



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

**ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ
ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΙΩΡΓΟΣ Τ. ΤΡΥΦΩΝΟΣ

2018



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

**ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ
ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ Η ΟΠΟΙΑ ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΠΡΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΤΙΤΛΟΥ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΚΥΠΡΟΥ**

ΓΙΩΡΓΟΣ Τ. ΤΡΥΦΩΝΟΣ

ΛΕΥΚΩΣΙΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2018

ΓΙΩΡΓΟΣ Γ. ΤΡΥΦΩΝΟΣ

© ΓΙΩΡΓΟΣ Γ. ΤΡΥΦΩΝΟΣ, 2018

ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

από

Γιώργο Τ. Τρύφονος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ:

Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ:

Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς, Αναπληρωτής Καθηγητής (Πρόεδρος)

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Νάτια Χαραλάμπους, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου, Ειδικός Επιστήμονας

Τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Δρ. Ιωάννα Συμεωνίδου, Επίκουρη Καθηγήτρια

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

Υποψήφιος Διδάκτορας: Γιώργος Τ. Τρύφωνος

Τίτλος Διατριβής: Ενοποιημένη διαδικασία σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση Διδακτορικού διπλώματος στο Τμήμα Αρχιτεκτονικής και εγκρίθηκε στις 07/12/2018 από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ερευνητικός Σύμβουλος

.....
*Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης,
Επίκουρος Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής (Προέδρος)

.....
*Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς,
Αναπληρωτής Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής

.....
*Δρ. Νάτια Χαραλάμπους
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια*

Μέλος Επιτροπής

.....
*Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου,
Ειδικός Επιστήμονας*

Μέλος Επιτροπής

.....
*Δρ. Ιωάννα Συμεωνίδου
Επίκουρη Καθηγήτρια*

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.

Γιώργος Τ. Τρύφωνος

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, οι δυνατότητες των μέσων ψηφιακού σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής επιτρέπουν τη χρήση νέων υλικών για την παραγωγή σύνθετων δομών, κάτι το οποίο παλαιότερα θα προκαλούσε ασάφειες και ανακρίβειες κατά τη μεταφορά των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς τους από τη φάση σχεδιασμού στη φάση κατασκευής τους. Η παρούσα έρευνα αποσκοπεί στην ανάπτυξη μιας ενοποιημένης διαδικασίας ψηφιακού σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής για την επίλυση τέτοιων ζητημάτων μέσα από το παράδειγμα της εφαρμογής ενός νέου-ελαστικού υλικού (νήμα ελαστομερούς πολυουρεθάνης) για την παραγωγή εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων σε πολλαπλές διαστάσεις. Συγκεκριμένα, στο ένα σκέλος γίνεται σχεδιαστική διερεύνηση μέσω της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής (form-finding), στατικής και πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου ελέγχεται παραμετρικά η παραμόρφωση και η αντοχή του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες και τους περιορισμούς μιας προτεινόμενης διαδικασίας ύφανσης. Η διαδικασία βασίζεται σε γεωμετρικές, στατικές και κατασκευαστικές παραμέτρους, αλλά και περιορισμούς που στόχο έχουν την ανάλυση και προσομοίωση της μορφής, επιδιώκοντας τη δημιουργία ενός παραμετρικού αλγόριθμου για τον έλεγχο της ύφανσης του πλέγματος κατά τη φάση ρομποτικής κατασκευής του. Στο κατασκευαστικό σκέλος, σημαντικό στοιχείο διαδραματίζει η διερεύνηση και κατασκευή ενός εργαλείου τελικής δράσης (end-effector), το οποίο σε συνδυασμό με την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα, επιτρέπουν τον έλεγχο χρήσης του υλικού και της πορείας ύφανσης του, λαμβάνοντας υπόψη τις ελαστικές του ιδιότητες και τη γεωμετρία των δομών προς υλοποίηση. Η διαδικασία που αναπτύσσεται αναφέρεται στην διαδοχική πρόσθεση νήματος και τοπικής συγκόλλησης κόμβων και ελέγχεται από τον αλγόριθμο λειτουργίας του βραχίονα για την κατασκευή του προκαθορισμένου ελαστικού πλέγματος με ακρίβεια. Τέλος, γίνεται πειραματισμός σε φυσικά πρωτότυπα μικρών διαστάσεων και αξιολογούνται τα αποτελέσματα, τα οποία προκύπτουν τόσο μέσα από την ψηφιακή διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης, όσο και μέσα από τις δυνατότητες του αυτοσχέδιου μηχανισμού να εφαρμόζεται αποτελεσματικά στην κατασκευή ελαστικών πλεγμάτων.

ABSTRACT

Nowadays, the capabilities of digital design and robotic fabrication tools allow for the use of new materials for the production of complex structures, which previously would create ambiguities and inaccuracies, when transferring their properties and behavior from the design to the fabrication stage. The present research aims to develop an integrated procedure of digital design and robotic fabrication to solve such issues. In particular, this is done through the example of the application of a new flexible material (polyurethane elastomeric thread) for the production of tensile elastic mesh in various dimensions. Specifically, the first aspect of the design is form-finding, static and multi-criteria analysis, where deformation and tensile strength of the material are parametrically controlled, taking into account the parameters and constraints of a proposed weaving process. The procedure is based on geometric, static and fabrication parameters, but also limitations aiming at the analysis and simulation of the form, with final goal the creation of an algorithm for controlling parametrically the robotic weaving process of the mesh during the construction phase. In the construction aspect, an important element is the investigation and manufacturing of an end-effector tool, which, in combination with the robotic arm movement, allows the control of material use and the weaving process, taking into account its elastic properties and the geometry of structure to be implemented. The process that is developed refers to the sequential addition of thread and locally knotted nodes and is controlled by the operational algorithm of robotic arm to accurately develop the predetermined tensile elastic mesh. Finally, experimentation on physical prototypes in small dimension size is performed and their results are evaluated, which arise both from the digital design and analysis process and through the capabilities of the custom mechanism to be effectively applied for the fabrication of elastic meshes.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες, όπως και την ευγνωμοσύνη μου απέναντι στα άτομα που συνέβαλαν στη βελτίωση, στην εξέλιξη και παράδοση της διδακτορικής διατριβής. Χωρίς την παρουσία, την υποστήριξη και την ανεκτικότητα αυτών των ατόμων δε θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Οδυσσέα Κοντοβούρκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, για την επιστημονική, πνευματική και ηθική υποστήριξη, όχι μόνο κατά την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής αλλά και των προπτυχιακών σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα τα χρόνια της προσπάθειας, τις πολύτιμες συμβουλές, και διορθώσεις που βοηθήσαν στην αποπεράτωση της διδακτορικής διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Μάριο Κ. Φωκά, Αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου, για τις μεθοδικές, πνευματικές, επαγγελματικές και επιστημονικές συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, για την ευκαιρία που μου δόθηκε να συμμετάσχω στο ερευνητικό πρόγραμμα *Optimization Driven Architectural Design of Structures (OptArch)* του *Marie Skłodowska-Curie Actions, Research and Innovation Staff Exchange (RISE)*, Call: *H2020-MSCA-RISE-2015*. Η συνεργασία και η καθοδήγηση που είχα συνέβαλαν καθοριστικά στην πορεία εξέλιξης της έρευνας.

Θέρμες ευχαριστίες και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Δρ. Νάτια Χαραλάμπους, Επίκουρη καθηγήτρια στο Τμήμα Αρχιτεκτονικής Πανεπιστήμιο Κύπρου, Δρ. Ευτύχιο Χριστοφόρου, Ειδικό Επιστήμονα στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστήμιο Κύπρου και Δρ. Ιωάννα Συμεωνίδου, Επίκουρη Καθηγήτρια στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, για την πρόθυμη παρουσία τους στην αξιολόγηση της υποβληθείσας διδακτορικής διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους μου οι οποίοι μου έδωσαν τη δύναμη να αρχίσω, να συνεχίσω και να ολοκληρώσω την παρούσα διδακτορική διατριβή και μου παρείχαν την ανυπολόγιστη υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια δύσκολων στιγμών.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ευγνωμοσύνη και ευχαριστίες στους γονείς μου, Τρύφωνα Τρύφωνος και Παναγιώτα Τρύφωνος, για την οικονομική και ηθική στήριξη που μου παρείχαν στη ζωή μου.

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

*ΣΕ ΑΥΤΟΥΣ ΠΟΥ ΣΤΗΡΙΞΑΝ ΤΗΝ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΙΕΚΠΕΡΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.0_Εισαγωγή	- 1 -
2.0_Ψηφιακός σχεδιασμός και ρομποτική κατασκευή με νήματα.....	- 6 -
2.1_Εισαγωγή	- 6 -
2.2_Εξέλιξη τεχνικών χειρισμού υλικών	- 6 -
2.3_Ενοποιημένες προσεγγίσεις ψηφιακού σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας	- 12 -
2.3.1_ Διαδικασία σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής με βάση υλικότητα και μέθοδο συναρμολόγησης.....	- 15 -
2.3.2_Ρομποτική κατασκευή μονάδων και συναρμολόγηση	- 16 -
2.3.3_Ρομποτική κατασκευή συνολικής μορφής.....	- 21 -
2.5_Συμπεράσματα	- 27 -
3.0_ Διαδικασίες διερεύνησης εφελκόμενων πλεγμάτων	- 29 -
3.1_Εισαγωγή.....	- 29 -
3.2_Γεωμετρικοί κανόνες εφελκόμενων κατασκευών	- 29 -
3.2.1_Φυσικές διαδικασίες εξεύρεσης μορφής	- 33 -
3.2.2_Ψηφιακές διαδικασίες εξεύρεσης μορφής και ανάλυσης.....	- 35 -
3.2.3_Τεχνική ελαστικών-σωματιδίων.....	- 38 -
3.2.4_Προετοιμασία εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων για κατασκευή	- 40 -
3.3_Στατική βελτιστοποίηση.....	- 43 -
3.4_Συμπεράσματα	- 48 -
4.0_Μεθοδολογία έρευνας	- 50 -
4.1_Εισαγωγή.....	- 50 -
4.2_Ενοποιημένη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και ρομποτικής κατασκευής	- 50 -
4.2.1_ Διαδικασία εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακή ανάλυση	- 51 -
4.2.2_Αλγόριθμος ελέγχου ρομποτικού βραχίονα και αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης	- 54 -
3.3_Συμπεράσματα	- 55 -
5.0_ Διαδικασία γεωμετρικής ανάπτυξης και πολυκριτηριακής ανάλυσης	- 57 -
5.1_Εισαγωγή.....	- 57 -
5.2_Μοτίβο ύφανσης ελαστικών πλεγμάτων	- 57 -
5.3_Ανάπτυξη περιπτώσιολογικών μελετών	- 63 -
5.3.1_Μεταβολή επιφάνειας και δημιουργία περιπτώσιολογικών μελετών.....	- 63 -
5.3.2_Αλγόριθμος ελέγχου μορφής και μη-γραμμική ανάλυση.....	- 69 -

5.3.3_Αξιολόγηση μορφής με πρόγραμμα στατικής ανάλυσης	- 71 -
5.4_ Πολυκριτηριακή διαδικασία ελέγχου ελαστικών πλεγμάτων	- 77 -
5.5_ Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης	- 79 -
5.5.1_ Αποτελεσματικότητα εφαρμογής μοτίβου ύφανσης σε μικρές διαστάσεις κατασκευής	- 82 -
5.5.2_ Αποτελέσματα εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης σε μεγάλες διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας	- 94 -
5.6_ Συμπεράσματα	- 99 -
6.0_ Ανάπτυξη εργαλείου τελικής δράσης.....	- 101 -
6.1_ Εισαγωγή	- 101 -
6.2_ Σχεδιασμός και έλεγχος εργαλείου τελικής δράσης.....	- 102 -
6.2.1_ Έλεγχος μήκους και τροφοδοσία νήματος.....	- 103 -
6.2.2_ Τροφοδοσία και τήξη κολλητικής σιλικόνης	- 106 -
6.2.3_ Συγκράτηση και δημιουργία κόμβων.....	- 108 -
6.3_ Κατασκευή εργαλείου τελικής δράσης.....	- 111 -
6.4_ Προγραμματισμός και έλεγχος εργαλείου τελικής δράσης	- 114 -
6.4.1_ Προγραμματισμός της διαδικασίας τροφοδοσίας και τήξης κολλητικής σιλικόνης....	- 118 -
6.5_ Προσδιορισμός της πορείας κίνησης και έλεγχος ρομποτικού βραχίονα.....	- 121 -
6.6_ Συμπεράσματα	- 128 -
7.0_ Φυσικά πειράματα και αξιολόγηση	- 129 -
7.1_ Εισαγωγή	- 129 -
7.2_ Πειράματα για βελτίωση της προτεινόμενης διαδικασίας.....	- 129 -
7.2.1_ Ολοκληρωμένο πείραμα ύφανσης	- 132 -
7.3_ Συμπεράσματα	- 139 -
8.0_ Συμπεράσματα	- 140 -
8.1_ Ερευνητική συνεισφορά	- 140 -
8.2_ Ερευνητικά αποτελέσματα και μελλοντική εξέλιξη.....	- 141 -
9.0_ Βιβλιογραφία	- 145 -
10.0_ Παραρτήματα	- 159 -
10.1_ Παραρτήματα I.....	- 159 -
10.2_ Παραρτήματα II	- 162 -
10.3_ Παραρτήματα III.....	- 177 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1.	Η πρώτη μηχανή για οριζόντιο λάξευμα (τόρνος) που δημιουργήθηκε από τον <i>Eli Whitney</i> το 1860 (Caneparo, 2014).....	- 7 -
Εικόνα 2.2.	Διαδικασία λειτουργίας ρομποτικής μηχανής για την παραγωγή φυσικού πρωτότυπου (Vermisso, 2012).....	- 10 -
Εικόνα 2.3.	Πείραμα δομής με κόμβους και ράβδους (Pohl and Nachtigall, 2015).....	- 10 -
Εικόνα 2.4.	Ο ρομποτικός μηχανισμός και η διαδικασία ύφανσης (Yablonina et al., 2017).....	- 11 -
Εικόνα 2.5.	Διάγραμμα ενοποιημένης κατασκευαστικής προσέγγισης σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας.	- 13 -
Εικόνα 2.6.	Εργαλείο τελικής δράσης και εφαρμογή του σε ρομποτικό βραχίονα (Prado et al., 2017).	- 14 -
Εικόνα 2.7.	Μεθοδολογική προσέγγιση σχεδιασμού και κατασκευής μονάδων με χρήση ρομποτικού βραχίονα.	- 17 -
Εικόνα 2.8.	Χώρος εργασίας του 12-αξωνικού ρομποτικού συστήματος για τη δημιουργία των μονάδων (Prado et al., 2014).	- 18 -
Εικόνα 2.9.	Εργαλείο τελικής δράσης για ύφανση των νημάτων γυαλιού (<i>Glass fiber, GF</i>) και άνθρακα (<i>Carbon Fiber, CF</i>) διαμέσου των αγκυρώσεων (Prado et al., 2017).....	- 19 -
Εικόνα 2.10.	Βαθμονόμηση ρομποτικού βραχίονα και δοκιμές εργαλείου τελικής δράσης (Reinhardt et al., 2018).....	- 20 -
Εικόνα 2.11.	Διάγραμμα αναπαράστασης της μεθόδου ρομποτικής κατασκευής με την ενσωμάτωση εργαλείου τελικής δράσης για την παραγωγή μονάδων και συναρμολόγηση τους.....	- 21 -
Εικόνα 2.12.	Διάγραμμα αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας με χρήση ρομποτικού βραχίονα στο σύνολο της κατασκευής.	- 22 -
Εικόνα 2.13.	Χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και του περιστρεφόμενου τραπέζιου για την ύφανση των νημάτων γυαλιού και άνθρακα (Reichert et al., 2014).....	- 22 -
Εικόνα 2.14.	Αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης για εφαρμογή των νημάτων άνθρακα στη μεμβράνη <i>ETFE</i> (Schieber et al., 2015).....	- 23 -
Εικόνα 2.15.	Διάγραμμα συσχετισμού επιτρεπόμενου χώρου εργασίας ρομποτικού βραχίονα με την τελική μορφή (Vasey et al., 2015).....	- 24 -
Εικόνα 2.16.	Ο μηχανισμός ύφανσης και προσαρμογής της ρητίνης για τη δημιουργία των κατασκευών από νήματα γυαλιού (<i>Glass fiber, GF</i>) (Kayser et al., 2019).....	- 24 -
Εικόνα 2.17.	Γενικό διάγραμμα διαδικασίας κατασκευής του συνόλου της μορφής με την εφαρμογή εργαλείου τελικής δράσης.	- 25 -
Εικόνα 2.18.	Διαδικασία σταδιακής προσομοίωσης πλέγματος των νημάτων από τις ρομποτικές μηχανές (Mirjan et al., 2016).....	- 26 -
Εικόνα 3.1.	Κατηγορίες <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Bechthold, 2008).	- 31 -
Εικόνα 3.2.	Παράδειγμα δυναμικής συμπεριφοράς και παραμόρφωσης καλωδίων (Bechthold, 2008).....	- 33 -

Εικόνα 3.3.	Αποτελέσματα πειραμάτων με μοντέλα από υγρά φιλμ σαπουνιού (Bechthold, 2008).....	- 34 -
Εικόνα 3.4.	Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής (Descamps, 2014).....	- 35 -
Εικόνα 3.5.	Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής με την τεχνική ελαστικών σωματιδίων σε κρεμαστά μοντέλα (Kilian and Ochsendorf, 2005).	- 39 -
Εικόνα 3.6.	Διαδικασία επιπεδοποίησης ενός δομημένου πλέγματος (Gale and Lewis, 2016).....	- 40 -
Εικόνα 3.7.	Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής από επιπεδοποιημένο σχήμα με τη μέθοδο Total Lagrangian Formulation (TLF)) (Veenendaal and Block, 2012).....	- 41 -
Εικόνα 4.1.	Διάγραμμα της προτεινόμενης ενοποιημένης μεθοδολογίας με βάση τις δυο κατευθύνσεις, τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και τη ρομποτική κατασκευή.	- 51 -
Εικόνα 4.2.	Διάγραμμα ενοποιημένης μεθοδολογίας ελέγχου παραμέτρων και περιορισμών υλικού και εργαλείου τελικής δράσης για βελτιστοποίηση των εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων.	- 53 -
Εικόνα 4.3.	Διάγραμμα μεθοδολογίας για τον προγραμματισμό λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα.	- 55 -
Εικόνα 5.1.	Αρχική διερεύνηση της διαδικασίας ύφανσης των ελαστικών πλεγμάτων (Kontonourkis and Tryfonos, 2014).....	- 58 -
Εικόνα 5.2.	Διάγραμμα ύφανσης μεταξύ δύο πρωτεύοντων ελαστικών νημάτων και σχέσεις κόμβων (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).	- 59 -
Εικόνα 5.3.	Προσθετική διαδικασία, εξεύρεση μορφής και κατασκευαστική προσομοίωση για τη δημιουργία της πορείας κίνησης του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).....	- 60 -
Εικόνα 5.4	Διάγραμμα τελικού ρυθμού ύφανσης, παραμόρφωσης νημάτων και δημιουργίας κόμβων με $N=13$	- 61 -
Εικόνα 5.5.	Αρχική και τελική μορφή εφελκόμενου πλέγματος 36 μονάδων μέσω της προσομοίωσης με τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής. Αριστερά: Οι γραμμές και οι κόμβοι του αρχικού μοτίβου ύφανσης, Δεξιά: Το αποτέλεσμα της μορφής του πλέγματος με $L/D=85\%$ και θέση κόμβων = 50%	- 62 -
Εικόνα 5.6.	Διαδοχική προσομοίωση της πρόσθεσης 36 μονάδων και διαδικασία εξεύρεσης μορφής.	- 62 -
Εικόνα 5.7.	Σημεία μέτρησης τιμής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (K_a) σε δύο παραδείγματα περιπτώσιολογικών μελετών.....	- 64 -
Εικόνα 5.8.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας A.	- 65 -
Εικόνα 5.9.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας B.	- 66 -
Εικόνα 5.10.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας C.....	- 66 -
Εικόνα 5.11.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας D.	- 66 -
Εικόνα 5.12.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας E.....	- 67 -
Εικόνα 5. 13.	Περίπτωση μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας F.	- 67 -
Εικόνα 5.14.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας G.	- 68 -
Εικόνα 5.15.	Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας H.	- 68 -
Εικόνα 5.16.	Διάγραμμα διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης.....	- 71 -

Εικόνα 5.17. Διαδικασία μεταφοράς αρχικής γεωμετρίας πριν από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής στο στατικό πρόγραμμα μη-γραμμικής ανάλυσης SAP2000.....	- 72 -
Εικόνα 5.18. Διαδικασία μη-γραμμικής ανάλυσης και απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων στην αρχική μορφή του πλέγματος.....	- 73 -
Εικόνα 5.19. Αποτέλεσμα μετακίνησης κόμβων μέσω του προγράμματος <i>CSI SAP2000</i> και μεταφορά δεδομένων στο πρόγραμμα <i>Grasshopper</i>	- 74 -
Εικόνα 5.20. Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης κλειστού βρόχου ανατροφοδότησης.	- 78 -
Εικόνα 5.21. Γραφική παράσταση σχέσης μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και συνολικού μήκους παραμορφωμένου υλικού για τους καλύτερους συμβιβασμούς στις γενεές 0, 25η, 100η, 250η, και 500 ^η	- 81 -
Εικόνα 5.22. Αποτελέσματα πληθυσμού λύσεων μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη χρήση Γενετικού Αλγόριθμου πολλαπλών- στόχων για την περίπτωση F.8.	- 83 -
Εικόνα 5.23. Γραφική παράσταση σχέσης μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και συντελεστή (L/D).....	- 84 -
Εικόνα 5.24. Εύρος επιλογής λύσεων βάσει του συντελεστή L/D για την περίπτωση F.8.	- 85 -
Εικόνα 5.25. Διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης και σύγκρισης κατηγοριών τυπολογίας.	- 86 -
Εικόνα 5.26. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας A και τις περιπτώσεις 1,4,8.....	- 86 -
Εικόνα 5.27. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας D και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 87 -
Εικόνα 5.28. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας B και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 87 -
Εικόνα 5.29. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας C και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 88 -
Εικόνα 5.30. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας E και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 88 -
Εικόνα 5.31. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας F και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 89 -
Εικόνα 5.32. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας G και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 90 -
Εικόνα 5.33. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας H και τις περιπτώσεις 2,5,8.....	- 90 -

Εικόνα 5.34. Γραφική παράσταση συσχετισμού της αρχικής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας με την τελική <i>Gaussian</i> καμπυλότητα στις επιφάνειες των ελαστικών πλεγμάτων.....	- 92 -
Εικόνα 5.35. Γραφική παράσταση που παρουσιάζει τη μεταβολή από τον μέγιστο στον ελάχιστο συντελεστή L/D	- 92 -
Εικόνα 5.36. Γραφική παράσταση μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και μέσου όρου τελικής καμπυλότητας.....	- 93 -
Εικόνα 5.37. Γραφική παράσταση συσχετισμού μεταβολής του συντελεστή L/D και του αποτελέσματος μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας.....	- 93 -
Εικόνα 5.38. Γραφικές παραστάσεις καλύτερων γεωμετρικά λύσεων συμπεριφοράς σε σχέση με τη στατική τους απόδοση.....	- 95 -
Εικόνα 5.39. Γραφικές παραστάσεις καλύτερων στατικά λύσεων σε σχέση με τη γεωμετρική τους μεταβολή.....	- 97 -
Εικόνα 5.40. Γραφική παράσταση δύο λύσεων με συντελεστή $L/D = 70\%$ και διατομή νήματος $\delta = 0.004$ mm στην περίπτωση B.8 που εμφανίζουν διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις αρθρώσεις και μετατοπίσεις των κόμβων τους. Αυτό επιφέρει μεταβολή της παραμόρφωσης των νημάτων από εξωτερικά φορτία από 0.005 m σε 0.0189 m.....	- 98 -
Εικόνα 6.1. Αρχικό φυσικό πρωτότυπο του εργαλείου τελικής δράσης και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ενεργοποιητών.....	- 101 -
Εικόνα 6.2. Τελική μορφή εργαλείου τελικής δράσης που προέκυψε μέσα από διαδικασία εξέλιξης.....	- 103 -
Εικόνα 6.3. Αρχικός μηχανισμός ελέγχου τροφοδοσίας του νήματος (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).....	- 104 -
Εικόνα 6.4. Λεπτομέρεια ελέγχου του αρχικού μήκος νήματος και συγκράτησή του για την επίτευξη αρχικής παραμόρφωσης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται σε μεγέθυνση οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία.....	- 105 -
Εικόνα 6.5. Αρχική λεπτομέρεια τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλκόνης (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).....	- 107 -
Εικόνα 6.6. Λεπτομέρεια μηχανισμών για την τροφοδοσία και τήξη της κολλητικής σιλκόνης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται σε μεγέθυνση τομή οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία.....	- 108 -
Εικόνα 6.7. Αρχική λεπτομέρεια συγκράτησης και δημιουργίας των κόμβων με γραμμικό ενεργοποιητή (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).....	- 109 -
Εικόνα 6.8. Αρχική λεπτομέρεια συγκράτησης και δημιουργίας των κόμβων με γραμμικό ενεργοποιητή. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η λεπτομέρεια ψεκασμού ψυχρού αέρος μαζί με τις βαλβίδες ελέγχου ροής.....	- 110 -
Εικόνα 6.9. Η διαδικασία δημιουργίας του άκρου και η ενίσχυση του με αντικολλητική σιλκόνη αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Α: Μήτρες από υλικό PVA, Β: Θήκες από υλικό ABS, Γ και Δ: Το αποτέλεσμα βαπτίσματος και συναρμολόγησης του θηκών-μητρών με τη χρήση της σιλκόνης, Ε: Η λεπτομέρεια του άκρου με τη σιλκόνη, η οποία δημιουργεί το ημισφαίριο του κόμβου και τις σπές για ψεκασμό με ψυκτικό αέριο.....	- 111 -

