνεχόμενες κλειδωμένες μεταξύ των ελεύθερων αρθρώσεων, ώστε να μην ανταγωνίζονται τα καλώδια, όταν λόγου χάρη το ένα καλώδιο τείνει ν' αυξήσει τη γωνία άρθρωσης και το άλλο τείνει να τη μειώσει. Τα κριτήρια των ακολουθιών καταγράφονται πιο κάτω:

- α) Όλες οι πιθανότητες ελέγχονται βάσει της φοράς του ρολογιού (κυκλική ρύθμιση δεξιόστροφα) και αντίστροφα (κυκλική ρύθμιση αριστερόστροφα),
- β) Έλεγχος με δυο συνεχόμενες κλειδωμένες αρθρώσεις,
- γ) Έλεγχος με δυο και τέσσερις συνεχόμενες ελεύθερες αρθρώσεις (περισσότερες από έξι δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο σύστημα),
- δ) Έλεγχος βάσει της μετατόπισης των ελεύθερων αρθρώσεων ανά γωνία σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού (κυκλική ρύθμιση δεξιόστροφα) δηλαδή μοτίβο ακολουθίας 1: J_2 και J_5 (βήμα 1), μοτίβο ακολουθίας 2: J_3 και J_6 (βήμα 1), μοτίβο ακολουθίας 3: J_4 και J_7 (βήμα 1) η ελεύθερη άρθρωση μεταφέρεται κατά μια θέση, J_2 σε J_3 - J_5 σε J_6 ,
- ε) Έλεγχος βάσει της μετατόπισης των ελεύθερων αρθρώσεων ανά βήμα, δηλαδή μοτίβο ακολουθίας 1: J_2 και J_5 (βήμα 1), μοτίβο ακολουθίας 2: J_2 και J_5 (βήμα 2),
- ζ) Οι ελεύθερες αρθρώσεις ορίζουν τη θέση των επόμενων ελεύθερων αρθρώσεων, οι οποίες είναι δυο συνεχόμενες, για παράδειγμα μοτίβο ακολουθίας 1: J_2 και J_5 (βήμα 1), μοτίβο ακολουθίας 1: J_3 και J_4 (βήμα 2),
- η) Η σειρά των επόμενων ακολουθιών βασίζεται στις προηγούμενες, όπου η άρθρωση στα αριστερά σε κάθε βήμα προδιαγράφει ότι οι ελεύθερες συνεχόμενες αρθρώσεις στα επόμενα στάδια θα μετατοπιστούν κατά μια άρθρωση σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού (κυκλική ρύθμιση), για παράδειγμα μοτίβο ακολουθίας 1: J_2

και J_5 (βήμα 1), μοτίβο ακολουθίας 1: J_3 και J_4 (βήμα 2), μοτίβο ακολουθίας 1: J_4 και J_5 (βήμα 3), μοτίβο ακολουθίας 1: J_5 και J_6 (βήμα 4), μοτίβο ακολουθίας 1: J_6 και J_7 (βήμα 5), και μοτίβο ακολουθίας 1: J_7 και J_8 (βήμα 6).

6.5 Περιορισμοί

Η ιδιομορφία της κινηματικής του συστήματος δεν επιτρέπει την εφαρμογή και λειτουργία όλων των τύπων των μοτίβων ακολουθιών. Συγκεκριμένα κριτήρια προσομοίωσης του συστήματος έγκεινται στις δυο στηρίξεις εδάφους, οι οποίες παραμένουν ελεύθερες σε όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της ρύθμισης της τελικής θέσης. Σημαντικό ν' αναφερθεί ότι κανένα μέλος δεν μετακινείται από το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους. Περιορισμό αποτελεί η ευθυγράμμιση μελών του μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων που εμφανίζονται οι θέσεις κλειδώματος και απενεργοποιούν τη λειτουργία του μηχανισμού αποτρέποντας την μετάδοση κίνησης. Παράλληλα, η ευθυγράμμιση των καλωδίων αποβαίνει σε σημαντικό περιοριστικό χαρακτηριστικό, εφόσον αποδυναμώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του μηχανισμού και παράλληλα δύσκολα επιτρέπει την ενεργοποίηση της κίνησης [6.3].

6.6 Ανάπτυξη ακολουθιών συστήματος

Επτά μοτίβα ακολουθιών με έξι διαφορετικούς τύπους εξετάζονται και προδιαγράφουν τις παραμέτρους κλειδώματος των αντίστοιχων πιο πάνω κριτηρίων. Στο πρώτο μοτίβο ακολουθιών εξετάζεται η λογική των δυο συνεχόμενων ελεύθερων αρθρώσεων και στους ακόλουθους τύπους μεταφέρεται η σειρά κατά ένα βήμα σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού (κυκλική ρύθμιση δεξιόστροφα). Δυο τύποι (A, Z) κρίθηκαν κατάλληλοι για τη διεκπεραίωση της κίνησης του συστήματος από την αρχική στην τελική θέση. Οι υπόλοιποι τύποι του μοτίβου ακολουθίας [1] εντάσσονται στην κατηγορία των προβληματικών μοτίβων κίνησης, διότι ακυρώνουν τη ρύθμιση της γωνίας στο προηγούμενο βήμα. Τα μοτίβα ακολουθιών [2, 3, 4 και 5] βασίζονται στη λογική κλειδώματος δυο συνεχόμενων αρθρώσεων και οι συνδυασμοί των ελεύθερων αρθρώσεων αναφέρονται στις γωνίες $J_2 - J_5$, $J_3 - J_6$, $J_4 - J_7$ και $J_5 - J_8$ αντίστοιχα. Ο τύπος B στο μοτίβο ακολουθιών [2] είναι εφικτός και ανταποκρίνεται σ' όλα τα στάδια κίνησης χωρίς να ευθυγραμμίζονται τα καλώδια με επιτυχή λειτουργία της ρύθμισης των γωνιών άρθρωσης.

Κατάλληλοι τύποι που εξυπηρετούν τη μεταβολή από την αρχική θέση στην τελική θέση δεν προσφέρονται από το μοτίβο ακολουθιών [3]. Ο τύπος Δ στο μοτίβο ακολουθιών [4] και ο τύπος Ζ στο μοτίβο ακολουθιών [5] είναι εφικτοί και κρίνονται κατάλληλοι να διεκπεραιώσουν τη μετάδοση κίνησης σ' όλα τα στάδια. Διαφορετική προσέγγιση παρουσιάζουν τα μοτίβα ακολουθιών [6 και 7] εφαρμόζοντας τέσσερις συνεχόμενες κλειδωμένες αρθρώσεις ενδιάμεσα των ελεύθερων $J_2 - J_7$ και $J_3 - J_8$. Το μοτίβο ακολουθιών [6] αποδίδει ένα εφικτό τύπο Β ενώ το μοτίβο ακολουθιών [7] αποδίδει προβληματικούς τύπους ρύθμισης της τελικής θέσης του συστήματος.

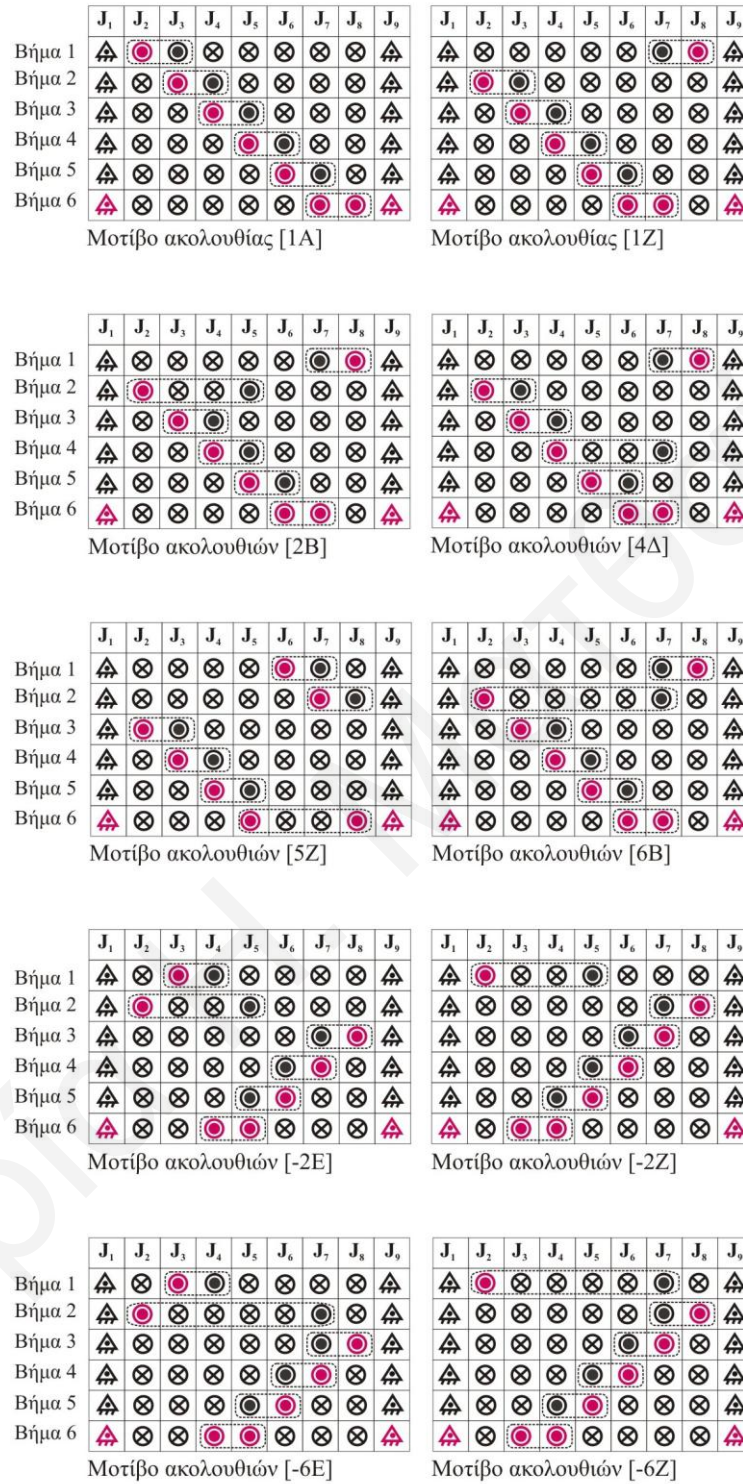
Οι εφικτοί τύποι είναι οι εξής:

- α) τύπος Α, μοτίβο ακολουθίας [1],
- β) τύπος Ζ, μοτίβο ακολουθίας [1],
- γ) τύπος Β, μοτίβο ακολουθίας [2],
- δ) τύπος Δ, μοτίβο ακολουθίας [4],
- ε) τύπος Ζ, μοτίβο ακολουθίας [5],
- ζ) τύπος Β, μοτίβο ακολουθίας [6]

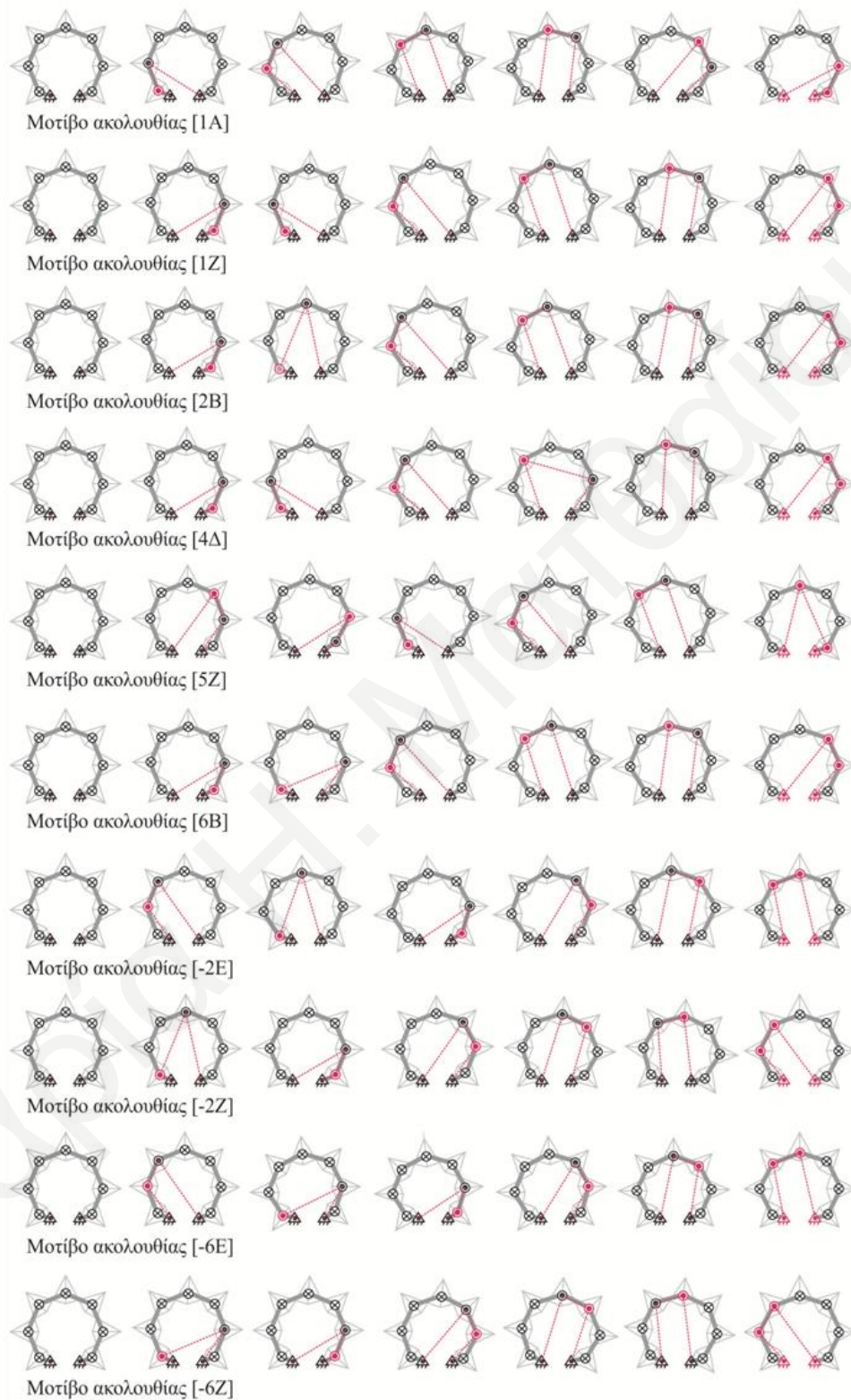
Κατά την αντίστροφη φορά του ρολογιού εξετάζονται τα αντίστοιχα μοτίβα ακολουθιών παρουσιάζοντας εφικτούς τύπους τους εξής:

- η) τύπος Ε, μοτίβο ακολουθίας [-2],
- θ) τύπος Ζ, μοτίβο ακολουθίας [-2],
- ι) τύπος Ε, μοτίβο ακολουθίας [-6],
- κ) τύπος Ζ, μοτίβο ακολουθίας [-6]

Συνολικά εξετάζονται δέκα εφικτοί τύποι (εικόνα 6.2) και τα στάδια μεταβολής και διαμόρφωσης της τελικής θέσης παρουσιάζονται στην εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.2 Εφικτά μοτίβα ακολουθιών στον υπό εξέταση μηχανισμό εννιά αρθρωτών ράβδων (9 - bar).



Εικόνα 6.3 Προσομοίωση βημάτων για την απαιτούμενη ρύθμιση της τελικής θέσης του μηχανισμού εννιά αρθρωτών ράβδων (9 - bar).

6.7 Ανάλυση κινητικών υβριδικών συστημάτων

Η επιλογή βέλτιστων κινητικών ακολουθιών έγκειται στην απόκλιση συστημάτων λόγω των κατασκευαστικών, κινητικών περιορισμών και στη στατική συμπεριφορά των συστημάτων. Κριτήρια επιλογής παρέχονται από τις στατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οι ενεργοποιητές και τη κινητική διαχείριση που σχετίζεται με τις δυνάμεις. Το σύστημα ανάλυσης βάσει του σχεδιασμού κίνησης προγραμματίζει την τελική θέση με μικρές μεταβολές και απαιτήσεις δυνάμεων και για το λόγο αυτό δεν εξετάζονται οι επιταχύνσεις. Οι ροπές και οι αξονικές τάσεις που αναπτύσσονται προδιαγράφουν την επιλογή των απαιτούμενων ενεργοποιητών στις αρθρώσεις. Εξαιρούνται οι ακολουθίες που παρουσιάζουν μεγαλύτερες ροπές στα κομβικά σημεία προκειμένου να κατευθύνουν το σύστημα στην τελική του θέση. Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές που αναπτύσσονται τα συστήματα των διάφορων τύπων από το αρχικό μέχρι το τελικό στάδιο ρύθμισης της τελικής θέσης. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί επίσης η καταγραφή της διαφοράς του μήκους των εσωτερικών καλωδίων από ορθοστάτη σε ορθοστάτη σε κάθε τύπο και σ' όλα τα στάδια μεταβολής, όπως υποδεικνύεται στον πίνακα 6.1. Το αρχικό μήκος του καλωδίου από ορθοστάτη σε ορθοστάτη υπολογίζεται 1.80m και στον πίνακα 6.1 υπολογίζεται η μέγιστη τιμή αύξησης ή μείωσης του καλωδίου.

Πίνακας 6.1 Μέγιστη ροπή και αξονική δύναμη στα καλώδια.