- Εικόνα 6.10.** Πρωτότυπο αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης συναρμολογημένο μαζί με τα ηλεκτρομηχανολογικά του τμήματα. - 112 -
- Εικόνα 6.11.** Τα τμήματα του εργαλείου τελικής δράσης. Α: Η βάση σύνδεσης του εργαλείου τελικής δράσης με το ρομποτικό βραχίονα, Β: Η θήκη για τα κινητά μέρη και στήριξη των ενεργοποιητών, Γ: Η λεπτομέρεια της διαδικασίας τροφοδοσίας της ράβδου σιλκόνης, Δ: Η λεπτομέρεια του συστήματος ελέγχου μήκους νήματος, Ε: Η λεπτομέρεια για τη συγκράτηση και δημιουργία των κόμβων, Ζ: Η θήκη για τη συσκευή τήξης και Η: Η λεπτομέρεια του σφαιριδίου για ψεκασμό του κόμβου..... - 113 -
- Εικόνα 6.12.** Διάγραμμα συντονισμού των βασικών συστημάτων. - 114 -
- Εικόνα 6.13.** Επίπεδα προσέγγισης του εργαλείου τελικής δράσης μέσα από την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα. - 115 -
- Εικόνα 6.14.** Αρχικοί πειραματισμοί μετακίνησης εργαλείου τελικής δράσης για τη δημιουργία της υπολογισμένης παραμόρφωσης στο νήμα (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016). - 115 -
- Εικόνα 6.15.** Λεπτομέρεια κίνησης για έλεγχο και αρχικής παραμόρφωσης του νήματος. Α: Ο μηχανισμός συγκρατεί το νήμα προκαλώντας την αναμενόμενη αρχική παραμόρφωση, Β: Ο μηχανισμός ελευθερώνει το νήμα αυξάνοντας το μήκος του. - 116 -
- Εικόνα 6.16.** Οι δύο περιπτώσεις λειτουργίας της διαδικασίας ελέγχου και τροφοδοσίας του μήκους του νήματος. Α: Ο μηχανισμός είναι κλειστός και συγκρατεί το νήμα, Β: Το διάνυσμα κίνησης από τον κόμβο, όπου το νήμα είναι ελεύθερο και παίρνει το αναμενόμενο μήκος στο τέλος της πορείας. - 116 -
- Εικόνα 6.17.** Λεπτομέρεια κίνησης για την συγκράτηση των νημάτων και δημιουργία του κόμβου, Α: Το πιστόνι κλείνει και συγκρατεί τα νήματα για τη δημιουργία του κόμβου, Β: Το πιστόνι ανοίγει για την απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης από τον κόμβο..... - 117 -
- Εικόνα 6.18.** Λειτουργία δημιουργίας του κόμβου, Α: Το εργαλείο τελικής δράσης προσεγγίζει το νήμα, Β: Κλείσιμο του γραμμικού ενεργοποιητή, Γ: Τήξη και εισδοχή της σιλκόνης μέσα στο ημισφαίριο, Δ: Ψύξη του κόμβου, Ε: Άνοιγμα του γραμμικού ενεργοποιητή, Ζ: Απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης..... - 118 -
- Εικόνα 6.19.** Περιληπτικό διάγραμμα ελέγχου της ρομποτικής πλακέτας και της λειτουργίας του εργαλείου τελικής δράσης. - 118 -
- Εικόνα 6.20.** Η πλακέτα Arduino (1), η οποία ελέγχεται από τον *IRC5* του ρομποτικού βραχίονα και αποστέλλει βήματα στη πλακέτα του βηματικού μοτέρ (2) για την ενεργοποίηση του αναμεταδότη (Relay) (3)..... - 119 -
- Εικόνα 6.21.** Ο αλγόριθμος κίνησης της ρομποτικής μηχανής συνδυάζει: Α: Την πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής, Β: Τα σημεία της πορείας κίνησης στα οποία ενεργοποιούνται οι βασικές λειτουργίες του εργαλείου τελικής δράσης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σημεία δημιουργίας του κόμβου και με πράσινο τα σημεία ενεργοποίησης της διαδικασίας ελέγχου του μήκους νήματος. - 122 -
- Εικόνα 6.22.** Σταδιακή επαλήθευση δημιουργίας της μορφής και στατικής ανάλυσης για εξεύρεση της πορείας κίνησης της ρομποτικής μηχανής (Tryfonos, 2018). - 123 -
- Εικόνα 6.23.** Αριστερά η περιστροφή του κόμβου στο σημείο τριγωνισμού των νημάτων. Δεξιά η γωνία υπολογισμού του αρχικού μήκους του νήματος (L) από τον αρχικό κόμβο (N1). Η απόσταση L καθορίζεται από τον συντελεστή L/D..... - 124 -

Εικόνα 6.24.	Επίπεδα τοποθέτησης και ελέγχου του εργαλείου τελικής δράσης από το ρομποτικό βραχίονα για τη δημιουργία ενός κόμβου σε προκαθορισμένο επίπεδο.....	- 126 -
Εικόνα 6.25.	Ο αλγόριθμος που εκτελείται από τον ελεγκτή IRC5 με την προγραμματική γλώσσα <i>Rapid</i> για τη δημιουργία ενός κόμβου και το μέτρημα του μήκους του νήματος για τον επόμενο κόμβο.	- 127 -
Εικόνα 7.1.	Αρχικό πείραμα δημιουργίας του κόμβου σε υφιστάμενο περιμετρικό πλαίσιο από ελαστικό νήμα (Kontonourkis and Tryfonos, 2015a; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).	- 130 -
Εικόνα 7.2.	Πείραμα εξεύρεσης μορφής και συσχέτιση με προσθήκη δυο ελαστικών νημάτων (Kontonourkis and Tryfonos, 2015a; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).....	- 131 -
Εικόνα 7.3.	Ξύλινη βάση για την κατασκευή του ελαστικού πλέγματος. Αριστερά η ψηφιακή προσομοίωση, Δεξιά η τοποθέτηση της βάσης και βαθμονόμηση της.	- 131 -
Εικόνα 7.4.	Αξιολόγηση της τοποθέτησης των αρθρώσεων με τη μέτρηση της απόστασης τους.....	- 132 -
Εικόνα 7.5.	Αρχικά νήματα 1-4 κατά τη διαδικασία δημιουργίας του ολοκληρωμένου πειράματος.	- 133 -
Εικόνα 7.6.	Φθορές άκρου ημισφαιρίου και αστοχία αρπαγής.	- 134 -
Εικόνα 7.7.	Διαδοχικές λήψεις από την διαδικασία κατασκευής του ελαστικού νήματος. ...	- 135 -
Εικόνα 7.8.	Αποτέλεσμα ολοκληρωμένου πειράματος ύφανσης ελαστικού πλέγματος.....	- 136 -
Εικόνα 7.9.	Σύγκριση αποκλίσεων σε [mm] του αποτελέσματος της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής με φυσικό πρωτότυπο σε άξονες XY.....	- 137 -
Εικόνα I.1.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση A.8.	- 177 -
Εικόνα I.2.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση B.8.	- 177 -
Εικόνα I.3.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση C.8.	- 177 -
Εικόνα I.4.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση D.8.	- 177 -
Εικόνα I.5.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση E.8.....	- 178 -
Εικόνα I.6.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση F.8.....	- 178 -
Εικόνα I.7.	Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση G.8.	- 178 -

Εικόνα 1.8. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση Η.8..... - 178 -

ΓΙΩΡΓΟΣ Γ. ΤΡΥΦΩΝΟΣ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά μετάλλου, ελαστικών και σύνθετων υλικών (Ashby, 2011).	- 43 -
Πίνακας 5.1. Κατηγορίες τυπολογιών A ως D. Μεταβολή των καμπύλων A ή και B και αποτελέσματα μέγιστης μεταβολής καμπυλότητας.	- 65 -
Πίνακας 5.2. Κατηγορίες τυπολογιών E ως H. Μεταβολή των καμπύλων A ή και B και αποτελέσματα μέγιστης μεταβολής στην καμπυλότητα.	- 65 -
Πίνακας 5.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μετακίνησης κόμβων και απόκλισης από το αρχικό μοτίβο ύφανσης.	- 75 -
Πίνακας 5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων μετακίνησης κόμβων και απόκλισης από το αρχικό μοτίβο ύφανσης χωρίς ιδιοφορτίο σε νήματα.	- 76 -
Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα λύσεων για την περίπτωση F.8. A: Η ακραία λύση με την καλύτερη γεωμετρική απόδοση, B: Η κατασκευάσιμη λύση που επιλέγεται με την καλύτερη γεωμετρική απόδοση, Γ: Η κατασκευάσιμη λύση που επιλέγεται με τη καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ: Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.	- 85 -
Πίνακας 5.6. Περιπτώσεις λύσεων με μέγιστο και ελάχιστο συντελεστή L/D για τις κατηγορίες τυπολογίας A.8-H.8.	- 91 -
Πίνακας 5.7. Επιλεγμένες βέλτιστες γεωμετρικά λύσεις κάθε κατηγορίας σε σχέση με τη στατική απόδοσή τους.	- 96 -
Πίνακας 5.8. Επιλεγμένες βέλτιστες στατικά λύσεις κάθε κατηγορίας σε σχέση με τη γεωμετρική μεταβολή τους.	- 97 -
Πίνακας 7.1. Συγκριτικός πίνακας αποκλίσεων σε άξονες XY μεταξύ ψηφιακής διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και φυσικού πρωτοτύπου του ελαστικού πλέγματος.	- 139 -
Πίνακας I.1. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας A.	- 159 -
Πίνακας I.2. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας B.	- 159 -
Πίνακας I.3. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας C.	- 159 -
Πίνακας I.4. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας D.	- 160 -
Πίνακας I.5. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας E.	- 160 -
Πίνακας I.6. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας F.	- 160 -
Πίνακας I.7. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας G.	- 161 -
Πίνακας I.8. Αποτέλεσμα μεταβολής <i>Gaussian</i> καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας H.	- 161 -
Πίνακας I.9. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για τις περιπτώσεις A,B,C,D,E,F,G.1*	- 162 -

Πίνακας I.47. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.4*.....	- 171 -
Πίνακας I.48. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.5*.....	- 171 -
Πίνακας I.49. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.6*.....	- 172 -
Πίνακας I.50. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.7*.....	- 172 -
Πίνακας I.51. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.8*.....	- 172 -
Πίνακας I.52. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.2*.....	- 172 -
Πίνακας I.53. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.3*.....	- 173 -
Πίνακας I.54. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.4*.....	- 173 -
Πίνακας I.55. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.5*.....	- 173 -
Πίνακας I.56. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.6*.....	- 173 -
Πίνακας I.57. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.7*.....	- 174 -
Πίνακας I.58. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για τις περιπτώσεις G.8 και H.1*.....	- 174 -
Πίνακας I.59. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.2*.....	- 174 -
Πίνακας I.60. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.3*.....	- 174 -
Πίνακας I.61. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.4*.....	- 175 -
Πίνακας I.62. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.5*.....	- 175 -
Πίνακας I.63. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.6*.....	- 175 -
Πίνακας I.64. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.7*.....	- 175 -
Πίνακας I.65. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.8*.....	- 176 -

1.0_ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνικές πλέξης εύκαμπτων υλικών με στόχο την εφαρμογή τους στο σχεδιασμό και στην κατασκευή δομών (Mirjan et al., 2016), πολλές φορές έχουν ως αντικείμενο έμπνευσης γεωμετρικά ή στατικά μοτίβα από φυσικούς μηχανισμούς, ή συμπεριφορές οργανισμών, ή φυσικές γεωμετρίες (Menges, 2011), όπως τους μεταξοσκώληκες, το πλέξιμο του ιστού της αράχνης, γεωμετρίες φυσαλίδων σαπουνιού, μορφές από υφάσματα, κ.α. Η μελέτη τέτοιων μηχανισμών, μέσω του φυσικού πειραματισμού και της ψηφιακής προσομοίωσης, επιτρέπει σε βάθος διερεύνηση και εξέλιξη της τεχνικής και της δομικής συμπεριφοράς τους (Duro-Royo et al., 2015), ενθαρρύνοντας τη δημιουργία κατασκευαστικών τεχνικών με νήματα, μεμβράνες και καλώδια (Yablonina et al., 2017).

Η πιο πάνω κατεύθυνση διερεύνησης και εξέλιξης τεχνικών χειρισμού υλικών λαμβάνει χώρα παράλληλα με την εξέλιξη προγραμμάτων παραμετρικού σχεδιασμού και διαδικασιών εξεύρεσης μορφής (form-finding) (Lewis and Gosling, 1993; Oxman, R. and Oxman, 2010; Symeonidou, 2016). Τέτοια υπολογιστικά προγράμματα ενσωματώνονται στη σχεδιαστική διαδικασία για το χειρισμό της μορφής και την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων των νημάτων, εφαρμόζοντας παράλληλα σε αυτά στατικές φορτίσεις για την προσομοίωση της γεωμετρικής συμπεριφοράς τους (Otto et al., 2006). Παράδειγμα διαδικασιών εξεύρεσης μορφής είναι οι φυσαλίδες σαπουνιού και νημάτων του Frei Otto (Otto, 1984) αλλά και η μελέτη της ισορροπημένης κατανομής των δυνάμεων και των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης κατασκευών (Werkbund and Villa, 2001) στο *Institute of lightweight structures* της Στουτγάρδης. Μεταξύ άλλων μεθόδων, η προσομοίωση που βασίζεται στη συμπεριφορά ελαστικών σωματιδίων (particle-spring behavior) (Kilian and Ochsendorf, 2005) μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη στη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατικής συμπεριφοράς εφελκόμενων κατασκευών πλεγμάτων αφού έχει βρει εφαρμογή σε πολλά παραδείγματα με επιτυχία (Harding et al., 2017; Piker, 2013; Symeonidou, 2015).

Παράλληλα, διαδικασίες εξεύρεσης μορφής τείνουν να συνδυάζονται με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης εφαρμόζοντας λογισμικά προγράμματα βελτιστοποίησης για τον έλεγχο και την επιλογή των κατάλληλων λύσεων όσον αφορά τις δομές από εύκαμπτα νήματα. Λογισμικά βελτιστοποίησης που στοχεύουν στην δημιουργία καλύτερης μορφής (*shape optimization*) (Yunliang, 1986) ή ελέγχου της διατομής (*section optimization*) (Hassan, 2013) των εφελκόμενων στοιχείων έχουν την ικανότητα μεταβολής σχεδιαστικών

ή και στατικών παραμέτρων για τη βελτιστοποίηση δομικών πλεγμάτων (Ahlquist et al., 2015; Bletzinger and Ramm, 2001). Μελέτες έχουν δείξει την δυνατότητα χρήσης τέτοιων μεθόδων, όπως Γενετικοί Αλγόριθμοι πολλαπλών στόχων (MOGA), για τη βελτιστοποίηση εφελκόμενων κατασκευών σε πραγματικό χρόνο (Ahlquist et al., 2014). Με την ενσωμάτωση πολυκριτηριακής ανάλυσης βασισμένης σε Γενετικούς Αλγόριθμους πολλαπλών στόχων σε μια διαδικασία εξεύρεσης μορφής, επιτυγχάνεται η δημιουργία πολλαπλών βέλτιστων αποτελεσμάτων, όπου τα γεωμετρικά και στατικά κριτήρια επηρεάζουν την επιλογή της τελικής εφελκόμενης μορφής (Adriaenssens et al., 2014).

Πάρα τις τελευταίες εξελίξεις όσον αφορά τις τεχνικές χειρισμού και εξεύρεσης μορφής μέσα από τη χρήση ανελαστικών υλικών, στη βιομηχανία υπάρχουν ελάχιστα παραδείγματα συσχέτισμού τους με σύγχρονες κατασκευαστικές μεθόδους (Sadler, 2005; Stavrić et al., 2013) για την ανάπτυξη εφελκόμενων πλεγμάτων με ακρίβεια σε μεγάλες διαστάσεις. Μέσα από μια ενοποιημένη σχέση όπου θα μπορούσαν να συσχετίζονται διαδικασίες εξεύρεσης μορφής και ρομποτικής κατασκευής (Gramazio and Kohler, 2008) επιδιώκεται η μετατόπιση από τη χρονοβόρα και ασαφή διαδικασία μετάφρασης των σχεδιαστικών αποτελεσμάτων σε κατασκευαστικές λύσεις (Bridgens and Birchall, 2012; Gale and Lewis, 2016; Symeonidou, 2016) προς νέες κατευθύνσεις έρευνας, όπου θα μπορούσε να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ διαδικασιών εξεύρεσης μορφής (Bletzinger et al., 2005; Gale and Lewis, 2016; Schwinn et al., 2012) και κατασκευής πλεγμάτων.

Βασική πρόκληση στο πεδίο αυτό είναι να ξεπεραστεί το κενό μεταξύ μικρού μεγέθους πειραμάτων και μεγαλύτερου μεγέθους πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας κατασκευών. Έτσι, η παρούσα έρευνα προτείνει μια ενοποιημένη διαδικασία, η οποία συμπεριλαμβάνει την τεχνική χειρισμού ελαστικών νημάτων ελαστομερούς πολυουρεθάνης, τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και τη ρομποτική κατασκευή αλλά και την εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η ενοποιημένη διαδικασία αποσκοπεί στην μείωση των αποκλίσεων και παραδοχών που προκύπτουν από τη μεταφορά των δεδομένων από το στάδιο εξεύρεσης μορφής στο στάδιο κατασκευής. Επιδίωξη είναι η αποτελεσματικότητα και ακρίβεια στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ελαστικών πλεγμάτων και παράλληλα ο αμφίδρομος έλεγχος τους μέσα από παραμέτρους και περιορισμούς.

Για την επίτευξη των πιο πάνω ελέγχεται η δυνατότητα χρήσης ρομποτικών μηχανισμών, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα κατασκευής σε πολλαπλές διαστάσεις αλλά και κίνησης με βάση μια προτεινόμενη προσθετική διαδικασία ύφανσης ελαστικών νημάτων. Η διαδικασία

ύφανσης και διερεύνησης του διαδοχικού μοτίβου πρόσθεσης των νημάτων αποτελεί βασικό σκέλος της έρευνας αφού μέσα από αυτήν συσχετίζεται η υλικότητα και η κατασκευαστική δυνατότητα του υλικού. Επίσης, γίνεται παράλληλη διερεύνηση σε σχεδιαστικό και φυσικό περιβάλλον των ιδιοτήτων, της παραμόρφωσης και γενικά της συμπεριφοράς του ελαστικού νήματος.

Η υλοποίηση της προτεινόμενης διαδικασίας κατασκευής εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων επιτυγχάνεται σε μικρού μεγέθους πειράματα μέσα από την καινοτόμα ανάπτυξη ενός αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραμόρφωση και την πλέξη του ελαστικού νήματος και τη δημιουργία των σχεδιαστικά παραγόμενων πλεγμάτων με ακρίβεια. Συγκεκριμένα, η ακρίβεια ελέγχου της ελαστικότητας των νημάτων είναι αποτέλεσμα της δυνατότητας του προτεινόμενου αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης να υπολογίζουν με ακρίβεια την σταδιακή παραμόρφωση των νημάτων και την πρόσθεση των κόμβων, αλλά και τον αυτόματο έλεγχο της ρομποτικής μηχανής και ενεργοποίησης του εργαλείου τελικής δράσης. Επίσης, η ενοποιημένη διαδικασία επιτυγχάνει τον πρωτότυπο χειρισμό της ελαστικότητας των νημάτων σε ψηφιακό και φυσικό περιβάλλον και την αυτοματοποιημένη ανάπτυξη ολοκληρωμένων πειραμάτων μικρών διαστάσεων, στοχεύοντας σε ένα νέο πεδίο διερεύνησης σχεδιασμού ελαστικών πλεγμάτων σε πολλαπλές διαστάσεις και εισαγωγής νέων αυτοματοποιημένων κατασκευαστικών στρατηγικών.

Η παρούσα έρευνα εξετάζει όλα τα πιο πάνω τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Αναλυτικά, το **Κεφάλαιο 2** περιγράφει, μέσα από παραδείγματα εφαρμογής, την εξέλιξη των τεχνικών χειρισμού νημάτων μέσα από περιπτώσεις απλών χειροκίνητων και σύνθετων ρομποτικών μηχανισμών. Η ανάγκη χρήσης νέων υλικών για δημιουργία σύνθετων μορφών και η δυνατότητα των ρομποτικών μηχανών για κατασκευαστικό πειραματισμό, οδηγεί στο σχεδιασμό εργαλείων τελικής δράσης. Λόγω της ασάφειας που παρατηρείται στο χειρισμό νημάτων κατά τη φάση κατασκευής σύνθετων μορφών, απαιτείται παράλληλη πειραματική διερεύνηση σε σχεδιαστικό και κατασκευαστικό περιβάλλον με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται νέες κατασκευαστικές τεχνικές, οι οποίες επηρεάζονται από σχεδιαστικές και κατασκευαστικές παραμέτρους.

Σημαντικό στοιχείο σε τέτοιες μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής είναι η διαδικασία που ακολουθείται για την εξεύρεση της ψηφιακής μορφής, η οποία επηρεάζεται από κατασκευαστικές παραμέτρους υλικότητας. Έτσι, το **Κεφάλαιο 3** εστιάζεται στην ανάπτυξη

του θεωρητικού υπόβαθρου για το σχεδιασμό εφελκόμενων πλεγμάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση εξετάζονται οι γεωμετρικοί κανόνες που επηρεάζουν τη μορφή των πλεγμάτων με συνεπακόλουθο τη στατική συμπεριφορά της κατασκευής. Για την εξεύρεση της γεωμετρίας χρησιμοποιούνται φυσικοί και ψηφιακοί μέθοδοι διερεύνησης της μορφής, της οποίας η κατάσταση ισορροπίας βασίζεται στα χαρακτηριστικά του υλικού και στην κατανομή των δυνάμεων. Βασικό τμήμα της διερεύνησης και ελέγχου των στατικών, κατασκευαστικών και σχεδιαστικών παραμέτρων αλλά και της επιλογής βέλτιστων δομών, είναι η χρήση Γενετικών Αλγορίθμων. Ο συνδυασμός διαδικασιών εξεύρεσης μορφής και κατασκευαστικής βελτιστοποίησης επιτρέπει τη δημιουργία εφελκόμενων πλεγμάτων, τα οποία βασίζονται σε σχεδιαστικές παραμέτρους και επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του υλικού.

Η ανάγκη συσχέτισης κατασκευαστικών τεχνικών με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα και σχεδιασμού με διαδικασίες εξεύρεσης μορφής αλλά και ανάλυσης, οδηγούν στην ανάπτυξη μιας ενοποιημένης μεθοδολογίας σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων. Το **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζει την προτεινόμενη μεθοδολογία μέσα από την επεξήγηση της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και της πολυκριτηριακής ανάλυσης αλλά και του αλγόριθμου ελέγχου των ρομποτικών μηχανισμών για την ύφανση των πλεγμάτων με τη χρήση ελαστομερούς πολυουρεθάνης (*Polyurethane Elastomer*). Για την επίτευξη των πιο πάνω στόχων, η ερευνα χωρίζεται σε δύο βασικά σκέλη τα οποία αλληλοεπηρεάζονται και συσχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του υλικού και της γεωμετρίας και εξετάζονται σε πειράματα μικρής διάστασης 0.7x0.7 m.

Στο **Κεφάλαιο 5** αναπτύσσεται αναλυτικά η διαδικασία εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης του εφελκόμενου ελαστικού πλέγματος. Με τη δημιουργία αλγόριθμου για τον παραμετρικό έλεγχο της γεωμετρίας διερευνώνται περιπτώσεις τυπολογιών, όπου εφαρμόζεται το προτεινόμενο μοτίβο ύφανσης. Έπειτα, εφαρμόζεται η διαδικασία εξεύρεσης μορφής με την τεχνική προσομοίωσης ελαστικών σωματιδίων, όπου λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές ιδιότητες του νήματος, τα στατικά κριτήρια και οι κατασκευαστικοί περιορισμοί. Για τη διερεύνηση των καλύτερων λύσεων χρησιμοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση μέσω Γενετικών Αλγορίθμων πολλαπλών στόχων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιολογούνται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται στη δυνατότητα ελέγχου της ρομποτικής μηχανής για κατασκευή με βάση τα προτεινόμενα μοτίβα ύφανσης στην επιφάνεια της μορφής. Η δεύτερη αναφέρεται στη δυνατότητα των

προτεινόμενων μορφών να λειτουργούν σε πολλαπλές κλίμακες. Η ανάλυση στηρίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω της μεταβολής της εφελκυστικής τάσης, των παραμορφώσεων από εξωτερικά φορτία και τη γεωμετρική μεταβολή, προτείνοντας λύσεις κατασκευαστικά βέλτιστες.

Το **Κεφάλαιο 6** ασχολείται με την κατασκευαστική διερεύνηση των προτεινόμενων λύσεων μέσω της χρήσης ρομποτικών μηχανισμών. Ο σχεδιασμός του εργαλείου τελικής δράσης κρίνεται βασικό στοιχείο της έρευνας, αφού η ακρίβεια στον έλεγχο του υλικού επηρεάζει την ακρίβεια τοποθέτησης των ελαστικών νημάτων και του πλέγματος στο σύνολο του, καθορίζοντας ταυτόχρονα τις παραμέτρους δημιουργίας της ψηφιακής μορφής. Ο μηχανισμός στοχεύει σε μια συνεχή διαδικασία πρόσθεσης ελαστικών νημάτων και δημιουργίας κόμβων σύνδεσης. Για την δημιουργία του αλγόριθμου ελέγχου χρησιμοποιούνται προγράμματα προσομοίωσης ρομποτικού βραχίονα σε παραμετρικό περιβάλλον. Το σχεδιαστικό αποτέλεσμα που προκύπτει μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και ύφανσης δημιουργεί την πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής και ενεργοποιεί το εργαλείο τελικής δράσης.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται παρουσίαση των φυσικών πειραμάτων κατασκευής εφελκυσόμενων ελαστικών πλεγμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, συζητούνται και συγκρίνονται με τα ψηφιακά μοντέλα. Η συσχέτιση της ψηφιακής θέσης και της φυσικής μετατόπισης των κόμβων, έχει ως στόχο την ανίχνευση των σφαλμάτων, τη βελτίωση της ψηφιακής διαδικασίας σχεδιασμού και την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο σύνολο της.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται συζήτηση συμπερασμάτων όσον αφορά την ερευνητική συνεισφορά και τα αποτελέσματα της ενοποιημένης διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και ρομποτικής κατασκευής εφελκυσόμενων ελαστικών πλεγμάτων.

2.0_ ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΝΗΜΑΤΑ

2.1_ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

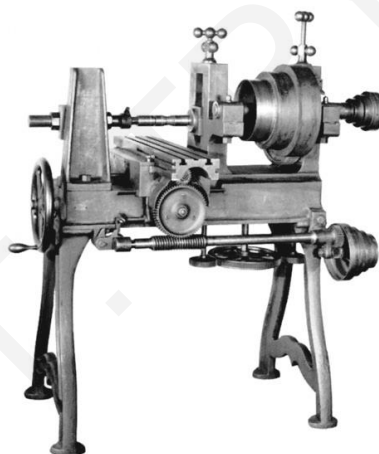
Η εξέλιξη των μέσων ψηφιακού σχεδιασμού και ειδικά η εισαγωγή διαδικασιών εξεύρεσης μορφής επιτρέπει την αποτελεσματική προσομοίωση και βελτιστοποίηση ειδικών κατασκευών λόγω της ευελιξίας του υλικού τους. Παρ' όλα αυτά, σε επίπεδο φυσικής ανάπτυξης τέτοιων σύνθετων δομών αλλά και τεχνικής επεξεργασίας των υλικών κατασκευής της μορφής τους, σημαντική είναι η εισαγωγή νέων τεχνικών, οι οποίες ξεφεύγουν από την απλή χρήση βιομηχανικών μηχανών. Προς αυτή την κατεύθυνση απαιτείται η αλληλεπίδραση μεταξύ σχεδιαστικών και κατασκευαστικών τεχνικών και η χρήση ρομποτικών μηχανισμών για το χειρισμό των υλικών, κάτι που οδηγεί στην ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών κατασκευής. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά διαδικασίες χειρισμού νέων-ευέλικτων υλικών από ρομποτικές μηχανές και μέσων αλληλεπίδρασης μεταξύ σχεδιαστικών και κατασκευαστικών διαδικασιών.

2.2_ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΥΛΙΚΩΝ

Το υλικό, ως παράμετρος σε μία σχεδιαστική διαδικασία, θεωρείται βασικό στοιχείο για την αποτελεσματικότητα της κατασκευαστικής τεχνικής (Menges, 2011). Από τα πολύ παλιά χρόνια η υλικότητα και πιο συγκεκριμένα η συμπεριφορά του υλικού επηρέαζε σχεδιαστικούς και κατασκευαστικούς προβληματισμούς. Ο *Manuel DeLanda* στο κείμενο του *'Material Complexity'* (DeLanda, 2004) αναφέρεται στην αρχαία Ελλάδα και στον Αριστοτέλη, ο οποίος για να διευρύνει τις γνώσεις του σχετικά με το μέταλλο και τα κράματα του, επισκεπτόταν τεχνίτες και σιδηρουργούς, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν μη βιομηχανικές τεχνικές στην κατασκευή. Την τότε εποχή η μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών γινόταν με την μέθοδο της παρατήρησης και μέσα από την ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ τεχνιτών. Για παράδειγμα, γνώσεις που αφορούσαν την αντίδραση ενός υλικού όταν θερμαίνεται ή κατά την διαδικασία μορφοποίησης του μέσα από την κοπή, σμίλευση και παραμόρφωση του. Έτσι, μέσα από την παρατήρηση και την ανταλλαγή πληροφοριών, το υλικό επηρέαζε τον τρόπο σχεδιασμού του. Η ανάγκη μεταφοράς της σχεδιαστικής πληροφορίας με αξιοπιστία στην τεχνική επεξεργασία του υλικού δημιούργησε τις πρώτες χειροκίνητες μηχανές. Ο σχεδιασμός τέτοιων χειροκίνητων εργαλείων προσέφερε στην

κατασκευαστική διαδικασία τη δυνατότητα επανάληψης αλλά και υλοποίησης των κατασκευών.