Τύπος	$J_{2, \max}$ [kNm]	$J_{3, \max}$ [kNm]	$J_{4, \max}$ [kNm]	$J_{5, \max}$ [kNm]	$J_{6, \max}$ [kNm]	$J_{7, \max}$ [kNm]	$J_{8, \max}$ [kNm]	$L_{1, \max}$ [kN]	$L_{2, \max}$ [kN]	Δl_{\max} [cm]
1[A]	19.29	26.19	46.07	42.35	41.13	21.17	15.55	19.63	15.24	-8
1[Z]	18.87	24.58	33.58	34.64	32.19	19.05	14.70	19.31	11.91	-8
2[B]	19.61	24.35	33.53	34.34	32.12	19.22	12.94	19.01	13.95	-10
4[Δ]	19.64	26.75	33.42	34.73	32.08	4.26	14.70	19.05	11.48	-7
5[Z]	20.13	25.80	52.53	46.97	42.87	20.48	15.87	19.60	13.79	-11
6[B]	20.05	25.10	33.22	35.48	31.95	20.18	12.79	19.55	12.21	-6
-2[E]	18.69	25.24	15.89	34.53	20.33	19.06	11.64	19.25	19.72	-8
-2[Z]	26.09	21.42	29.36	28.67	29.69	24.29	17.10	17.09	14.37	+6
-6[E]	18.90	20.21	19.82	32.27	33.64	19.86	11.64	19.56	19.31	-6
-6[Z]	12.55	34.86	29.77	29.61	31.07	22.41	16.21	15.98	12.07	-6

Η ανάλυση της στατικής συμπεριφοράς των κινητικών συστημάτων διακρίνει τα μοτίβα ακολουθιών που αναπτύσσουν μικρότερες ροπές στις ενώσεις και αξονικές τάσεις στα καλώδια. Ο τύπος Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2] παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές

καμπτικών ροπών κατά τα στάδια διαμόρφωσης της τελικής θέσης. Μέγιστες τιμές παρατηρούνται στον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [5], με σχετικά μικρή διαφορά από τον τύπο A στο μοτίβο ακολουθιών [2], ενώ οι υπόλοιποι τύποι βρίσκονται στην ενδιάμεση ζώνη και παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Μικρότερες αξονικές τάσεις, αναπτύσσει ο τύπος Z στο μοτίβο ακολουθιών [-6] με μικρή διαφοροποίηση από τον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2]. Οι υπόλοιποι τύποι παρουσιάζουν μικρή εναλλαγή στις τιμές των αξονικών τάσεων διακρίνοντας τον τύπο E στο μοτίβο ακολουθιών [-2] με τη μέγιστη αξονική δύναμη. Μέγιστες μεταβολές στο μήκος του καλωδίου από ορθοστάτη σε ορθοστάτη σε σχέση με το αρχικό μήκος παρατηρούνται στον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [5], ενώ οι τύποι B στο μοτίβο ακολουθιών [6], Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2], E στο μοτίβο ακολουθιών [-6] και Z στο μοτίβο ακολουθιών [-6] παρουσιάζουν μικρότερες μεταβολές. Η αξιολόγηση διακρίνει τον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2] ως τη βέλτιστη απόδοση της κινητικής δομής να διαμορφώσει την τελική θέση μέσα από τα στάδια μεταβολής βάσει των κριτηρίων του συγκεκριμένου μηχανισμού υπό εξέταση.



Εικόνα 6.4 Προσομοιωμένα στάδια μετασχηματισμού του εννιαμελούς αρθρωτού συνδυασμού σε σχέση με τον τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2].

6.8 Συμπεράσματα

Η υβριδική κινητική δομή εννιά αρθρωτά συνδεδεμένων μελών, συζευγμένα μ' ένα δευτερεύον σύστημα ορθοστατών και συνεχόμενων καλωδίων - με κλειστό κύκλωμα - ενεργοποιούν τη κατασκευαστική μεταβολή της τυπολογίας. Η ολοκληρωμένη ανάπτυξη της δομής και ο σχεδιασμός της κίνησης βασίζονται στον ενεργό μηχανισμό τεσσάρων αρθρωτών ράβδων, του οποίου εξετάστηκε η συμπεριφορά μέσα από την προσομοίωση δέκα τύπων από διαφορετικά μοτίβα ακολουθιών. Η επιλογή εφικτών τύπων βάσει περιορισμών και ειδικών κριτηρίων (απαιτούμενες ροπές/δυνάμεις ενεργοποιητή, αξονικές δυνάμεις στα καλώδια, μεταβολή αρχικού μήκους καλωδίων) διακρίνει το βέλτιστο τύπο Z στο μοτίβο ακολουθιών [-2] όσον αφορά την απόδοση της κινητικής υβριδικής δομής από

την αρχική στην τελική θέση. Σε παραλληλία με τα χαρακτηριστικά της δομής αναφέρεται η πιθανή αύξηση του μήκους των ορθοστατών επιφέροντας βελτίωση στην κίνηση της δομής και αντίστοιχα κίνδυνο λυγισμού, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ακριβής διχοτόμηση της γωνίας των ορθοστατών ως προς τις δοκούς, θα μπορεί να επιτευχθεί με το υδραυλικό γραμμικό σύστημα φρένων. Στην φάση αυτή ανάγονται τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί για την ομαλή ανάπτυξη των μοτίβων ακολουθίας και λαμβάνονται επίσης υπόψη στην κατασκευαστική επίλυση. Για παράδειγμα, η αύξηση του μήκους των ορθοστατών για την αποφυγή των ευθυγραμμίσεων των καλωδίων και την ενσωμάτωση του υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων στη δομική κατασκευή. Η διαδικασία της έρευνας υποστηρίζεται στο επόμενο κεφάλαιο με περαιτέρω ανάλυση, επαλήθευση και βελτιστοποίηση της κινητικής υβριδικής δομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

7.1. Εισαγωγή

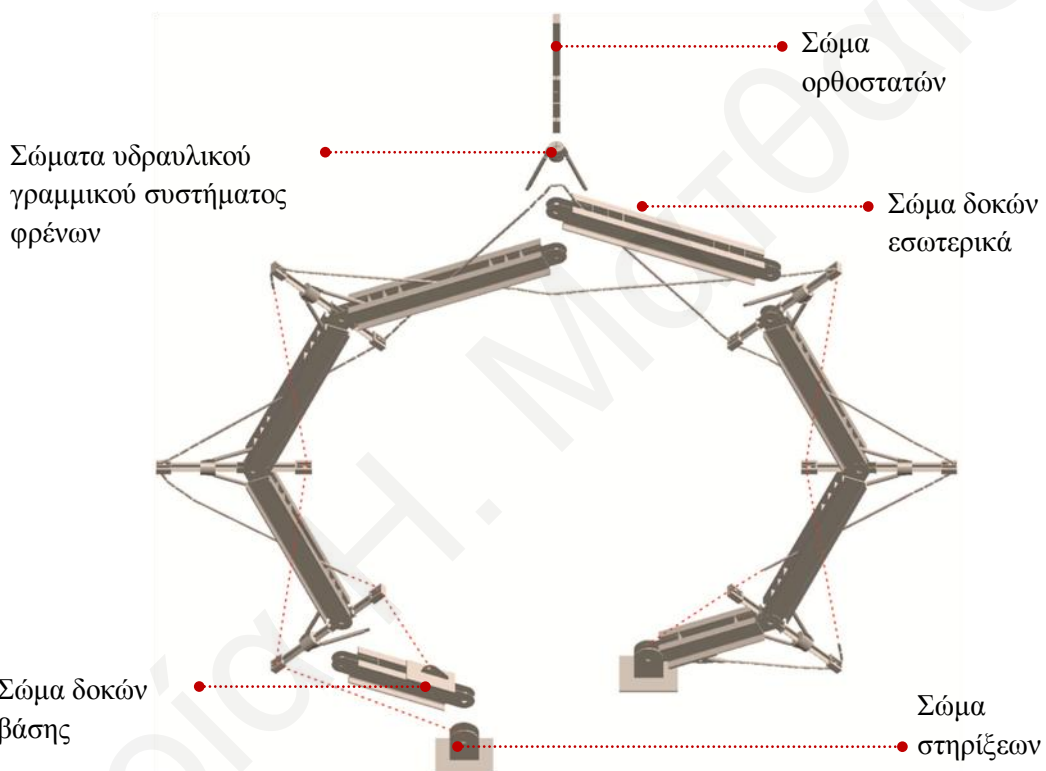
Στο κεφάλαιο πραγματώνεται ο σχεδιασμός και η ανάλυση της κίνησης της υβριδικής δομής μέσα από το λογισμικό δυναμικής ανάλυσης Solidworks Essentials. Το λογισμικό πρόγραμμα, αποτελεί ένα παραμετρικό σχεδιαστικό εργαλείο κα παρέχει δυνατότητες ανάλυσης συμπεριφοράς κινητικών συστημάτων. Θεμελιώδες εργαλείο προώθησης της δυναμικής ανάλυσης έγκειται στο σχεδιασμό της κίνησης μέσω της καταγραφής μιας σειράς καταστάσεων κίνησης (event - based motion). Ο πυλώνας σχεδιασμού της κίνησης έγκειται σε μια ακολουθία ενεργειών με καθορισμένα αλληλένδετα και αλληλεπιδρώμενα βήματα, στοχεύοντας στην ομαλή διεξαγωγή της κίνησης από την αρχική στην τελική θέση. Δυο διακριτά στάδια πραγματώνουν τη διεξαγωγή ανάλυσης της συμπεριφοράς της κινητικής υβριδικής δομής με βάση τη μοντελοποίηση (model) και την ανάλυση της κίνησης (motion analysis). Η τοπολογία του μοντέλου ορίζεται από μια συσχέτιση γεωμετρικών σχέσεων και περιορισμών από διακριτά συναρμολογημένα τμήματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος συστήματος.

7.2. Μοντελοποίηση του κινητικού υβριδικού συστήματος

7.2.1. Συναρμολόγηση του συστήματος

Η συναρμολόγηση συνίσταται κυρίως από την εισαγωγή τμημάτων της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας δομικής κατασκευής (εικόνα 7.1). Τα διακριτά μέλη (σώματα) τα οποία εισάγονται είναι τα εξής: δοκοί, ορθοστάτες, καλώδια, υδραυλικό γραμμικό σύστημα φρένων και στηρίξεις. Τα συναρμολογημένα τμήματα και μέλη περιγράφονται από δυο καταστάσεις και ορίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά ρύθμισης του μηχανισμού (Basics of mechanism setup in SolidWorks motion), τα άκαμπτα και τα εύκαμπτα μελη (rigid & flexible). Ένα άκαμπτο συναρμολογημένο υποσύστημα, ορίζεται ως τα ξεχωριστά στοιχεία που υπολογίζονται να είναι άκαμπτα συνδεδεμένα και συγκολλημένα (welded) μεταξύ

τους, όπως ένα ανεξάρτητο μέλος. Ένα άκαμπτο σώμα μπορεί να συμπεριφέρεται και να δρα ως ένα ακίνητο ή κινητό μέλος. Οι στηρίξεις εδάφους αποτελούν ακίνητα σώματα και παρουσιάζουν 0 βαθμούς ελευθερίας, ενώ τα υπόλοιπα μέλη αποτελούν άκαμπτα κινητά σώματα [7.1]. Τα φυσικά χαρακτηριστικά που ορίζουν τα σώματα ως προς το βάρος είναι: σώματα δοκών βάσης 209 kg, σώματα δοκών εσωτερικά 335 kg, σώμα ορθοστατών 40 kg, σώματα υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων 51 kg και σώματα καλωδίων 4 kg/m.



Εικόνα 7.1 Αποσυναρμολόγηση του κινητικού υβριδικού συστήματος.

7.2.2. Γεωμετρικές σχέσεις (mates)

Οι τοπικές γεωμετρικές σχέσεις ορίζουν τη σύνδεση των άκαμπτων σωμάτων και την κατεύθυνση της κίνησης. Η εφαρμογή κάποιας σχέσης περιορίζει παράλληλα τον αριθμό βαθμών ελευθερίας στα σώματα και διατηρεί τη θέση, ανεξαρτήτως δυνάμεων του μηχανισμού και κίνησης. Οι γεωμετρικές σχέσεις εφαρμόζονται για να περιορίσουν τη

σχετική κίνηση ενός ζευγαριού άκαμπτων σωμάτων από φυσική σύνδεση. Δυο κατηγορίες ορίζουν τις σχέσεις αυτές:

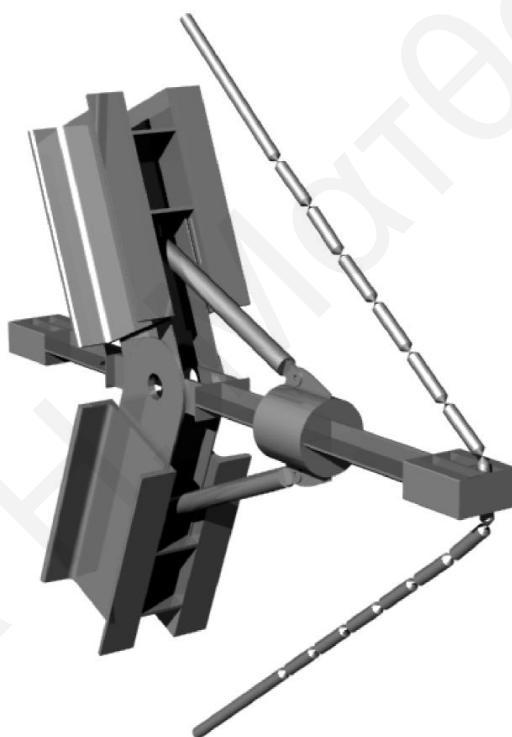
- Σχέσεις που χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τη σχετική κίνηση από ένα ζευγάρι άκαμπτων σωμάτων φυσικά συνδεδεμένων (hinge, concentric, coincident, fixed, screw)
- Σχέσεις που χρησιμοποιούνται για να επιβάλλουν σταθερούς γεωμετρικούς περιορισμούς (distance, angle, parallel)

Οι γεωμετρικές σχέσεις που χαρακτηρίζουν τα τμήματα του συστήματος αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα και προδιαγράφουν την αντίστοιχη συμπεριφορά της κινητικής υβριδικής δομής στο τομέα ανάλυσης της κίνησης. Τα συναρμολογημένα τμήματα της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής συνδέονται αρθρωτά με τα ελάσματα στις δυο στηρίξεις εδάφους, οι οποίες είναι ακίνητες στο χώρο. Η συνδεσμολογία που ορίζει τα άκαμπτα σώματα της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής έγκειται στην εφαρμογή της άρθρωσης (mate: hinge). Η συγκεκριμένη σχέση περιορίζει την κίνηση ανάμεσα σε δυο μέλη στον ένα άξονα περιστροφής και αφορά τον καθορισμό των στοιχείων που περιγράφουν την άρθρωση με συνδυασμό την επαφή (coincident) και ομόκεντρα (concentric) στα ελάσματα.

Ιδιαίτερη υπόσταση αποτελεί η προσομοίωση του υδραυλικού γραμμικού συστήματος φρένων και η συσχέτισή του με τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα μέλη της δομικής κατασκευής, με σκοπό την ομαλή διχοτόμηση της γωνίας της άρθρωσης με τον ορθοστάτη και τις δοκούς, όπως επίσης και το φρενάρημα. Διαγώνια μέλη κυλινδρικής διατομής συνδέονται αρθρωτά με τα ελάσματα της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής, καθώς επίσης και με το άνω τμήμα του φρένου. Αντιθέτως, η επιτυχία της γραμμικής αξονικής κίνησης του άνω τμήματος του φρένου στον ορθοστάτη, έγκειται στις σχέσεις παραλληλίας και εφαπτομενικής επαφής που επιτρέπουν την μετακίνηση μόνο στον ένα άξονα, αποτρέποντας κάθε περιστροφή μ' ένα δεύτερο σώμα. Άρθρωση χαρακτηρίζει επίσης τη σύνδεση των τροχαλιών με τους ορθοστάτες.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της μοντελοποίησης αποβαίνει στην προσομοίωση των καλωδίων (εικόνα 7.2). Η δομική σύσταση των δυο καλωδίων ορίζεται από την σημειακή

σύνδεση πολλαπλών μελών μεταξύ τους, επιτρέποντας στα άκαμπτα σώματα να μετακινούνται μόνο στον ένα άξονα και όχι να περιστρέφονται σε συνάρτηση με το δεύτερο σώμα. Το αξονικό επίπεδο των μελών συσχετίζεται συγχρόνως με ένα κάθετο επίπεδο που διχοτομεί τις τροχαλίες ώστε να επιτυγχάνεται ο περιορισμός της κίνησης των μελών μόνο στον ένα άξονα (z). Ένας ιδεατός διαγώνιος άξονας καθορίζει την εφαρμογή των μελών των καλωδίων στις δυο στηρίξεις εδάφους και προδιαγράφει τη γραμμική κίνηση του ενεργοποιητή στο στάδιο της ανάλυσης. Τα δυο καλώδια παρουσιάζουν την ίδια αντιμετώπιση.



Εικόνα 7.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της μοντελοποίησης των καλωδίων.

7.3. Ανάλυση Κίνησης

7.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά και ρυθμίσεις

Η απόδοση της κινητικής υβριδικής δομής επιτυγχάνεται μέσα από την ανάλυση της κίνησης από το Solidworks Motion και επικεντρώνεται στην ανάλυση των μετακινούμενων συστημάτων και μηχανισμών. Ο υπολογισμός της κίνησης στηρίζεται

στην ολοκληρωμένη μέθοδο επίλυσης GSTIFF [7.2]. Γενικότερα, η κίνηση των συστημάτων καθορίζεται από τα ακόλουθα:

- Γεωμετρικές σχέσεις που συνδέουν τα μέλη (Mates connecting parts),
- Τη μάζα και τις αδρανειακές ιδιότητες των μελών (The mass and inertia properties of the components),
- Ενεργοποιητές (Driving motions: motors or actuators),
- Βαρύτητα (Gravity),
- Χρόνο (Time),
- Βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom)

Η μοντελοποίηση του κινητικού υβριδικού συστήματος αποτέλεσε τον πυλώνα για τον υπολογισμό της κίνησης. Οι γεωμετρικές σχέσεις και οι περιορισμοί που έχουν καθοριστεί στο στάδιο της μοντελοποίησης υποδεικνύουν την ανάλογη συμπεριφορά του συστήματος. Διακριτά και ουσιώδη γνωρίσματα του συγκεκριμένου σταδίου αποτελούν η μεταφορά των γεωμετρικών σχέσεων από το επίπεδο της μοντελοποίησης στο επίπεδο ανάλυσης της κίνησης μέσω της εφαρμογής των ευέλικτων αρθρώσεων. Οι τελευταίες εκφέρουν χαρακτηριστικά στις αρθρώσεις σύμφωνα με τις ρεαλιστικές προδιαγραφές. Τα ιστροπικά «Bushings» εφαρμόζονται με σκοπό τη μοντελοποίηση των αρθρώσεων με πιθανές τριβές κατά τη διαδικασία μεταβολής της κινητικής υβριδικής δομής. Ο ορισμός επίσης των επαφών στα πολλαπλά σώματα, ορίζεται με σκοπό την αποφυγή σύγκρουσης των σωμάτων μεταξύ τους, τον καθορισμό δράσης των μελών μεταξύ τους, τον έλεγχο τριβών και των ελαστικών ιδιοτήτων των μελών [(7.1), [7.2)].