Με την εξέλιξη της βιομηχανίας, κατά την περίοδο της μαζικής παραγωγής (*mass production*) (Caneparo, 2014), η εφεύρεση των πρώτων μηχανών (*mechanical machines*) αποσκοπούσε στον επαναλαμβανόμενο χειρισμό υλικών με βάση κάποια τεχνική που οδηγούσε στην κατασκευή τους και έβρισκε εφαρμογή στην κατασκευαστική. Για παράδειγμα, η εφεύρεση του πρώτου τόννου (οριζόντιο λάξευμα) από τον *Eli Whitney* (Εικόνα 2.1) αποδεικνύεται ευέλικτη όσον αφορά την επεξεργασία του ξύλου και την παραγωγή αντικειμένων για κατασκευαστικούς σκοπούς. Επιπλέον, τέτοιες μηχανές επεξεργασίας υλικών είχαν τη δυνατότητα παραγωγής άλλων εργαλειομηχανών, όπως ο *Whitney* τόννος, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του πρώτου εκκοκκιστηρίου βαμβακιού (*cotton gin*) (Battison, 1973).



Εικόνα 2.1. Η πρώτη μηχανή για οριζόντιο λάξευμα (τόννος) που δημιουργήθηκε από τον *Eli Whitney* το 1860 (Caneparo, 2014).

Αργότερα, οι ιδιόμορφες ανάγκες της αυτοκινητοβιομηχανίας και αεροδιαστημικής για σχεδιαστική ευελιξία και κατασκευαστική ακρίβεια καθώς και η εισαγωγή νέων ελαφρών υλικών οδήγησε στην εμφάνιση νέων καινοτόμων διαδικασιών κατασκευής. Με την εφεύρεση του ψηφιακού ελέγχου (*NC – numeric control*) οι μηχανές συνδέονται με υπολογιστή, όπου τα στοιχεία του σχεδιασμού μπορούν να μεταφραστούν σε μαθηματική γλώσσα προγραμματισμού (*NC*) και να αποστέλλονται στη μηχανή (Noble, 2011). Ο υπολογιστής ελέγχει αυτόματα τη μηχανή καθοδηγώντας την με ακρίβεια για το χειρισμό του υλικού. Αρχικά, λόγω του υψηλού κόστους των μηχανημάτων, αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται σε μεγάλες βιομηχανίες. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη μείωση του

κόστους αρχίζουν να εισάγονται σε μικρότερες βιομηχανίες και μετέπειτα στην οικοδομική βιομηχανία (Dunn, 2012).

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, το χαμηλό κόστος των μηχανών και η ακρίβεια στον έλεγχο του υλικού επιτρέπουν τη διερεύνηση της σχέσης σχεδιαστικών προγραμμάτων και κατασκευαστικών διαδικασιών. Με τη δυνατότητα σχεδιαστικής επεξεργασίας, προσομοίωσης και στατικής συμπεριφοράς του υλικού εξελίσσονται μέθοδοι βελτιστοποίησης και ελέγχου πολύπλοκων μορφών καθώς και παραγωγής τους. Στο πλαίσιο αυτό, ο προσδιορισμός του υλικού της μορφής βασίζεται στην αλληλεπίδραση των παραμέτρων του ψηφιακού μοντέλου και της διαδικασίας κατασκευής της (Kolarevic, 2003).

Στις μέρες μας, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των μορφών αυτών επιτυγχάνεται μέσω ψηφιακών διαδικασιών προσομοίωσης των ιδιοτήτων του υλικού. Ιδιαίτερα ο σχεδιασμός ελεύθερων μορφών απαιτεί επεξεργασία σε ψηφιακό περιβάλλον όπου παράμετροι της υλικότητας και της κατασκευής ενσωματώνονται σε διάφορα σχεδιαστικά επίπεδα (Kontonourkis et al., 2013). Για την υλοποίησή τους έχουν εξελιχθεί διάφορες στρατηγικές όπως το *Sectioning*, *Contour*, *Forming*, *Tessellation*, *Milling* και *Folding* (Groover, 2010; Iwamoto, 2009), οι οποίες εφαρμόζονται για τον έλεγχο του υλικού με τη χρήση υπολογιστών ψηφιακού ελέγχου (*CNC*) για παραγωγή της φυσικής μορφής. Η επιλογή της τεχνικής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και τους σχεδιαστικούς στόχους, οι οποίοι προσδιορίζουν τον τρόπο επεξεργασίας του υλικού, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, κοπή και παραμόρφωση. Οι τεχνικές αυτές, εμφανίζουν ιδιαιτερότητες και περιορισμούς που επηρεάζουν το ψηφιακό μοντέλο αλλά και τη διαδικασία κατασκευής της φυσικής μορφής (Kolarevic, 2001).

Η επεξεργασία του υλικού με τη χρήση υπολογιστών ψηφιακού ελέγχου (*CNC*) για παραγωγή της φυσικής μορφής περιορίζεται σε τεχνολογίες χειρισμού συγκεκριμένων βασικών υλικών μαζικής παραγωγής, όπως μέταλλα, ξύλο, μπετόν, θερμοπλαστικά και γυαλί. Με τη ραγδαία εξέλιξη νέων ελαφριών και ευέλικτων υλικών στον τομέα της αεροναυπηγικής, αναπτύσσονται πειραματισμοί δημιουργίας νέων μορφών και τεχνικών χειρισμού τους (Wessel, 2004). Έτσι, μέσα από το συνδυασμό των παραμέτρων και των ιδιοτήτων συμπεριφοράς ενός υλικού, καθώς και των αποτελεσμάτων της διαδικασίας παραγωγής συγκεκριμένων μορφών, αναζητούνται συνδυασμοί τεχνικών (για παράδειγμα πρόσθεση υλικού και παραμόρφωση ή παραμόρφωση και κοπή) και τρόποι χειρισμού της

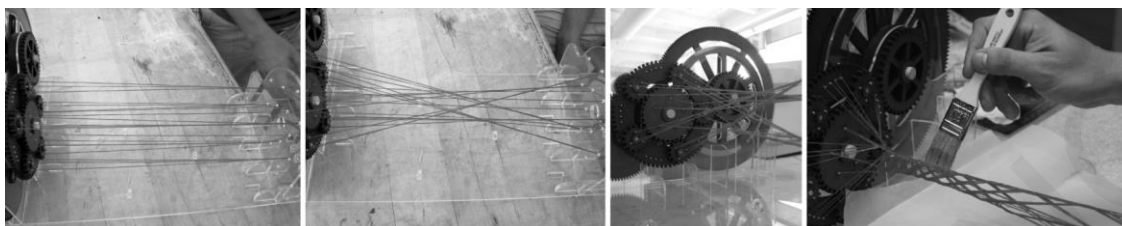
υλικότητας (Willmann et al., 2012). Ως αποτέλεσμα της ανάγκης σχεδιασμού και διερεύνησης των ιδιοτήτων τους, παρατηρούνται κατασκευαστικοί πειραματισμοί με τη χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών για τη δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων (Menges, 2013).

Σε αυτή την περίπτωση η διερεύνηση επικεντρώνεται στον παράλληλο χειρισμό του υλικού και στην εξεύρεση της μορφής σε ψηφιακό περιβάλλον καθώς και στη βελτιστοποίηση του κατασκευαστικού μηχανισμού. Αποτέλεσμα μιας τέτοιας αλληλεπίδρασης είναι η δημιουργία αυτοσχέδιων κατασκευαστικών συστημάτων με συγκεκριμένες τεχνικές χειρισμού ιδιοτήτων του υλικού.

Η ακρίβεια στην κατασκευαστική διαδικασία επιτυγχάνεται μέσα από τη συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ των χαρακτηριστικών συμπεριφοράς του υλικού και την κίνηση της ρομποτικής μηχανής (Braumann and Brell-Cokcan, 2012a). Η βελτιστοποίηση της κίνησης της ρομποτικής μηχανής αυξάνει τη δυνατότητα κατασκευής της μορφής, μειώνοντας παράλληλα τα σφάλματα που προκύπτουν λόγω της συμπεριφοράς του υλικού. Επίσης, ο βαθμός ελέγχου των ιδιοτήτων του υλικού καθορίζει και τους περιορισμούς της ρομποτικής μηχανής καθώς και τις κατασκευαστικές δυνατότητες της (Tryfonos, 2018).

Έτσι, ο σχεδιασμός αυτοσχέδιων ρομποτικών μηχανών επιτρέπει μία σειρά από παραλλαγές διερευνήσεων και πειραματισμών όσον αφορά την κατασκευή σύνθετων μορφών με νέα υλικά, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν και τον τρόπο σχεδιασμού τους (Chaturvedi et al., 2011; Kontonourkis and Tryfonos, 2015b). Για παράδειγμα, στο ερευνητικό έργο ‘*Knitectonics*’ (Chaturvedi et al., 2011) αναπτύσσεται ένα πρωτότυπο ρομποτικής μηχανής και μια προτεινόμενη μέθοδος ύφανσης νημάτων, με την οποία επιτυγχάνεται η δημιουργία μικρού μεγέθους πλεγμάτων. Επίσης, διερευνάται σε σχεδιαστικό επίπεδο η δυνατότητα ανάπτυξης γεωμετριών σε μεγαλύτερο μέγεθος και κλίμακα. Παρόμοιο παράδειγμα είναι το ερευνητικό έργο ‘*Bio – prototypes*’ (Vermisso, 2012), όπου με το χειρισμό νημάτων και κολλητικής ουσίας επιτυγχάνεται η δημιουργία στερεών αντικειμένων (Εικόνα 2.2), τόσο στην αρχική όσο και στην τελική φάση σχεδιαστικής διερεύνησης. Στην περίπτωση εφαρμογής στην αρχική φάση σχεδιασμού, το φυσικό αποτέλεσμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική πρόθεση διαδικασίας εξεύρεσης μορφής. Μεταφέροντας και απεικονίζοντας το φυσικό αποτέλεσμα σε ψηφιακό περιβάλλον γίνεται επιτρεπτή η εκτενέστερη ανάλυση του μέσω στατικών προγραμμάτων, όπως πεπερασμένων στοιχείων (*FEA*). Ως αποτέλεσμα, η φυσική μορφή συσχετίζεται με τη ψηφιακή αλλά και τις στατικές ιδιότητες της. Ως εκ’ τούτου, η δυνατότητα χειρισμού του

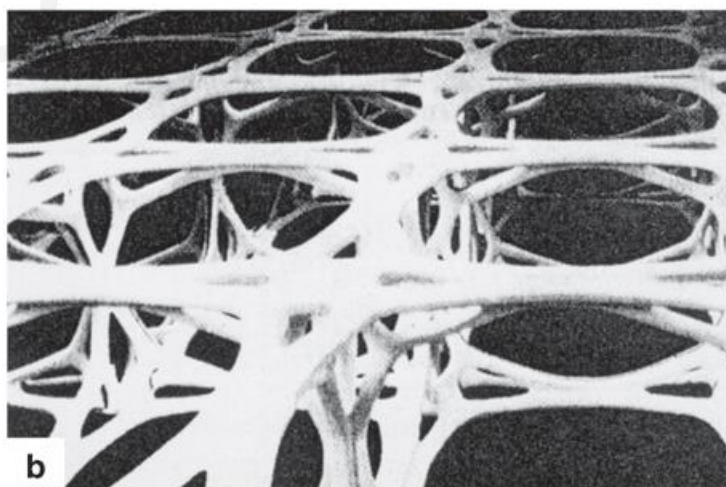
υλικού μέσω της ρομποτικής μηχανής θεωρείται σημαντική παράμετρος και επηρεάζει τη σχεδιαστική διαδικασία.



Εικόνα 2.2. Διαδικασία λειτουργίας ρομποτικής μηχανής για την παραγωγή φυσικού πρωτότυπου (Vermisso, 2012).

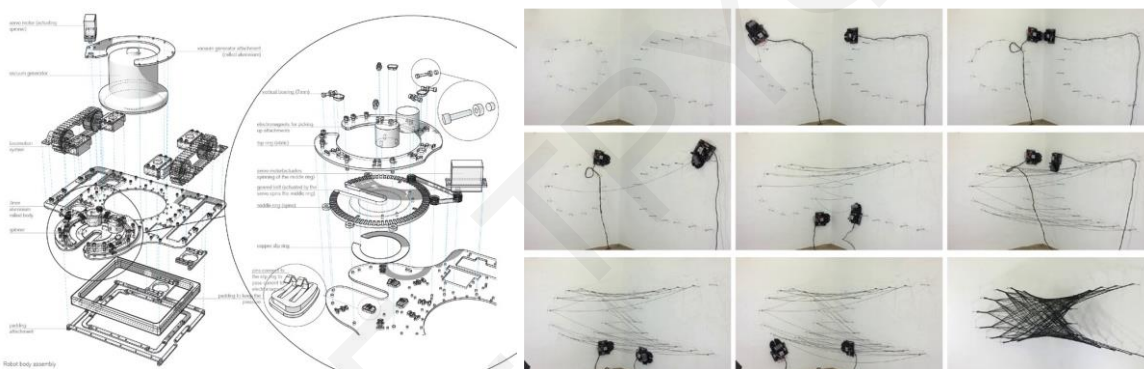
Παράλληλά, ο προγραμματισμός των ενεργοποιητών της ρομποτικής μηχανής επιφέρει την κίνηση των μηχανικών τμημάτων που οδηγεί στον επαναλαμβανόμενο χειρισμό του υλικού με ακρίβεια. Ο προγραμματισμός επιπρόσθετων αξόνων ελευθερίας στην ρομποτική μηχανή παρέχει τη δυνατότητα ευελιξίας στο επίπεδο εργασίας για τη δημιουργία σύνθετων μορφών σε τρεις διαστάσεις. Ως εκ τούτου, για την υλοποίηση τέτοιων μεθοδολογιών είναι αναγκαίος ο συγχρονισμός μεταξύ των χαρακτηριστικών του υλικού, της πορείας κίνησης και της τεχνικής επεξεργασίας της ρομποτικής μηχανής.

Πολλές φορές τεχνητά παραδείγματα ελέγχου και επεξεργασίας υλικών που στόχο έχουν την παραγωγή δομών είναι αποτέλεσμα μελέτης της συμπεριφοράς οργανισμών στην φύση, όπως αράχνες και μεταξοσκώληκες (Pohl and Nachtigall, 2015; Werkbund and Villa, 2001). Η συμπεριφορά και ο μηχανισμός επιβίωσης του οργανισμού μελετάται και προσαρμόζεται στο κατασκευαστικό στόχο (Oxman, N. et al., 2017). Σε αυτό το πεδίο έρευνας βρίσκουν εφαρμογή μηχανισμοί ύφανσης με νήματα, που συνδυάζουν την τοποθέτηση του υλικού και την κίνηση της ρομποτικής μηχανής για τη δημιουργία της μορφής (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3. Πείραμα δομής με κόμβους και ράβδους (Pohl and Nachtigall, 2015).

Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι το “*Mobile Robotic Fabrication System for Filament Structures*” στο *Institute for Computational Design and Construction* στο *Universität Stuttgart* (Yablonina et al., 2017), όπου αναπτύσσεται ένα σύστημα ύφανσης εφελκόμενης κατασκευής μεταξύ δύο επιφανειών τοίχων με την χρήση ενός ρομποτικού μηχανισμού που αναγνωρίζει σημεία και δημιουργεί κόμβους – συνδέσεις του συνεχόμενου νήματος. Σε αυτή την περίπτωση ο μηχανισμός είναι εμπνευσμένος από τη διαδικασία ύφανσης της αράχνης, όπου με τη συνεχόμενη κίνηση της δημιουργεί την γεωμετρία του ιστού (Εικόνα 2.4). Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα δημιουργίας ευέλικτων μορφών μεταξύ δύο επιφανειών, κάτι το οποίο έχει περιορισμούς όσον αφορά τις διαστάσεις της κατασκευής σε αντίθεση με τις δυνατότητες ανάπτυξης εφελκόμενων κατασκευών σε μεγαλύτερες διαστάσεις (Bridgens and Birchall, 2012).



Εικόνα 2.4. Ο ρομποτικός μηχανισμός και η διαδικασία ύφανσης (Yablonina et al., 2017).

Ένα πλεονέκτημα στη χρήση τέτοιων αυτοσχέδιων μηχανισμών είναι η δυνατότητα εξέλιξης τους ανάλογα με την επίδραση των ιδιοτήτων του υλικού, τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη συναρμολόγηση του. Το χαμηλό κόστος στη φάση εξέλιξης των αυτοσχέδιων μηχανισμών επιτρέπει τον πειραματισμό από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού τους αλλά και την παράλληλη βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειάς τους (Tamre et al., 2017).

Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη αυτοσχέδιων μηχανισμών επιφέρει και μια σειρά από περιορισμούς όσον αφορά το χειρισμό υλικών, κάτι το οποίο επηρεάζει και τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των μορφών (Malé-Alemaný et al., 2017). Ένα παράδειγμα είναι η μελέτη των (Yablonina et al., 2017), όπου η τεχνική ύφανσης της μορφής επηρεάζει την διαδικασία εξεύρεσης μορφής και κατά συνέπεια τον προγραμματισμό κίνησης των ρομποτικών μηχανών. Παρ’ ότι οι αυτοσχέδιες μηχανές καλύπτουν το κενό που δημιουργείται μεταξύ των βιομηχανικών υπολογιστών ψηφιακού ελέγχου (CNC) (Groover, 2010) και των τεχνικών χειρισμού συγκεκριμένων νέων υλικών, η ανάπτυξη τους παραμένει

σε πειραματικό στάδιο χωρίς εφαρμογή σε μεγάλες κατασκευαστικές βιομηχανίες (Caneparo, 2014; Glynn and Sheil, 2017).

2.3_ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Η παράλληλη εξέλιξη των βιομηχανικών ρομπότ και η πολύ-χρηστικότητα τους αυξάνει τη δυνατότητα κατασκευαστικής διερεύνησης σε πολλαπλές διαστάσεις. Επίσης, επιτρέπει πειραματική διερεύνηση σε μικρές διαστάσεις πρωτοτύπων, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους και περιορισμούς του υλικού σε μεγαλύτερες διαστάσεις κατασκευών (De Kestelier, 2017; Howe, 2000). Αυτό ενθαρρύνει τη χρήση αυτοσχέδιων μηχανών, οι οποίες μπορούν να εφαρμόζονται στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα ως εργαλεία τελικής δράσης για χρήση και πειραματισμό νέων υλικών (Seyedahmadian et al., 2015) παράλληλα με την εξέλιξη της σχεδιαστικής και κατασκευαστικής διαδικασίας (Braumann and Brell-Cokcan, 2012a).

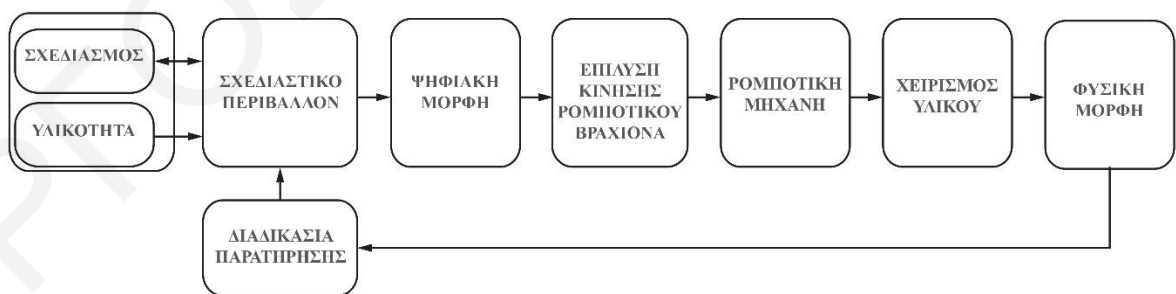
Η συσχέτιση της παραμετρικής τεχνολογίας των υπολογιστών και των ψηφιακών μέσων σχεδιασμού παρέχει δυνατότητες ολιστικής προσέγγισης στο σχεδιασμό (Shea et al., 2005). Επιπλέον, η δυνατότητα συνδυασμού σύνθετων κατασκευαστικών τεχνικών με τη χρήση γραφιστικών περιβαλλόντων προσομοίωσης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, επιτρέπουν την παράλληλη διερεύνηση σχεδιαστικών και κατασκευαστικών διαδικασιών (Oxman, R. and Oxman, 2010).

Η εκτέλεση μίας κατασκευαστικής διαδικασίας απαιτεί τον προγραμματισμό της ρομποτικής μηχανής, κάτι το οποίο προϋποθέτει γνώσεις προγραμματισμού (Lee, 1987). Κατ' επέκταση, ο προγραμματισμός της κίνησης των ρομποτικών μηχανών συσχετίζεται με το λογισμικό και τον προγραμματισμό της συμπεριφοράς του υλικού. Με βάση αυτά τα δύο χαρακτηριστικά, έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές στρατηγικές προγραμματισμού, ο αυτοματοποιημένος προγραμματισμός (*Automatic programming*) (Zolkiewski and Pioskowik, 2014), γνωστός ως προγραμματισμός με απευθείας σύνδεση (*online programming*) και ο χειροκίνητος προγραμματισμός (*manual programming*) (Brucoleri et al., 2007), γνωστός ως προγραμματισμός χωρίς σύνδεση (*offline programming*) (Biggs and MacDonald, 2003).

Η εξέλιξη των παραμετρικών προγραμμάτων ψηφιακού σχεδιασμού και η παράλληλη διερεύνηση κατασκευαστικών τεχνικών χειρισμού υλικών, επιτρέπουν μεταβολές αλλά και συνδέσεις με τη ρομποτική μηχανή σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η

προσομοίωση των κινήσεων της ρομποτικής μηχανής μεταβάλλεται παράλληλα με τις αλλαγές που εμφανίζονται στη φυσική μορφή (Braumann and Brell-Cokcan, 2011), επιτυγχάνοντας τον έλεγχο των υλικών.

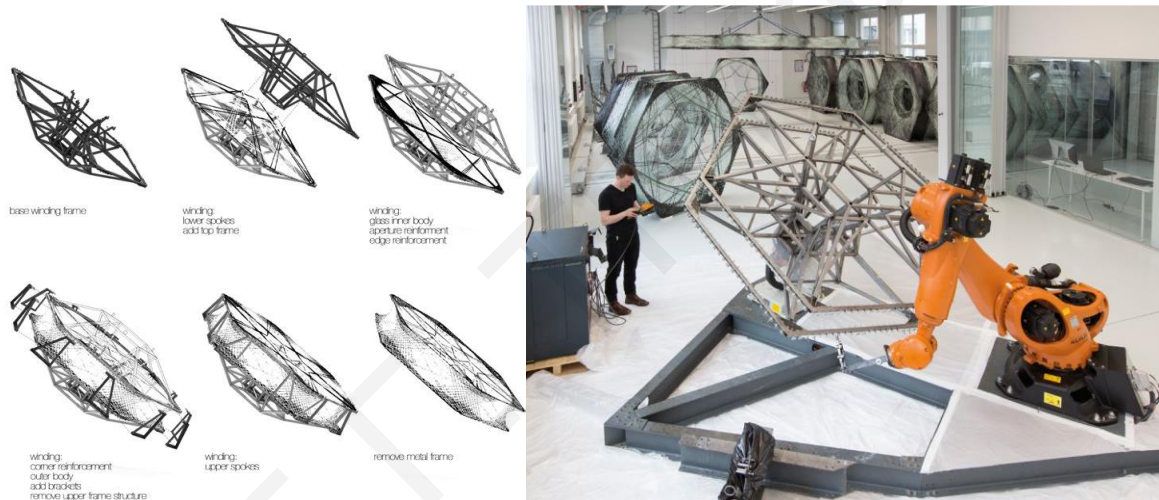
Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός και η προσομοίωση μέσα σε μια ενιαία πλατφόρμα προγραμμάτων επιτρέποντας έτσι το συνδυασμό επιπρόσθετων πληροφοριών, όπως στατική ανάλυση και βελτιστοποίηση. Για παράδειγμα, οι εξωτερικές δυνάμεις που προκαλούν παραμορφώσεις καθώς και χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του υλικού μπορούν να συνυπολογίζονται σε ένα τέτοιο σχεδιαστικό περιβάλλον. Δηλαδή, η πληροφορία από ένα μηχανισμό καταγραφής μπορεί να εισάγεται μέσα στο πρόγραμμα, να τυγχάνει επεξεργασίας και να εμπλουτίζει τη γεωμετρία. Ακολούθως, η προσομοίωση την κίνησης του ρομποτικού βραχίονα μέσω της διαδικασίας κινηματικής επίλυσης (*kinematic solver*) (Adrian-Florin et al., 2015), επιτρέπει την βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής. Παράλληλα με την προσομοίωση της ψηφιακής μορφής, η φυσική ρομποτική μηχανή με τη χρήση της ίδιας κινηματικής επίλυσης έχει τη δυνατότητα να εκτελεί την κατασκευαστική διαδικασία χωρίς να χρειάζεται επιπλέον μεταβολές στον αλγόριθμο της διαδικασίας (Szulczyński and Kozłowski, 2015). Τέτοια δυναμικά προγράμματα, όπως το *HAL*® (Schwartz, 2013) και το *KUKA/prc*® (Braumann and Brell-Cokcan, 2012b) μπορούν να χρησιμοποιούνται μέσω του προγράμματος *Rhinoceros*® (Robert McNeel, 2018) και του προσθετικού προγράμματος (*plug-in*) γραφικού προγραμματισμού (*graphical programming*) *Grasshopper*® (Rutten, 2018), με στόχο τον προγραμματισμό της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και την επεξεργασία της τρισδιάστατης γεωμετρίας (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5. Διάγραμμα ενοποιημένης κατασκευαστικής προσέγγισης σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας.

Οι πιο πάνω δυνατότητες μηχανισμών και προγραμμάτων θα μπορούσαν να βοηθήσουν μέσα από τρία στάδια διερεύνησης. Το πρώτο στάδιο είναι το προγραμματικό, όπου ελέγχεται η κίνηση της ρομποτικής μηχανής και ο τρόπος χειρισμού του υλικού (Bonwetsch, 2012), το δεύτερο στάδιο είναι το σχεδιαστικό, όπου με βάση τους περιορισμούς του υλικού

ορίζεται η αρχική μορφή, και το τρίτο στάδιο είναι της διαδικασίας κατασκευής, όπου με βάση την τεχνική χειρισμού του υλικού παράγεται με ακρίβεια η κατασκευή σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας. Ένα παράδειγμα εφαρμογής των τριών σταδίων είναι το *ICD/ITKE Elytra Filament Pavilion* στο *University of Stuttgart*, (Prado et al., 2017), στο οποίο προτείνεται ένα εργαλείο τελικής δράσης τοποθετημένο πάνω σε ρομποτικό βραχίονα. Μέσω της κίνησης του τοποθετούνται νήματα άνθρακα (*carbon fiber threads*) και νήματα υάλου (*Glass fiber threads*) σε μεταλλικά πλαίσια και έτσι σχηματίζονται μονάδες. Έπειτα, τα νήματα καλύπτονται με ρητίνη (*resin*) για να αποκτήσουν στατική επάρκεια (Εικόνα 2.6). Η συναρμολόγηση των μονάδων επιτυγχάνει το σύνολο της κατασκευής σε μεγάλη αρχιτεκτονική κλίμακα.



Εικόνα 2.6. Εργαλείο τελικής δράσης και εφαρμογή του σε ρομποτικό βραχίονα (Prado et al., 2017).

Κατά συνέπεια, η συνολική μορφή είναι αποτέλεσμα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της στατικής συμπεριφοράς, τόσο του συστήματος όσο και των μονάδων, π.χ. ιδιότητες των επιλεγόμενων υλικών (Oxman, N. and Rosenberg, 2007; Zhang et al., 2012). Με την εφαρμογή ενοποιημένων μεθόδων ψηφιακού σχεδιασμού και ρομποτικής επιτρέπονται διερευνήσεις που στοχεύουν στην όσο το δυνατόν πειστικότερη και αποδοτικότερη προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού στον ψηφιακό χώρο με σκοπό την υλοποίηση κατασκευαστικών δομών σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια.

2.3.1_ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΥΛΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής η αμφίδρομη σχέση, η οποία αναπτύσσεται μεταξύ γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των υλικών επιτρέπει τον πειραματισμό σε νέες μεθοδολογικές προσεγγίσεις (Mogas-Soldevila et al., 2015). Στην περίπτωση που η παράμετρος του υλικού εντάσσεται στα αρχικά στάδια της σχεδιαστικής διαδικασίας, θεωρείται ότι οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του γίνονται αναπόσπαστο μέρος και επηρεάζουν τη διαδικασία σχεδιασμού και κατ' επέκταση τη δημιουργία των κατασκευών. Αντιθέτως, η εφαρμογή παραμέτρων σχεδιασμού και κατασκευής χωρίς την ενσωμάτωση του υλικού στα πρώτα στάδια διερεύνησης μπορεί να δημιουργήσει μία σειρά από περιορισμούς στη χρήση του υλικού. Η δυνατότητα χειρισμού νέων υλικών από εργαλεία τελικής δράσης και ρομποτικούς μηχανισμούς καθώς και ο σχεδιασμός τους με ψηφιακά μέσα επιτρέπουν την παράλληλη διερεύνηση πιθανών μορφών με βάση σχεδιαστικά και κατασκευαστικά κριτήρια.

Έτσι, η υλικότητα είναι αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού τόσο στο επίπεδο εξεύρεσης όσο και στο επίπεδο προσομοίωσης της συμπεριφοράς των μορφών. Ακολούθως, αυτοί οι παράμετροι μπορούν να ελέγχουν τη διαδικασία κατασκευής της μορφής, επηρεάζοντας τον τρόπο κίνησης της ρομποτικής μηχανής και τη λειτουργία του εργαλείου τελικής δράσης. Με τη χρήση τέτοιων ρομποτικών εργαλείων είναι εφικτή η εύκολη εναλλαγή της διάστασης της κατασκευής, μειώνοντας το κόστος πειραματισμού σε νέες μορφές και υλικά (Braumann and Brell-Cokcan, 2012a).

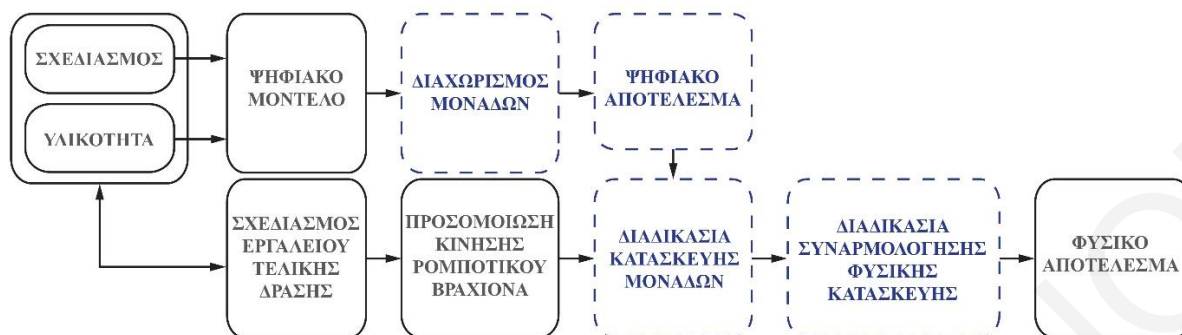
Πέρα από τη διερεύνηση της υλικότητας των μορφών μέσα από πειραματισμούς σε θέματα στρατηγικής χειρισμού των νημάτων, η συναρμολόγηση της μορφής μέσα από την εφαρμογή των ρομποτικών μηχανισμών και των ειδικών εργαλείων τελικής δράσης μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση τους σε διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας. Μέσα από τη μελέτη της επίκαιρης βιβλιογραφίας παρατηρούνται δύο βασικές προσεγγίσεις σχεδιασμού και κατασκευής μορφών από νήματα μέσω της χρήσης ρομποτικών μηχανισμών. Οι δύο κατηγορίες χωρίζονται με βάση τον τρόπο χειρισμού των υλικών και συναρμολόγησης της δομής τους με στόχο την υλοποίηση τους στο φυσικό χώρο.

2.3.2_ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ

Η πρώτη κατηγορία επικεντρώνεται στην χρήση του ρομποτικού βραχίονα για τη δημιουργία των μονάδων, η συναρμολόγηση των οποίων οδηγεί στην κατασκευή της φυσικής μορφής. Έτσι σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός, πέρα από τη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής και στατικής βελτιστοποίησης της, επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής και συναρμολόγησης των μονάδων.

Η διαδικασία δημιουργίας των μονάδων προϋποθέτει τον προγραμματισμό της κίνησης της ρομποτικής μηχανής αλλά και της κατασκευαστικής τεχνικής που προ-απαιτείται για το χειρισμό του νήματος. Αναλόγως των μηχανικών ιδιοτήτων του νήματος, επιλέγεται ή δημιουργείται το εργαλείο τελικής δράσης, το οποίο με την κατάλληλη λειτουργία μπορεί να δημιουργήσει τη φυσική μορφή. Σε αυτή την περίπτωση είναι αναγκαία η ύφανση της μονάδας σε συνδυασμό με προσχεδιασμένη βάση η οποία καθορίζεται σε σαφή όρια, επιτρέποντας τη διαδοχική πρόσθεση των νημάτων και δημιουργία της κατασκευαστικής μονάδας. Στις πλείστες περιπτώσεις ελέγχου του υλικού, όσον αφορά την μεταβλητότητα και την ευελιξία του κατά τη φάση τοποθέτησης του, απαιτείται η διερεύνηση αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης (Budig et al., 2014). Παράλληλα με το χειρισμό του υλικού από το εργαλείο τελικής δράσης, η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα θεωρείται σημαντική αφού έχει ως στόχο να καθοδηγεί το εργαλείο σε συγκεκριμένες και υπολογισμένες θέσεις της κατασκευής. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, η πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής συμβάλλει στην κατασκευή των μονάδων που συγκροτούν την τελική μορφή.

Σε αυτή την κατηγορία, το φυσικό αποτέλεσμα (Εικόνα 2.7) ορίζεται από την αλληλεπίδραση της συμπεριφοράς του υλικού στη ψηφιακή διαδικασία παραγωγής των στατικών μονάδων, της κατασκευής και τέλος της συναρμολόγησης. Ο παράλληλος πειραματισμός σε θέματα χειρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού σε ψηφιακό και φυσικό περιβάλλον επιφέρει την εξέλιξη της κίνησης και ενεργοποίησης του εργαλείου τελικής δράσης με το ρομποτικό βραχίονα, όπου με το χειρισμό του υλικού εξασφαλίζεται η κατασκευή των μονάδων. Έπειτα, για τη δημιουργία της τελικής μορφής, η διαδικασία συναρμολόγησης βασίζεται σε κλασικούς κατασκευαστικούς τρόπους ένωσης των μονάδων εντός του χώρου κατασκευής (Bonwetsch, 2012).



Εικόνα 2.7. Μεθοδολογική προσέγγιση σχεδιασμού και κατασκευής μονάδων με χρήση ρομποτικού βραχίονα.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας που έχει περιγραφεί πιο πάνω είναι το 'ICD/ITKE Research Pavilion 2013' στο *University of Stuttgart* (Prado et al., 2014). Η δημιουργία των μονάδων είναι αποτέλεσμα βιομηχανικής ανάλυσης για τη δημιουργία της ψηφιακής μορφής, η οποία κατασκευάζεται από ένα εργαλείο τελικής δράσης και το συγχρονισμό δύο ρομποτικών βραχιόνων. Το εργαλείο τελικής δράσης και η κίνηση του ρομποτικού συστήματος επιτρέπουν την επαναλαμβανόμενη ύφανση των νημάτων και τη δημιουργία των μεμονωμένων μονάδων (Εικόνα 2.8). Η ανελαστική ιδιότητα των υλικών, όπως νήματα γυαλού (*Glass fiber, GF*) και άνθρακα (*Carbon Fiber, CF*) (Steinmann and Saelhoff, 2016) επιτρέπει την πλέξη τους σε στρώματα με σταθερή ελάχιστη τάση για να αποφεύγεται η χαλάρωση τους. Στους ρομποτικούς βραχίονες εφαρμόζεται το πλαίσιο της μονάδας, όπου μέσω ενός απλουστευμένου σταθερού μηχανισμού στο μέσο των δύο βραχιόνων γίνεται η τροφοδοσία των νημάτων από το καρούλι σε σταθερή τροχαλία. Έτσι, με την περιστροφή και κίνηση του βραχίονα, τα νήματα γυαλιού και άνθρακα υφαίνονται στους γάντζους του υφιστάμενου πλαισίου δημιουργώντας ένα πλέγμα με τάση χωρίς χαλαρώσεις.

Ο συνδυασμός των δύο νημάτων αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες και πλεονεκτήματα τους, όπως μεγάλη αντοχή σε φορτία εφελκυσμού και χαμηλό ιδιοβάρος. Δηλαδή, αρχικά η ύφανση της μονάδας και ο προσδιορισμός του πλέγματος εκτελείται με την χρήση νημάτων γυαλιού, όπου συγκριτικά με τα νήματα άνθρακα έχουν χαμηλότερο κόστος αλλά λιγότερη αντοχή. Ως ακολούθως, το εργαλείο τελικής δράσης υφαίνει τα νήματα άνθρακα στις θέσεις που παρατηρείται μεγάλη ένταση και απαιτείται ενίσχυση της μονάδας (Zhang et al., 2012). Έτσι, η πλέξη των υλικών δημιουργεί τη μονάδα του πλέγματος, η οποία επικαλύπτεται με κολλητική ουσία ρητίνης (*Resin*) επιτρέποντας τη σκλήρυνση τους και τη μέγιστη στατική λειτουργία της μορφής. Έπειτα, οι μονάδες τοποθετούνται σε συσκευή ακτινών UV για τη σκλήρυνση τους και την επίτευξη επιθυμητής

θλιπτικής αντοχής στο σύνολο τους (Doerstelmann et al., 2015; Steinmann and Saelhoff, 2016). Μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι η επιβάρυνση των ρομποτικών βραχιόνων με το φορτίο του πλαισίου της μονάδας και των δυνάμεων που ασκούνται κατά τη διαδικασία πλέξης των νημάτων.



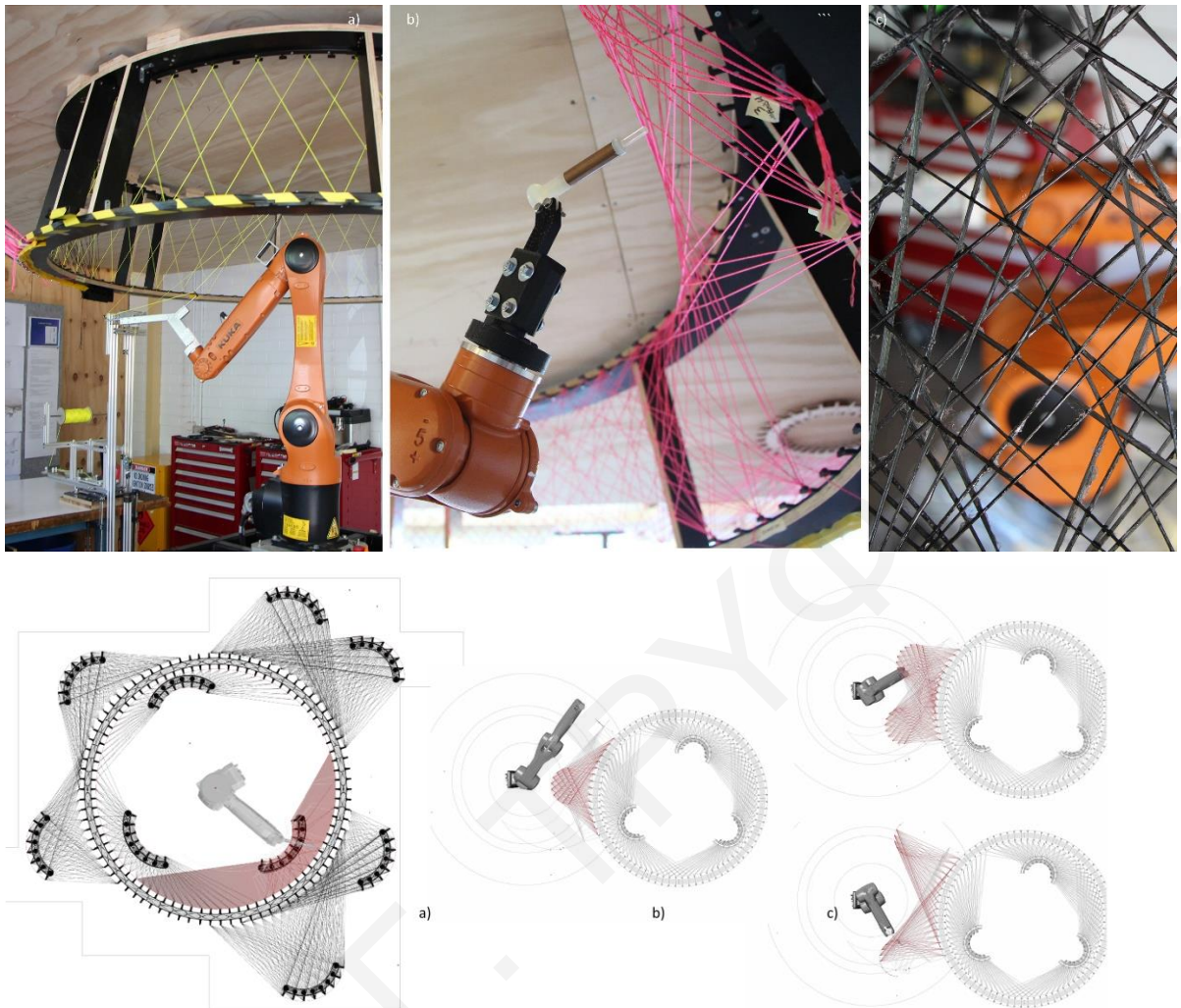
Εικόνα 2.8. Χώρος εργασίας του 12-αξονικού ρομποτικού συστήματος για τη δημιουργία των μονάδων (Prado et al., 2014).

Το παράδειγμα του *Elytra Filament Pavilion* στο *Victoria and Albert Museum*, όπως αναφέρεται και στο Κεφαλαίο 2.3.1, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται με παρόμοια λογική ύφανσης αλλά με διαφοροποίηση της διαδικασίας χειρισμού του εργαλείου τελικής δράσης. Σε αντίθεση με το πρώτο παράδειγμα, σε αυτή την περίπτωση ο ρομποτικός βραχίονας χειρίζεται την πορεία των νημάτων γυαλιού (*Glass fiber, GF*) και άνθρακα (*Carbon Fiber, CF*) χρησιμοποιώντας ένα απλό εργαλείο τελικής δράσης (Prado et al., 2017). Αυτό αποτελείται από μία προεξοχή τροφοδοσίας, τροχαλίες προσαρμογής ρητίνης και καρούλι τροφοδοσίας νημάτων. Το εργαλείο κινείται διαμέσου των αγκυρώσεων του σκελετού της μονάδας για την πλέξη των νημάτων και το σχηματισμό της επιθυμητής μορφής (Εικόνα 2.9). Η χρήση περιστρεφόμενου τραπέζιου επιτρέπει στο εργαλείο τελικής δράσης να κινείται σε όλα τα σημεία των αγκυρώσεων. Η μορφή που σχηματίζεται στο πλαίσιο από τα νήματα γυαλιού (*Glass fiber, GF*) και άνθρακα (*Carbon Fiber, CF*), επικαλύπτεται με ρητίνη (*Resin*) και ψήνεται για τη σκλήρυνση της. Τέλος, οι μονάδες συναρμολογούνται για τη δημιουργία του σκέπαστρου.



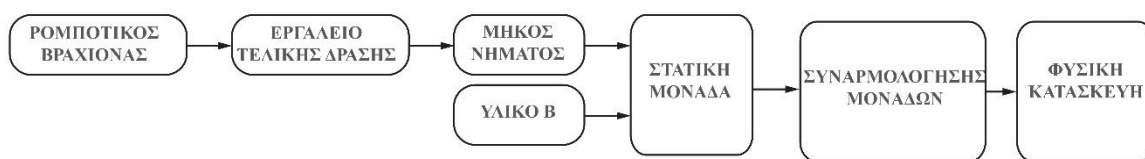
Εικόνα 2.9. Εργαλείο τελικής δράσης για ύφανση των νημάτων γυαλιού (*Glass fiber, GF*) και άνθρακα (*Carbon Fiber, CF*) διαμέσου των αγκυρώσεων (Prado et al., 2017).

Στην ίδια θεματική αναφέρεται και το παράδειγμα *Onsite robotic fabrication for flexible workspaces* (Reinhardt et al., 2018), στο οποίο δημιουργείται πλέγμα από νήματα άνθρακα (*carbon fibers, CP*), τα οποία υφαίνονται μεταξύ δύο πλαισίων αναρτημένων στην οροφή ενός εσωτερικού χώρου (Εικόνα 2.10). Στην προκειμένη περίπτωση, οι αρχικοί πειραματισμοί χρησιμοποιούν σκοινιά από μαλλί για να αξιολογήσουν τη διαδικασία και την αποτελεσματικότητα του εργαλείου τελικής δράσης να διατηρεί σταθερή ένταση κατά την διάρκεια της ύφανσης. Επίσης, για να βαθμονομήσουν τη θέση του ρομποτικού βραχίονα με τη βάση ύφανσης (Reinhardt et al., 2018). Το εργαλείο τελικής δράσης αποτελούμενο από μία μεταλλική διατομή φέρει στο άκρο του τροχαλίες που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση σταθερής έντασης στο νήμα κατά τη διαδικασία εναπόθεσης του. Το νήμα άνθρακα, αρχίζοντας από το καρούλι τροφοδοσίας, διαπερνά μία σειρά από τροχαλίες, για να φτάσει στην κορυφή του εργαλείου τελικής δράσης. Κατά τη διαδικασία πλέξης σε προκαθορισμένες τροχιές δημιουργείται αντίσταση και συνεχόμενη ένταση στο νήμα που προκαλεί το ξετύλιγμα του καρουλιού και την εναπόθεση του νήματος, το οποίο ταυτόχρονα καλύπτεται με ρητίνη. Η απλότητα του εργαλείου τελικής δράσης που είναι υπεύθυνη για το ξετύλιγμα του ανελαστικού νήματος από άνθρακα και η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα βοηθούν στην ύφανση της μονάδας. Μετά από διάστημα 4-9 ημερών η ρητίνη σκληραίνεται (*curing time*) (Reinhardt et al., 2018) και η κατασκευή αποκτά τη μέγιστη στατική επάρκεια της. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η δημιουργία των μονάδων στο χώρο τοποθέτησης τους δεν επιτρέπει το ψήσιμο τους, επιβραδύνοντας έτσι το χρόνο σκλήρυνσης και επίτευξης στατικότητας.



Εικόνα 2.10. Βαθμονόμηση ρομποτικού βραχίονα και δοκιμές εργαλείου τελικής δράσης (Reinhardt et al., 2018).

Σε αυτή την κατηγορία, η χρήση ρομπότ αλλά και αυτοσχέδιων εργαλείων τελικής δράσης, δημιουργούν το σύνολο των ρομποτικών μηχανισμών ύφανσης των νημάτων. Αν και ο χειρισμός των ανελαστικών νημάτων από ένα απλό εργαλείο τελικής δράσης σε συνδυασμό με την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα επιτυγχάνει ακρίβεια στην εφαρμογή του μήκους του νήματος στην προκατασκευασμένη βάση, η δημιουργία της μέγιστης απαιτούμενης στατικότητας απαιτεί την επικάλυψη με δευτερεύον υλικό και μετα-επεξεργασία για μείωση του χρόνου σκλήρυνσης. Η ολοκλήρωση του συνόλου της δομής αλλά και της στατικότητας της επιτυγχάνεται με κλασικές μεθόδους συναρμολόγησης (Εικόνα 2.11.). Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η δυνατότητα πειραματισμού όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών και την εναλλαγή των κλιμάκων, χρησιμοποιώντας τους ρομποτικούς μηχανισμούς ως μέσα μαζικής παραγωγής μονάδων.



Εικόνα 2.11. Διάγραμμα αναπαράστασης της μεθόδου ρομποτικής κατασκευής με την ενσωμάτωση εργαλείου τελικής δράσης για την παραγωγή μονάδων και συναρμολόγησή τους.

2.3.3 ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

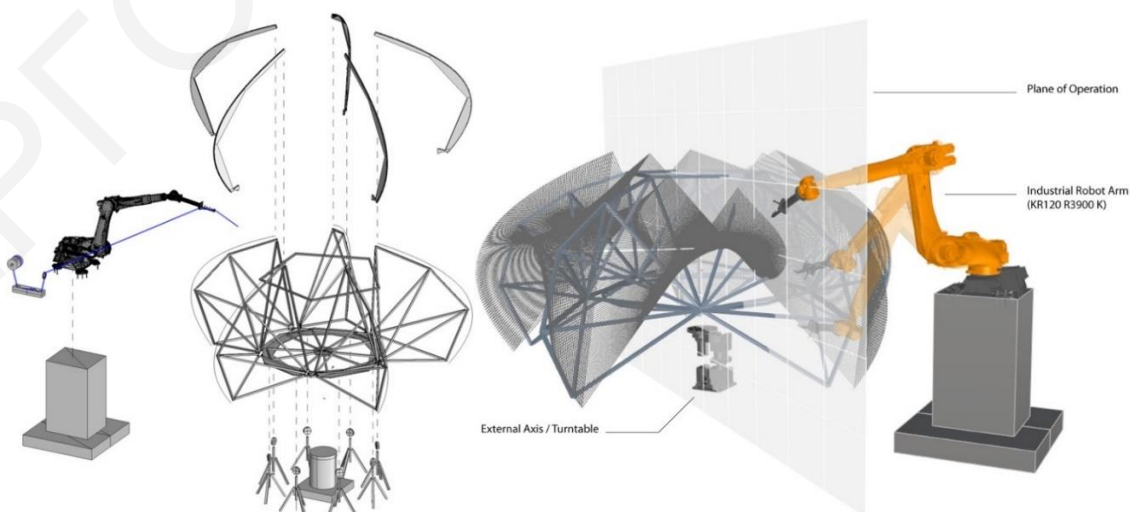
Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται σε μια ολιστική αυτοματοποιημένη κατασκευαστική διαδικασία (Howe, 2000). Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιδιώκει την εξ ολοκλήρου εφαρμογή του ρομποτικού βραχίονα ως βασικό μέσο κατασκευής του συνολικού αποτελέσματος και του παράλληλου χειρισμού του νήματος. Σε αυτή την περίπτωση η μορφή της κατασκευής επηρεάζεται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της ρομποτικής μηχανής. Συγκεκριμένα, ο χώρος εργασίας καθώς και οι άξονες κίνησης της ρομποτικής μηχανής συνυπολογίζονται από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Ο χώρος εργασίας επηρεάζει το μέγεθος της διάστασης σχεδιασμού και κατασκευής, καθορίζοντας τα όρια λειτουργίας του εργαλείου τελικής δράσης. Επιπρόσθετα, οι σχεδιαστικές παράμετροι συνυπολογίζονται και αλληλοεπηρεάζουν τις στατικές παραμέτρους, τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του εργαλείου τελικής δράσης. Επίσης, οι ιδιότητες του υλικού καθορίζουν την τεχνική χειρισμού τους και τον τρόπο ύφανσης της κατασκευής (Reinhardt et al., 2016).

Η πιο πάνω διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί σε ψηφιακό σχεδιαστικό επίπεδο μέσω διαδικασιών προσομοίωσης της κίνησης της ρομποτικής μηχανής σε συνδυασμό με προγράμματα ανάλυσης στατικής συμπεριφοράς του υλικού, τα οποία μπορούν να προβλέψουν απρόσμενες παραμορφώσεις του νήματος και μετατόπισης της κατασκευής. Σε φυσικό κατασκευαστικό επίπεδο ο ρομποτικός βραχίονας χειρίζεται το εργαλείο τελικής δράσης, το οποίο ρυθμίζει το μήκος του νήματος στις δευτερεύουσες στηρίξεις δημιουργώντας την ύφανση του νήματος και τη στατικότητα της κατασκευής (Εικόνα 2.12). Η δυνατότητα προσομοίωσης και η εφαρμογή του ρομποτικού βραχίονα ως κατασκευαστικό μέσο ολιστικής αντιμετώπισης της κατασκευαστικής διαδικασίας επιτρέπει τη συνολική αυτοματοποίηση της και την ανάπτυξη του συνόλου της δομής εντός του χώρου δημιουργίας της χωρίς την ανάγκη συναρμολόγησης με κλασικές μεθόδους. Μέσω αυτής της ολιστικής αντιμετώπισης μπορούν να υλοποιούνται σύνθετες και ευέλικτες μορφές με ακρίβεια στο χώρο τελικής θέσης τους.



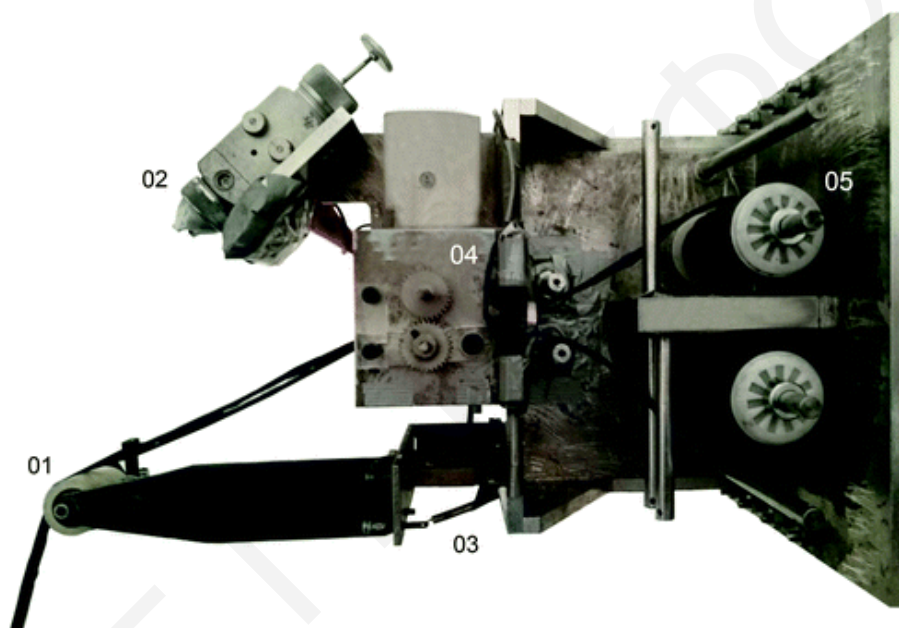
Εικόνα 2.12. Διάγραμμα αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας με χρήση ρομποτικού βραχίονα στο σύνολο της κατασκευής.

Παραδείγματα εφαρμογής μίας τέτοιας μεθοδολογίας είναι τα 'ICD/ITKE Research Pavilions' του 2012 (Reichert et al., 2014) και 2015 (Schieber et al., 2015) στο *University of Stuttgart*. Η επιλογή της χρήσης νημάτων γυαλιού (*Glass fiber, GF*) και άνθρακα (*Carbon Fiber, CF*) (Prado et al., 2017) επηρεάζει την τεχνική τοποθέτησής τους και στις δύο περιπτώσεις. Αναλυτικά, η περίπτωση του 'ICD/ITKE Research Pavilion' 2012, βασίζεται στις ίδιες αρχές χειρισμού του υλικού, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.3.2. Δηλαδή, ο ρομποτικός βραχίονας αναλαμβάνει την διαδικασία ύφανσης των δύσκαμπτων νημάτων με τη χρήση απλοποιημένου εργαλείου τελικής δράσης, το οποίο διατηρεί σταθερή την τάση στα νήματα. Αυτά εμποτίζονται με ρητίνη και με ένα σύστημα από τροχαλίες καταλήγουν στο άκρο του εργαλείου τελικής δράσης (Εικόνα 2.13). Έτσι, μέσω της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα που υποβοηθείται από εξωτερικό περιστρεφόμενο τραπέζι (*Turn table*), τοποθετείται το νήμα στις αγκύρωσης, δημιουργώντας το αναμενόμενο πλέγμα. Η σκλήρυνση της ρητίνης και η μετα-επεξεργασία της μονάδας επιτυγχάνει την παγίωση της προέντασης των νημάτων, δημιουργώντας την ακαμψία της κατασκευής.



Εικόνα 2.13. Χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και του περιστρεφόμενου τραπέζιού για την ύφανση των νημάτων γυαλιού και άνθρακα (Reichert et al., 2014).