Παράλληλα, απαραίτητη προϋπόθεση στο σχεδιασμό της κίνησης και της μετάβασης των βημάτων του μοτίβου ακολουθίας, αποβαίνει στο καθορισμό της σχέσης κλειδώματος (mate: lock) των γωνίων των αρθρώσεων. Η σχέση κλειδώματος διατηρεί κλειδωμένα δυο άκαμπτα σώματα μεταξύ τους, ώστε να μην υπάρξει οποιαδήποτε κίνηση κατά την άσκηση μιας δύναμης. Η ενέργεια αυτή υποδηλώνεται μετά από κάθε βήμα το οποίο έχει επιτύχει την επιθυμητή θέση της γωνίας της άρθρωσης και διατηρεί κλειδωμένη την

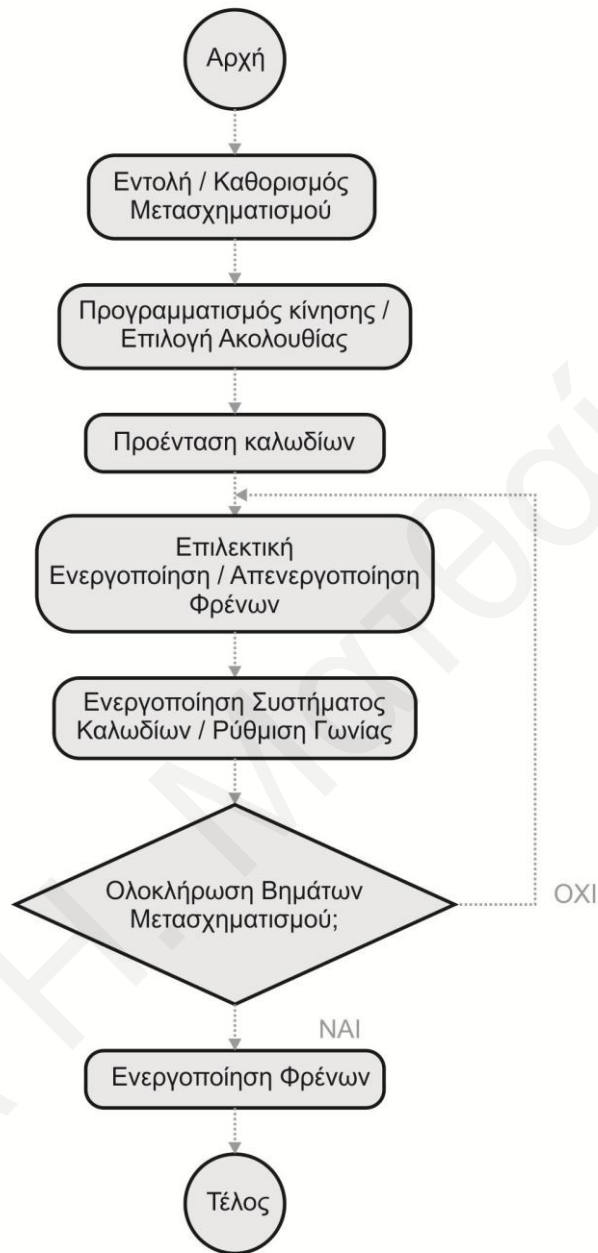
συγκεκριμένη μέχρι την ολοκλήρωση των βημάτων και συνάμα της τελικής θέσης του συστήματος [(7.1), [7.2)].

Νευραλγικός πυλώνας σχεδιασμού της κίνησης έγκειται στην ακολουθία κίνησης αποτελούμενη από μια διαδοχική σειρά καταστάσεων βάσει του παράγοντα χρόνου. Η κάθε αποστολή ορίζεται από την πρόκληση ενός εισερχόμενου ερεθίσματος και συσχετίζεται με την πρόκληση της δράσης που ελέγχει ή καθορίζει την κίνηση κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η κατάσταση αναγνώρισης του εισερχόμενου ερεθίσματος αποτελείται από την έναρξη ή την ολοκλήρωση μιας αποστολής της ακολουθίας της κίνησης. Οι δυνατότητες επιλογής της δράσης ενέχουν τη λειτουργία, ή την καταστολή των ενεργοποιητών και των γεωμετρικών σχέσεων (mates) [7.2].

Δυο γραμμικοί ενεργοποιητές (linear servo motors) εφαρμόζονται στα ακρινά μέλη και των δυο καλωδίων και ενεργοποιούνται ανάλογα με την τροπή που απαιτείται να παρουσιάσει το σύστημα, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θέση της γωνίας της άρθρωσης σε κάθε βήμα.

7.3.2. Ακολουθία κίνησης του κινητικού υβριδικού συστήματος

Η αρχή σχεδιασμού της κίνησης διέπεται από τη λειτουργία του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (E4B), καθώς σε κάθε βήμα ρυθμίζεται μια γωνία άρθρωσης του συστήματος. Για το λόγο αυτό, σε κάθε βήμα συντονίζονται παράλληλα η δράση των ενεργοποιητών και οι ελεύθερες ή κλειδωμένες αρθρώσεις. Η ολοκλήρωση της ρύθμισης από την αρχική στην τελική θέση επιτυγχάνεται σε μια σειρά έξι βημάτων μέσω της λειτουργίας των γραμμικών ενεργοποιητών στις στηρίξεις. Η ακολουθία της κίνησης και η ομαλή διεκπεραίωση των βημάτων επηρεάζεται άμεσα από τη προένταση των καλωδίων και συνεπώς εισάγεται ένα στάδιο προέντασης πριν την έναρξη της ακολουθίας με κλειδωμένες όλες τις αρθρώσεις και μετά το πρώτο βήμα. Η ρύθμιση και η τροποποίηση του μήκους των καλωδίων μέσω των γραμμικών ενεργοποιητών επιφέρει την επιθυμητή γωνιακή ρύθμιση. Θεωρείται ότι οι αισθητήρες στην κατασκευή είναι υπεύθυνοι για τη μέτρηση των γωνιών στις αρθρώσεις. Η διεύθυνση της κίνησης του συστήματος ελέγχεται από υπολογιστικό πρόγραμμα (εικόνα 7.3).



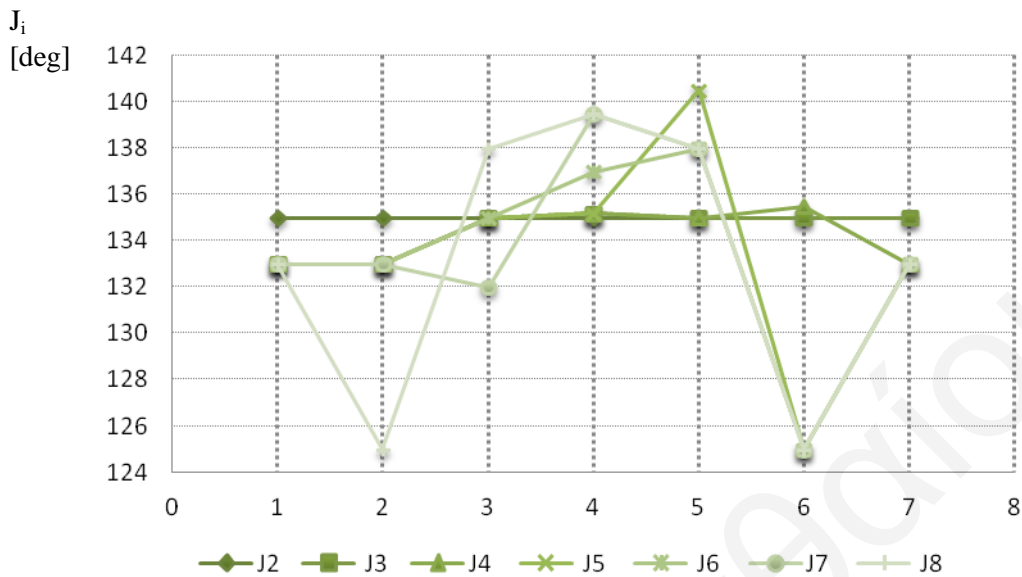
Εικόνα 7.3 Λογικό διάγραμμα της ακολουθίας της κίνησης.

Αρχικά τα δυο καλώδια υφίστανται μερική προένταση με κλειδωμένες όλες τις αρθρώσεις, ώστε να αποφευχθεί το χαλάρωμα των μελών που προκύπτει από την μοντελοποίηση. Η ρύθμιση της γωνίας της άρθρωσης από την αρχική θέση $J_2=135^\circ$ στην τελική θέση $J_2=133^\circ$ απαιτεί την ανάλογη τροπή του συστήματος προς τα αριστερά. Η κατεύθυνση αυτή, είναι όμοια με τη συμπεριφορά του συστήματος όταν η βαρύτητα

επενεργεί χωρίς τα καλώδια. Επομένως, ο γραμμικός ενεργοποιητής στα αριστερά θα ελευθερώσει το μήκος του καλωδίου (L_1) ώστε να επιτρέψει στη J_2 να πάρει τη τελική θέση (μείωση) σύμφωνα με τη βαρύτητα. Ο ενεργοποιητής στα δεξιά τεντώνει το καλώδιο (L_2) για να αποφευχθεί η χαλάρωση του καλωδίου εφόσον η αντίστοιχη γωνιά τείνει να μειωθεί. Στο βήμα [2] το σύστημα τείνει να κατευθυνθεί προς τα αριστερά σύμφωνα με τη βαρύτητα, αντίθετα από ότι θα έπρεπε να κινηθεί για να ρυθμιστεί η J_8 . Η αρχική θέση της αντίστοιχη γωνίας είναι $J_8=135^\circ$ και η τελική της θέση $J_8=133^\circ$. Το καλώδιο (L_2) ενεργοποιείται τεντώνοντας το μήκος του, ενώ το (L_1) ελευθερώνει το μήκος του ώστε να επιτρέψει στο (L_2) να ενεργήσει ομαλά και να μειώσει τη τιμή της J_8 .

Πίνακας 7.1 Θέση της γωνίας άρθρωσης J_i σε κάθε βήμα.

J_i $\Delta J_{i\text{target}}$	Αρχική θέση	Εντολή					
		Βήμα 1	Βήμα 2	Βήμα 3	Βήμα 4	Βήμα 5	Βήμα 6
J_2 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	133 2	133 -	133 -	133 -	133 -	133 -
J_3 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	133 -	133 -	133 -	133 -	133 -	125 10
J_4 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	135 -	135 -	135 -	135 -	133 2	138 6
J_5 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	135.18 0.18	135.18 -	135.18 -	137 1.82	139.50 2.50	139.50 -
J_6 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	135 -	135 -	140.50 5.5	138 2.5	138 -	138 -
J_7 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	135 -	135.50 0.50	125 10.50	125 -	125 -	125 -
J_8 [deg] $\Delta J_{i\text{target}}$ [deg]	135 -	135 -	133 2	133 -	133 -	133 -	133 -



Εικόνα 7.4 Θέση γωνιών των αρθρώσεων κατά τα διακριτά βήματα της ακολουθίας της κίνησης (1: Αρχική Θέση, 2: βήμα 1, 3: Βήμα 2, 4: Βήμα 3, 5: Βήμα 4, 6: Βήμα 5, 7: Βήμα 6).

Η μείωση της γωνίας της άρθρωσης J_7 (προκειμένου να λάβει την τελική τιμή $J_7=125^\circ$) απαιτεί την τροπή του συστήματος προς τα δεξιά, σύμφωνα και με τη βαρύτητα. Ο γραμμικός ενεργοποιητής επιτρέπει στο καλώδιο (L_2) να ελευθερωθεί, ενώ το καλώδιο (L_1) τεντώνεται ώστε να συνδράμει με το (L_2) στη μείωση της J_7 . Η τροπή του συστήματος που ανάγεται από την βαρύτητα είναι ταυτόσημη με αυτή που πρέπει να κατευθυνθεί το σύστημα στο βήμα [4], ώστε να ρυθμιστεί η J_6 . Στην περίπτωση αυτή, δρα ο γραμμικός ενεργοποιητής στο (L_2) μέσω ελευθέρωσης του μήκους και στο καλώδιο (L_1) μέσω προέντασης, ελέγχοντας βάσει της ελευθέρωσης του μήκους πόσο θα κινηθεί το σύστημα με τη βαρύτητα. Ακολούθως, ο συγχρονισμός των καλωδίων στο βήμα [5] απαιτεί την ελευθέρωση του καλωδίου (L_1) και την προένταση του καλωδίου (L_2), ώστε να επιτευχθεί η μείωση της J_5 . Το καλώδιο (L_2) δραττει ενεργά (προένταση) γιατί αποτρέπει το σύστημα να κατευθυνθεί προς τα δεξιά (βαρύτητα), αντίθετα από ότι χρειάζεται για να εξασφαλιστεί η μείωση της J_5 . Η ίδια αντιμετώπιση ισχύει για το βήμα [6], όπου το σύστημα τείνει να κατευθυνθεί προς τα δεξιά, αυξάνοντας την τιμή της γωνίας της άρθρωσης J_3 και μειώνοντας την τιμή της J_4 . Για το λόγο αυτό, ο γραμμικός ενεργοποιητής στα αριστερά προεντίνει το καλώδιο (L_1) ενώ το καλώδιο (L_2) ελευθερώνεται, ώστε το

σύστημα να κατευθυνθεί αντίθετα με τη βαρύτητα και να επιτευχθεί η μείωση της J_3 και η αύξηση της J_4 .

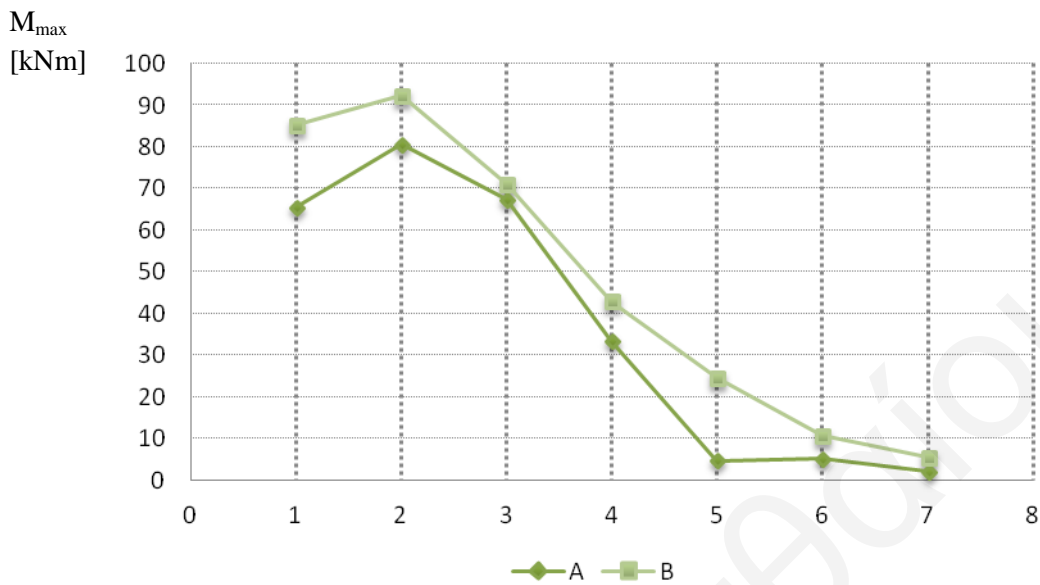
7.3.3. Αποτελέσματα της ανάλυσης της κίνησης

Η ανάλυση της κίνησης του κινητικού υβριδικού πρωτοτύπου στηρίζεται στα αποτελέσματα των ροπών στις κλειδωμένες αρθρώσεις, των αξονικών τάσεων στα καλώδια (L_1) και (L_2) καθώς και στην μετατόπιση των καλωδίων σε κάθε βήμα, ώστε να επιτευχθεί η τελική θέση του συστήματος. Ιδιαίτερα σημαντική αποτελεί η συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων με το λογισμικό πρόγραμμα Working Model στο κεφάλαιο 5.

Η συγκριτική αποτίμηση της μέγιστης ροπής στις κλειδωμένες αρθρώσεις χωρίς την προένταση και με την προένταση των δυο καλωδίων (πίνακας 7.2 και εικόνα 7.5) που προηγείται της ακολουθίας των κινήσεων του συστήματος, καθορίζουν ότι η προένταση δεν επηρεάζει τις μεγάλες τιμές των ροπών που παρατηρούνται στο πρωταρχικό στάδιο της προέντασης. Οι μεγάλες τιμές των ροπών παρατηρούνται επίσης και στα αποτελέσματα της ανάλυσης χωρίς την προένταση των καλωδίων. Οι μέγιστες τιμές των ροπών και στις δυο περιπτώσεις βρίσκονται στις J_2 , J_3 και J_4 έναντι των J_5 , J_6 , J_7 και J_8 , λόγω του γεγονός ότι το σύστημα τείνει να περιστραφεί προς τα αριστερά σύμφωνα με τη βαρύτητα. Μείωση της τάξεως του 23.06% παρατηρείται στη J_2 χωρίς την προένταση των καλωδίων, 12.85% στη J_3 , 5.17% στη J_4 , 22.19% στη J_5 , 80.67% στη J_6 , 51.11% στη J_7 και 62.07% στη J_8 .

Πίνακας 7.2 Συγκριτική αποτίμηση της μέγιστης ροπής στις κλειδωμένες αρθρώσεις χωρίς την προένταση και με την προένταση.