Στο παράδειγμα 'ICD/ITKE Research Pavilion 2015' η μορφή και η κατασκευαστική προσέγγιση απαιτεί ένα πιο σύνθετο σχεδιασμό εργαλείου τελικής δράσης. Σε αυτή την περίπτωση τα νήματα άνθρακα (*carbon fiber, CP*) υφαίνονται και κολλιούνται πάνω σε μεμβράνη *PTFE* (Schieber et al., 2015). Μέσα από τη μείωση της έντασης που ασκείται στα νήματα, γίνεται σωστή τοποθέτησή τους στην επιφάνεια χωρίς αυτά να μετακινούνται. Έτσι ο μηχανισμός του εργαλείου τελικής δράσης αναλαμβάνει τον έλεγχο του μήκους του νήματος με κυκλικούς ενεργοποιητές από διάφορες τροχαλίες αλλά και την επικάλυψη του νήματος με ρητίνη (Εικόνα 2.14).



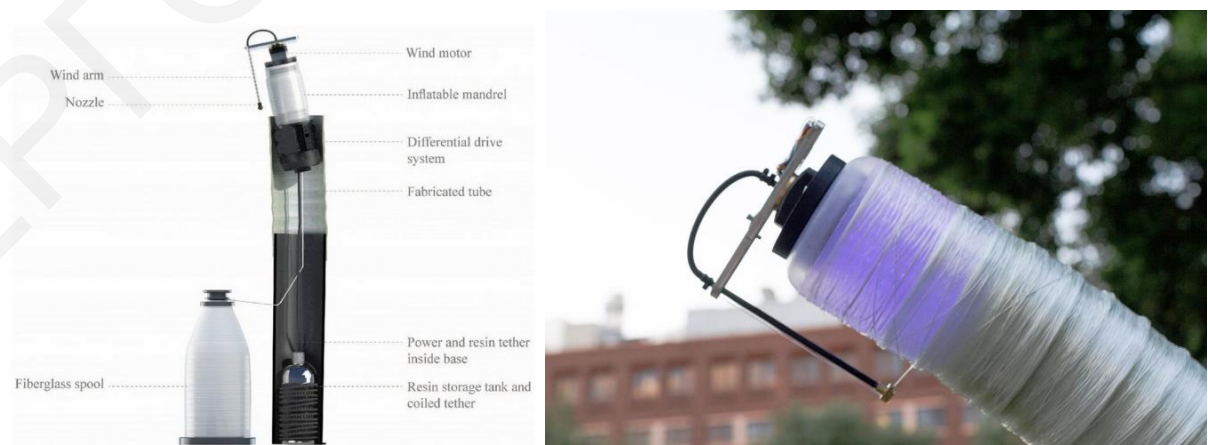
Εικόνα 2.14. Αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης για εφαρμογή των νημάτων άνθρακα στη μεμβράνη *ETFE* (Schieber et al., 2015).

Στην περίπτωση αυτή, ο προγραμματισμός του εργαλείου τελικής δράσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή διεκπεραίωση του φυσικού αποτελέσματος αφού προϋποθέτει πέρα από την τοποθέτηση του νήματος με σταθερή ένταση, το συγχρονισμό του με την πορεία κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και το συνεχόμενο έλεγχο της ποσότητας του μήκους του νήματος, επιτυγχάνοντας έτσι την κόλληση των νημάτων άνθρακα στην μεμβράνη *PTFE* και την κατασκευή της προσχεδιασμένης δομής (Εικόνα 2.15).



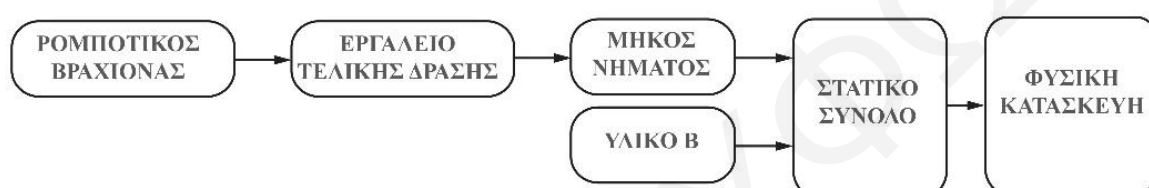
Εικόνα 2.15. Διάγραμμα συσχετισμού επιτρεπόμενου χώρου εργασίας ρομποτικού βραχίονα με την τελική μορφή (Vasey et al., 2015).

Στην ίδια θεματική, όπου γίνεται χρήση ανελαστικών υλικών σε διαδικασίες ύφανσης, αναφέρεται και το παράδειγμα *Fiberbots* (Kayser et al., 2019). Σε αυτή την περίπτωση οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται (Εικόνα 2.16) αποτελούνται από μικρές ρομποτικές μηχανές με δυνατότητες αναρρίχησης και περιμετρικής ύφανσης γύρω από τον εαυτό τους. Στο άκρο της ρομποτικής μηχανής τοποθετείται μικρή περιστρεφόμενη προέκταση που χειρίζεται το νήμα γυαλού (*Glass fiber, GF*) με αυτόματη προσαρμογή της ρητίνης στο ίδιο το νήμα κατά τη διάρκεια ύφανσης. Στην προκειμένη περίπτωση η βάση του ρομποτικού μηχανισμού καθορίζει το σημείο έναρξης της περιμετρικής ύφανσης για τη δημιουργία της προσχεδιασμένης μορφής. Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία των ρομποτικών μηχανών όπως και η τροφοδοσία με ρητίνη αποτελούν παράγοντες περιορισμού των διαστάσεων των κατασκευών που αναπτύσσονται.



Εικόνα 2.16. Ο μηχανισμός ύφανσης και προσαρμογής της ρητίνης για τη δημιουργία των κατασκευών από νήματα γυαλού (*Glass fiber, GF*) (Kayser et al., 2019).

Συμπερασματικά, η συνολική δομή είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής, στατικής βελτιστοποίησης και προσομοίωσης της κίνησης της ρομποτικής μηχανής. Η κίνηση της ρομποτικής μηχανής με την παράλληλη λειτουργία του μηχανισμού ελέγχου της σταθερής τάσης στα νήματα από άνθρακα και γυαλί για την τοποθέτησή τους, αλλά και την εφαρμογή της ρητίνης απαιτεί κάποιο χρόνο σκλήρυνσης του υλικού, κάτι το οποίο επιφέρει την παγίωση της μορφής και τη δημιουργία άκαμπτων κατασκευών (Εικόνα 2.17). Στην προκείμενη περίπτωση, ο μέγιστος χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα επηρεάζει την τελική μορφή της κατασκευής, προσδιορίζοντας το μέγεθός της.



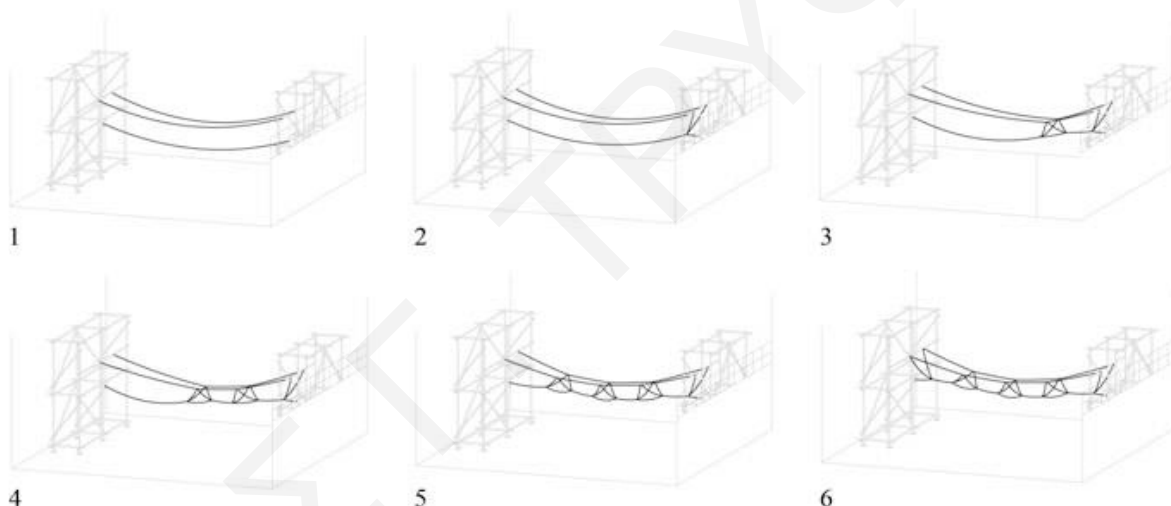
Εικόνα 2.17. Γενικό διάγραμμα διαδικασίας κατασκευής του συνόλου της μορφής με την εφαρμογή εργαλείου τελικής δράσης.

Σε αυτή την περίπτωση η αλληλένδετη σχέση μεταξύ συμπεριφοράς του υλικού και σχεδιαστικών αποφάσεων επηρεάζεται, αλλά παράλληλα περιορίζεται από τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της ρομποτικής μηχανής και του περιβάλλοντος εργασίας αντίστοιχα. Διαφοροποιήσεις μπορούν να βρεθούν σε σχέση με την εφαρμογή των ρομποτικών μηχανισμών για την παραγωγή μονάδων και συνόλου δομής. Στην πρώτη περίπτωση οι μονάδες τυγχάνουν συναρμολόγησης με συμβατικούς τρόπους και ως αποτέλεσμα ο ρομποτικός μηχανισμός δεν περιορίζει τις διαστάσεις της κατασκευής. Και στις δύο κατηγορίες η εναπόθεση του νήματος και ο έλεγχος της ανελαστικότητας του επιτυγχάνεται μέσω της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και των ιδιοτήτων του εργαλείου τελικής δράσης. Τα νήματα επικαλύπτονται με επιπρόσθετα υλικά (ρητίνη) για τη δημιουργία ακαμψίας και στατικότητας στο σύστημα μέσα από τη σκλήρυνση τους. Λαμβάνοντας υπόψη τις στατικές ιδιότητες των νημάτων σε προένταση και εφελκυστική τάση, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μεγάλων διαστάσεων ελαφριών κατασκευών. Έτσι, οι μορφές που προτείνονται θα μπορούσαν να έχουν καθαρά εφελκυστική συμπεριφορά με αποτέλεσμα να αποφεύγονται δευτερεύοντα υλικά για υποστήριξη της ευστάθειας τους.

Επιπρόσθετα, στη δεύτερη κατηγορία βασικό μειονέκτημα είναι το περιορισμένο εύρος κατασκευής δομών λόγω των ορίων στις δυνατότητες εργασίας της ρομποτικής μηχανής. Αυτό θα μπορούσε να υπερπηδηθεί μέσω του συγχρονισμού πολλών μηχανών, κάτι το οποίο

θα αύξανε το περιβάλλον εργασίας και κατ' επέκταση θα επέτρεπε την αυτοματοποίηση του συνόλου της διαδικασίας.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το *Institute for Dynamic Systems and Control and Gramazio Kohler Research* στην σχολή *ETH* στην Ζυρίχη, στο οποίο διερευνάται ο συγχρονισμός ιπτάμενων ρομποτικών μηχανών για την κατασκευή μιας γέφυρας από νήματα (Mirjan et al., 2013). Η διαδικασία σταδιακής προσομοίωσης της εφελκυστικής συμπεριφοράς των νημάτων και των κόμβων, σε συνδυασμό με την κατασκευαστική διαδικασία, επιτρέπει την εξέλιξη, βελτιστοποίηση και αξιολόγηση της κατασκευής. Οι ρομποτικές μηχανές αναλαμβάνουν την πρόσθεση των νημάτων, συνδέοντας τα υφιστάμενα πρωτεύοντα νήματα με νέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της κατασκευής και την ενεργοποίηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς της (Mirjan et al., 2013) (Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18. Διαδικασία σταδιακής προσομοίωσης πλέγματος των νημάτων από τις ρομποτικές μηχανές (Mirjan et al., 2016).

Συμπερασματικά, ο συγχρονισμός των ρομποτικών μηχανών και η παράλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς τους σε σχέση με την ψηφιακή μορφή επιτρέπει την αυτοματοποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας σε μεγαλύτερες κλίμακες. Οι ρομποτικές μηχανές αντιπροσωπεύουν το μέσο ύφανσης των νημάτων και ο προγραμματισμός σε παραμετρικά προγράμματα ορίζει το ρυθμό κίνησης τους. Επίσης, τα νήματα συνδέονται με κόμβους, με στόχο την επίτευξη επαρκούς στατικής συμπεριφοράς και δημιουργίας της φυσικής δομής.

2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εξέλιξη των προγραμμάτων σχεδιασμού και ανάλυσης της συμπεριφοράς του υλικού επιτυγχάνεται ο ψηφιακός σχεδιασμός και η κατασκευαστική βελτιστοποίηση σύνθετων και ευέλικτων μορφών. Η χρήση ρομποτικού βραχίονα από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού ενθαρρύνει τον πειραματισμό με νήματα τόσο σε ψηφιακό όσο και σε φυσικό περιβάλλον. Επίσης, η εξέλιξη εργαλείων τελικής δράσης για το χειρισμό των υλικών δημιουργούν νέες τεχνικές έλεγχου ή συνδυασμού τους. Αυτές εντάσσονται και επηρεάζουν τη διερεύνηση από τα αρχικά στάδια της, μέσω των δυνατοτήτων παραμετρικού σχεδιασμού και προσομοίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η ανάλυση παραδειγμάτων όπου γίνεται χρήση ρομποτικών μηχανών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατός ο χειρισμός ανελαστικών νημάτων με ακρίβεια, όταν αυτός συνοδεύεται από την εισαγωγή και διερεύνηση αυτοσχεδίων μηχανισμών, δημιουργώντας νέα εργαλεία τελικής δράσης τα οποία έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν το μήκος και την τοποθέτηση του υλικού. Στα παραδείγματα των (Kayser et al., 2019; Prado et al., 2014; Reinhardt et al., 2018) η άσκηση ελάχιστης σταθερής τάσης για να αποφεύγεται η χαλάρωση των νημάτων γίνεται με απλά εργαλεία τελικής δράσης που αποτελούνται από τροχαλίες και εξωτερικούς μηχανισμούς διοχέτευσης δευτερευόντων υλικών ρητίνης. Η πρόσθεση της ρητίνης είναι αναγκαίο υλικό και απαιτείται για την επίτευξη στατικότητας στις μορφές, μια διαδικασία που τις περισσότερες φορές αποσκοπεί στη μεταφορά φορτίων υπό θλίψη. Πιο συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα μπορεί να έχει την αναμενόμενη στατική συμπεριφορά μέσα από τη χρήση σύνθετων υλικών και διαδικασιών σκλήρυνσης, οι οποίες μερικές φορές γίνονται μέσω ψησίματος των μονάδων (Prado et al., 2014). Αυτό ενδεχομένως να περιορίζει τη διάσταση της μορφής, αλλά και να έρχεται σε αντίθεση με το βασικό πλεονέκτημα των νημάτων, που είναι η δυνατότητα τους να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων μορφών σε μεγάλες διαστάσεις.

Οι μορφές που προτείνονται απαιτούν σύνθεση υλικών με αντοχές σε θλίψη και ανελαστικότητα. Επίσης, στην περίπτωση δημιουργίας εφελκυστικών δομών με ίδια υλικά, αυτό θα απαιτούσε την άσκηση τεράστιων δυνάμεων για τη δημιουργία παραμόρφωσης και κατ' επέκταση τη στατική επάρκεια των μορφών. Αντιθέτως, η χρήση ελαστικών νημάτων προσφέρει τη δυνατότητα ευέλικτης δημιουργίας εφελκυστικών πλεγμάτων σε πολλαπλές διαστάσεις, όπου η ελαστικότητα τους θα μπορούσε να ελέγχεται από εργαλείο τελικής δράσης. Πλεονέκτημα χρήσης ελαστικών υλικών είναι η ευκολία στον έλεγχο του μήκους

τους για τη δημιουργία της απαιτούμενης παραμόρφωσης χωρίς την ανάπτυξη τεράστιων δυνάμεων στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα. Τέτοια ελαστικά υλικά, μπορούν να έχουν ιδιότητες στατικής συμπεριφοράς παρόμοιες με αυτών που εμφανίζονται στις μεμβράνες. Έτσι, ο σχεδιασμός δομών που τα αποτελούν μπορεί να βασίζεται καθαρά στο σχεδιασμό ελαφριών εφελκόμενων κατασκευών (Κεφάλαιο 3).

Όπως παρουσιάζεται στα παραδείγματα χρήσης ρομποτικού βραχίονα από τους (Mirjan et al., 2016), η τοποθέτηση του νήματος εξαρτάται άμεσα από την κίνηση της ρομποτικής μηχανής, η οποία μεταβάλλει και τοποθετεί τα νήματα για τη δημιουργία ελαφριών εφελκόμενων δομών σε πολλαπλές διαστάσεις. Για την επίτευξη αυτού του κατασκευαστικού αποτελέσματος, παρατηρείται ότι απαιτείται ο συγχρονισμός τριών βασικών διαδικασιών:

1. Κίνηση της ρομποτικής μηχανής,
2. Έλεγχος του μήκους του νήματος από το εργαλείο τελικής δράσης,
3. Παράλληλη προσομοίωση της ψηφιακής κατασκευής και της συμπεριφοράς του υλικού αλλά και της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα.

Η ανάπτυξη μιας ενοποιημένης διαδικασίας διερεύνησης σε ψηφιακό περιβάλλον και η εισαγωγή εργαλείων προσομοίωσης της συμπεριφοράς τέτοιων υλικών, μεθόδων εξεύρεσης μορφής, στατικής ανάλυσης και τέλος καθορισμού της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα θα μπορούσαν να συνεισφέρουν προς την επίτευξη των πιο πάνω στόχων. Επίσης, σε μια τέτοια διαδικασία σημαντική είναι η ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πολλαπλών σχεδιαστικών παραμέτρων και κατασκευαστικών περιορισμών.

Με την εξέλιξη των προγραμμάτων παραμετρικού σχεδιασμού για τον έλεγχο και την προσομοίωση ρομποτικών μηχανών, προσφέρεται η δυνατότητα διερεύνησης νέων αυτοματοποιημένων κατασκευαστικών διαδικασιών (Kontonourkis and Tryfonos, 2014) αλλά και η παράλληλη δημιουργία και ανάλυση ελαφριών εφελκόμενων κατασκευών στο ίδιο περιβάλλον εργασίας. Η πολυπλοκότητα ελέγχου των παραμέτρων απαιτεί τη χρήση Γενετικών Αλγόριθμων, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο_3, μαζί με την ενσωμάτωση κριτηρίων συμπεριφοράς και σχεδιασμού των ελαστικών υλικών.

3.0_ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

3.1_ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο εξετάζει διαδικασίες διερεύνησης εφελκυσόμενων ελαστικών πλεγμάτων. Μέσα από κανόνες στατικής συμπεριφοράς αναζητούνται μέθοδοι εξεύρεσης μορφών που επιτρέπουν την άμεση ανίχνευση της παραμόρφωσης τους σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες διαδικασίες αναλύονται τόσο με τη χρήση φυσικών μοντέλων όσο και με τη χρήση ψηφιακών μέσων προσομοίωσης που συσχετίζονται άμεσα με προγράμματα στατικής βελτιστοποίησης και υπολογισμού της προέντασης, καθώς και αποφόρτισης τους. Επιπρόσθετα, μέσα από την εισαγωγή διαδικασιών βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων (G.A) αναζητούνται ψηφιακές τεχνικές για τη διερεύνηση μορφών σε σχεδιαστικό επίπεδο μέσα από τον έλεγχο ενός πλήθους από σχεδιαστικές παραμέτρους και κατασκευαστικούς περιορισμούς.

3.2_ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Τα εφελκυσόμενα δομικά πλέγματα χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους και βασίζονται στη σχέση υλικού, γεωμετρίας και στατικών δυνάμεων. Σε μεγάλο βαθμό ο σχεδιασμός τέτοιων ελαφριών κατασκευών βασίζεται στους νόμους της φυσικής. Συνεπώς, μέρος της σχεδιαστικής διερεύνησης είναι και ο τρόπος που κατανέμονται οι δυνάμεις αλλά και η συμπεριφορά της μορφής σε δυναμικές φορτίσεις (Beccarelli, 2015; Phocas, 2013).

Με τη μείωση των καμπτικών καταπονήσεων και των παραμορφώσεων, επιτυγχάνεται η χρήση λιγότερου υλικού με αποτέλεσμα ένα πιο οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμο σχεδιασμό (Paech, 2016). Ωστόσο, ο σχεδιασμός εφελκυσόμενων κατασκευών απαιτεί τη χρήση διαδικασιών εξεύρεσης μορφής (*form-finding*) (Barnes, 1988) ή κατασκευαστικής βελτιστοποίησης (*structural optimization*) (Bendsoe, 1995). Σε αντίθεση με άλλους τρόπους σχεδιασμού ελεύθερων μορφών στην αρχιτεκτονική, όπου η μορφή είναι αποτέλεσμα μαθηματικών, ή άλλων αισθητικά καθοδηγούμενων σχεδιαστικών προσεγγίσεων με τη χρήση τρισδιάστατων προγραμμάτων σχεδιασμού, η διαδικασία εξεύρεσης μορφής προσδιορίζεται από μια αρχική (Barnes, 1988; Bletzinger and Ramm, 2001) και μια τελική δομή ως αποτέλεσμα της διαδικασίας. Έτσι, ο καθορισμός των παραμέτρων τυπολογίας και των φορτίων που ασκούνται στη μορφή επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Η διαδικασία εξεύρεσης μορφής (*Form – Finding*) χρησιμοποιείται παράλληλα με την εξακρίβωση της στατικής συμπεριφοράς του συστήματος, στο οποίο ασκούνται φορτίσεις, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία σύνθετων δομών. Για την αποτελεσματική στατική λειτουργία της μορφής απαιτείται μεγάλη κατασκευαστική ακρίβεια. Μια τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με τη χρήση φυσικών μοντέλων, ψηφιακών διαδικασιών προσομοίωσης, ή και συνδυασμό των δύο (Symeonidou, 2016). Στις μέρες μας, λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, η χρήση των ψηφιακών μέσων τυγχάνει ευρείας εφαρμογής αφού προσφέρει περισσότερη ευελιξία, καλύτερο έλεγχο και ακρίβεια στο σχεδιασμό των μορφών.

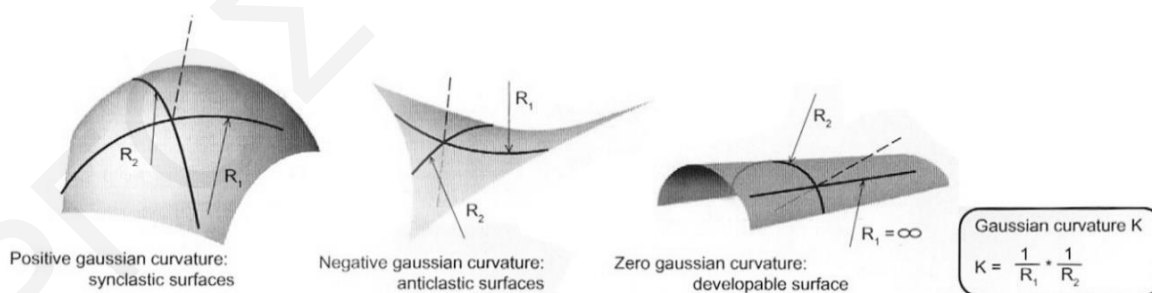
Τα δομικά πλέγματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα εφελκόμενα και τα θλιβόμενα. Οι εφελκόμενες κατασκευές αναφέρονται σε μεμβράνες ή πλέγματα καλωδίων και οι θλιβόμενες κατασκευές σε κελύφη ή πλέγματα – κελύφη (Linkwitz, 1999). Παρόλο που η διαδικασία εξεύρεσης μορφής ακολουθεί και στις δύο περιπτώσεις παρόμοια λογική, εντούτοις η μεθοδολογία στατικής ανάλυσης που ακολουθείται σε κάθε περίπτωση διαφέρει.

Οι εφελκόμενες κατασκευές διαμορφώνονται με στόχο να φέρουν μόνο αξονικές δυνάμεις. Παραδείγματα τέτοιων δομών είναι τα δίκτυα από νήματα που σχηματίζουν συνεχόμενες πορώδεις επιφάνειες και μεταφέρουν τις αξονικές δυνάμεις μέσα από τις διατομές τους, αναπτύσσοντας αξονικές εφελκυστικές τάσεις. Οι μεμβράνες έχουν την ίδια μορφή και στατική λειτουργία και συνήθως κατασκευάζονται από ένα σύνολο συνεχόμενων επιφανειών που μεταφέρουν εφελκυστικές δυνάμεις μέσα από το υλικό και τον τρόπο ραφής τους (Bletzinger et al., 2005). Τις πλείστες φορές, για την κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων, χρησιμοποιούνται μεμβράνες σε συνδυασμό με πλέγματα καλωδίων. Ένα παράδειγμα εφελκόμενης κατασκευής είναι το ‘*Olympic stadium Munich*’ (Allen et al., 2010; Phocas, 2013), όπου παρουσιάζεται ένα υβριδικό σύστημα από μεμβράνες και καλώδια. Οι εφελκόμενες κατασκευές χαρακτηρίζονται ως αποτελεσματικές αφού έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις με λιγότερο υλικό.

Τα κατασκευαστικά συστήματα από μεμβράνες και δίκτυα θεωρούνται εξαιρετικά ελαφριά και με τη σωστή γεωμετρία και προένταση μπορούν να λάβουν μεγάλες εξωτερικές δυνάμεις. Επιπρόσθετα, λόγω του χαμηλού ιδιοβάρους τους, τις περισσότερες φορές αυτό δεν λαμβάνεται ως βασική παράμετρος στον σχεδιασμό τους. Σε αντίθεση με άλλες κατασκευές όπως μεταλλικές και από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα δομικά πλέγματα από

μεμβράνες έχουν μεγαλύτερο βαθμό αστοχίας σε φορτία ανέμου, τα οποία ενδεχομένως να προκαλέσουν ανασήκωμα της κατασκευής (Stranghöner and Uhlemann, 2016; Van Craenenbroeck, 2015). Ένα μεγάλο πλεονέκτημα τους σε σχέση με άλλες κατασκευές είναι η συμπεριφορά τους σε σεισμικά φορτία. Κατά την κίνηση του εδάφους, η μικρή ιδιομάζα τους προκαλεί μικρή δύναμη αδράνειας. Παράλληλα, λόγω της ευελιξίας τους και επειδή ο σχηματισμός της γεωμετρίας συμβαίνει με τη δημιουργία προέντασης στο σύστημα, μπορούν να έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν μεγάλες παραμορφώσεις κατά την διάρκεια σεισμικών δραστηριοτήτων (Lewis, 2003).

Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, υλικά όπως καλώδια, νήματα και μεμβράνες μπορούν να μεταφέρουν αξονικές δυνάμεις, δηλαδή τα νήματα και οι μεμβράνες δεν έχουν αντίσταση σε καμπτικά φορτία, όπου παρατηρούνται ανεπιθύμητες παραμορφώσεις και χαλάρωση. Για να αντιστέκονται σε τέτοια φορτία απαιτείται να ασκείται δύναμη προέντασης (Barnes, 1988; Lewis, 2003). Η μορφή της κατασκευής πρέπει πάντοτε να βρίσκεται σε ισορροπία μεταξύ της παραμόρφωσης που αναπτύσσεται από τις προεντάσεις και τα εξωτερικά φορτία. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ισορροπία απαιτείται η δημιουργία μηχανικής προέντασης, δηλαδή άσκηση παράλληλης εξωτερικής δύναμης που προκαλεί επιπλέον εφελκυσμό στα καλώδια, στα νήματα ή στις μεμβράνες. Τα μηχανικά προεντεταμένα δομικά πλέγματα βασίζονται στην λεγόμενη αντικλαστική (*anticlastic*) καμπυλότητα, ή αρνητική *Gaussian* καμπυλότητα (Bletzinger et al., 2005) (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1. Κατηγορίες *Gaussian* καμπυλότητας (Bechthold, 2008).