Βήμα	$J_{2, \max}$ [kNm]	$J_{3, \max}$ [kNm]	$J_{4, \max}$ [kNm]	$J_{5, \max}$ [kNm]	$J_{6, \max}$ [kNm]	$J_{7, \max}$ [kNm]	$J_{8, \max}$ [kNm]
Χωρίς προένταση	65.64	80.57	67.38	33.37	4.76	5.28	2.09
Προένταση	85.32	92.45	71.05	42.89	24.63	10.80	5.51

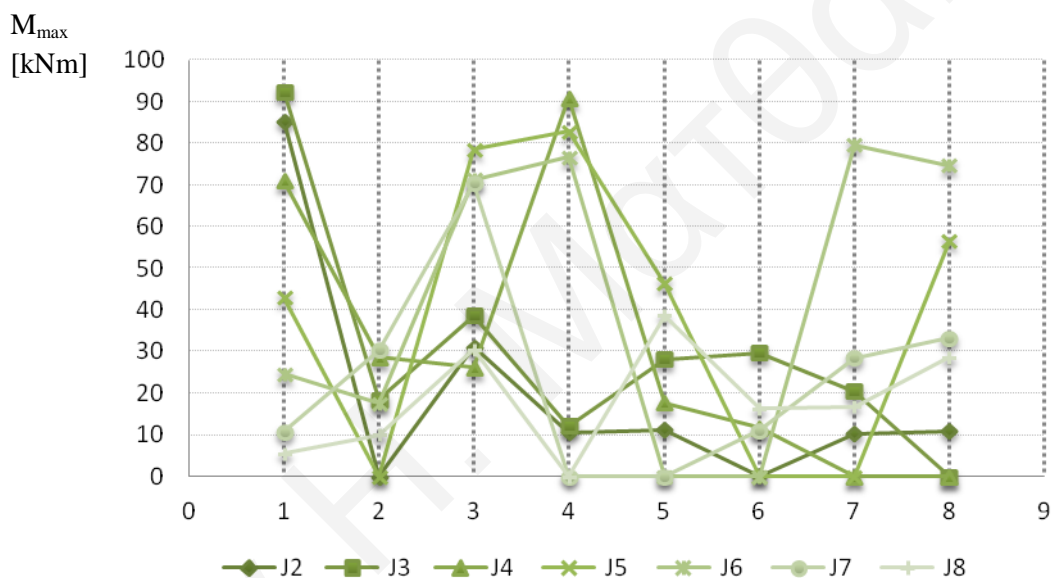


Εικόνα 7.5 Συγκριτική αποτίμηση της μέγιστης ροπής (A: κλειδωμένες αρθρώσεις χωρίς την προένταση, B: προένταση).

Η μέγιστη ροπή στις κλειδωμένες αρθρώσεις για κάθε βήμα στην ακολουθία της κίνησης του κινητικού υβριδικού πρωτοτύπου παρουσιάζεται στον πίνακα 7.3. Μέγιστες τιμές παρουσιάζουν οι J_3 και J_5 στο στάδιο της προέντασης αντίστοιχα με 92.45 kNm και 78.59 kNm, η J_4 στο βήμα [2] με 90.94 kNm, η J_6 με 79.63 kNm στο βήμα 5 και 74.69 kNm στο βήμα 6. Αν εξαιρέσουμε τα στάδια της προέντασης, τα βήματα που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές στις ροπές είναι αυτά που η τροπή του συστήματος για να ρυθμιστεί η γωνία της άρθρωσης είναι αντίθετη με τη τροπή που αναπτύσσει στη βαρύτητα.

Πίνακας 7.3 Μέγιστη ροπή στις κλειδωμένες αρθρώσεις.

Βήμα	$J_{2, \max}$ [kNm]	$J_{3, \max}$ [kNm]	$J_{4, \max}$ [kNm]	$J_{5, \max}$ [kNm]	$J_{6, \max}$ [kNm]	$J_{7, \max}$ [kNm]	$J_{8, \max}$ [kNm]	M_{\max} [kNm]
Προεν.	85.32	92.45	71.05	42.89	24.63	10.80	5.51	92.45
Βήμα 1	0	18.43	28.65	0	17.60	30.31	10.06	30.31
Προεν.	31.14	38.70	26.12	78.59	71.33	70.33	30.52	78.59
Βήμα 2	10.57	12.15	90.94	82.81	76.71	0	0	90.94
Βήμα 3	11.26	28.16	17.75	46.33	0	0	38.71	28.16
Βήμα 4	0.05	29.73	11.71	0	0	11.03	16.30	29.73
Βήμα 5	10.35	20.39	0	0	79.63	28.51	16.70	79.63
Βήμα 6	10.83	0	0	56.60	74.69	33.21	28.67	74.69

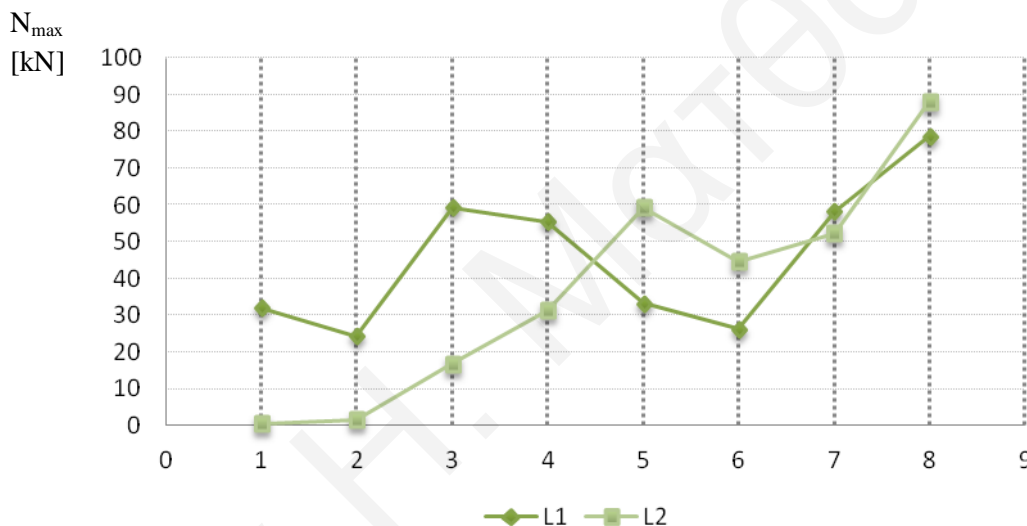


Εικόνα 7.6 Μέγιστη ροπή σύμφωνα με τα βήματα (1: Προένταση, 2: βήμα 1, 3: Προένταση, 4: Βήμα 2, 5: Βήμα 3, 6: Βήμα 4, 7: Βήμα 5, 8: Βήμα 6).

Οι μέγιστες τιμές αξονικών τάσεων αναπτύσσονται στο καλώδιο (L_2) στο βήμα [6] με 88.19 kN, στο βήμα [3] με 59.40 kN και στο βήμα [4] με 44.54 kN ενώ στο καλώδιο (L_2) στο στάδιο της προέντασης με 59.36 kN, στο βήμα [5] με 58.19 kN, στο βήμα [2] με 55.53 kN (πίνακας 7.4 και εικόνα 7.7). Συγκριτικά και των δυο καλωδίων η μέγιστη τιμή αναπτύσσεται στο καλώδιο (L_2) στο βήμα [6] και οι ελάχιστες τιμές στο βήμα [1] στο καλώδιο (L_1). Μέγιστες μετατοπίσεις των καλωδίων παρατηρούνται στα βήματα [5], [6] και [3], όπου για να ρυθμιστεί η γωνία της άρθρωσης απαιτεί μεγαλύτερο βαθμό περιστροφής των μελών έναντι των υπολοίπων αρθρώσεων.

Πίνακας 7.4 Μέγιστη αξονική δύναμη στα καλώδια και μετατόπιση.

Βήμα	$L_{1, \max}$ [kN]	$L_{2, \max}$ [kN]	N_{\max} [kN]	L_1 Δl_{\max} [cm]	L_2 Δl_{\max} [cm]
Προένταση	31.94	0.52	31.94	20.0	23.0
Βήμα 1	24.32	1.55	24.32	-1.0	3.0
Προένταση	59.36	16.77	59.36	6.5	5.5
Βήμα 2	55.53	31.34	55.53	-6.0	7.0
Βήμα 3	33.24	59.40	59.40	13.0	-17.5
Βήμα 4	26.21	44.54	44.54	2.5	-1.5
Βήμα 5	58.19	52.38	58.19	-8.5	28.0
Βήμα 6	78.73	88.19	88.19	23.8	-23.0



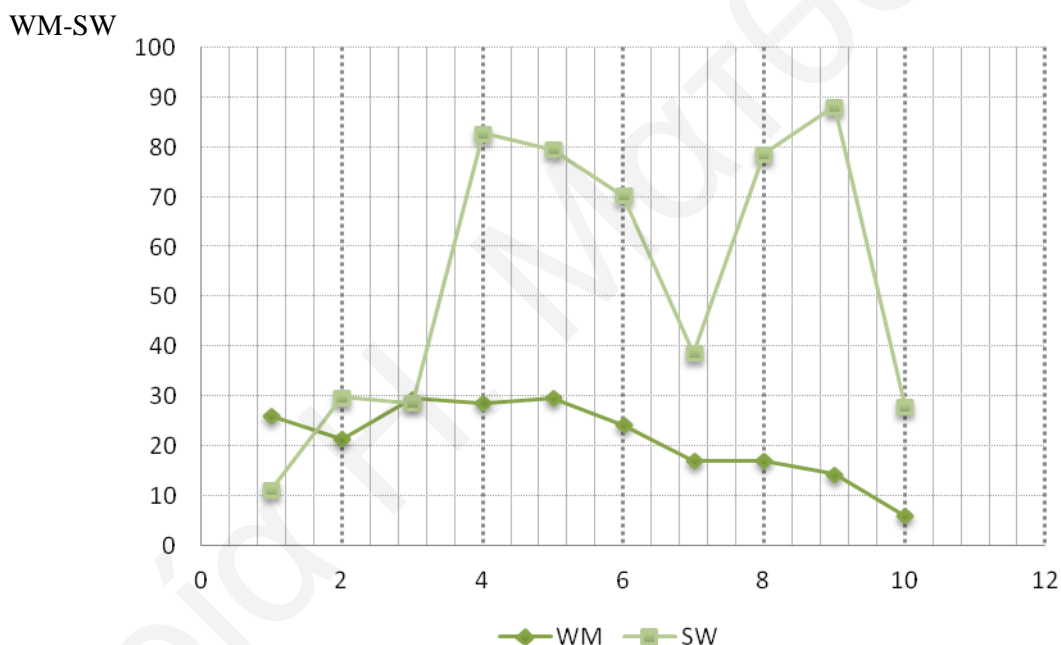
Εικόνα 7.7 Μέγιστη αξονική δύναμη στα καλώδια (1: Προένταση, 2: βήμα 1, 3: Προένταση, 4: Βήμα 2, 5: Βήμα 3, 6: Βήμα 4, 7: Βήμα 5, 8: Βήμα 6).

Η συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων σχετικά με τις ροπές, τις αξονικές τάσεις και τις μετατοπίσεις των καλωδίων όπως αυτές έχουν εξαχθεί από τις αντίστοιχες αναλύσεις στα λογισμικά προγράμματα, Working Model και Solidworks Essential, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5 και εικόνα 7.8. Γενικότερα, παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των πιο πάνω κριτηρίων ανάλυσης της κινητικής υβριδικής δομής παρουσιάζονται μέσω του λογισμικού Solidworks Essentials. Πιο συγκεκριμένα, μείωση των ροπών στις κλειδωμένες αρθρώσεις της τάξεως του 57% παρατηρείται στη J_2 και 2% στη J_4 μέσω Solidworks Essentials. Αύξηση στις ροπές της τάξεως του 28% στη J_3 , 65% στη J_5 , 63% στη J_6 , 65% στη J_7 και 56% στη J_8 . Επίσης, οι αξονικές τάσεις παρουσιάζονται αυξημένες

στην ανάλυση μέσω Solidworks Essentials έναντι της ανάλυσης μέσω Working Model. Το ποσοστό αύξησης στο καλώδιο (L_1) είναι 78% και στο καλώδιο L_2 είναι 84%. Αύξηση της τάξεως του 79% παρατηρείται στην μετατόπιση των καλωδίων μέσω Solidworks Essentials.

Πίνακας 7.5 Συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων (WM: Working Model, SW: SolidWorks).

	$J_{2, \max}$ [kNm]	$J_{3, \max}$ [kNm]	$J_{4, \max}$ [kNm]	$J_{5, \max}$ [kNm]	$J_{6, \max}$ [kNm]	$J_{7, \max}$ [kNm]	$J_{8, \max}$ [kNm]	$L_{1, \max}$ [kN]	$L_{2, \max}$ [kN]	Δl_{\max} [cm]
WM	26.09	21.42	29.36	28.67	29.69	24.29	17.10	17.09	14.37	6.00
SW	11.26	29.73	28.65	82.81	79.63	70.33	38.71	78.73	88.19	28.00



Εικόνα 7.8 Συγκριτική αποτίμηση των αποκρίσεων (WM: Working Model, SW: SolidWorks).

7.4. Συμπεράσματα

Η προένταση που υφίστανται τα καλώδια σε κάθε βήμα επηρεάζει άμεσα την κατεύθυνση της κίνησης του συστήματος. Υπάρχουν περιπτώσεις που η προένταση στο βήμα υπό εκτέλεση είναι κατάλληλη για να επιφέρει τη σωστή τροπή στο επερχόμενο βήμα. Επιπλέον, η αυξημένη προένταση μπορεί να επιφέρει μεγάλες καταπονήσεις στα μέλη. Η σχέση μεταξύ των καλωδίων είναι ιδιαίτερα σημαντική εφόσον όταν το ένα χαλαρώσει

λίγο και το άλλο τεντώσει περισσότερο ή το αντίθετο υπάρχει η πιθανότητα να στραφεί προς άλλη κατεύθυνση το σύστημα. Η συνολική θέση του γενικότερου συστήματος επηρεάζει άμεσα τη ρύθμιση της γωνίας της άρθρωσης. Ο γραμμικός ενεργοποιητής ελευθερώνει το καλώδιο στις περιπτώσεις που η ρύθμιση της γωνίας της άρθρωσης, είτε για να αυξηθεί, είτε να μειωθεί, είναι αντίστοιχη με την τροπή της βαρύτητας. Σ' αντίθεση με το προηγούμενο, όταν η τροπή του συστήματος σύμφωνα με τη βαρύτητα επιφέρει αντίθετα αποτελέσματα στη ρύθμιση της γωνίας της άρθρωσης που προβλέπει το εκάστοτε βήμα, τότε ο γραμμικός ενεργοποιητής τεντώνει το ανάλογο καλώδιο που συνεισφέρει στη ρύθμιση της επιθυμητής γωνίας. Αξίζει ν' αναφερθεί ότι η ανάλυση της κίνησης διέκρινε ότι οι μέγιστες ροπές παρουσιάζονται στις περιπτώσεις που η τροπή του συστήματος σύμφωνα με τη βαρύτητα είναι αντίθετη από αυτή που απαιτείται για να ρυθμιστεί η γωνία της άρθρωσης. Αντίστοιχα, σε πρακτικό επίπεδο, η κίνηση της κατασκευής θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί με το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα όπου δηλώνεται η μεταβολή που θα λάβει ο ενεργοποιητής αντί της δήλωσης της γωνίας που πρέπει να αποκτήσει η άρθρωση.

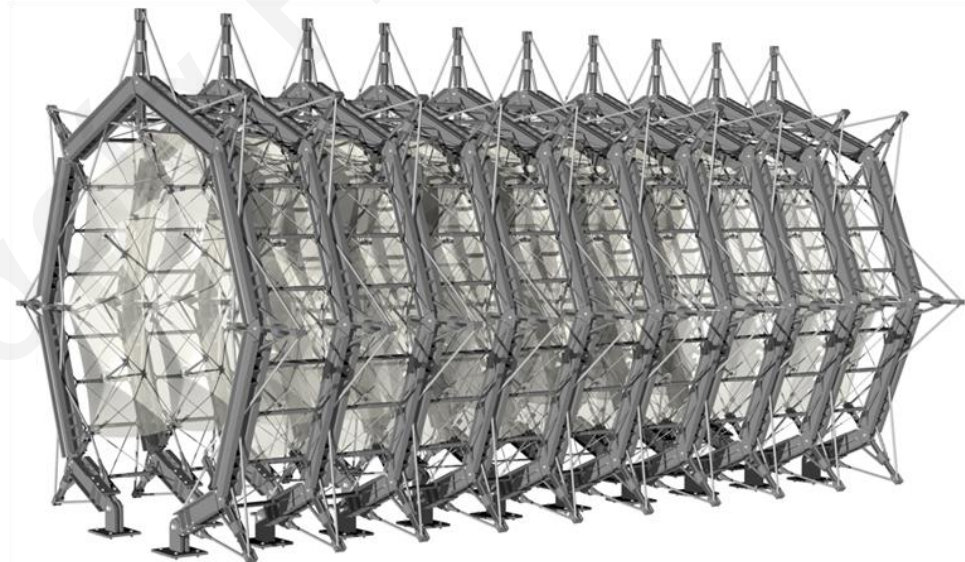
Πρωτίστως, η παρούσα ανάλυση του συστήματος με το λογισμικό Solidworks Essentials έχει στόχο την επαλήθευση λειτουργίας της υβριδικής κινητικής δομής βάσει της λειτουργίας του δευτερεύοντος κυρίως συστήματος. Επιπλέον, η συγκριτική αποτίμηση της ανάλυσης μεταξύ των δυο λογισμικών προγραμμάτων παρουσιάζει γενικότερα αυξημένες τιμές στη δεύτερη φάση της ανάλυσης της κίνησης της υβριδικής δομής μέσω Solidworks Essentials. Ο λόγος οφείλεται κυρίως στην εξέλιξη και μοντελοποίηση της δομικής κατασκευής σε περισσότερη κατασκευαστική και μηχανική λεπτομέρεια, εφαρμόζοντας τα ελάσματα στις αρθρώσεις, τον υδραυλικό γραμμικό ενεργοποιητή στις αρθρώσεις, τις τροχαλίες και τα καλώδια.

Κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μοντελοποίηση και η ανάλυση της κίνησης της υβριδικής δομής εφόσον καταγράφεται η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος σε σχέση με τα καλώδια, η αλληλένδετη σχέση και συνέργεια μεταξύ των δυο καλωδίων και η δράση των καλωδίων απέναντι στις τοπικές ρυθμίσεις των γωνίων των αρθρώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ

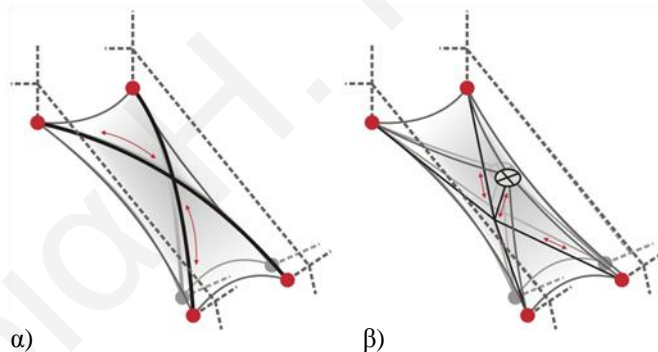
8.1 Εισαγωγή

Το εξωτερικό περίβλημα της προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομικής κατασκευής (εικόνα 8.1) βασίζεται ιδιαίτερα στην επιλογή του κατάλληλου υλικού, επιτυγχάνοντας μέσω της δομικής του σύστασης, την κατασκευαστική απόδοση, την ικανότητα να υποστηρίζει σχετικά μεγάλα ανοίγματα με αποκλειστικά ελαστικές παραμορφώσεις και την αποφυγή επιβάρυνσης της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής με εσωτερικές καταπονήσεις [8.1]. Επιπλέον, η ευελιξία του υλικού συνδράμει στην τροποποίηση της δομής του κατασκευαστικού περιβλήματος με σκοπό να υποστηρίξει τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται ανόμοιες διαμορφώσεις και προκύπτουν από κάθε μεταβολή του μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (4-bar linkage). Οι απαιτήσεις για υψηλό ποσοστό ευελιξίας προτάσσουν την ανάγκη για εφαρμογή υλικών με αυξημένο μέτρο ελαστικότητας. Στην παρούσα διερεύνηση, η εφαρμογή της μεμβράνης δεν εξυπηρετεί σε θερμικό διάφραγμα στο λειτουργικό χώρο ωστόσο περιορίζεται στην προστασία από τις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 8.1 Ισομετρική άποψη της τρισδιάστατης κινητικής υβριδικής δομής εφαρμόζοντας το ενεργό υβριδικό δομικό σύστημα περιβλήματος.

Στο κεφάλαιο προτείνονται δυο συστήματα μεταβαλλόμενου κατασκευαστικού περιβλήματος εφαρμόζοντας THV– Τετραφλουοροαιθυλένιο εξαφλουοροπροπυλένιο βινυλιδένιο–μεμβράνες με κύρια χαρακτηριστικά τους: την παθητική ανταπόκριση στους πολλαπλούς μετασχηματισμούς της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής και τον ενεργό έλεγχο για βελτίωση των εντατικών συνθηκών στη μεμβράνη (εικόνα 6.2). Στοιχεία με διπλή παραβολοειδή καμπύλη και υψηλή ελαστικότητα διασυνδέουν τις μεμβράνες THV με την πρωτεύουσα δομική κατασκευή. Οι μονάδες της μεμβράνης έχουν αρχικές συνολικές διαστάσεις στο επίπεδο 1.0 x 2.3 m και η ακτίνα της παραβολοειδούς καμπύλης 20-25 cm. Το σύστημα του περιβλήματος τοποθετείται σε απόσταση περίπου 30 cm κάτω από την πρωτεύουσα δομική κατασκευή για διατήρηση της συνέχειας του υλικού στο περίβλημα. Ένα δευτερεύον σύστημα υποστηρίζει τις μονάδες της μεμβράνης, ώστε να αποφευχθεί η άμεση σύνδεσή τους με το πρωτεύον δομικό σύστημα. Η συγκρότηση της δευτερεύουσας δομικής κατασκευής έγκειται σε βοηθητικούς συνδέσμους που τοποθετούνται στο κάτω άκρο των ορθοστατών και υποστηρίζουν παράλληλα τη μεμβράνη με διπλή καμπυλότητα στα ακρινά και κεντρικά της σημεία ([8.2], [8.3], [8.4]).



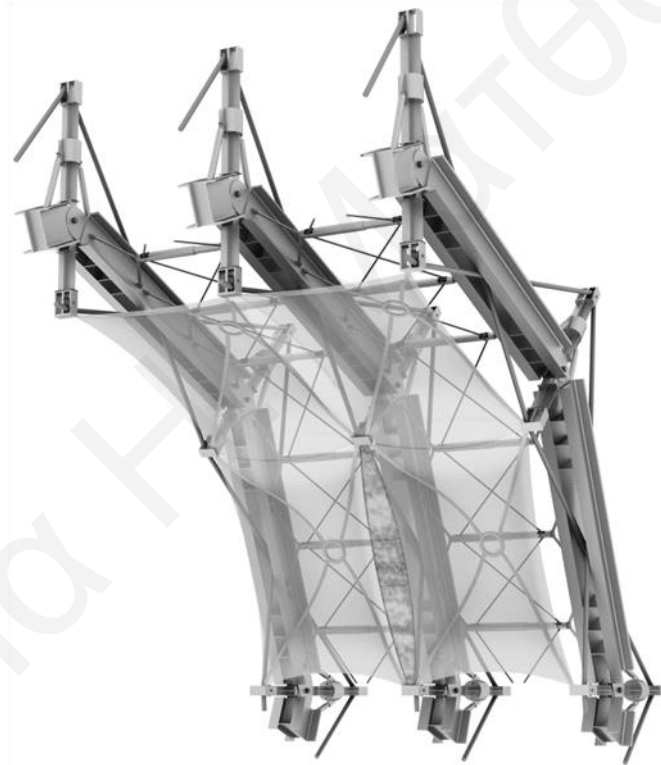
Εικόνα 8.2 Προσαρμόσιμο κατασκευαστικό περίβλημα α) Παθητικό σύστημα β) Ενεργό σύστημα.

8.2 Συστήματα κατασκευαστικού περιβλήματος

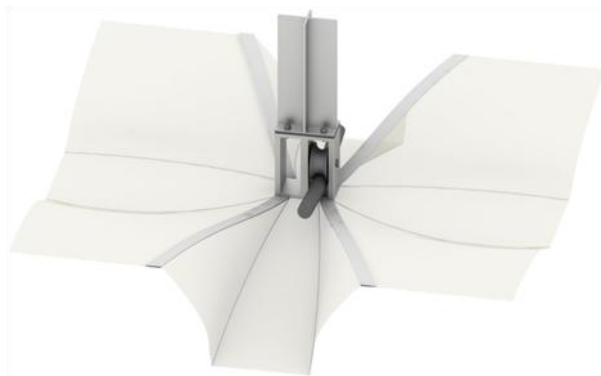
8.2.1 Παθητικό σύστημα περιβλήματος

Η προτεινόμενη τυπολογία κατασκευαστικού περιβλήματος ανταποκρίνεται παθητικά στην κίνηση των πρωτεύοντων μελών. Ένεργα καμπτόμενα μέλη (bending active members) διατεταγμένα σε τύπο ψαλιδιού στο οριζόντιο επίπεδο συνδέονται στα

κατώτερα σημεία των ορθοστατών και στα άνω σημεία των μεμβράνων μέσω αντίστοιχων μεταλλικών δακτυλίων (εικόνα 8.3). Τα μέλη είναι καμπυλόμορφα στον ασθενή άξονα (κατακόρυφη διεύθυνση) μ' αποτέλεσμα οι σχετικές μεταβολές στο μήκος τους να προκύπτουν από την κίνηση των πρωτεύοντων μελών. Οι μεμβράνες διπλής καμπυλότητας διαμορφώνουν το σχηματισμό τους βάσει των συνθηκών από τις σχετικές στηρίξεις των συνδέσμων. Τα ενεργά καμπτόμενα μέλη συνδέονται στα κατώτερα άκρα των ορθοστατών με ορθογωνική διατομή που εμπεριέχει συγχρόνως τις τροχαλίες και τα συνεχόμενα καλώδια της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής (εικόνα 8.4) ([8.2], [8.3], [8.4]).



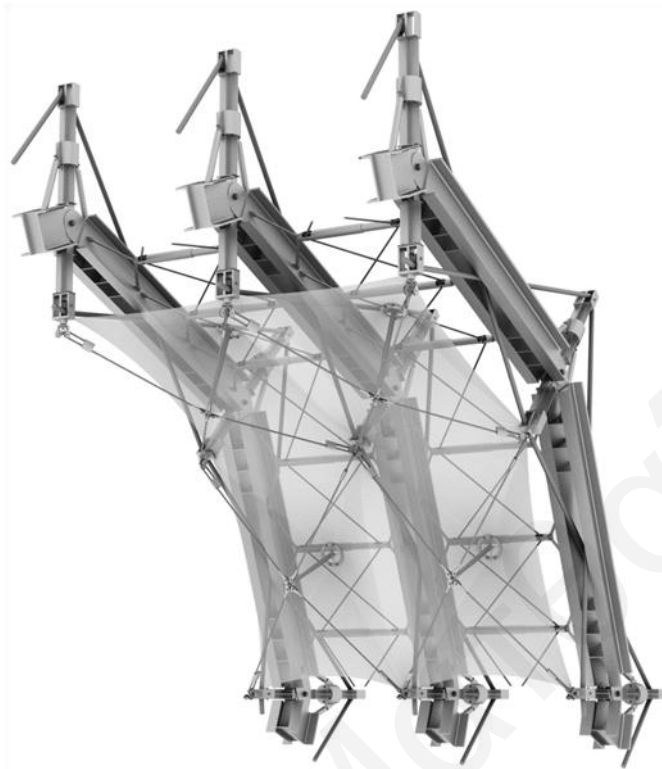
Εικόνα 8.3 Παθητικό σύστημα περιβλήματος με ενεργά καμπτόμενα μέλη.



Εικόνα 8.4 Λεπτομέρεια σύνδεσης ενεργά καμπτόμενων μελών με τους ορθοστάτες της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής.

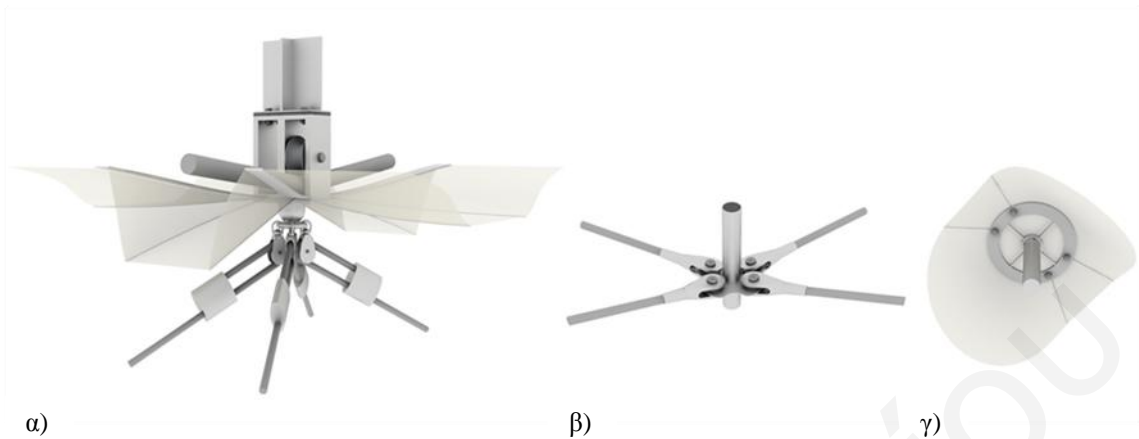
8.2.2 Ενεργό σύστημα περιβλήματος

Η υβριδική τυπολογία του ενεργού συστήματος του περιβλήματος απαρτίζεται κυρίως από την αντικατάσταση των ενεργών καμπτόμενων μελών με μεμβράνη διπλής καμπυλότητας. Το δευτερεύον καλωδιωτό σύστημα κλειστού κυκλώματος, οι τηλεσκοπικοί μεταλλικοί ορθοστάτες και οι μεμβράνες THV συγκροτούν την υβριδική δομή του περιβλήματος (εικόνα 8.4). Σε οποιαδήποτε λειτουργία του πρωτεύοντος συστήματος, η υβριδική δομή ενεργεί σύμφωνα με τη μεταφορά φορτίου. Η εισαγωγή των αξονικών δυνάμεων στα δευτερεύοντα μέλη υποστηρίζει την ακαμψία που σχετίζεται με τη μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων στις μεμβράνες. Καθώς η πρωτεύουσα δομική κατασκευή μεταβάλλει το σχήμα της, το ενεργό σύστημα περιβλήματος ανταποκρίνεται με την τροποποίηση των καλωδίων και του μήκους των ορθοστατών. Αναμένεται ότι το ενεργό σύστημα θα εξασφαλίζει μια ενιαία κατανομή της δύναμης στο υλικό της μεμβράνης. Επιπρόσθετα, οι διάφορες επικείμενες μεταβολές στις μονάδες των μεμβράνων αποτελούν τοπική ρύθμιση και ο συνολικός μετασχηματισμός της κατασκευής έγκειται από τις τοπικές μεταβολές ([8.2], [8.3], [8.4]).



Εικόνα 8.5 Ενεργό υβριδικό προσαρμόσιμο σύστημα περιβλήματος.

Ειδική σύνδεση με σφαιροειδή στοιχεία επικολλάται με ορθογωνική μεταλλική διατομή στα κατώτερα σημεία των ορθοστατών της πρωτεύουσας δομικής κατασκευής και επιτρέπει τρεις βαθμούς ελευθερίας (εικόνα 8.5). Στο τμήμα της ειδικής σύνδεσης βρίσκονται οι τροχαλίες ώστε να επιτρέπουν την κύλιση για τροποποίηση του μήκους των καλωδίων. Οι ειδικές συνδέσεις και η δράση των ενεργών δυνάμεων επιφέρουν την προσαρμογή των καλωδίων και της μεμβράνης σύμφωνα με το μετασχηματισμό της πρωτεύουσας φέρουσας δομής. Συνεπώς, διατηρείται ισορροπία στις δυο διευθύνσεις και αποφυγή εκκεντρότητας στα συνδετικά σημεία των δευτερεύοντων καλωδίων από πιθανούς μη συμμετρικούς μετασχηματισμούς. Η στήριξη της μεμβράνης επιτυγχάνεται με σύνδεση μεταλλικών ορθογωνικών ελασμάτων στο κατώτερο σημείο των ορθοστατών ([5.1], [5.2], [5.3]).



Εικόνα 8.6 Λεπτομέρειες σύνδεσης του ενεργού κατασκευαστικού συστήματος περιβλήματος: α) δευτερεύοντα καλώδια με ορθοστάτες πρωτεύουσας δομικής κατασκευής β) δευτερεύοντα καλώδια με δευτερεύοντες ορθοστάτες γ) σταθεροποίηση μεμβράνης στους δευτερεύοντες ορθοστάτες.

8.3 Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός του κτιριακού περιβλήματος με βάση το προτεινόμενο παθητικό ή ενεργό σύστημα δομών THV – μεμβρανών επιτρέπει στο δομικό σύστημα από ενεργά καμπτόμενα μέλη ή ορθοστάτες και εφελκυστικά στοιχεία μεταβαλλόμενου μήκους με τις μεμβράνες αντίστοιχης διπλής καμπυλότητας μέσω της κινηματικής τους, την αποφυγή επιπρόσθετων καταπονήσεων των πρωτευόντων μελών και πλαστικών παραμορφώσεων στο υλικό επικάλυψης κατά τη μεταφορά των μετασχηματισμών της πρωτεύουσας κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1. Ερευνητική συνεισφορά

Η ερευνητική πρόταση εγείρεται στον ολοκληρωμένο σχεδιασμό μιας κινητικής υβριδικής δομής. Άξονα ανάπτυξης αποτέλεσε η συζευγμένη και ενιαία στατική και κινητική λειτουργία της κατασκευαστικής δομής. Το πλαίσιο έρευνας και ανάλυσης της υφιστάμενης γνώσης σε στατικές και κινητικές υβριδικές δομές καθόρισε το ερευνητικό πρόβλημα. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας βασίζεται στην τυπολογική βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών δομών με κατεύθυνση τα υβριδικά δομικά συστήματα που προδιαγράφουν χαρακτηριστικά μείωσης ιδιοβάρους, μείωσης των καμπτικών και διατμητικών καταπονήσεων βάσει του ανοίγματος και δυνατότητας ενσωμάτωσης ενεργών μελών αποφεύγοντας τις πολύπλοκες τυπολογίες. Η κινητική υβριδική δομή συγκροτείται από αρθρωτά συνδεδεμένα μέλη και ένα δευτερεύον σύστημα ενίσχυσης ορθοστατών και καλωδίων. Η δυαδική λειτουργία των καλωδίων εξασφαλίζει την αποφόρτιση του πρωτεύοντος δομικού συστήματος και παράλληλα υποστηρίζει την αναδιαμόρφωση μέσω του ενεργού συστήματος ελέγχου. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κινητικής υβριδικής δομής αποτελεί η εφαρμογή του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων με ένα βαθμό ελευθερίας προκειμένου να επιτευχθεί η διαχείριση του ενεργού έλεγχου της κίνησης μειώνοντας το συνολικό ιδιοβάρος και κόστος της κατασκευαστικής δομής.

Η δομή της προτεινόμενης διατριβής και η μεθοδολογία της έρευνας διαρθρώνεται στην παρούσα μελέτη με κομβικά σημεία τη στατική συμπεριφορά των υβριδικών δομικών συστημάτων μέσα από την μη γραμμική παραμετρική ανάλυση (κεφάλαιο 2), την μεθοδολογία σχεδιασμού της προτεινόμενης κινητικής υβριδικής δομής (κεφάλαιο 3), την ανάλυση τυπολογίας υβριδικών δομικών συστημάτων στο κεφάλαιο 4 όπου επιχειρεί να καθορίσει λεπτομερώς το πρωτεύον και δευτερεύον κατασκευαστικό σύστημα ενσωματώνοντας τα στοιχεία ενεργού συστήματος ελέγχου στα πλαίσια του ενιαίου ολοκληρωμένου σχεδιασμού. Παράλληλα, επιλύεται το ζήτημα της διαφραγματικής λειτουργίας, εφόσον η κινητική υβριδική δομή θα μπορεί να αποτελέσει χωρική οργάνωση

και να προσφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής κελύφους. Η κατασκευαστική επίλυση της κινητικής υβριδικής δομής (κεφάλαιο 5), η δομή και η λειτουργία του κινητικού μηχανισμού (κεφάλαιο 6), ο σχεδιασμός και η ανάλυση της κίνησης της υβριδικής δομής (κεφάλαιο 7). Η διαδικασία της έρευνας υποστηρίζεται με περαιτέρω ανάλυση, επαλήθευση και βελτιστοποίηση της κινητικής υβριδικής δομής μέσα από το πρόγραμμα δυναμικής μοντελοποίησης SolidWorks Essential (κεφάλαιο 8). Τέλος, αναπτύσσεται το κατασκευαστικό περίβλημα (κεφάλαιο 9), όπου λόγω της ιδιομορφίας της κινητικής υβριδικής δομής απαιτείται η διερεύνηση μεταβαλλόμενων και προσαρμοστικών συστημάτων για την κατασκευή του κελύφους και την άμεση ανταπόκριση στις πολλαπλές παραμορφώσεις. Με βάση γενική ανασκόπηση της θεματικής "κατασκευαστικό εφελκόμενο περίβλημα" θα τύχουν αναφοράς οι μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες εφελκόμενων δομών, οι οποίες θα ευνοούν προσαρμογή στις γεωμετρικά χωρικές μεταβολές της κινητικής υβριδικής δομής. Στην παρούσα μελέτη προτάθηκε ο σχεδιασμός δυο τυπολογιών. Ο πρώτος τύπος αφορά την εφαρμογή ελαστικών καμπτικών μελών, ενώ ο δεύτερος τύπος αποτελεί ένα υβριδικό σύστημα με καλώδια και τηλεσκοπικούς ράβδους. Υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης SAP2000, Working Model 2D και Solidworks Essential πραγματοποιούν την ανάλυση και αξιολόγηση αντίστοιχα της στατικής και κινητικής συμπεριφοράς της κινητικής υβριδικής δομής.

9.2. Ερευνητικά αποτελέσματα

Η ερευνητική διαδικασία εστιάζεται στον ολοκληρωμένο σχεδιασμό πρωτότυπου κινητικής υβριδικής δομικής κατασκευής. Επιστημονικές έρευνες παρουσιάζουν τη δυνατότητα κατασκευαστικών δομών να διακρίνονται από ευμεταβλητότητα, εστιάζοντας την προσοχή σε προσαρμοστικά δομικά συστήματα. Η διεθνής βιβλιογραφική ανασκόπηση συναφών δραστηριοτήτων στην έρευνα και εφαρμογή, υποδεικνύει το στόχο μείωσης του ιδιοφορτίου των κατασκευών μέσω ανάπτυξης επίπεδων ή χωρικών δικτυωμάτων και αντίστοιχη αντικατάσταση δομικών μελών με ενεργοποιητές ή και προσθήκη ενεργοποιητών για την επίτευξη της κινητικής συμπεριφοράς.

Σε ενοποιημένο πλαίσιο σχεδιασμού ελαφριών δομικών κατασκευών, στατικής και κινητικής συμπεριφοράς τους, στην παρούσα πρόταση διδακτορικής διατριβής

αναπτύσσονται τυπολογίες μεικτών δομικών συστημάτων με βελτιστοποιημένη στατική και κινητική συμπεριφορά. Η συνέργεια των στατικών και κινητικών χαρακτηριστικών του υβριδικού πρωτότυπου συστήματος και ο σχεδιασμός της κίνησης μέσω της εφαρμογής του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (E4B) παρέχουν ένα βέλτιστο μεταβαλλόμενο σύστημα. Με εφαρμογή σε αρθρωτά συνδεδεμένη αλυσίδα δοκών, το δευτερεύον σύστημα από ορθοστάτες και καλωδιωτά στοιχεία κλειστού κυκλώματος και μεταβαλλόμενου μήκους, είναι υπεύθυνο τόσο για τη στατική ευστάθεια του πρωτεύοντος συστήματος, όσο και για την επίτευξη της κινηματικής μορφολογικής μετάλλαξης του συνολικού συστήματος. Μέσω της συνέργειας αυτής μεταξύ των συστατικών στοιχείων της κατασκευής και των ιδιοτήτων της όσον αφορά τη κινηματική της συμπεριφορά, η παρούσα διατριβή προτείνει συνεπώς την εφαρμογή του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων και την ενσωμάτωση του ενεργού συστήματος ελέγχου σε μια συγκροτημένη και ενιαία τυπολογία. Στα πλαίσια ενοποιημένης ένταξης κελύφους, αναπτύσσονται προσαρμόσιμα εφελκόμενα δομικά συστήματα μέσω του παθητικού και ενεργού ελέγχου.

Επιπλέον η εφαρμογή της μεθόδου του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (effective 4 - bar) στο σχεδιασμό κίνησης της κατασκευής επιτυγχάνει την ανάπτυξη ακολουθιών του συστήματος με δυο ενεργοποιητές, όπου ο κάθε ένας ανταποκρίνεται σε κάθε καλώδιο στις κατασκευαστικές στηρίξεις όπως και υδραυλικό σύστημα γραμμικών φρένων για την αποφυγή αύξησης του συνολικού βάρους της κατασκευής και συνεπώς της απαιτούμενης ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη διεκπεραίωση της κίνησης. Χαρακτηριστικά αναφέρονται επιπλέον η μείωση του οικονομικού κόστους της συνολικής κατασκευής, της ενεργειακής κατανάλωσης και των καμπτικών και διατμητικών καταπονήσεων που αναπτύσσονται. Η ανάλυση και ο έλεγχος της στατικής και κινητικής συμπεριφοράς, όπως και ο σχεδιασμός της κίνησης μέσα από τις ψηφιακές πλατφόρμες δυναμικής προσομοίωσης επιτυγχάνουν τη διαδραστική και αλληλοσχετιζόμενη διαδικασία σχεδιασμού της κινητικής υβριδικής δομής.

Πρωτίστως, η παρούσα ανάλυση του συστήματος με το λογισμικό Solidworks Essentials έχει στόχο την επαλήθευση λειτουργίας της υβριδικής κινητικής δομής βάσει της λειτουργίας του δευτερεύοντος κυρίως συστήματος. Επιπλέον, η συγκριτική

αποτίμηση της ανάλυσης μεταξύ των δυο λογισμικών προγραμμάτων παρουσιάζει γενικότερα αυξημένες τιμές στη δεύτερη φάση της ανάλυσης της κίνησης της υβριδικής δομής μέσω Solidworks Essentials. Κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μοντελοποίηση και η ανάλυση της κίνησης της υβριδικής δομής εφόσον καταγράφεται η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος σε σχέση με τα καλώδια, η αλληλένδετη σχέση και συνέργεια μεταξύ των δυο καλωδίων και η δράση των καλωδίων απέναντι στις τοπικές ρυθμίσεις των γωνίων των αρθρώσεων.

Η ανάπτυξη της σχεδιαστικής και κατασκευαστικής δομής πραγματώνει το εγχείρημα για δυναμικά και προσαρμοστικά συστήματα, τα οποία θα είναι ικανά ν' ανταποκρίνονται σε εισερχόμενα ερεθίσματα βελτιστοποιώντας τη δομή, τη λειτουργία και τη μορφολογία τους. Τα εισερχόμενα ερεθίσματα μπορούν να αποτελούν μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές παραμέτρους που μπορεί να απορρέουν από φορτία χιονιού, ανεμοπιέσεις, φυσικό φωτισμό όπως επίσης χρήσεων του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου της κατασκευής. Η ανάπτυξη προσαρμόσιμων εφελκόμενων δομικών συστημάτων σε πλαίσια ενοποιημένης ένταξης κελύφους και η πολυκλαδική ερευνητική διαδικασία επιτυγχάνουν τη διαδραστική και αλληλοσχετιζόμενη διαδικασία σχεδιασμού της κινητικής υβριδικής δομής μέσα από τη στατική, κατασκευαστική και κινητική συμπεριφορά.

Ανασκόπηση των μεμονωμένων σταδίων της παρούσας έρευνας επιτυγχάνεται στις αναφορές ([9.1], [9.2], [9.3], [9.4], [9.5], [9.6], [9.7], [9.8]).

9.3. Μελλοντικές προοπτικές - Εισηγήσεις

Η δυνατότητα της κινητικής υβριδικής δομής να αποκτά διαφορετικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς ενισχύει τη μεθοδολογία ανάπτυξης του σχεδιασμού της κίνησης που βασίζεται σε μοτίβα ακολουθίας και πιθανόν να ανταποκρίνεται σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές ή χρηστικές συνθήκες. Η ολοκλήρωση της επιθυμητής θέσης συντάσσεται από το σχεδιασμό της κίνησης και στηρίζεται σε πολλαπλά διακριτά στάδια εκ των οποίων ορίζουν εφήμερες γεωμετρικές μεταβολές και θα μπορούσε να εφαρμοστούν ως εναλλακτικοί μετασχηματισμοί.

Κατ'έκταση σε πρακτικές εφαρμογές μπορούν να προσδιοριστούν βέλτιστες ενδιάμεσες ή και τελικές μορφολογίες της κινητικής υβριδικής δομής περιορίζοντας έτσι το μέγιστο δυνατό εύρος των μετασχηματισμών τους. Η ανάπτυξη ενός αυτόματου βελτιστοποιημένου μοτίβου ακολουθίας βάσει των λειτουργικών ή/και περιβαλλοντικών συνθηκών εμπλέκει επίσης, την ανάπτυξη ενός κατάλληλου ενεργού συστήματος ελέγχου που θα προγραμματίζει και θα ιεραρχεί τα ερεθίσματα, προκειμένου να επιτευχθεί η διαδραστική σχέση μεταξύ της κατασκευής, χρήστη και του περιβάλλοντος.

Η δομική μορφολογία της κινητικής υβριδικής δομής, όσον αφορά τους ορθοστάτες θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω με γνώμονα την αποτροπή της ευθυγράμμισης των καλωδίων, αυξάνοντας το μήκος τους και αποφεύγοντας συγχρόνως κατασκευαστικά ζητήματα λυγισμού.

Η επαλήθευση και η αξιολόγηση της κίνησης της υβριδικής δομής και πιο συγκεκριμένα της συνέργειας του δευτερεύοντος καλωδιωτού συστήματος και του ενεργού μηχανισμού τεσσάρων αρθρωτών ράβδων (E4B) ανάγει θέματα πρακτικής φύσεως όπως την αναγνώριση της τροπής του συστήματος βάσει της βαρύτητας και προτείνεται όπως ελέγχεται από υπολογιστικό πρόγραμμα, ώστε να αποφευχθούν οι απρόβλεπτες μετακινήσεις του συστήματος προς αντίθετη τροπή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Μαρία Η. Ματθαίου

Π1.1 Μορφολογική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων

Μαρία Η. Ματθαίου

Πίνακας Ι.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.

Σύστημα	Πρωτεύουσα δομική κατασκευή	Δευτερεύουσα δομική κατασκευή	Διατομές [mm]	Κατανεμημένο φορτίο [kN/m]	Σταθερό συνολικό άνοιγμα [m]
A-1-1	Αμφιαρθρωτή δοκός [n=1]	-	UPN 320	2.50	17.50
B-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
B-2-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h _{min} =1m h _{max} =1.4m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
Γ-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
Γ-2-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h _{min} =1m h _{max} =1.4m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
Δ-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
Δ-2-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h _{min} =1m h _{max} =1.4m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50

Σύστημα	Πρωτεύουσα δομική κατασκευή	Δευτερεύουσα δομική κατασκευή	Διατομές [mm]	Κατανεμημένο φορτίο [kN/m]	Σταθερό συνολικό άνοιγμα [m]
E-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]	Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	UPN 320 85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
E-2-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]	Ορθοστάτες h _{min} =1m h _{max} =1.4m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	UPN 320 85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
ΣΤ-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]	Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	UPN 320 85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50
ΣΤ-2-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]	Ορθοστάτες h _{min} =1m h _{max} =1.4m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=28]	UPN 320 85x40x3.2 Ø 40	2.50	17.50

Π1.2 Στατική ανάλυση υβριδικών δομικών συστημάτων

Μαρία Η. Ματθαίου

Πίνακας Ι.2 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων A-1-1, A-1-2, A-1-3, A-1-4 και A-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
A-1-1	Οριζόντιες δοκοί	-	29.61	129.42	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	-	-	-	
	Καλωδιωτά στοιχεία	-	-	-	
	Σύστημα				15.38
A-1-2	Οριζόντιες δοκοί	-	23.26	79.97	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	-	-	-	
	Καλωδιωτά στοιχεία	-	-	-	
	Σύστημα				5.86
A-1-3	Οριζόντιες δοκοί	-	21.15	65.98	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	-	-	-	
	Καλωδιωτά στοιχεία	-	-	-	
	Σύστημα				4.00
A-1-4	Οριζόντιες δοκοί	-	16.92	42.30	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	-	-	-	
	Καλωδιωτά στοιχεία	-	-	-	
	Σύστημα				1.64
A-1-5	Οριζόντιες δοκοί	-	12.69	23.69	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	-	-	-	
	Καλωδιωτά στοιχεία	-	-	-	
	Σύστημα				0.52

Πίνακας Ι.3 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων B-1-1, B-1-2, B-1-3, B-1-4 και B-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
B-1-1	Οριζόντιες δοκοί	1.61	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	71.09	1.03	0.52	
	Καλωδιωτά στοιχεία	290.50	-	-	
	Σύστημα				11.29
B-1-2	Οριζόντιες δοκοί	31.03	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	64.00	0.85	0.43	
	Καλωδιωτά στοιχεία	173.19	-	-	
	Σύστημα				5.26
B-1-3	Οριζόντιες δοκοί	28.22	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	49.18	0.65	0.33	
	Καλωδιωτά στοιχεία	133.27	-	-	
	Σύστημα				3.25
B-1-4	Οριζόντιες δοκοί	14.30	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	35.76	0.46	0.23	
	Καλωδιωτά στοιχεία	97.13	-	-	
	Σύστημα				1.80
B-1-5	Οριζόντιες δοκοί	0.34	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	20.86	0.25	0.13	
	Καλωδιωτά στοιχεία	57.00	-	-	
	Σύστημα				0.88

Πίνακας Ι.4 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων B-2-1, B-2-2, B-2-3, B-2-4 και B-2-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
B-2-1	Οριζόντιες δοκοί	20.71	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	44.32	0.66	0.33	
	Καλωδιωτά στοιχεία	162.31	-	-	
	Σύστημα				3.96
B-2-3	Οριζόντιες δοκοί	19.05	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	28.02	0.41	0.21	
	Καλωδιωτά στοιχεία	95.49	-	-	
	Σύστημα				1.47
B-2-5	Οριζόντιες δοκοί	0.20	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	11.81	0.15	0.07	
	Καλωδιωτά στοιχεία	40.84	-	-	
	Σύστημα				0.38

Πίνακας Ι.5 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Γ-1-1, Γ-1-2, Γ-1-3, Γ-1-4 και Γ-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{max} [kN]	Q_{max} [kN]	M_{max} [kNm]	f_{max} [cm]
Γ-1-1	Οριζόντιες δοκοί	303.56	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	115.08	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	296.59	-	-	
	Σύστημα				16.85
Γ-1-2	Οριζόντιες δοκοί	212.63	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	82.81	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	211.78	-	-	
	Σύστημα				8.80
Γ-1-3	Οριζόντιες δοκοί	137.59	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	59.05	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	151.21	-	-	
	Σύστημα				4.41
Γ-1-4	Οριζόντιες δοκοί	78.43	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	35.29	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	90.63	-	-	
	Σύστημα				1.67
Γ-1-5	Οριζόντιες δοκοί	35.46	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	21.01	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	54.28	-	-	
	Σύστημα				0.58

Πίνακας Ι.6 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων
Γ-2-1, Γ-2-2, Γ-2-3, Γ-2-4 και Γ-2-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
Γ-2-1	Οριζόντιες δοκοί	178.56	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	116.80	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	176.35	-	-	
	Σύστημα				7.73
Γ-2-3	Οριζόντιες δοκοί	87.30	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	59.31	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	97.76	-	-	
	Σύστημα				2.34
Γ-2-5	Οριζόντιες δοκοί	25.39	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	21.07	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	39.60	-	-	
	Σύστημα				0.38

Πίνακας Ι.7 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Δ-1-1, Δ-1-2, Δ-1-3, Δ-1-4 και Δ-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{max} [kN]	Q_{max} [kN]	M_{max} [kNm]	f_{max} [cm]
Δ-1-1	Οριζόντιες δοκοί	157.96	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	42.63	1.06	0.53	
	Καλωδιωτά στοιχεία	266.78	-	-	
	Σύστημα				9.63
Δ-1-2	Οριζόντιες δοκοί	130.33	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	34.06	0.80	0.40	
	Καλωδιωτά στοιχεία	210.52	-	-	
	Σύστημα				5.71
Δ-1-3	Οριζόντιες δοκοί	81.27	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	24.40	0.54	0.27	
	Καλωδιωτά στοιχεία	148.10	-	-	
	Σύστημα				3.29
Δ-1-4	Οριζόντιες δοκοί	43.34	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	16.57	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	63.35	-	-	
	Σύστημα				0.68
Δ-1-5	Οριζόντιες δοκοί	15.82	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	11.60	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	31.72	-	-	
	Σύστημα				0.26

Πίνακας Ι.8 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων Δ-2-1, Δ-2-2, Δ-2-3, Δ-2-4 και Δ-2-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
Δ-2-1	Οριζόντιες δοκοί	89.83	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	25.36	0.24	0.17	
	Καλωδιωτά στοιχεία	167.70	-	-	
	Σύστημα				3.65
Δ-2-3	Οριζόντιες δοκοί	34.60	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	16.88	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	92.98	-	-	
	Σύστημα				1.22
Δ-2-5	Οριζόντιες δοκοί	5.72	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	9.26	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	31.78	-	-	
	Σύστημα				0.15

Πίνακας Ι.9 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων E-1-1, E-1-2, E-1-3, E-1-4 και E-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{max} [kN]	Q_{max} [kN]	M_{max} [kNm]	f_{max} [cm]
E-1-1	Οριζόντιες δοκοί	4.83	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	82.10	2.14	1.07	
	Καλωδιωτά στοιχεία	279.44	-	-	
	Σύστημα				10.57
E-1-2	Οριζόντιες δοκοί	2.61	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	60.45	1.42	0.71	
	Καλωδιωτά στοιχεία	208.03	-	-	
	Σύστημα				5.46
E-1-3	Οριζόντιες δοκοί	2.03	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	44.61	0.90	0.45	
	Καλωδιωτά στοιχεία	136.61	-	-	
	Σύστημα				2.91
E-1-4	Οριζόντιες δοκοί	0.44	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	25.65	0.29	0.15	
	Καλωδιωτά στοιχεία	89	-	-	
	Σύστημα				1.01
E-1-5	Οριζόντιες δοκοί	0.17	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	16.18	0.18	0.09	
	Καλωδιωτά στοιχεία	44.42	-	-	
	Σύστημα				0.41

Πίνακας Ι.10 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων E-2-1, E-2-2, E-2-3, E-2-4 και E-2-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
E-2-1	Οριζόντιες δοκοί	1.38	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	46.20	0.55	0.28	
	Καλωδιωτά στοιχεία	166.10	-	-	
	Σύστημα				3.66
E-2-3	Οριζόντιες δοκοί	0.63	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	23.98	0.30	0.15	
	Καλωδιωτά στοιχεία	91.57	-	-	
	Σύστημα				1.27
E-2-5	Οριζόντιες δοκοί	0.16	4.23	2.54	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	10.47	0.12	0.06	
	Καλωδιωτά στοιχεία	36.38	-	-	
	Σύστημα				0.24

Πίνακας Ι.11 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ-1-1, ΣΤ-1-2, ΣΤ-1-3, ΣΤ-1-4 και ΣΤ-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ-1-1	Οριζόντιες δοκοί	112.98	110.58	135.58	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	221.34	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	298.19	-	-	
	Σύστημα				15.95
ΣΤ-1-2	Οριζόντιες δοκοί	75.32	83.46	101.68	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	158.07	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	213.00	-	-	
	Σύστημα				8.83
ΣΤ-1-3	Οριζόντιες δοκοί	45.19	56.35	67.79	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	112.88	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	152.08	-	-	
	Σύστημα				4.32
ΣΤ-1-4	Οριζόντιες δοκοί	22.60	38.27kN	45.19kNm	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	67.69	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	91.33	-	-	
	Σύστημα				1.75
ΣΤ-1-5	Οριζόντιες δοκοί	15.06	20.19	22.60	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	40.57	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	54.82	-	-	
	Σύστημα				0.58

Πίνακας Ι.12 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ-2-1, ΣΤ-2-2, ΣΤ-2-3, ΣΤ-2-4 και ΣΤ-2-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ-2-1	Οριζόντιες δοκοί	53.49	111.55	136.80	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	223.36	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	191.31	-	-	
	Σύστημα				13.22
ΣΤ-2-3	Οριζόντιες δοκοί	21.21	56.69	68.22	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	113.62	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	105.56	-	-	
	Σύστημα				3.55
ΣΤ-2-5	Οριζόντιες δοκοί	5.41	20.24	22.67	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	40.71	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	41.84	-	-	
	Σύστημα				0.50

Π1.3 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων

Μαρία Η. Ματθαίου

Πίνακας Ι.13 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.