Περίληπτικά, η καμπυλότητα της επιφάνειας μετριέται ως η σημειακή καμπυλότητα σε οποιοδήποτε σημείο (P) πάνω στην επιφάνεια. Πάνω σε μια επιφάνεια μπορεί να εμπεριέχονται άπειρα σημεία (P) και κατ' επέκταση άπειρες κάθετες γραμμές πάνω στην επιφάνεια που διαπερνούν το σημείο (P). Υποθέτοντας ότι η επιφάνεια έχει σύνθετη γεωμετρία, η ακτίνα (R) στο σημείο (P) έχει πολλαπλά αποτελέσματα. Η τιμή της ακτίνας (R) μεταβάλλεται καθώς το επίπεδο περιστρέφεται γύρω από την κάθετη γραμμή στο σημείο

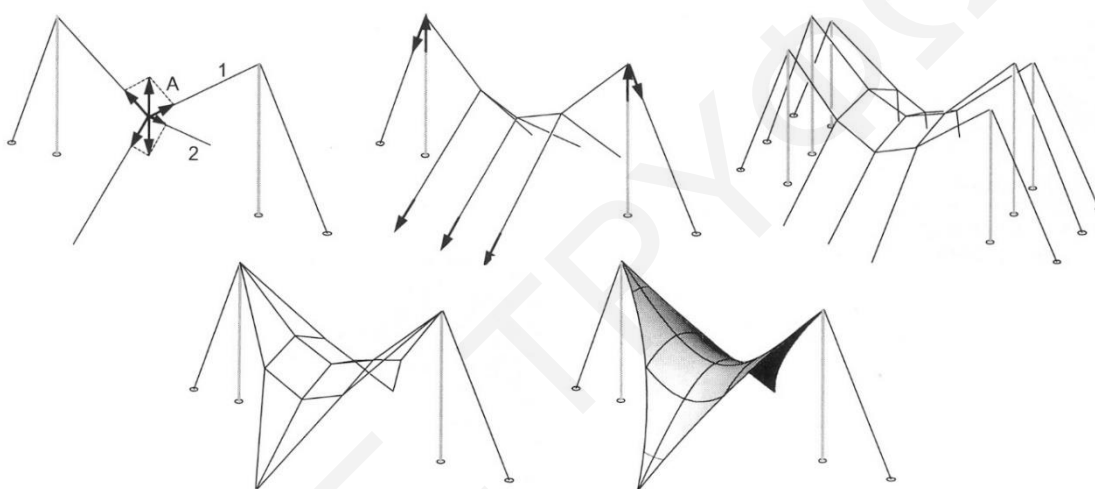
(P). Οι προκύπτουσες τεμνόμενες γραμμές παραγωγής ονομάζονται καμπύλες του κύριου τμήματος και η σχετική καμπυλότητα (K) ονομάζεται η κύρια καμπυλότητα στο σημείο (P). Η καμπυλότητα (K) ισούται με το $1/R$ ακτίνα (R). Η μέση τιμή όλων των καμπυλοτήτων (K) στο σημείο (P) ονομάζεται μέση καμπυλότητα. Το αποτέλεσμα των δύο κυρίων καμπυλοτήτων (K1) και (K2) ονομάζεται *Gaussian* καμπυλότητα. Το όνομά *Gaussian* καμπυλότητα δόθηκε από τον μαθηματικό *Karl Friedrich Gauss* (Dunnington et al., 2004), ο οποίος δημοσίευσε τη θεωρία της επιφάνειας της καμπυλότητας το 1827. Όταν η τιμή *Gaussian* καμπυλότητας είναι θετική ονομάζεται ομοκλαστική (*synclastic*) επιφάνεια, δηλαδή με δύο καμπύλες προς την ίδια κατεύθυνση. Αντιθέτως, αντικλαστική (*anticlastic*) καμπυλότητα ονομάζεται η καμπυλότητα με αρνητική τιμή και σε αυτή την περίπτωση οι δύο καμπύλες είναι προσανατολισμένες σε αντίθετη κατεύθυνση (Bechthold, 2008; Zarfam et al., 2014).

Τις περισσότερες φορές τα δομικά πλέγματα με αντικλαστική (*anticlastic*) γεωμετρία διακρίνονται σε δύο βασικές σειρές καμπυλοτήτων που τέμνονται μεταξύ τους. Η πρώτη ομάδα είναι πάντοτε παράλληλη με τις βασικές στηρίξεις και η δεύτερη ομάδα τέμνει τις πρωτεύουσες δημιουργώντας τη συνολική καμπυλότητα. Τα δύο ζεύγη παραμορφώνουν και προκαλούν προένταση στα καλώδια ή στα νήματα αυξάνοντας έτσι την εφελκυστική ένταση και δημιουργώντας την αντικλαστική (*anticlastic*) γεωμετρία (Bridgens and Birchall, 2012). Σε μια αντικλαστική (*anticlastic*) γεωμετρία, νοουμένου ότι και τα δύο ζεύγη σειρών συμμετέχουν, οι δυνάμεις βαρύτητας μεταφέρονται διαμέσου των βασικών στηρίξεων κατά μήκος των παράλληλων νημάτων ή καλωδίων, ενώ οι δυνάμεις άνωσης μεταφέρονται διαμέσου των παράλληλων τεμνόμενων νημάτων ή καλωδίων. Τα εξωτερικά φορτία, και στις δύο περιπτώσεις, προκαλούν μετατόπιση των κόμβων στα τεμνόμενα σημεία, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση της ισορροπίας της αξονικής μηχανικής προέντασης. Για την αποφυγή χαλάρωσης των νημάτων ή καλωδίων, η τιμή της μηχανικής προέντασης πρέπει να είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την τιμή των εξωτερικών δυνάμεων. Για τον λόγο αυτό η τιμή της μηχανικής προέντασης καθορίζεται με βάση τα εξωτερικά φορτία και την αντοχή του υλικού σε παραμόρφωση (Allen et al., 2010).

Έτσι, υπάρχει αλληλένδετη σχέση μεταξύ καμπυλότητας, προέντασης και εξωτερικών δυνάμεων, οι οποίες σύμφωνα με τους νόμους του *Newton* πρέπει να βρίσκονται πάντοτε σε ισορροπία (Bridgens and Birchall, 2012). Για παράδειγμα, η έλλειψη καμπυλότητας σε ένα σύστημα σε ισορροπία απαιτεί περισσότερη προένταση ή όταν εξωτερικά φορτία

παραμορφώνουν και αυξάνουν την καμπυλότητα ενός αντικλαστικού (*anticlastic*) συστήματος, αυτό αυξάνει παράλληλα και την ένταση του συστήματος (Lewis, 2003).

Ένα περιπτωσιολογικό παράδειγμα της σταδιακής συμπεριφοράς και παραμόρφωσης καλωδίων αναφέρεται στο βιβλίο *'Innovative Surface Structures_Technologies and Applications'* (Bechthold, 2008) (Εικόνα 3.2), όπου παρουσιάζεται μια διαδικασία πρόσθεσης καλωδίων σε δύο πασσάλους και σε δύο διευθύνσεις αγκυρώσεων που συσχετίζονται με τη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής και με την προσθετική διαδικασία μηχανικής φόρτισης ενός δομικού πλέγματος.



Εικόνα 3.2. Παράδειγμα δυναμικής συμπεριφοράς και παραμόρφωσης καλωδίων (Bechthold, 2008).

3.2.1_ ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΕΥΡΕΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

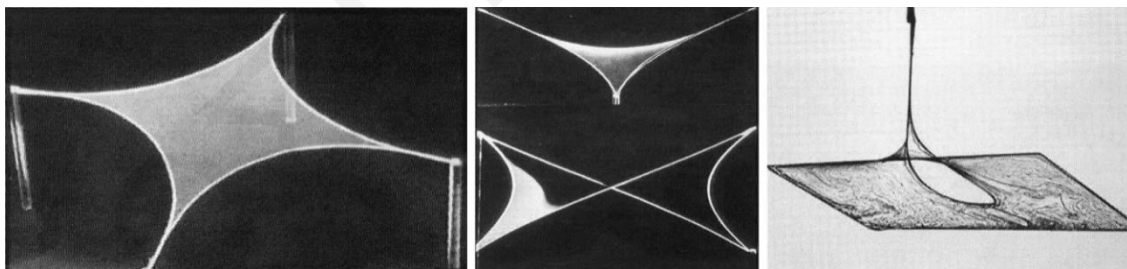
Ο στόχος της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής σε ένα δομικό πλέγμα είναι να προσδιοριστεί η γεωμετρία του συστήματος κατά την προένταση με δεδομένες τις συνθήκες στήριξης για αποφυγή χαλαρώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας φυσικής διαδικασίας όπου οι κόμβοι της αρχικής γεωμετρίας βρίσκουν τη θέση ισορροπίας τους, δημιουργώντας παραμόρφωση και προένταση στο σύστημα. Η εξεύρεση της κατάστασης ισορροπίας μιας γεωμετρίας σε εφελκυσμό είναι ένα από τα βασικά βήματα στο σχεδιασμό και επιτυγχάνεται μόνο μέσα από την διαδικασία εξεύρεσης μορφής (*Form-Finding*) (Descamps, 2014; Goldsmith, 2014). Στην περίπτωση αυτή, βασικοί παράμετροι είναι η θέση των ορίων και η αρχική παραμόρφωση που ασκείται στο σύστημα, οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό της τελικής μορφής σε προένταση.

Μια βασική κατηγορία διαδικασίας εξεύρεσης μορφής είναι μέσω της ανάπτυξης φυσικών μοντέλων μικρής διάστασης. Τέτοια μοντέλα συνήθως χρησιμοποιούνται στην

αρχή της σχεδιαστικής διαδικασίας και σκοπός τους είναι ο κατά προσέγγιση προσδιορισμός της τρισδιάστατης μορφής του στατικού συστήματος. Τα φυσικά μοντέλα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη μεθοδολογία παραγωγής τους (Argyris et al., 1974).

1. Υγρά φιλμ σαπουνιού (*Soap Films*),
2. Ελαστικά υφάσματα (*Stretch Fabric*).

Τα μοντέλα που προκύπτουν από υγρά φιλμ σαπουνιού (*Soap Films*) (Otto, 1988) είναι συστήματα ελάχιστης ενέργειας και εμβαδού που προκύπτουν μεταξύ οποιουδήποτε συνόλου κλειστών πλευρών. Η ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων μπορεί να σχηματίζεται μεταξύ γραμμικών ή καμπύλων άκρων και νημάτων. Τα πειράματα του *Frei Otto* στο *'Institute of Lightweight Structures'* στο *University of Stuttgart* με υγρά φιλμ σαπουνιού (*Soap Films*) (Otto, 1988), διερευνούν την τάση του υλικού στην παραγωγή εξισορροπημένης κατανομής των δυνάμεων στην επιφάνεια με το ελάχιστο εμβαδό, δημιουργώντας μοναδικές μορφές. Το αποτέλεσμα κάθε μορφής εξαρτάται από σταθερές παραμέτρους όπως την απόσταση και τη μορφή των άκρων (Εικόνα 3.3). Επειδή το υλικό που χρησιμοποιείται είναι εύθραυστο, τα μοντέλα που δημιουργούνται έχουν μικρή διάρκεια ζωής και αυτό έχει ως επακόλουθο περιορισμούς στην ανάπτυξη τους ως φυσικά πρωτότυπα (Werkbund and Villa, 2001).

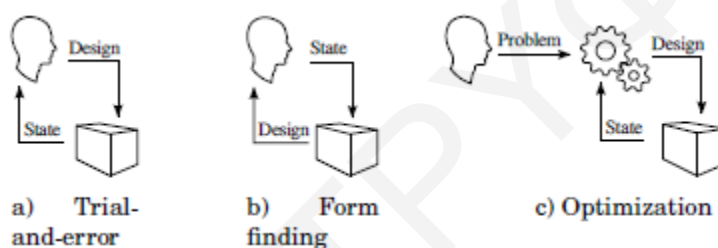


Εικόνα 3.3. Αποτελέσματα πειραμάτων με μοντέλα από υγρά φιλμ σαπουνιού (Bechthold, 2008).

Αντίθετα, τα μοντέλα που σχηματίζονται με ελαστικά υφάσματα (*Stretch Fabrics*) (Otto, 1984), παρόλο που ακολουθούν παρόμοια λογική, έχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης τους σε μεγαλύτερο μέγεθος και με μεγαλύτερο βαθμό παραμόρφωσης. Επίσης, ο τρόπος ύφανσης τους θα μπορούσε να προσδιορίσει και τον τρόπο που αυτά μεταφράζονται ως καλώδια και νήματα, επηρεάζοντας έτσι τον τρόπο συμπεριφοράς της συνολικής μορφής (Ishii, 1999; Linhard et al., 2008; Otto et al., 1967).

Οι διαδικασίες εξεύρεσης μορφής (*Form – Finding*) των δομικών πλεγμάτων με φυσικούς τρόπους, παραδοσιακά, βασίζονται στην διαδικασία δοκιμής και λάθους (*trial and error*), στην εμπειρική γνώση και στις σχεδιαστικές παραμέτρους των φυσικών μοντέλων

(Bach et al., 1988). Επίσης για το βέλτιστο γεωμετρικό αποτέλεσμα μιας αρχικής ιδέας, αυτή σχεδιάζεται, δοκιμάζεται και επαληθεύεται (*trial and error*) σε μια σειρά από δοκιμές και κατασκευαστικές αναλύσεις. Ωστόσο, κάθε δοκιμή βελτιστοποίησης προϋποθέτει τη δημιουργία και την ανάλυση της γεωμετρίας από την αρχή, κάτι το οποίο είναι χρονοβόρο και μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες όσον αφορά την αναπαράσταση της. Επιπρόσθετα, οι γνώσεις και οι ικανότητες του σχεδιαστή, τις περισσότερες φορές αδυνατούν να προβλέψουν όλες τις συμπεριφορές και τυχόν παραμορφώσεις των συστημάτων (Εικόνα 3.4). Γι' αυτό και στις μέρες μας η διαδικασία δοκιμής και λάθους (*trial and error*) για εξεύρεση της μορφής έχει μεταφερθεί στο ψηφιακό περιβάλλον, όπου συνδυάζεται με την παράλληλη ανάλυση των δυνάμεων και τη βελτιστοποίηση (Descamps, 2014).



Εικόνα 3.4. Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής (Descamps, 2014).

3.2.2_ ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΕΥΡΕΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ψηφιακή διαδικασία εξεύρεσης μορφής είναι παρόμοια με τη φυσική διαδικασία αλλά με επιπρόσθετα πλεονεκτήματα την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού και της γεωμετρίας του συνόλου της δομής, επιτρέποντας τη διερεύνηση πολλών εναλλακτικών λύσεων σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Βασικός σκοπός της ψηφιακής διαδικασίας είναι η εξακρίβωση της γεωμετρίας σε κατάσταση ισορροπίας. Λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως τα όρια μιας γεωμετρίας και τα εξωτερικά φορτία, ο σχεδιαστής καθορίζει τις εσωτερικές δυνάμεις, τα χαρακτηριστικά του υλικού και την αρχική γεωμετρία της μορφής με στόχο την εξισορρόπηση της (Barnes, 1988). Γενικά, μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής είναι δυνατή η παραγωγή αποτελεσμάτων, τα οποία φαίνονται πειστικά όσον αφορά την γεωμετρία τους αλλά ενδεχομένως να έχουν σοβαρές ελλείψεις εξαιτίας λανθασμένης χρήσης παραμέτρων, καμπυλότητας, ή στατικής ανεπάρκειας. Με τη χρήση ψηφιακών μεθόδων απαιτείται, πέρα από την κατανόηση της γεωμετρίας σε ισορροπία, και καλή μαθηματική γνώση των αλγόριθμων ελέγχου καθώς και των μεθόδων εφαρμογής τους.

Τέτοιες ψηφιακές διαδικασίες αρχίζουν να αναπτύσσονται από τη δεκαετία του '60 και διακρίνονται σε δυο βασικές μαθηματικές μεθόδους:

- Μέθοδος Δύναμης-Πυκνότητας (*Force-Density*)(Schek, 1974),
- Μέθοδος Δυναμικής χαλάρωσης (*Dynamic relaxation*) (Day, 1966).

Η μέθοδος της Δύναμης-Πυκνότητας (*Force-Density*) (Schek, 1974) χρησιμοποιείται για την εξεύρεση της ισορροπίας προεντεταμένων εφελκόμενων κατασκευών που αποτελούνται από κόμβους συνδεδεμένους με γραμμικά στοιχεία. Τα γραμμικά στοιχεία αποκτούν παραμέτρους ακαμψίας και πλάτους που είναι ίσες με την απόσταση των μεταξύ τους στοιχείων. Στην αρχή της διαδικασίας, θεωρείται πως το σύστημα δεν παραμορφώνεται λόγω του νεκρού φορτίου ή του ιδιοφορτίου. Επίσης, ορίζονται τα όρια, οι στηρίξεις και οι δυνάμεις προέντασης (Linkwitz, 1999). Για την εξεύρεση της εξίσωσης ισορροπίας, το μέγεθος της δύναμης-πυκνότητας εισάγεται στο σύστημα. Η δύναμη-πυκνότητα ορίζεται ως η αξονική δύναμη σε κάθε στοιχείο διαιρεμένη με το μήκος του στοιχείου. Το σύνολο των αναφερόμενων στοιχείων αντιπροσωπεύει τις γεωμετρικές παραμέτρους μιας εφελκόμενης πλεκτής κατασκευής. Η φόρτιση προκαλεί επιμήκυνση των στοιχείων και ο συνδυασμός των συνολικών επιμηκύνσεων οδηγεί στη μεταβολή της συνολικής γεωμετρίας. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει μέχρι να υπάρξει ισορροπία μεταξύ των κόμβων και των δυνάμεων που ασκούνται στα στοιχεία (Barnes, 1999b). Το αποτέλεσμα της διαδικασίας εξεύρεσης της μορφής οδηγεί στη διαφοροποίηση του μήκους των στοιχείων και κατά συνέπεια στη μεταβολή της αξονικής δύναμης (Aboul-Nasr and Mourad, 2015; Veenendaal and Block, 2012). Η εφαρμογή της μεθόδου πυκνότητας-δύναμης σε μια αρχική κατάσταση ενός δομικού πλέγματος μπορεί να μεταφραστεί ως εφελκυστική δύναμη που ασκείται σε μεμβράνες και εφελκόμενα δίκτυα. Λόγω του ότι τα δεδομένα της δύναμης-πυκνότητας βασίζονται σε μήτρες (*matrix*) και είναι λύσεις γραμμικής ανάλυσης που περιγράφουν την μετακίνηση των κόμβων, η μέθοδος θεωρείται γενική όσον αφορά την εξεύρεση της μορφής (Bechthold, 2008; Veenendaal and Block, 2012).

Η μέθοδος της δυναμικής χαλάρωσης (*Dynamic relaxation*) (Day, 1966) αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και προσομοίωση της συμπεριφοράς των ρευστών. Το 1977 αναθεωρήθηκε και από τότε χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό εφελκόμενων κατασκευών (Barnes, 1977). Όπως και στην μέθοδο της δύναμης-πυκνότητας, η μέθοδος δυναμικής χαλάρωσης (*Dynamic relaxation*) διερευνάται με τη δημιουργία κόμβων και γραμμικών στοιχείων. Κατά τα αρχικά στάδια της διαδικασίας το δίκτυο έχει τη δυνατότητα

να έχει οποιοδήποτε σχήμα. Παράλληλα, το ιδιοβάρος της κατασκευής μετατρέπεται σε σημειακό φορτίο στους κόμβους. Λόγω της ελαστικότητας των στοιχείων, οι δυνάμεις προέντασης ή οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα προκαλούν ταλαντώσεις (Naicu and Williams, 2015). Η κινητική ενέργεια των κόμβων κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης μετριέται συνεχώς. Παράλληλα, για την απόσβεση της ταλάντωσης επιλέγεται η τιμή που είναι πιο κοντά στις κρίσιμες τιμές. Όταν η κινητική ενέργεια φτάσει στο μέγιστο τότε όλες οι ταχύτητες των κόμβων μηδενίζονται. Η ισορροπημένη μορφή του συστήματος είναι αποτέλεσμα του μηδενισμού των ταχυτήτων και της γρήγορης απόσβεσης (Barnes, 1999a).

Οι δυο βασικές κατηγορίες ψηφιακής εξεύρεσης μορφής (*Form – Finding*) έχουν την δυνατότητα σχηματισμού εφελκυσμένων δομικών πλεγμάτων μέσα από παραμέτρους ισορροπίας. Αντιθέτως, η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει την ανάλυση της συμπεριφοράς μιας εφελκυσμένης κατασκευής κάτω από φορτίσεις.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite-Element Methods - FEA*) αρχικά διατυπώθηκε από τον *Richard Courant* το 1943 (Williamson, 1980) και από τότε χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της μηχανικής. Από το 1970 αρχίζει να χρησιμοποιείται στην επίλυση στατικών προβλημάτων. Το πρώτο βήμα αυτής της μεθόδου για εξεύρεση μορφής έγινε στα τέλη το 1960 από τον Γιάννη Αργύρη και τους συνεργάτες του στη Στουτγάρδη (Argyris et al., 1974) για την διερεύνηση εφελκυσμένων πλεγμάτων από καλώδια.

Γενικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί επανάληψη τριών διαδικασιών. Προ-επεξεργασία, ανάλυση και μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Al-Haddad, 2009). Κατά την προ-επεξεργασία, σε περίπτωση διερεύνησης επιφανειών, αυτές υποδιαιρούνται σε πλέγμα (*mesh*) (γραμμικά στοιχεία και κόμβους), ορίζοντας το είδος των στηρίξεων και το συνδυασμό των φορτίων (βαρύτητα, άνεμος, κινητά και νεκρά φορτία). Ο υπολογισμός των μετατοπίσεων των κόμβων κατά την διάρκεια της ανάλυσης είναι αποτέλεσμα μεθόδων μήτρας (*matrix*), όπου τα αποτελέσματα δίνουν τη συνολική παραμόρφωση και τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα γραμμικά στοιχεία. Για σκοπούς μελέτης, η μετα-επεξεργασία μεταφράζει τα πρωτογενή δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες, όπως χρωματική χαρτογράφηση των τάσεων, καταπονήσεων και παραμορφώσεων (Adriaenssens et al., 2014).

Οι πιο πάνω μέθοδοι εξεύρεσης και ανάλυσης βασίζονται σε μαθηματικούς υπολογισμούς των μορφών, των οποίων τα αποτελέσματα της ανάλυσης απεικονίζονται γραφικά στον υπολογιστή. Αν και οι υπολογιστικές μέθοδοι γίνονται με τον καιρό πιο κατανοητές για τους σχεδιαστές, για την χρήση τέτοιων προγραμμάτων πρέπει να γίνονται αντιληπτοί οι περιορισμοί κάθε διαδικασίας επίλυσης και η συμπεριφορά των γραμμικών στοιχείων των πλεκτών κατασκευών.

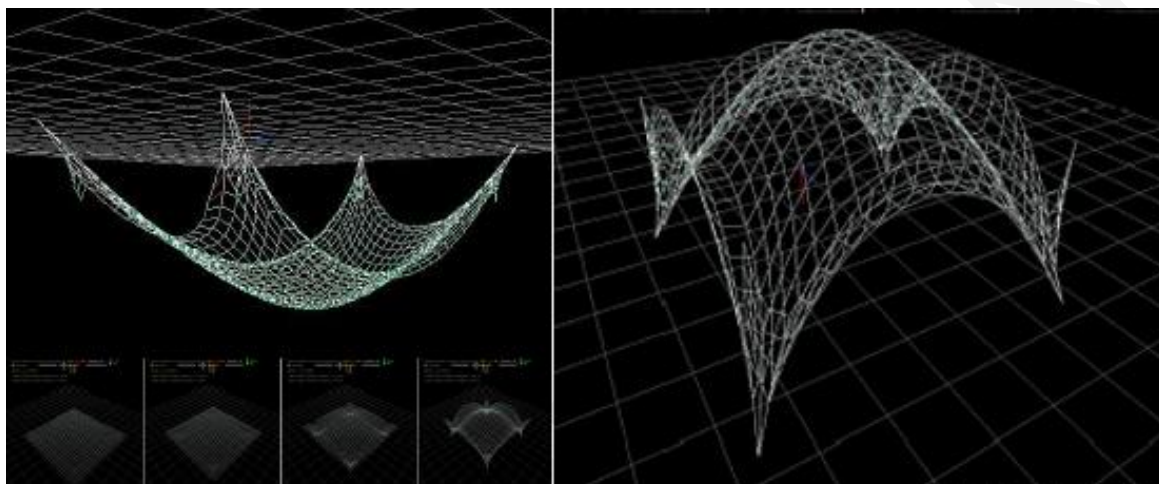
3.2.3_ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Ένα δομικό πλέγμα μπορεί να είναι μέρος μιας αρχιτεκτονικής ιδέας και να παράγεται μέσω μιας διαδικασίας όπως αυτή της εξεύρεσης μορφής (form-finding). Η ανάγκη για απλούστευση των υπολογιστικών – μαθηματικών μεθόδων είναι αναγκαία για την διερεύνηση τέτοιων μορφολογιών στην αρχική φάση σχεδιασμού. Αν και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τέτοια εργαλεία μερικές φορές είναι κατά-προσέγγιση, δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης χαρακτηριστικών του υλικού και δυνάμεων με περισσότερη αξιοπιστία.

Μια τέτοια τεχνική είναι αυτή των ελαστικών σωματιδίων (*particle-spring technique*) (Kilian and Ochsendorf, 2005), η οποία βασίζεται στο νόμο του *Hooke* (Hooke, 1678). Σε αυτή την τεχνική, το φορτίο γίνεται σημειακό και ασκείται πάνω στα σωματίδια (κόμβοι), τα οποία βρίσκονται στο τρισδιάστατο περιβάλλον. Τα σωματίδια συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα με την μορφή της γεωμετρίας και σχηματίζουν ένα πλέγμα από ελατήρια. Στα ελατήρια ορίζονται παράμετροι ακαμψίας και απόσβεσης. Τα εξωτερικά φορτία, αλλά και το ιδιοβάρος της κατασκευής μετατρέπονται σε σημειακά και φορτίζουν τα σωματίδια. Παράδειγμα συνδυασμού φόρτισης είναι η βαρύτητα και το ιδιοφορτίο με το οποίο φορτίζονται τα σωματίδια. Κατά τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής, οι δυνάμεις αρχίζουν να προκαλούν μετατόπιση των σωματιδίων και αυτό προκαλεί την παραμόρφωση του πλέγματος. Τα ελατήρια ταλαντώνονται μέχρι η κίνηση να αποσβεσθεί και να υπάρξει ηρεμία στο σύστημα. Η νέα γεωμετρία αντιπροσωπεύει το πλέγμα σε ισορροπία (Adriaenssens et al., 2014).

Το παράδειγμα του λογισμικού *CADenary* (Kilian και Ochsendorf, 2005), περιγράφει μια υπολογιστική διαδικασία εξεύρεσης της μορφής σε κρεμαστά μοντέλα (*hanging models*) (Εικόνα 3.5). Σκοπός είναι η αντιστροφή των απόλυτα εφελκόμενων κρεμαστών μορφών για την παραλαβή μόνο θλιπτικών τάσεων. Αναλυτικά, το κάθε σωματίδιο μέσα στο

σύστημα ορίζεται ως ένα σημείο μάζας, το οποίο συνδέεται με ελατήρια που προκαλούν εφελκυστική ή θλιπτική ένταση. Η εφαρμογή της βαρύτητας προκαλεί την κίνηση των σωματιδίων και την εφελκυστική δύναμη που οδηγεί στην επιμήκυνση των ελατηρίων. Το περιβάλλον μοντελοποίησης δίνει τη δυνατότητα συνεχούς επανάληψης της διαδικασίας. Επειδή το λογισμικό βασίζεται σε θεμελιώδεις αρχές δομικής συμπεριφοράς, επιτρέπει μια ολοκληρωμένη προσομοίωση κατασκευών σε θλίψη.



Εικόνα 3.5. Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής με την τεχνική ελαστικών σωματιδίων σε κρεμαστά μοντέλα (Kilian and Ochsendorf, 2005).