Σύστημα	Πρωτεύουσα δομική κατασκευή	Δευτερεύουσα δομική κατασκευή	Διατομές [mm]	Κατανεμημένο φορτίο [kN/m]	Σταθερό συνολικό άνοιγμα [m]
ΣΤ1-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320	2.50	17.50
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=16]	85x40x3.2 Ø 40		
ΣΤ2-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320	2.50	17.50
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Διακοπτόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40		
ΣΤ3-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320	2.50	17.50
		Ορθοστάτες h=1m [n=14] Συνεχόμενα καλώδια [n=16]	85x40x3.2 Ø 40		
ΣΤ4-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320	2.50	17.50
		Ορθοστάτες h=1m [n=7] Διακοπτόμενα καλώδια [n=28]	85x40x3.2 Ø 40		
ΣΤ5-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320	2.50	17.50
		Ορθοστάτες h=1m Διακοπτόμενα καλώδια [n=64]	85x40x3.2 Ø 40		

Πίνακας Ι.14 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ1-1-1, ΣΤ1-1-2, ΣΤ1-1-3, ΣΤ1-1-4 και ΣΤ1-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ1-1-1	Οριζόντιες δοκοί	112.96	110.34	135.28	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	221.04	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	298.10	-	-	
	Σύστημα				16.45
ΣΤ1-1-2	Οριζόντιες δοκοί	75.31	83.29	101.47	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	157.87	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	212.95	-	-	
	Σύστημα				8.82
ΣΤ1-1-3	Οριζόντιες δοκοί	45.19	56.25	67.66	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	112.75	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	152.13	-	-	
	Σύστημα				4.32
ΣΤ1-1-4	Οριζόντιες δοκοί	22.59	38.21	45.12	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	67.63	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	91.31	-	-	
	Σύστημα				1.75
ΣΤ1-1-5	Οριζόντιες δοκοί	15.06	20.18	22.58	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	40.55	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	54.82	-	-	
	Σύστημα				0.58

Πίνακας Ι.15 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ2-1-1, ΣΤ2-1-2, ΣΤ2-1-3, ΣΤ2-1-4 και ΣΤ2-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ2-1-1	Οριζόντιες δοκοί	112.98	110.58	135.58	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	221.34	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	298.19	-	-	
	Σύστημα				16.46
ΣΤ2-1-2	Οριζόντιες δοκοί	75.32	83.46	101.68	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	158.07	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	213	-	-	
	Σύστημα				8.83
ΣΤ2-1-3	Οριζόντιες δοκοί	45.49	56.35	67.79	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	112.88	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	152.17	-	-	
	Σύστημα				4.32
ΣΤ2-1-4	Οριζόντιες δοκοί	22.60	38.27	45.19	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	67.69	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	91.33	-	-	
	Σύστημα				1.75
ΣΤ2-1-5	Οριζόντιες δοκοί	15.06	20.19	22.60	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	40.57	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	54.82	-	-	
	Σύστημα				0.58

Πίνακας Ι.16 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3-1-1, ΣΤ3-1-2, ΣΤ3-1-3, ΣΤ3-1-4 και ΣΤ3-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ3-1-1	Οριζόντιες δοκοί	104.55	110.99	136.10	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	222.32	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	279.37	-	-	
	Σύστημα				16.13
ΣΤ3-1-2	Οριζόντιες δοκοί	69.68	83.75kN	102.04Nm	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	58.76	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	199.56	-	-	
	Σύστημα				8.65
ΣΤ3-1-3	Οριζόντιες δοκοί	41.80	56.54	68.03	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	113.39	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	142.58N	-	-	
	Σύστημα				4.23
ΣΤ3-1-4	Οριζόντιες δοκοί	20.90	38.42	45.38	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	68.00	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	85.60	-	-	
	Σύστημα				1.72
ΣΤ3-1-5	Οριζόντιες δοκοί	13.94	20.27	22.69	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	40.78	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	51.48	-	-	
	Σύστημα				0.57

Πίνακας Ι.17 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ4-1-1, ΣΤ4-1-2, ΣΤ4-1-3, ΣΤ4-1-4 και ΣΤ4-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ4-1-1	Οριζόντιες δοκοί	110.52	110.93	136.02	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	222.29	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	279.34	-	-	
	Σύστημα				15.63
ΣΤ4-1-2	Οριζόντιες δοκοί	67.09	80.58	98.19	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	152.82	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	192.16	-	-	
	Σύστημα				9.60
ΣΤ4-1-3	Οριζόντιες δοκοί	40.28	54.40	65.46	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	109.14	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	137.30	-	-	
	Σύστημα				4.66
ΣΤ4-1-4	Οριζόντιες δοκοί	20.13	36.96	43.67	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	65.46	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	82.43	-	-	
	Σύστημα				1.91
ΣΤ4-1-5	Οριζόντιες δοκοί	6.71	19.50	21.84	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	39.25	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	49.50	-	-	
	Σύστημα				0.62

Π1.4 Στατική ανάλυση κινητικών υβριδικών δομικών συστημάτων με βάση το ύψος του ορθοστάτη

Μαρία Η. Ματθαίου

Πίνακας Ι.18 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών συστημάτων.

Σύστημα	Πρωτεύουσα δομική κατασκευή	Δευτερεύουσα δομική κατασκευή	Διατομές [mm]	Κατανεμημένο φορτίο [kN/m]	Σταθερό συνολικό άνοιγμα [m]
ΣΤ3.1-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		17.50
		Ορθοστάτες h=1.5m [n=14]	85x40x3.2	2.50	
		Συνεχόμενα καλώδια [n=16]	Ø 40		
		Μηχανισμός κίνησης [n=14]	85x40		
ΣΤ3.2-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320		17.50
		Ορθοστάτες h=1.5m [n=14]	85x40x3.2	2.50	
		Συνεχόμενα καλώδια [n=16]	Ø 40		
		Μηχανισμός κίνησης [n=14]	85x40		
ΣΤ3.3-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320		17.50
		Ορθοστάτες h=1.5m [n=14]	85x40x3.2	2.50	
		Συνεχόμενα [n=16]	Ø 40		
		Μηχανισμός κίνησης [n=14]	85x40		
ΣΤ3.4-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		17.50
		Ορθοστάτες h=1.5m [n=14]	85x40x3.2	2.50	
		Διακοπτόμενα καλώδια [n=28]	Ø 40		
		Μηχανισμός κίνησης [n=14]	85x40		
ΣΤ3.5-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=7]		UPN 320		17.50
		Ορθοστάτες h=1.5m [n=14]	85x40x3.2	2.50	
		Συνεχόμενα καλώδια [n=16]	Ø 40		
		Μηχανισμός κίνησης [n=14]	85x40		

Σύστημα	Πρωτεύουσα δομική κατασκευή	Δευτερεύουσα δομική κατασκευή	Διατομές [mm]	Κατανεμημένο φορτίο [kN/m]	Σταθερό συνολικό άνοιγμα [m]
ΣΤ3.6-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h=2m [n=14]	85x40x3.2	2.50	17.50
		Συνεχόμενα [n=16] Μηχανισμός κίνησης [n=14]	Ø 40 85x40		
ΣΤ3.7-1-1	Οριζόντιες δοκοί [n=14]		UPN 320		
		Ορθοστάτες h=2m [n=14]	85x40x3.2	2.50	17.50
		Διακοπτόμενα καλώδια [n=28] Μηχανισμός κίνησης [n=14]	Ø 40 85x40		

Πίνακας Ι.19 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.3-1-1, ΣΤ3.3-1-2, ΣΤ3.3-1-3, ΣΤ3.3-1-4 και ΣΤ3.3-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ3.3-1-1	Οριζόντιες δοκοί	128.01	111.94	137.28	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	224.22	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	281.76	-	-	
	Σύστημα				15.00
ΣΤ3.3-1-3	Οριζόντιες δοκοί	43.37	57.04	68.66kNm	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	114.40	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	120.84	-	-	
	Σύστημα				3.90
ΣΤ3.3-1-5	Οριζόντιες δοκοί	22.88	20.46	22.93kNm	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	41.15	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	51.88	-	-	
	Σύστημα				0.50

Πίνακας Ι.20 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.4-1-1, ΣΤ3.4-1-2, ΣΤ3.4-1-3, ΣΤ3.4-1-4 και ΣΤ3.4-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ3.4-1-1	Οριζόντιες δοκοί	32.40	112.10	137.48	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	224.44	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	171.22	-	-	
	Σύστημα				14.31
ΣΤ3.4-1-2	Οριζόντιες δοκοί	18.46	84.58	103.08	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	160.24	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	122.29	-	-	
	Σύστημα				7.30
ΣΤ3.4-1-3	Οριζόντιες δοκοί	11.68	57.07	68.69	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	114.38	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	87.35	-	-	
	Σύστημα				3.80
ΣΤ3.4-1-4	Οριζόντιες δοκοί	1.32	38.72	45.78	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	68.52	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	52.40	-	-	
	Σύστημα				1.92
ΣΤ3.4-1-5	Οριζόντιες δοκοί	1.75	20.38	22.83	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	41.01	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	31.44	-	-	
	Σύστημα				0.80

Πίνακας Ι.21 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.6-1-1, ΣΤ3.6-1-2, ΣΤ3.6-1-3, ΣΤ3.6-1-4 και ΣΤ3.6-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ3.6-1-1	Οριζόντιες δοκοί	53.15	112.90	138.49	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	226.21	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	172.71	-	-	
	Σύστημα				12.40
ΣΤ3.6-1-2	Οριζόντιες δοκοί	35.43	85.20	103.87	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	161.57	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	123.40	-	-	
	Σύστημα				7.00
ΣΤ3.6-1-3	Οριζόντιες δοκοί	21.26	57.54	69.28	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	115.39	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	88.19	-	-	
	Σύστημα				3.60
ΣΤ3.6-1-4	Οριζόντιες δοκοί	10.63	39.07	46.19	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	69.22	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	52.97	-	-	
	Σύστημα				1.50
ΣΤ3.6-1-5	Οριζόντιες δοκοί	7.09	20.62	23.13	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	41.52	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	31.84	-	-	
	Σύστημα				0.48

Πίνακας Ι.22 Εσωτερικά εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις δομικών συστημάτων ΣΤ3.7-1-1, ΣΤ3.7-1-2, ΣΤ3.7-1-3, ΣΤ3.7-1-4 και ΣΤ3.7-1-5.

Σύστημα	Ομάδα μελών	Εσωτερικά εντατικά μεγέθη			
		N_{\max} [kN]	Q_{\max} [kN]	M_{\max} [kNm]	f_{\max} [cm]
ΣΤ3.7-1-1	Οριζόντιες δοκοί	53.15	112.90	138.49	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	226.21	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	172.71	-	-	
	Σύστημα				13.62
ΣΤ3.7-1-2	Οριζόντιες δοκοί	35.43	85.21	103.87	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	161.57	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	123.40	-	-	
	Σύστημα				7.3
ΣΤ3.7-1-3	Οριζόντιες δοκοί	21.26	57.54	69.28	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	115.39	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	88.19	-	-	
	Σύστημα				3.57
ΣΤ3.7-1-4	Οριζόντιες δοκοί	10.63	39.07	46.19	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	69.22	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	52.97	-	-	
	Σύστημα				1.46
ΣΤ3.7-1-5	Οριζόντιες δοκοί	7.09	20.62	23.13	
	Κατακόρυφοι Ορθοστάτες	41.52	~0	~0	
	Καλωδιωτά στοιχεία	31.84	-	-	
	Σύστημα				0.47

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- [1.1] Fox, M., Kemp, M., Interactive Architecture. Princeton Architectural Press, New York, 2009
- [1.2] Sherbini, K., Krawczyk, R., Overview of Intelligent Architecture. 1st ASCAAD International Conference, e-Design in Architecture, KFUPM, Saudi Arabia, 2004
- [1.3] Lelieveld, C.M.J.L., Voorbij, A.I.M., Poelman, W.A., Adaptable Architecture. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Building Technology, Netherlands, 2007
- [1.4] Sterk, T. E., Caad for Responsive Architecture. The Office of Robotic Architectural Media, British Columbia, Canada, 2006
- [1.5] Zuk, W., Clark, R.H., Kinetic Architecture. Von Nostrand Reinhold Company, New York, 1970
- [1.6] Αλκέτας, Ο.Κ., Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία, Όμιλος Ίων, Αθήνα, 2012
- [1.7] Haque, U., Architecture, Interactions, Systems. AU: Arquitetura & Urbanismo, Vol. 149, 2006
- [1.8] Gruber, P., Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings. Springer, Vienna, 2011
- [1.9] Κυπριανού, Κ.Ν., Μεικτά φέροντα Δομικά Συστήματα. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, 2009
- [1.10] Engel, H., Structure Systems. Hatje Cantz, Stuttgart, 2009

- [1.11] Merali, R., Long, D., Actuated Responsive Truss. Proceedings of the Workshop on Modular Robotics: State of the Art, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Alaska, 2010
- [1.12] Miura, K., Furuya, H., Suzuki, K., Variable Geometry Truss and its Application to Deployable Truss and Space Crane Arm. 35th Congress of the International Federation of Astronautics, Elsevier, Switzerland, Vol. 12, No 7-8, pp. 599-607, 1985
- [1.13] Hwang, I., Verb Natures. European Union Publications, Actar, Barcelona, 2006
- [1.14] Kilian, A., Block, P., Schmitt P., Snavely, J., An Evolving Language for Actuated Structures. Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2006
- [1.15] Sterk, T. E., Using Actuated Tensegrity Structures to Produce a Responsive Architecture. Connecting Crossroads to Digital Discourse, Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 22, Indianapolis, pp. 86-93, 2003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- [2.1] Σάκκα, Ν., Ελαφριές Μεταλλικές Κατασκευές. Skyline Design Studio, Αθήνα, 2009
- [2.2] Galilei, G., Dialogues Concerning Two New Sciences. Macmillan Company, Chicago, 1914
- [2.3] Μιχάλτσου, Γ.Θ., Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004
- [2.4] Bresler, B., Lin, T.U., Scalzi, J.B., Design of Steel Structures. J. Wiley & Sons, Singapore, 1968
- [2.5] Bussell, M., Structures and Construction in Historic Building Conversation: Use of Iron and Steel in Buildings. Blackwell Publishing, Oxford, 2007

- [2.6] Place, W., Architectural Structures. J. Wiley & Sons, Toronto, 2007
- [2.7] Trebilcock, P., Lawson, M., Architectural Design in Steel, Spon Press, New York, 2004
- [2.8] Blanc, A., McEvoy, M., Plank, R., Architecture and Construction in Steel. E & FN Spon, London, 1993
- [2.9] Sofla, A.Y., Elzey D.M., Wadley, H.N.G., Shape Morphing Hinged Truss Structures. IQP Science, Bristol, 2009
- [2.10] Goldsmith, M., Bauten und Konzepte/Buildings and Concepts. Birkhauser, Basel, 1986
- [2.11] Κυπριανού, Κ.Ν., Μεικτά φέροντα Δομικά Συστήματα. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, 2009
- [2.12] Engel, H., Structure Systems. Hatje Cantz, Stuttgart, 2009
- [2.13] Φωκάς, Μ., Κτίρια από Χάλυβα, Οικοδομικός Σχεδιασμός. Σύγχρονες Μεταλλικές Κατασκευές, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2006
- [2.14] Verde, M., Friction: Experiencing Computation, Matter and Data - Driven Manufacturing. Spiridonidis. C., Voyatzaki. M., (eds), Proceedings of Architectural Design & Construction Education: Experimentation Towards Integration, Art Of Text SA, Thessaloniki, 2009
- [2.15] Thompson, D' Arcy, W., On Growth and Form. The Macmillan Company, United States of America, 1945
- [2.16] Ανδρίτσου, Ε., Μελέτη και Ανάλυση Tensegrity Κατασκευών. Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Ερμούπολη-Σύρος, 2010

- [2.17] Tibert, G., Deployable Tensegrity Structures for Space Applications. Department of Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002
- [2.18] Sultan, C., Tensegrity: 60 Years of Art, Science and Engineer. Advances in Applied Mechanics, Vol. 43, pp. 70-145, 2009
- [2.19] Krausse, J., Lichtenstein, C., Your Private Sky. R. Buckminster Fuller, The Art of Design Science. Lars Muller, Zurich, 1999
- [2.20] Pugh, A., An Introduction to Tensegrity. University of California Press, Berkeley, 1976
- [2.21] Soderqvist, L., Structuralism in Architecture: a Definition. Journal of Aesthetics & Culture, Vol. 3, 2011
- [2.22] <http://www.megastructure-reloaded.org/yona-friedman/> [πρόσβαση: 25.05.2013]
- [2.23] <http://www.megastructure-reloaded.org/schulze-fielitz/> [πρόσβαση: 23.03.2013]
- [2.24] Βαμβαλής, Γ., Μανιφέστα και προγράμματα της αρχιτεκτονικής του 20ου αιώνα. Αθήνα, 1977
- [2.25] Constant, W. M., Constant's New Babylon: the hyper-architecture of desire. Rotterdam, 1998
- [2.26] Sadler, S., The Situationist City. MIT Press, Cambridge, 1998
- [2.27] Cook, P., Archigram. Birkhauser, Switzerland, 1991
- [2.28] <http://sfrang.com/historia/eis009.htm#1> [πρόσβαση: 25.05.2013]
- [2.29] <http://www.megastructure-reloaded.org/en/domenig-huth/> [πρόσβαση: 25.05.2013]
- [2.30] Μαρτινίδης, Π., Αρχιτεκτονική Θεωρία από την Αναγέννηση μέχρι σήμερα. Γνώση, Κίνα, 2005

- [2.31] Almagro, M. C. P., Emilio Perez Pinero at the Context of the Experimental Architecture of the 60s. Escrig, F., Sanchez, J., (eds.), New Proposals for Transformable Architecture, Engineering and Design, First International Conference Transformables-2013 in the Honor of Emilio Perez Pinero, 18.09-20.09.13, Seville, Spain, Proceedings, Starbooks Structural Architecture, Seville, pp. 239-244, September 2013
- [2.32] Belda, E. A. P., The Structures of Emilio Perez Pinero. Evolution and Types. Escrig, F., Sanchez, J., (eds.), New Proposals for Transformable Architecture, Engineering and Design, First International Conference Transformables-2013 in the Honor of Emilio Perez Pinero, 18.09-20.09.13, Seville, Spain, Proceedings, Starbooks Structural Architecture, Seville, pp. 23-29, September 2013
- [2.33] Frampton, K., Μοντέρνα Αρχιτεκτονική: Ιστορία και Κριτική. Θεμέλιο, Αθήνα, 1999
- [2.34] Flachbart, G., Weibel, P., Dissapearing Architecture. Germany, 2000
- [2.35] Fox, M., Kemp, M., Interactive Architecture. Princeton Architectural Press, New York, 2009
- [2.36] Zuk, W., Clark, R.H., Kinetic Architecture. Von Nostrand Reinhold Company, New York, 1970
- [2.37] Αλκέτας, Ο.Κ., Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία, Όμιλος Ίων, Αθήνα, 2012
- [2.38] <http://www.neural.it/english/marcosnovak.htm> [πρόσβαση: 23.12.2012]
- [2.39] Zuk, W., Zuk, T., New Technologies: New Architecture. Van Nostrand Reinhold Company, Virginia, 1994
- [2.40] Sherbini, K., Krawczyk, R., Overview of Intelligent Architecture. 1st ASCAAD International Conference, e-Design in Architecture, KFUPM, Saudi Arabia, 2004

- [2.41] Lelieveld, C.M.J.L., Voorbij, A.I.M., Poelman, W.A., *Adaptable Architecture*. Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Building Technology, Netherlands, 2007
- [2.42] Sterk, T. E., *Caad for Responsive Architecture*. The Office of Robotic Architectural Media, British Columbia, Canada, 2006
- [2.43] Haque, U., *Architecture, Interactions, Systems*. AU: Arqitetura & Urbanismo, Vol. 149, 2006
- [2.44] Σωτηρόπουλος Δ., Τσονίδης Α., *4η Διάσταση*. Αθήνα, 2008
- [2.45] De Luca, F., Nardini, M., *Behind the Scenes: Avantgarde Techniques in Contemporary Design*. Birkhauser, Basel, 2002
- [2.46] Fox, M., *Ephemeralization*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001
- [2.47] Fox, M., *Transportable Environment 2: Beyond Kinetic*. Kronenburg, R., Lim, J., Yunn W. C., (eds), Spon Press, London, 2002
- [2.48] Kronenburg, R., *Transportable Environments 1: Theory, Context, Design and Technology*. Taylor & Francis, London, 1998
- [2.49] Kronenburg, R., *Transportable Environments 2: Theory, Context, Design and Technology*. Taylor & Francis, London, 2003
- [2.50] Kronenburg, R., *Transportable Environments 3: Theory, Context, Design and Technology*. Taylor & Francis, London, 2006
- [2.51] Kronenburg, R., *Flexible: Architecture that Responds to Change*. Laurence King Publishers, London, 2007
- [2.52] Brown, G., *Introduction to Transportable Environments 2*. Kronenburg, R., (ed.), Taylor & Francis, London, 2003

- [2.53] Gruber, P., *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*. Springer, Vienna, 2011
- [2.54] Lebedew, J.S., *Architektur und Bionik*. Verlag MIR, Berlin, 1983
- [2.55] Otto, F., *Natuerliche Konstruktionen. Formen und Konstruktionen in Natur und Technik, Prozesse und ihre Entstehung*. DVA, Stuttgart, 1982
- [2.56] Nachtigall, W., *Bionik: Grundlagen und Beispiele fuer Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer, Heidelberg, 1998
- [2.57] Ingber, D., *Bioessays 22. Evolutionary Processes: A Special Issue*. J. Wiley & Sons, San Francisco, 2000
- [2.58] Ingber, D., *Bioessays 22. The Origin of Cellular Life*, J. Wiley & Sons, San Francisco, 2000
- [2.59] Novak, M., Interview by Alessandro Ludovico, *Neural.it*, Vol. 18, 2001
<http://www.strandbeest.com> [πρόσβαση: 23.12.2012]
- [2.60] <http://www.neural.it/english/marcosnovak.htm> [πρόσβαση: 23.12.2012]
- [2.61] Hunt, A., *The Engineer Contribution to Contemporary Architecture*. Angus Macdonald and Thomas Telford Limited, London, 2000
- [2.62] Grimshaw, N., *Grimshaw: Architecture: The First 30 Years*. Prestel, London, 2011
- [2.63] Trebilcock, P., Lawson, M., *Architectural Design in Steel*. Spon Press, London, 2004
- [2.64] Chilton, J., *Space Grid Structures*. Architectural Press, Oxford, 2000
- [2.65] Schlaich, J., Bergemann, J. R., *Leichtweit/Light Structures*. Prestel, Berlin, 2003

- [2.66] Merali, R., Long, D., Actuated Responsive Truss. Proceedings of the Workshop on Modular Robotics: State of the Art, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Alaska, 2010
- [2.67] Inoue, F., Development of Adaptive Construction Structure by Variable Geometry Truss. Technical Research Institute, Obsayashi Corporation, InTech, Rijeka, 2008
- [2.68] Miura, K., Furuya, H., Suzuki, K., Variable Geometry Truss and its Application to Deployable Truss and Space Crane Arm. 35th Congress of the International Federation of Astronautics, Elviesier, Switzerland, Vol. 12, No 7-8, pp. 599-607, 1985
- [2.69] http://www.organicui.org/?page_id=36 [πρόσβαση: 23.12.2012]
- [2.70] Hwang, I., Verb Natures. European Union Publications, Actar, Barcelona, 2006
- [2.71] Kilian, A., Block, P., Schmitt P., Snavely, J., An Evolving Language for Actuated Structures. Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2006
- [2.72] Sterk, T. E., Using Actuated Tensegrity Structures to Produce a Responsive Architecture. Connecting Crossroads to Digital Discourse, Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 22, Indianapolis, pp. 86-93, 2003
- [2.73] Ματθαίου, Μ., Κινητική και Διαδραστική Αρχιτεκτονική. Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, 2010
- [2.74] Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J., Construction Manual for Polymers + Membranes, Institute for International Architecture – Documentation, Birkhauser, Munich, 2011
- [2.75] Fournier, F., Flexible Composite Materials to Minimize Material Intensity and Maximize Functional Intensity, First Conference Transformables 2013 in the Honor

of Emilio Perez Pinero, School of Architecture Seville, 18.07-23.07.13, Seville, Spain, Proceedings, Seville, 2013

- [2.76] Otto, F., Convertible Roofs, Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart, 1971
- [2.77] <http://kugel-rein.eu> [πρόσβαση: 23.10.2013]
- [2.78] <http://populous.com/project/wimbledon-aeltc/> [πρόσβαση: 23.10.2013]
- [2.79] Schanz, S., Otto, F., Rasch B., Finding Form, Axel Menges, 2001
- [2.80] Hensel M., Menges, A., Membrane spaces. Architectural Design 78: 74-79, 2008.
- [2.81] Phocas, M.C., Kontovourkis, O., Ioannou, T., Interdisciplinary Research Based Design: The Case of a Kinetic Form-Active Tensile Membrane. Architectural Engineering Technology, OMICS, Vol. 1, No. 2, doi: 10.4172/2168-9717.1000104, December, 2012

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- [3.1] Phocas, M.C., Michael, A., Technology-Driven Design towards Innovation, in Educating Architects towards Innovative Architecture, EAAE Transactions on Architectural Education No. 50, ed. C. Spiridonidis, and M. Voyatzaki, pp. 341-350, Istanbul, 2010
- [3.2] Phocas, M.C., Kontovourkis, O., Matheou, M., Kinetic Hybrid Structure Development and Simulation. Architectural Computing, Multi-Science Co., Vol. 10, No. 1, pp. 67-86, March, 2012
- [3.3] Phocas, M.C., Kontovourkis, O., Ioannou, T., Interdisciplinary Research Based Design: The Case of a Kinetic Form-Active Tensile Membrane. Architectural Engineering Technology, OMICS, Vol. 1, No. 2, doi: 10.4172/2168-9717.1000104, December, 2012

- [3.4] Kontovourkis, O., Phocas, M. C., Tryfonos, G., Prototyping of an Adaptive Structure Based on Physical Conditions. *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 11, No. 2, June, 2013
- [3.5] E. Jantsch, Towards Interdisciplinarity and Transdisciplinarity in Education and Information. *Interdisciplinarity: Problems of Teaching and Research in Universities*, ed. G. Michaud (Nice: Centre for Educational Research and Innovation OECD, 1970), pp. 97–121
- [3.6] Hoffmann, S., Barej, M., Puppa, G. D., Husing, M., Trautz, M., Corves, B., Interdisciplinary Design of Movable Structures in Architecture Education. *Proceedings of the First Conference Transformable 2013. In the Honor of Emilio Perez Pinero, Seville, September, 2013*
- [3.7] Αλκέτας, Ο.Κ., *Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική: Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία*. Όμιλος Ίων, Αθήνα, 2012
- [3.8] Phocas, M. C., Kontovourkis, O., Nicolaou, N., Design Concept of a Kinetic Form-Active Hybrid Envelope Structure. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, WIT Press, Vol. 9, No. 1, pp. 13-30, 2014
- [3.9] Asefi, M., *Transformable and Kinetic Architectural Structures*. VDM Verlag, April 2010
- [3.10] Zanfaly, D. E. El., *Active Shapes: Introducing Guidelines for Designing Kinetic Architectural Structures*. Massachusetts Institute of Technology, June 2011
- [3.11] Fox, M., Hu, C., Starting from the Micro: A Pedagogical Approach to Designing Interactive Architecture. *ACADIA05, Smart Architecture: Integration of Digital and Building Technologies: Proceedings of the 2005 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Georgia, 2005*
- [3.12] Kontovourkis, O., Physical Data Computing in Adaptive Design Process. Ripley, C., Asefi, M., (eds.), *International Conference on Adaptation and Movement in Architecture, ICAMA 2013, 11.10-12.10.13, Toronto, Canada, Proceedings, Ryerson University, Toronto, pp. 224-236, October, 2013*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

- [5.1] Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E. G., Mueller, A., Design and Control of an Adaptable Hybrid Steel Structure. Escrig, F., Sanchez, J., (eds.), New Proposals for Transformable Architecture, Engineering and Design, First International Conference Transformables-2013 in the Honor of Emilio Perez Pinero, 18.09-20.09.13, Seville, Spain, Proceedings, Starbooks Structural Architecture, Seville, pp. 239-244, September, 2013
- [5.2] Phocas, M. C., Matheou, M., Christoforou, E. G., Design and Simulation Analysis of a Kinetic Strut-Cable Beam Structure. Ripley, C., Asefi, M., (eds.), International Conference on Adaptation and Movement in Architecture, ICAMA 2013, 11.10-12.10.13, Toronto, Canada, Proceedings, Ryerson University, Toronto, pp. 224-236, October, 2013
- [5.3] Matheou, M., Kinetic Hybrid Structure: Design and Motion Planning, E-Journal Archi - Doct, ENHSA Network, pp. 90-104, June, 2013

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- [6.1] Norton, R.L., Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines. Mc Graw - Hill, Massachusetts, 1999
- [6.2] Christoforou, E. G., Mueller, A., Phocas, M. C., Matheou, M., Arnos, S., Design and Control Concept for Reconfigurable Buildings. Mechanical Design, ASME, [10 p.], (submitted 08.13)
- [6.3] Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E.G., Adaptable Hybrid Steel Structures. Kinetic Modeling and Simulation Study. Cruz, P.J.S. (ed.), Structures and Architecture: Concepts, Application and Challenges, Second International Conference on Structures & Architecture, ICSA 2013, 24.07 – 26.07.13, Guimaraes, Portugal, Proceedings, Taylor & Francis, London, pp. 1419-1426, July, 2013

- [6.4] Christoforou, E. G., Mueller, A., Phocas, M. C., Matheou, M., Arnos, S., Towards Realization of Shape-Controlled Adaptable Buildings following a Robotics Approach. ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (ICE), 04.08-07.08.13, Portland, Oregon, U.S.A., Proceedings, Portland, August, 2013
- [6.5] Christoforou, E. G., Mueller, A., Phocas, M. C., Motion Planning for Shape - Controlled Adaptable Buildings Resembling Topologically Closed - Loop Robotic Systems. ASME 2012 - International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (ICE), 12.08 - 15.08.12, Chicago, Illinois, U.S.A., Proceedings, Chicago, August, 2012

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

- [7.1] Solidworks 2011, Solidworks Essentials Training, Dassault Systems Solidworks Corporation, Massachusetts, USA, 2011
- [7.2] Solidworks 2013, Solidworks Motion, Dassault Systems Solidworks Corporation, Waltham, USA, 2011

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- [8.1] Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J., Construction Manual for Polymers + Membranes, Institute for International Architecture – Documentation, Birkhauser, Munich, 2011
- [8.2] Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E. G., Mueller, A., Design and Control of an Adaptable Hybrid Steel Structure. Escrig, F., Sanchez, J., (eds.), New Proposals for Transformable Architecture, Engineering and Design, First International Conference Transformables-2013 in the Honor of Emilio Perez Pinero, 18.09-20.09.13, Seville, Spain, Proceedings, Starbooks Structural Architecture, Seville, pp. 239-244, September, 2013
- [8.3] Phocas, M. C., Matheou, M., Christoforou, E. G., Design and Simulation Analysis of a Kinetic Strut-Cable Beam Structure. Ripley, C., Asefi, M., (eds.), International

Conference on Adaptation and Movement in Architecture, ICAMA 2013, 11.10-12.10.13, Toronto, Canada, Proceedings, Ryerson University, Toronto, pp. 224-236, October, 2013

- [8.4] Matheou, M., Kinetic Hybrid Structure: Design and Motion Planning, E-Journal Archi - Doct, ENHSA Network, pp. 90-104, June, 2013

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

- [9.1] Christoforou, E. G., Mueller, A., Phocas, M. C., Matheou, M., Arnos, S., Design and Control Concept for Reconfigurable Buildings. Mechanical Design, ASME (submitted 08.13)
- [9.2] Phocas, M. C., Matheou, M., Christoforou, E. G., Design and Simulation Analysis of a Kinetic Strut-Cable Beam Structure. Ripley, C., Asefi, M., (eds.), International Conference on Adaptation and Movement in Architecture, ICAMA 2013, 11.10-12.10.13, Toronto, Canada, Proceedings, Ryerson University, Toronto, pp. 224-236, October, 2013
- [9.3] Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E. G., Mueller, A., Design and Control of an Adaptable Hybrid Steel Structure. Escrig, F., Sanchez, J., (eds.), New Proposals for Transformable Architecture, Engineering and Design, First International Conference Transformables-2013 in the Honor of Emilio Perez Pinero, 18.09-20.09.13, Seville, Spain, Proceedings, Starbooks Structural Architecture, Seville, pp. 239-244, September, 2013
- [9.4] Christoforou, E. G., Mueller, A., Phocas, M. C., Matheou, M., Arnos, S., Towards Realization of Shape-Controlled Adaptable Buildings following a Robotics Approach. ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (ICE), 04.08-07.08.13, Portland, Oregon, U.S.A., Proceedings, Portland, August, 2013
- [9.5] Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E.G., Adaptable Hybrid Steel Structures. Kinetic Modeling and Simulation Study. Cruz, P.J.S. (ed.), Structures

- and Architecture: Concepts, Application and Challenges, Second International Conference on Structures & Architecture, ICSA 2013, 24.07 – 26.07.13, Guimaraes, Portugal, Proceedings, Taylor & Francis, London, pp. 1419-1426, July, 2013
- [9.6] Matheou, M., Kinetic Hybrid Structure: Design and Motion Planning, E-Journal Archi - Doct, ENHSA Network, pp. 90-104, June, 2013
- [9.7] Phocas, M. C., Kontovourkis, O., Matheou, M., Kinetic Hybrid Structure Development and Simulation. Architectural Computing, Multi-Science Co., Vol. 10, No. 1, pp. 67-86, March, 2012
- [9.8] Phocas, M. C., Kontovourkis, O., Matheou, M., Integrated Design of a Kinetic Prototype Structure. A Case Study. Stacey, F., Stacey, M., (eds.), Adaptive Architecture, An International Conference at the Building Centre, 03.03-05.03.2011, London, U.K., Proceedings, Building Centre Trust and the University of Nottingham, London, March, 2011