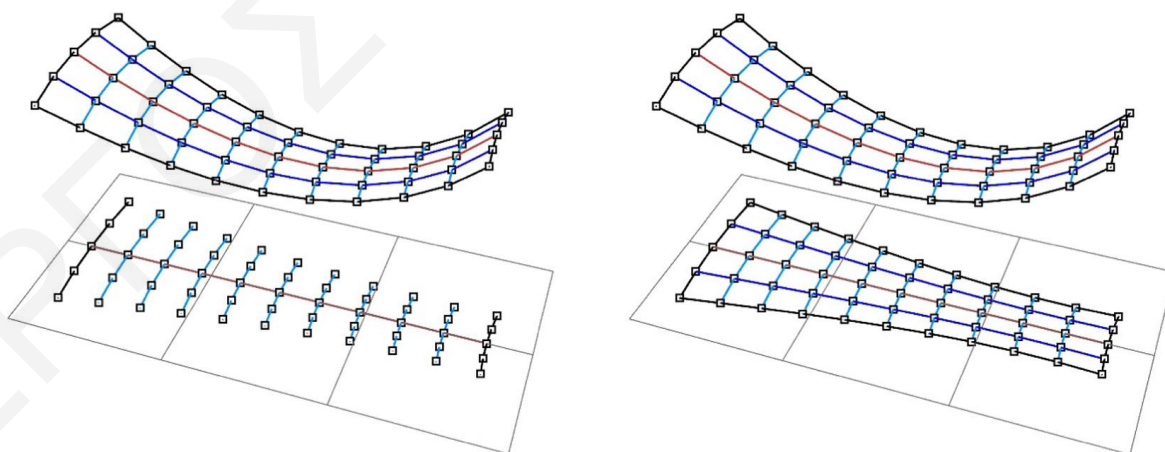
Βασισμένο στο παράδειγμα του *CADenary* είναι το λογισμικό *SpringFORM* (Ahlquist et al., 2014). Το *SpringFORM* εφαρμόζει την αρχή των ελαστικών-σωματιδίων και έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης εφελκυσμένων προεντεταμένων κατασκευών καθώς και υπολογισμού των τάσεων μέσω της μετακίνησης των σωματιδίων (Ahlquist et al., 2014). Αυτό επιτρέπει τη σύνδεση διαδικασιών εξεύρεσης της μορφής και ανάλυσης των αποτελεσμάτων εφελκυσμένων κατασκευών, στις οποίες δεν αναπτύσσονται ροπές. Με βάση τη λειτουργία των ελατηρίων σε εφελκυσμό αλλά και την αριθμητική τιμή της παραμόρφωσης σε σχέση με τη θέση ηρεμίας, προσφέρεται η δυνατότητα κατασκευής ψηφιακών μοντέλων (Ahlquist and Menges, 2013). Σε παρόμοια λογική βασίζεται και το λογισμικό *Kangaroo*® (Piker, 2013), *plug-in* για το πρόγραμμα *Grasshopper*® (Rutten, 2018), όπου εφαρμόζεται η διαδικασία εξεύρεσης μορφής με την αρχή των ελαστικών-σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη διερεύνηση σχεδιαστικών λύσεων. Επίσης, το λογισμικό παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης φυσικής συμπεριφοράς, όπως δύναμη, παραμόρφωση και βαρύτητα επιτρέποντας την παραμόρφωση εφελκυσμένων πλεγμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η τεχνική των ελαστικών-σωματιδίων επιτρέπει τη στατική διερεύνηση μέσω της σχεδιαστικής διαδικασίας, διερευνώντας παράλληλα τα αποτελέσματα των εναλλακτικών μορφών που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεγαλύτερη κατανόηση της δομικής συμπεριφοράς της μορφής από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Η ενσωμάτωση επιπροσθέτων λειτουργιών, ή δομικής συμπεριφοράς στον αλγόριθμο δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης, όπως συμβαίνει με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Συγκριτικά με τη διερεύνηση μορφών μέσω της χρήσης φυσικών μοντέλων, η τεχνική ελαστικών σωματιδίων επιτρέπει περισσότερη ευελιξία στην αναζήτηση μορφών.

3.2.4_ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Σημαντικό τμήμα της υλοποίησης μιας μορφής που παράγεται από διαδικασίες εξεύρεσης μορφής είναι η προετοιμασία του ψηφιακού μοντέλου για κατασκευή. Αυτή αναφέρεται στη διαδικασία κατά την διάρκεια της στατικής ανάλυσης, όπου καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού στα ελατήρια και γίνεται υποδιαίρεση της. Η υποδιαίρεση σε τμήματα αποσκοπεί στη διερεύνηση των μικρότερων επιφανειών του πλέγματος μέσω κατασκευαστικών περιορισμών, όπως το μήκος των νημάτων, τη διαδικασία κατασκευής των κόμβων, τους μηχανισμούς προέκτασης και τέλος την αντοχή του υλικού (Seidel, 2009).

Η μέθοδος υπολογισμού των τμημάτων σε ψηφιακά προγράμματα χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια (Gale and Lewis, 2016; Veenendaal and Block, 2012) (Εικόνα 3.6):

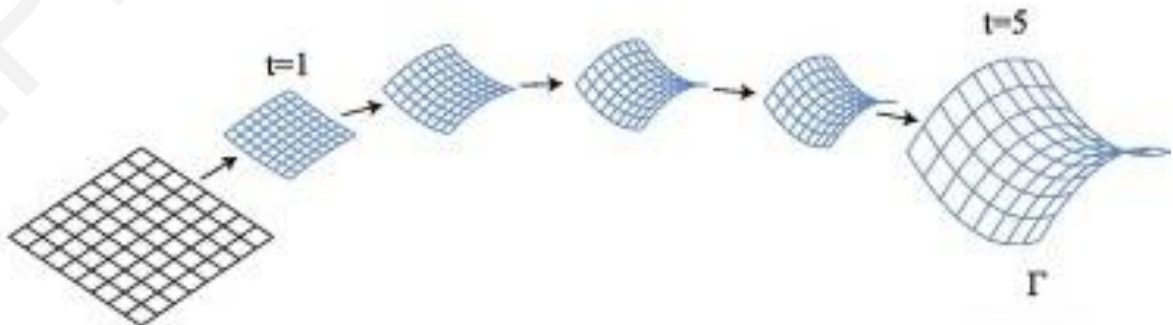


Εικόνα 3.6. Διαδικασία επιπεδοποίησης ενός δομημένου πλέγματος (Gale and Lewis, 2016).

- Υποδιαίρεση (*Subdivision*) της επιφάνειας σε τμήματα που συγκροτούνται από καλώδια. Σε αυτό το στάδιο καθορίζονται οι συνδέσεις του δομικού πλέγματος, δηλαδή οι κόμβοι μεταξύ των νημάτων και οι αρθρώσεις. Σκοπός αυτής της

διαδικασίας είναι να δημιουργήσει ένα πλέγμα από νήματα και να μειώσει τα σημεία των κόμβων στην επιφάνεια (Argyris et al., 1974),

- Επιπεδοποίηση (*Flattening*), δηλαδή ανάλυση του κάθε τρισδιάστατου τμήματος σε δισδιάστατο επίπεδο. Σε αυτό το στάδιο η κάθε μονάδα αναγκάζεται να προσαρμοστεί σε ένα επίπεδο, κάτι το οποίο τις περισσότερες φορές γίνεται με την χρήση μαθηματικών εξισώσεων και διαδικασιών βελτιστοποίησης. Επειδή η καμπυλότητες των τμημάτων περιγράφουν μόνο γεωμετρικά χαρακτηριστικά, στη διαδικασία επιπεδοποίησης προκύπτουν σφάλματα (Jae-Yeol and Jang-Bog, 2002). Γι' αυτό το λόγο η επίπεδη μορφή χρησιμοποιείται ως η αρχική γεωμετρία νέων μεθόδων παραμόρφωσης της μορφής (*Formulation*). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την επιπεδοποιημένη γεωμετρία ως δεδομένο εισόδου στη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής (Εικόνα 3.7),
- Αφαίρεση εξωτερικών φορτίων και εντάσεων που προκύπτουν από τη διαδικασία επιπεδοποίησης. Η διαδικασία βασίζεται σε αρχές βελτιστοποίησης και γίνεται με δύο τρόπους:
 - Τη γεωμετρική επίλυση αγνοώντας τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε στρέψη καθώς και τις αναλογίες μεταξύ των κόμβων που συμπεριλαμβάνονται στα μοτίβο,
 - Τη μηχανική επίλυση όπου συμπεριλαμβάνονται οι ιδιότητες του υλικού μαζί με τις αποκλίσεις των τάσεων κατά τη διαδικασία επιπεδοποίησης που προκύπτουν μέσω της σύγκριση των τάσεων με τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής,
- Τέλος, ο μαθηματικός υπολογισμός του μήκους του νήματος αφού αφαιρεθεί η προένταση που ασκείται στο μοτίβο.



Εικόνα 3.7. Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής από επιπεδοποιημένο σχήμα με τη μέθοδο Total Lagrangian Formulation (TLF) (Veenendaal and Block, 2012).

Επειδή η μορφή των εφελκυσόμενων πλεγμάτων έχει διπλή καμπυλότητα, η γεωμετρία δεν μπορεί να περιγραφεί σε ένα επίπεδο χωρίς να παραμορφωθεί (Lewis, 2005). Τα καλώδια ή νήματα που δημιουργούν την επιφάνεια διαφέρουν όσον αφορά τις εφελκυστικές δυνάμεις στους κόμβους, έτσι η προένταση τους δεν μπορεί να υπολογιστεί από την αρχική γεωμετρία μέσω της τεχνικής ελαστικών σωματιδίων. Αναλυτικά, το αρχικό μήκος του ελατηρίου και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού περιγράφονται από τον τύπο $K = \frac{N}{DL} = \frac{E \cdot A}{L}$, όπου K η σταθερά ελατηρίου, N η δύναμη που ασκείται από την αρχική παραμόρφωση και τα εξωτερικά φορτία, DL η παραμόρφωση του νήματος, A το εμβαδό της διατομής, L το μήκος του αρχικού νήματος και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι η αρχική παραμόρφωση μεταβάλλει διαφορετικά το κάθε τμήμα του νήματος – ελατηρίου με αποτέλεσμα το ΔL να διαφέρει σε κάθε νήμα. Συνεπώς, το κάθε καλώδιο ή νήμα έχει τη δική του σταθερά ελατηρίου και έτσι για να φτάσει σε ισορροπία, το N διαφέρει από κόμβο σε κόμβο (Lewis, 2003).

Επιπρόσθετα, όπως διαφαίνεται από τη δουλειά του Lewis M.J. (2005), υλικά με μεγάλες αντοχές κατά τη φάση παραμόρφωσης τους απαιτούν λιγότερη προένταση για τη δημιουργία καμπυλώσεων, μειώνοντας έτσι τις αποκλίσεις και επιτρέποντας τη χρήση τους σε διαδικασίες εξεύρεσης μορφών με τη μέθοδο ελαστικών σωματιδίων (particle behavior modeling) και μη-γραμμική ανάλυση (Argyris et al., 1974; Lewis, 2005). Ο ίδιος υποστηρίζει πως τα νήματα και τα καλώδια αντιπροσωπεύουν ένα διακριτό τύπο μεμβράνης χωρίς καμία διαφορά όσον αφορά τον στατικό υπολογισμό τους (Lewis, 2003). Το πιο πάνω επιχείρημα ενισχύεται από την ιστορική εξέλιξη των εφελκυσόμενων κατασκευών, αφού παλαιότερα υφάσματα τέτοιων κατασκευών δεν είχαν την απαιτούμενη αντοχή σε εφελκυσμό και έτσι γινόταν χρήση δευτερευόντων συστημάτων από συρματόσχοινα σε προένταση (Beccarelli, 2015). Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, η χρήση ελαστικών νημάτων θα μπορούσε να συνεισφέρει προς μια ενοποιημένη διαδικασία εξεύρεσης μορφής (form-finding) και κατασκευής εφελκυσόμενων πλεγμάτων με ακρίβεια.

Βασικό χαρακτηριστικό των ελαστικών νημάτων είναι η μεγάλη εφελκυστική παραμόρφωση που δέχονται σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας, συγκριτικά με κλασικά υλικά όπως τα μέταλλα (Πίνακας 3.1) (Ashby et al., 2010). Αυτό απαιτεί ειδικό χειρισμό και ακρίβεια στη φάση κατασκευής λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης τους (Moncrieff, 2005) αλλά και λόγω της ανάγκης συσχετισμού των δεδομένων κατά τη φάση γεωμετρικής

επίλυσης τους και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών τους κατά τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής (Gale and Lewis, 2016).

		Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή διαρροής (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Ανθεκτικότητα θραύσης (MPa.m ^{1/2})
Ferrous metals	Cast iron, ductile (nodular)	170 - 180	250 - 680	410 - 830	22 - 54
	Cast iron, gray	80 - 140	140 - 420	140 - 450	10 - 24
	High carbon steel	200 - 220	400 - 1,200	550 - 1,600	27 - 92
	Low alloy steel	210 - 220	400 - 1,500	550 - 1,800	14 - 200
	Low carbon steel	200 - 220	250 - 400	350 - 580	41 - 82
	Medium carbon steel	200 - 220	310 - 900	410 - 1,200	12 - 92
	Stainless steel	190 - 210	170 - 100	480 - 2,200	62 - 150
Elastomers	Butyl rubber (IIR)	0.001 – 0.002	2 - 3	5 - 10	0.07 - 0.1
	Ethylene vinyl acetate (EVA)	0.01 – 0.04	12 - 18	16 - 20	0.5 - 0.7
	Natural rubber	0.0015 – 0.0025	20 - 30	22 - 32	0.15 - 0.25
	Polychloroprene (Neoprene)	0.0007 – 0.002	3.4 - 24	3.4 - 24	0.1 - 0.3
	Polyisoprene rubber	0.0014 – 0.004	20 - 25	20 - 25	0.077 - 0.1
	Polyurethane	0.002 – 0.030	25 - 51	25 - 51	0.2 - 0.4
	Silicone elastomers	0.005 – 0.022	2.4 - 5.5	2.4 - 5.5	0.033 - 0.5
Composites	CFRP, epoxy matrix (isotropic)	69 - 150	550 - 1,100	550 - 1,100	6.1 - 20
	GFRP, epoxy matrix (isotropic)	15 - 28	110 - 190	140 - 240	7 - 23

Πίνακας 3.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά μετάλλου, ελαστικών και σύνθετων υλικών (Ashby, 2011).

Ως αποτέλεσμα, οι μορφές διπλής καμπυλότητας σε συνδυασμό με τις κατασκευαστικές αντοχές του υλικού απαιτούν εξειδικευμένο τρόπο σχεδιασμού και ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο σύνδεσης στους κόμβους για σχηματισμό του πλέγματος. Η διαδικασία εξεύρεσης μορφής και βελτιστοποίησης βοηθά στην ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων και επιδιώκει να προσδιορίσει τον τρόπο σύνδεσης των νημάτων για τη δημιουργία της αναμενόμενης μορφής. Έτσι, με την κατανομή των αξονικών δυνάμεων και της αρχικής παραμόρφωσης στα νήματα, στόχος είναι η μορφή του πλέγματος να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στο ψηφιακό αποτέλεσμα που προκύπτει μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής (Gale and Lewis, 2016).

3.3_ΣΤΑΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η επίτευξη κατάστασης ισορροπίας σε ένα εφελκύμενο πλέγμα είναι μέρος της διαδικασίας εξεύρεσης της μορφής του. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας επηρεάζεται από αρχικές παραμέτρους, όπως τις εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελαστικότητα υλικού), τις συνθήκες - συνδυασμούς φορτίσεων καθώς και τα όρια της κατασκευής. Αν και η διαδικασία μπορεί

να παράγει επιθυμητά αποτελέσματα, σε μερικές περιπτώσεις οι γεωμετρικοί περιορισμοί του υλικού οδηγούν στη διερεύνηση βέλτιστων αποτελεσμάτων.

Η στατική βελτιστοποίηση επιδιώκει την εξεύρεση της βέλτιστης μορφής μέσα από μία μαθηματική φόρμουλα όπου συνδυάζονται αντικειμενικά κριτήρια. Η διαδικασία βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται με την χρήση αλγόριθμων που βασίζονται στην εφαρμογή του μαύρου κουτιού (*Black Box*) (Wiener, 1965). Η τεχνική του μαύρου κουτιού λειτουργεί ως ένα κλειστό σύστημα όπου η επεξεργασία της εισόδου καθορίζει την έξοδο και μπορεί να πετύχει μία ή περισσότερες μεταβολές και αναλύσεις με σκοπό τη μείωση των ποικιλιών εξόδου (Kefalas 2003). Η εφαρμογή αλγόριθμων βελτιστοποίησης χωρίζεται σε Αλγόριθμους Άμεσης Αναζήτησης (*Direct Search Algorithms*) (Powell, 1998) και Μεταερευνητικούς Αλγόριθμους (*Metaheuristic Algorithms*) (Yang, 2010).

Στους Αλγόριθμους Άμεσης Αναζήτησης (*Direct Search Algorithms*) (Powell, 1998) μπορούμε να ξεχωρίσουμε τον *SUBPLEX* (Rowan, 1990), ο οποίος είναι αλγόριθμος γραμμικής αναζήτησης μιας κατεύθυνσης για την αναζήτηση της καλύτερης λύσης, και τον *DIRECT* (Jones et al., 1993), ο οποίος δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο κάναβο από περιοχές σε όλη της εμβέλεια των παραμέτρων που διαχωρίζονται σε ολίγα υφιστάμενες πλατιές περιοχές και υποσχόμενες μικρότερες περιοχές με στόχο τον εντοπισμό των βέλτιστων περιοχών. Αν και οι δύο αλγόριθμοι έχουν θετικά χαρακτηριστικά, η εφαρμογή τους για επίλυση στατικών και κατασκευαστικών προβλημάτων είναι σπάνια.

Οι Μεταερευνητικοί Αλγόριθμοι (*Metaheuristic Algorithms*) (Yang, 2010) θεωρούνται πιο εφαρμόσιμοι σε κατασκευαστικά και στατικά προβλήματα και διακρίνονται σε τρεις αλγόριθμους. Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίηση του Σμήνους Σωματιδίων (*Particle Swarm Optimization*) (Eberhart and Kennedy, 1995), μέσα από τον οποίο αναπτύσσεται πλήθος λύσεων υπό μορφή σωματιδίων που κινούνται προς τυχαίες κατευθύνσεις μεταξύ τους και επηρεάζονται από τον εαυτό τους και τις καλύτερες λύσεις στο σμήνος. Σταδιακά αυτές συγκλίνουν σε μια καλή περιοχή, όπου παγιδεύονται οι βέλτιστες λύσεις. Ο Αλγόριθμος Προσομοίωσης Ανόπτησης (*Simulated Annealing*) (Van Laarhoven and Aarts, 1987) παράγει μία μόνο βέλτιστη λύση και βασίζεται στη μίμηση της κίνησης ενός ατόμου (*atom*) μέσα σε ψυχρό μέταλλο. Αρχικά επηρεάζεται – εξερευνά τυχαία τις λύσεις και σταδιακά σταθεροποιείται με τη μείωση της θερμοκρασίας, φτάνοντας στην καλύτερη κατάσταση του και κατ' επέκταση στην εκμετάλλευση των καλύτερων λύσεων. Τέλος, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (*Genetic Algorithm*) (Goldberg, 1989) είναι υποκατηγορία των Εξελικτικών

Αλγορίθμων (*Evolutionary Algorithm*) και χαρακτηρίζονται ως μια τεχνική αναζήτησης εμπνευσμένη από γενικούς κανόνες φυσικής επιλογής (*natural selection*) όπως διατυπώθηκαν από τον *Darwin* για την επιβίωση του ισχυρότερου (*survival of the fittest*). Δηλαδή, μέσα σε ένα τυχαίο πληθυσμό από πιθανές λύσεις, οι καλύτεροι ευνοούνται και συνδυάζονται με σκοπό να δημιουργήσουν την επόμενη καλύτερη γενιά (Goldberg, 1989).

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (*GA*) θεωρούνται μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες και αποτελεσματικές μεθόδους βελτιστοποίησης για στατικά και κατασκευαστικά προβλήματα. Χαρακτηρίζονται ως ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο για επίλυση σύνθετων προβλημάτων, όπως η βελτιστοποίηση της στατικής συμπεριφοράς γεφυρών με μεγάλα ανοίγματα, η μορφή κελυφών και μεμβρανών καθώς και η χωρική διαμόρφωση πλεκτών κατασκευών (Adriaenssens et al., 2014).

Σε κάθε συστηματική προσέγγιση επίλυσης ενός προβλήματος, για να υπάρξει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα, απαιτούνται δύο βασικά στοιχεία:

- Ένα σύστημα αναπαράστασης που περιγράφει κάθε πιθανή ατομική (*individual*) λύση με ένα σύνολο μεταβλητών χρωματοσωμάτων (*chromosome*) και τη χρήση παραμέτρων για τον ορισμό των ορίων λειτουργίας των μεταβλητών,
- Τη συνάρτηση καταλληλότητας (*Fitness function*), όπου με βάση μία παράμετρο απόδοσης και το αντίστοιχο κριτήριο αξιολόγησης, υπολογίζονται οι παραγόμενες ατομικές (*individual*) λύσεις.

Επίσης, για τον έλεγχο του Γενετικού Αλγόριθμου και τη διερεύνηση ενός προβλήματος απαιτείται ένα ή περισσότερα κριτήρια αξιολόγησης καθώς και ο ορισμός των παραμέτρων. Το κριτήριο αξιολόγησης μπορεί να συσχετίζεται με τη συνάρτηση καταλληλότητας (μέγιστο ή ελάχιστο), με ένα αριθμό λύσεων, αριθμό γενεών, ή και χρόνο λειτουργίας. Οι παράμετροι περιλαμβάνουν τον αριθμό των γενεών, το μέγεθος του πληθυσμού, τον αριθμό των γονέων και διάφορους συντελεστές (*operators*) όπως επιλογή (*selection*), διασταύρωση (*crossover*) και μετάλλαξη (*mutation*) (Sivanandam and Deepa, 2007).

Για την εξεύρεση της βέλτιστης κατάστασης, η διαδικασία των Γενετικών Αλγορίθμων χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια. Αρχικά, για την εφαρμογή τους, ένα συγκεκριμένο πρόβλημα κωδικοποιείται σε χρωματοσώματα (*chromosome*) που μπορεί να αντιπροσωπεύουν σειρές από 1 και 0, λίστες από παραμέτρους, κωδικούς μετάθεσης, ή και πραγματικούς αριθμούς. Παράλληλα, απαιτείται ο καθορισμός της διαδικασίας επιλογής

των καλών από το σύνολο των λύσεων. Αυτό συνήθως γίνεται εφικτό με τον προκαθορισμό μίας αντικειμενικής συνάρτησης καταλληλότητας (*Fitness function*), ή οποία χρησιμοποιείται από τους Γενετικούς Αλγόριθμους για να καθοδηγήσει την εξέλιξη των μελλοντικών γενεών (Adriaenssens et al., 2014).

Αφού καθοριστεί το πρόβλημα μέσα από τις παραμέτρους των χρωματοσωμάτων και της συνάρτησης καταλληλότητας, δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός κωδικοποιημένων λύσεων. Ο πληθυσμός μπορεί να δημιουργείται τυχαία, ή με τη χρήση πιθανών καλών λύσεων εκ των προτέρων. Στην συνέχεια, για την επαναληπτική επεξεργασία του πληθυσμού και για τη δημιουργία μίας ακολουθίας από πληθυσμούς, εφαρμόζονται οι γενετικοί χειριστές (*genetic operators*), όπως επιλογή (*selection*), διασταύρωση (*crossover*), μετάλλαξη (*mutation*) και ελιτισμός (*elitism*). Η επιλογή (*selection*) βασίζεται στην αρχή της φυσικής εξέλιξης της επιβίωσης του ισχυρού. Αυτό γίνεται εφικτό με πολλούς τρόπους, όπως ρουλέτα στάθμισης (*Roulette Wheel*), τυχαία επιλογή (*Random Selection*), επιλογή σε σειρά (*Rank Selection*), διοργανωτική επιλογή (*Tournament Selection*), επιλογή Μπόλτσμαν (*Boltzmann Selection*), κ.α. (Sivanandam and Deera, 2007). Σκοπός είναι να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης κατά την εξελικτική διαδικασία, σώζοντας τα χρωματοσώματα από την καταστροφή τους λόγω διασταύρωσης ή και μετάλλαξης. Τέλος, η διαδικασία αξιολόγησης της συνάρτησης καταλληλότητας και οι γενετικοί χειριστές επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθούν οι στόχοι.

Αντιθέτως, κατά τη διερεύνηση πολλαπλών και αντίθετων συναρτήσεων καταλληλότητας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι το αποτέλεσμα δεν θα είναι βέλτιστο για όλες τις συναρτήσεις. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται Γενετικοί Αλγόριθμοι πολλαπλών – στόχων (*multi-objective*), όπου το τελικό αποτέλεσμα μίας διερεύνησης με πολλούς στόχους χαρακτηρίζεται από μία σειρά λύσεων και όχι μία μεμονωμένη βέλτιστη λύση. Η ομάδα των λύσεων ονομάζεται σύνολο εξισορρόπησης (*trade-off set*), μέτωπο *Pareto* (*Pareto front*), ή μη κυριαρχούμενο σύνολο (*no-dominated set*) και χαρακτηρίζεται από αποτελέσματα που είναι μη κυρίαρχα. Δηλαδή, αν η λύση A θέλει να κυριαρχήσει της λύσης B, η λύση A πρέπει να ξεπεράσει ή να φτάσει τη λύση B σε όλες ή σε μία από τις συναρτήσεις. Αν η λύση A ξεπερνά ή είναι ίση της λύσης B σε όλες τις συναρτήσεις, εκτός μιας, όπου η λύση B ξεπερνά τη λύση A, τότε οι λύσεις A και B βρίσκονται στο μέτωπο *Pareto* (*Pareto front*) (Deb, 2002). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ποικιλομορφία στον πληθυσμό των λύσεων, το οποίο προσφέρει καλύτερη διερεύνηση των αποτελεσμάτων στον πληθυσμό τους (Deb, 2002).

Η ικανότητα των Γενετικών Αλγόριθμών να διερευνούν διάφορες πιθανές λύσεις είναι άμεσα συνυφασμένη με τη μεθοδολογία εξεύρεσης μορφής και τη βελτιστοποίηση της. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, εκ της φύσης τους, μπορούν να συνδυάζουν παραμέτρους. Έτσι, δίνουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης γεωμετρικών - στατικών προβλημάτων με τη μεταβολή στις τιμές αυτών των παραμέτρων. Κατά την διάρκεια της στατικής βελτιστοποίησης, η συνάρτηση της μεταβολής μιας παραμέτρου εξελίσσεται συνεχώς, εξετάζοντας όλες τις πιθανές περιπτώσεις. Επίσης, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εργάζονται σε ένα πληθυσμό από λύσεις και όχι μόνο σε μια μεμονωμένη, έτσι έχουν λιγότερες πιθανότητες να παγιδευτούν σε ένα τοπικό ελάχιστο ή μέγιστο με αποτέλεσμα να έχουν τις περισσότερες πιθανότητες εξεύρεσης της βέλτιστης συνολικής τιμής με πολλαπλές και σύνθετες συναρτήσεις.

Κατά τη δημιουργία ενός στατικού προβληματισμού για βελτιστοποίηση, τα χρωματοσώματα, δηλαδή οι μεταβλητές παράμετροι, εξαρτώνται από το είδος της βελτιστοποίησης. Δηλαδή, τα χρωματοσώματα θα μπορούσαν να αποτελούν μεγέθη εφελκυστικών στοιχείων, κομβικές θέσεις, τοπολογία, ή και συνδυασμό των τριών. Μεγαλύτερο πλεονέκτημα των Γενετικών Αλγόριθμών σε μία διαδικασία κατασκευαστικής βελτιστοποίησης είναι η δυνατότητα τους να χειρίζονται παράλληλες παραμέτρους διαφορετικών τύπων που εκπροσωπούν πραγματικά μεγέθη. Ο καθορισμός της συνάρτησης καταλληλότητας καθοδηγεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης και μπορεί να εκπροσωπεί μια τιμή κατασκευαστικής απόδοσης, όπως για παράδειγμα το βάρος, την εφελκυστική τάση, ή την παραμόρφωση. Επιπλέον, μέσα από τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων επιτρέπεται συσχετισμός των χρωματοσωμάτων με την συνάρτηση καταλληλότητας, διασφαλίζοντας ότι σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις λαμβάνονται υπόψη. Για παράδειγμα, οι μέγιστες τάσεις σε ένα στατικό πρόβλημα δεν πρέπει να υπερβαίνουν ένα καθορισμένο όριο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της τιμής της τάσης. Γενικά, η μεταβολή στις περιοριστικές τιμές έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση, ή τη μείωση της συνάρτησης καταλληλότητας, με συνέπεια αυτό να επηρεάζει τη διερεύνηση και κατά συνέπεια την απόρριψη των μη εφικτών λύσεων. Μέθοδοι στατικής ανάλυσης, όπως για παράδειγμα πεπερασμένων στοιχείων (*FEA*), μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια αξιολόγησης των συναρτήσεων καταλληλότητας (Adriaenssens et al., 2014).

Η μελέτη των (Ahlquist et al., 2015) είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής τεχνικής ελαστικών σωματιδίων (*particle-spring method*) και μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε

συνδυασμό με Γενετικούς Αλγόριθμους. Αυτή αποσκοπεί στη σχεδιαστική διερεύνηση της τυπολογίας εφελκυσόμενων πλεγμάτων με υλική και στατική συμπεριφορά. Παράλληλα, με τη χρήση Γενετικών Αλγόριθμων διερευνάται η ποικιλομορφία στην περίπτωση αύξησης των τμημάτων βασισμένη σε δυναμικές – στατικές μεταβολές. Ο γεωμετρικός έλεγχος της τυπολογίας συνδυάζεται με την εφαρμογή τεχνικής ελαστικών σωματιδίων για τον υπολογισμό της κατασκευαστικής συμπεριφοράς σε συνδυασμό με Γενετικούς Αλγόριθμους. Ο συνδυασμός αυτός εφαρμόζεται σε σύνθετες γεωμετρίες και διαπραγματεύεται τις σχέσεις πυκνότητας, γεωμετρίας και ισόρροπης κατανομής δυνάμεων. Η έρευνα αυτή επιδιώκει τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων σε συνάρτηση με άλλες μεθόδους, όπως διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατική ανάλυση έχοντας υπόψη κατασκευαστικούς περιορισμούς. Με τη χρήση της τεχνικής των ελαστικών σωματιδίων, η διαδικασία εξεύρεσης μορφής προσφέρει ανατροφοδοτούμενη σχέση μεταξύ χειροκίνητου και αλγοριθμικού ελέγχου. Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρικής τυπολογίας και της στατικής συμπεριφοράς καμπύλων εφελκυσόμενων κατασκευών.

3.4_ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα εφελκυσόμενα ελαστικά πλέγματα θεωρούνται εξαιρετικά ελαφριά στατικά συστήματα, και με τη σωστή γεωμετρία και με βάση τις συνθήκες στήριξης και αρχικής παραμόρφωσης τους μπορούν να λάβουν μεγάλες εξωτερικές δυνάμεις. Λόγω της ευελιξίας τους στη φάση της γεωμετρικής ανάπτυξης τους μέσω της προέντασης που προκύπτει, έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν μικρότερες εξωτερικές παραμορφώσεις (Bechthold, 2008). Η μορφή των πλεγμάτων πρέπει να επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ της παραμόρφωσης που αναπτύσσεται από τις προεντάσεις, τα εξωτερικά φορτία και τις οριακές συνθήκες του συστήματος.

Η εξεύρεση της κατάστασης ισορροπίας μιας γεωμετρίας σε εφελκυσμό είναι ένα από τα βασικά βήματα στο σχεδιασμό και επιτυγχάνεται μέσω του καθορισμού της επιφάνειας, του ορισμού της αρχικής σχέσης των κόμβων, των νημάτων και των αρθρώσεων, τα οποία εισάγονται στη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής (*Form-Finding*) (Gale and Lewis, 2016). Η ψηφιακή διαδικασία εξεύρεσης της μορφής έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς του υλικού και της γεωμετρίας, επιτρέποντας τη διερεύνηση πολλών εναλλακτικών λύσεων σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Με τη χρήση της τεχνικής των ελαστικών σωματιδίων προσφέρεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης των διαδικασιών στατικής διερεύνησης και εξεύρεσης μορφής και προτείνονται εναλλακτικές λύσεις (Kilian and Ochsendorf, 2005). Με τη συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηρισμών της μορφής μέσω της Σταθερής του ελατηρίου (K : *Stiffness*) και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού μέσω του Μέτρου ελαστικότητας (E ; *Youth's modulus*) (Lewis, 2003), η δομική και στατική συμπεριφορά της μορφής γίνεται πιο κατανοητή από το αρχικό στάδιο σχεδιασμού της. Παράλληλα, η ικανότητα των Γενετικών Αλγορίθμων να διερευνούν πληθώρα πιθανών λύσεων (Adriaenssens et al., 2014) βοηθά στη βελτιστοποίηση του ελαστικού συστήματος με τον αυτόματο έλεγχο πολλαπλών παραμέτρων. Με το συνδυασμό των δύο πιο πάνω, αναπτύσσεται δυναμική σχέση μεταξύ του αλγοριθμικού ελέγχου – βελτιστοποίησης και της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής, επιτυγχάνοντας τη στατική βελτιστοποίηση μίας εφελκύομενης κατασκευής με στόχο τη γεωμετρική και στατική ισορροπία της.

Όπως διαφαίνεται από τα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 2, τα ελαστικά νήματα είναι υλικά, για τα οποία χρειάζεται άμεση συσχέτιση της ψηφιακής μορφής μαζί με τη διαδικασία ύφανσης τους. Η ανάγκη ακρίβειας τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και σε επίπεδο κατασκευής μπορεί να καλυφθεί μέσω της χρήσης ψηφιακών μέσων σχεδιασμού και κατασκευής, για παράδειγμα μέσω της χρήσης ρομποτικών μηχανών και εργαλείων τελικής δράσης (Augugliaro et al., 2015; Mirjan et al., 2016). Δηλαδή, σε μία αυτοματοποιημένη διαδικασία ύφανσης με τη χρήση ελαστικών νημάτων, το πλέγμα που παράγεται κατά τη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής υποστηρίζεται από τεχνικές, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη συμπεριφορά του υλικού και τη συνολική κατασκευαστική διαδικασία της ρομποτικής μηχανής (Kontovourkis and Tryfonos, 2018; Tryfonos, 2018).

4.0_ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1_ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη των ψηφιακών σχεδιαστικών και κατασκευαστικών μέσων επιτρέπει τον πειραματισμό σε ελαστικά νήματα για την ανάπτυξη σύνθετων δομών. Αυτή η διερεύνηση απαιτεί την αλληλεπίδραση διαδικασιών εξεύρεσης μορφής, στατικής βελτιστοποίησης και ρομποτικής κατασκευής. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι αναγκαία η ανάπτυξη αλγόριθμων ελέγχου σε ένα ενιαίο υπολογιστικό πλαίσιο που θα μπορούσαν να συμπεριλαμβάνουν:

- Τεχνικές εξεύρεσης μορφής (*form-finding*) βασισμένες σε λογικές ελαστικών σωματιδίων (*particle-spring behavior modeling*),
- Γενετικούς Αλγόριθμους πολλαπλών – στόχων (*Multi-objective Genetic Algorithms*) για τη βελτιστοποίηση της στατικής συμπεριφοράς της κατασκευής με βάση παραμέτρους και περιορισμούς,
- Εξεύρεση αυτοματοποιημένης τεχνικής χειρισμού του υλικού και σχεδιασμός εργαλείου τελικής δράσης για εφαρμογή σε ρομποτικό βραχίονα,
- Προσομοίωση της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα μέσω παραμετρικών προγραμμάτων ελέγχου,
- Πειράματα φυσικών πρωτοτύπων.

4.2_ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΕΥΡΕΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

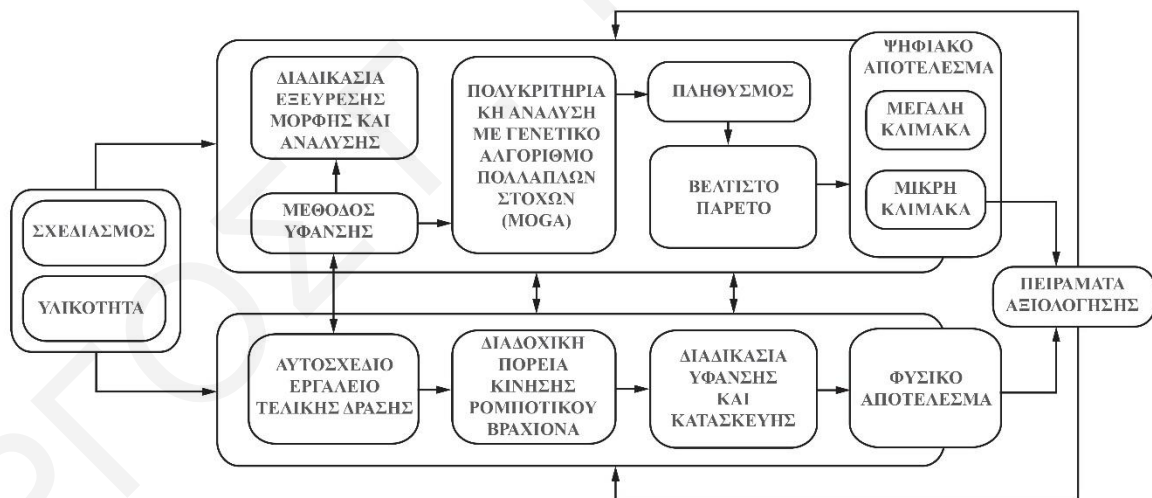
Έχοντας υπόψη τα πιο πάνω, προτείνεται μια ενοποιημένη διαδικασία διερεύνησης, η οποία κινείται σε δυο παράλληλες κατευθύνσεις (Εικόνα 4.1):

- Στη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης,
- Στην εξέλιξη του αλγόριθμου ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα και στη διερεύνηση αυτοσχεδίου εργαλείου τελικής δράσης.

Στην πρώτη κατεύθυνση γίνεται διερεύνηση και επιλογή των κατάλληλων μορφών προς υλοποίηση μέσα από ένα προτεινόμενο αλγόριθμο γεωμετρικής και στατικής ανάλυσης τους σε πολλαπλές κλίμακες έχοντας ως αφετηρία τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους και περιορισμούς του ρομποτικού συστήματος. Η διερεύνηση της ελαστικής συμπεριφοράς των νημάτων και εν συνεχεία των μορφών

προκύπτει μέσα από τη διερεύνηση και εξέλιξη ενός συνεχόμενου μοτίβου ύφανσης που βασίζεται σε μια προσθετική διαδικασία ύφανσης με ρομποτικό βραχίονα για την κατασκευή εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων από ελαστομερές πολυουρεθάνης (Polyurethane Elastomer). Επίσης, μέσα από πολυκριτηριακή ανάλυση με τη χρήση Γενετικών Αλγόριθμων πολλαπλών-στόχων τα αποτελέσματα αξιολογούνται στοχεύοντας στην επιλογή αυτών που είναι κατάλληλα προς υλοποίηση (Κεφάλαιο 5) (Kontonourkis and Tryfonos, 2015a; Kontonourkis and Tryfonos, 2018).

Στην δεύτερη κατεύθυνση γίνεται διερεύνηση όσον αφορά τη δυνατότητα του μοτίβου να υλοποιείται μέσα από αλγόριθμους ελέγχου ενός ρομποτικού βραχίονα και ενός εργαλείου τελικής δράσης για την αποτελεσματική κατασκευή του στο φυσικό χώρο. Η διαδικασία ύφανσης βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη προσθήκη νημάτων και στην αρχική παραμόρφωση του μήκους τους καθώς και στη δημιουργία συνδέσεων-κόμβων. Το μοτίβο ελέγχεται όσον αφορά την αποτελεσματικότητα κατασκευής του μέσω πειραμάτων ψηφιακής προσομοίωσης της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και της λειτουργίας του εργαλείου τελικής δράσης (Κεφάλαιο 6) (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).



Εικόνα 4.1. Διάγραμμα της προτεινόμενης ενοποιημένης μεθοδολογίας με βάση τις δυο κατευθύνσεις, τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και τη ρομποτική κατασκευή.

4.2.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΕΥΡΕΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο πρώτος σκέλος διερεύνησης, παράγονται μια σειρά από εφελκόμενα ελαστικά πλέγματα μέσα από μεθόδους εξεύρεσης μορφής (form-finding) και επίλυσης στατικής ανάλυσης (Barnes, 1988). Η διαδικασία εξεύρεσης μορφής συσχετίζεται με γεωμετρικές,

στατικές και κατασκευαστικές παραμέτρους και περιορισμούς, οι οποίες συνοψίζονται όπως πιο κάτω:

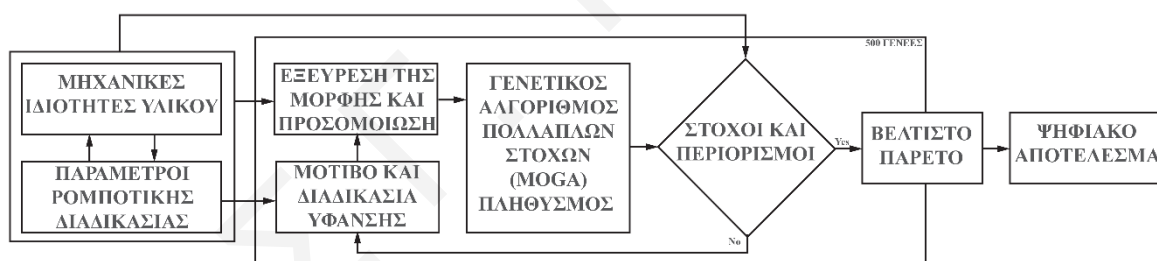
- Αρχική παραμόρφωση μήκους νήματος και αντοχή του ελαστομερούς πολυουρεθάνης,
- Παραμορφώσεις από εξωτερικά φορτία,
- Σημεία τοποθέτησης των αρθρώσεων στα άκρα,
- Αποφυγή χαλάρωσης του νήματος,
- Διατομή του νήματος,
- Κατασκευαστικοί περιορισμοί του εργαλείου τελικής δράσης, όπως ακρίβεια στο μήκος αρχικής παραμόρφωσης του νήματος και μέγιστη διατομή νήματος,
- Παράμετροι εργαλείου τελικής δράσης που επηρεάζουν τη στατική συμπεριφορά του ελαστικού πλέγματος, όπως μέγεθος κόμβου.

Αναλυτικά, η παραμετρική διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης αρχίζει με τον προσδιορισμό του υλικού με εφελκυστικές αντοχές. Όπως έχει αναφερθεί, για αυτή τη διερεύνηση επιλέγονται νήματα ελαστομερούς πολυουρεθάνης (Polyurethane Elastomer), τα οποία διαθέτουν μεγάλη ικανότητα εφελκυσμού σε σχέση με τη δύναμη προέντασης τους με μέτρο ελαστικότητας 0.02 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 25 MPa. Η προσομοίωση του υλικού επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης της τεχνικής ελαστικών σωματιδίων στο λογισμικό *Kangaroo*® (Piker, 2013), *plug-in* για το πρόγραμμα *Grasshopper*®.

Η διαδικασία εξεύρεσης μορφής βασίζεται στην αρχική παραμόρφωση και την αντοχή του νήματος, στη σταθερά των ελατήριων – νημάτων στοχεύοντας στην αποφυγή χαλαρώσεων σε αυτά κατά την κατάσταση ισορροπίας τους (Beccarelli, 2015; Kilian and Ochsendorf, 2005) και στην αύξηση της αντικλαστικής καμπυλότητα του πλέγματος. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εσωτερικής παραμόρφωσης των νημάτων και της στατικής ανάλυσης, η σταθερά του ελατηρίου συσχετίζεται σε τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού βάσει της εξίσωσης $K = \frac{A \cdot E}{L}$, όπου A η διατομή του νήματος, E το μέτρο ελαστικότητας και L το αρχικό μήκος νήματος (Argyris et al., 1974; Lewis, 2003). Τέλος, η αρχική παραμόρφωση που εξασκείται στα νήματα υπολογίζεται ως ο συντελεστής (L/D), όπου L το μήκος του νήματος, D η απόσταση των κόμβων στο αρχικό πλέγμα που παράγεται από την επιφάνεια πριν τη διαδικασία εξεύρεσης της μορφής και $L/D < 1$. Η

μεταβολή του συντελεστή L/D προκαλεί την αρχική παραμόρφωση στα νήματα και τη συνολική παραμόρφωση του ελαστικού πλέγματος και κατά συνέπεια τη μεταβολή της καμπυλότητας του πλέγματος για τη δημιουργία της μορφής σε ισορροπία. Για να αποδειχθεί ότι η διαδικασία εξεύρεσης της μορφής με χρήση *Kangaroo*® λειτουργεί εφελκυστικά, γίνεται σύγκριση της μετατόπισης των κόμβων με πρόγραμμα στατικού ελέγχου CSI SAP2000.

Ο συνδυασμός των παραμέτρων του υλικού, οι περιορισμοί του εργαλείου τελικής δράσης, η καμπυλότητα του πλέγματος, τα σημεία άρθρωσης του πλέγματος, ο έλεγχος αντοχής του υλικού, η μείωση του μήκους του νήματος και των αξονικών φορτίσεων είναι μια σύνθετη διαδικασία αναζήτησης που έχει ως στόχο την εξεύρεση των κατάλληλων μορφών για την κατασκευή τους. Για αυτό τον σκοπό γίνεται χρήση Γενετικών Αλγορίθμων πολλαπλών-στόχων (Deb, 2002) για την εξεύρεση βέλτιστων λύσεων. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως κλειστού βρόγχου ανατροφοδότηση (Kefalas, 2003), και έχει τη δυνατότητα πολυκριτηριακής αξιολόγησης των λύσεων μέσω της δημιουργίας του βέλτιστου Pareto front (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα ενοποιημένης μεθοδολογίας ελέγχου παραμέτρων και περιορισμών υλικού και εργαλείου τελικής δράσης για βελτιστοποίηση των εφελκυσόμενων ελαστικών πλεγμάτων.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης πολλαπλών - στόχων μέσω του λογισμικού *Octopus*® (Deb, 2002), *plug-in* για το *Grasshopper*®, βοηθά στην ανάπτυξη ενός συνόλου από λύσεις, οι οποίες επηρεάζονται από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής μεταβάλλοντας την αρχική παραμόρφωση των νημάτων (L/D), τη διατομή του νήματος και των αρθρώσεων στα άκρα της επιφάνειας. Οι μεταβολές της παραμόρφωσης των νημάτων και της θέσης των αρθρώσεων επηρεάζουν την καμπυλότητα του πλέγματος σε σύγκριση με την αρχική καμπυλότητα της επιφάνειας. Μέσα από τον παραμετρικό έλεγχο των καμπυλοτήτων με βάση εννέα σημεία, γίνεται κατανοητή η γεωμετρία και οι μετακινήσεις των στοιχείων της δομής του πλέγματος. Επιπρόσθετα, η παραμόρφωση του νήματος, η οποία υπολογίζεται

μέσω του συντελεστή L/D , επιφέρει μεταβολές στις εφελκυστικές δυνάμεις και στο μήκος των νημάτων.

Ο συνολικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει ως στόχο την εξεύρεση βέλτιστων λύσεων κατασκευαστικά, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση του συνολικού μήκους νήματος για την κατασκευή και τη μείωση του μέσου όρου της εφελκυστικής τάσης. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του εργαλείου τελικής δράσης σε σχέση με την αντοχή του υλικού κατά τη φάση κατασκευής. Ο πληθυσμός των βέλτιστων λύσεων διαμορφώνει το μέτωπο Pareto, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των καλύτερων στατικά και γεωμετρικά λύσεων, έτοιμες να κατασκευαστούν με τους ρομποτικούς μηχανισμούς. Η διερεύνηση των καλύτερων λύσεων διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη:

- Την αποτελεσματικότητα κατασκευής του προτεινόμενου μοτίβου ύφανσης μέσω του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης,
- Τις βέλτιστες δομές που παράγονται μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατικής επίλυσης.

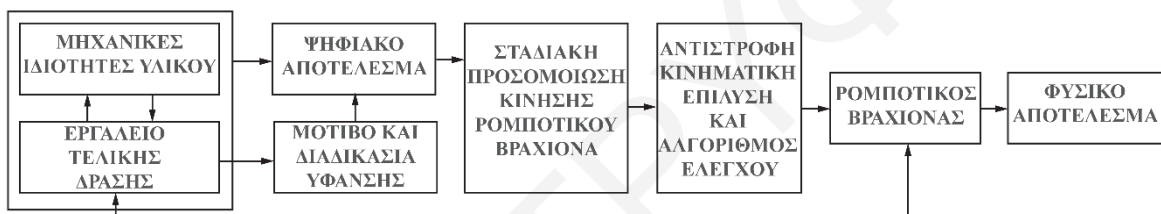
4.2.2_ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΚΑΙ ΑΥΤΟΣΧΕΔΙΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

ΤΕΛΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ

Η λειτουργία του εργαλείου τελικής δράσης είναι αλληλένδετα συσχετισμένη με τη διαδικασία και το ρυθμό ύφανσης αφού σκοπός του είναι η αρχική παραμόρφωση των ελαστικών νημάτων, η τοποθέτηση τους και η δημιουργία ευδιάκριτων κόμβων (Kontonourkis and Tryfonos, 2016). Η κατασκευή των τμημάτων του εργαλείου επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης τρισδιάστατου εκτυπωτή αλλά αυτό έχει περιορισμούς λόγω των διαθέσιμων εμπορεύσιμων υλικών, τα οποία εν πολλής ορίζουν και τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, καθορίζοντας τις διαστάσεις των πειραμάτων. Το εργαλείο εξελίσσεται μέσω της διαδικασίας ορθού-λάθους όπου δοκιμάζονται διάφοροι εναλλακτικοί σχεδιασμοί σύμφωνα με τις αντοχές των μερών υπό την άσκηση φορτίσεων λόγω της προέντασης που προκύπτει από την αρχική παραμόρφωση του μήκους νήματος και της θερμότητας που αναπτύσσεται.

Η κίνηση της ρομποτικής μηχανής βασίζεται στη σταδιακή ανάλυση της πρόσθεσης των νημάτων με το πρόγραμμα *Kangaroo*® (Piker, 2013), *plug-in* για *Grasshopper*®, με

αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ψηφιακής μορφής, η οποία μεταφράζεται σε σημεία κίνησης της. Η κίνηση και ο έλεγχος της ρομποτικής μηχανής γίνεται με προγραμματισμό της στο *HALL®* (Schwartz, 2013), *plug-in για Grasshopper®*, μαζί με τον υπολογισμό της αντίστροφης κινηματικής επίλυσης (*inverse kinematic solver*) (Adrian-Florin et al., 2015) για βραχίονα *ABB IRB2600* και ελεγκτή *IRC5*. Ο αλγόριθμος αναλαμβάνει μέσω του ελεγκτή (*controller*) την κίνηση της ρομποτικής μηχανής και την ενεργοποίηση των διαφόρων τμημάτων του εργαλείου τελικής δράσης (Κεφάλαιο 6) με αποτέλεσμα τον έλεγχο της αρχικής παραμόρφωσης του μήκους νήματος και τη δημιουργία των κόμβων. Μέσω της επαναλαμβανόμενης κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και της λειτουργίας του εργαλείου τελικής δράσης δημιουργείται σταδιακά το εφελκόμενο ελαστικό πλέγμα (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα μεθοδολογίας για τον προγραμματισμό λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα.

Το εργαλείο τελικής δράσης αλλά και η προσθετική διαδικασία ύφανσης στο σύνολο της διερευνώνται τόσο σε ψηφιακό σχεδιαστικό περιβάλλον παραμετρικού σχεδιασμού όσο και σε φυσικό περιβάλλον και εφαρμόζονται για την ανάπτυξη πειραματικών πρωτοτύπων μικρής διάστασης. Τα αρχικά πειράματα στοχεύουν στη βελτίωση της συμπεριφοράς του εργαλείου τελικής δράσης να εκτελεί αποτελεσματικά τόσο τη λειτουργία αρχικής παραμόρφωσης και ελέγχου του μήκους των νημάτων όσο και τη δημιουργία των κόμβων. Η τελική πειραματική διερεύνηση αξιολογείται με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τις δυνατότητες της προτεινόμενης ενοποιημένης διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και ρομποτικής κατασκευής να εφαρμόζεται με ακρίβεια για την κατασκευή εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων.

3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη ενοποιημένη μεθοδολογία σχεδιασμού και κατασκευής στοχεύει στον έλεγχο με ακρίβεια νέων ελαστικών υλικών για την κατασκευή εφελκόμενων πλεγμάτων. Μέσα από την παράλληλη σχέση εξεύρεσης και στατικής ανάλυσης της μορφής αλλά και με την συμπερίληψη κατασκευαστικών παραμέτρων και περιορισμών επιδιώκεται η

δημιουργία ενός αλγόριθμου για τον έλεγχο της ρομποτικής διαδικασίας, η οποία αναφέρεται στην προσθετική ύφανση ελαστικών νημάτων με ακρίβεια σε πολλαπλές διαστάσεις μέσω ενός προτεινόμενου εργαλείου τελικής δράσης.

Η διερεύνηση των βέλτιστων λύσεων γίνεται σε δυο επίπεδα με στόχο την αξιολόγηση του αλγόριθμου όσον αφορά τη δυνατότητα του να χειρίζεται πολυσύνθετες μορφές για την δημιουργία μοτίβων και κατ' επέκταση πορειών ύφανσης ελαστικών υλικών με δυνατότητες μεγάλης παραμόρφωσης. Ο πειραματισμός σε φυσικό επίπεδο μέσω της διερεύνησης του εργαλείου τελικής δράσης και σε ψηφιακό επίπεδο μέσω της διερεύνησης της διαδικασία ύφανσης αποσκοπεί στη συλλογή δεδομένων για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου στο σύνολο της. Τέλος, η χρήση του ρομποτικού βραχίονα και του εργαλείου τελικής δράσης ως μέσα κατασκευής επιτρέπουν τον καινοτόμο πειραματισμό σε τεχνικές κατασκευής με ακρίβεια σε πολλαπλά μεγέθη κατασκευών.

Συμπερασματικά, μέσα από την προτεινόμενη προσθετική διαδικασία γίνεται έλεγχος του νήματος και του μήκους της παραμόρφωσης του καθώς και της δυνατότητας δημιουργίας συνδέσεων-κόμβων. Οι μεταβολές της καμπυλότητας, το μήκος του υλικού, η παραμόρφωση από εξωτερικά φορτία και οι αξονικές δυνάμεις επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα που επιλέγεται μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Έτσι, η αξιολόγηση των φυσικών πειραματισμών και ο υπολογισμός των παραμορφώσεων των νημάτων στο φυσικό περιβάλλον με ψηφιακή μέθοδο αποτύπωσης επιχειρεί το συσχετισμό των ψηφιακών μέσων χειρισμού του υλικού με την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα και την ενεργοποίηση του εργαλείου τελικής δράσης. Αυτό αποσκοπεί στη βελτίωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας αλλά και των επιμέρους διερευνήσεων.

5.0_ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.1_ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία γεωμετρικής ανάπτυξης, εξεύρεσης μορφής (form-finding), στατικής ανάλυσης και πολυκριτηριακής διερεύνησης εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικές παραμέτρους και κατασκευαστικούς περιορισμούς. Η διερεύνηση επικεντρώνεται στην αλγοριθμική ανάπτυξη της διαδικασίας ύφανσης με σκοπό την εξεύρεση μορφής και στη συνέχεια αναφέρεται στην επιλογή λύσεων έτοιμων για κατασκευή μέσω ρομποτικών μηχανισμών. Η εξέλιξη της διαδικασίας βασίζεται στην παράλληλη ανάπτυξη του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης (Κεφάλαιο 6) για τη συνεχόμενη πρόσθεση προεντεταμένων ελαστικών νημάτων από ελαστομερές πολουρεθάνης (*Polyurethane Elastomer*) και τη δημιουργία κόμβων από σιλικόνη (*Silicone elastomers*).

Κατ' επέκταση, βασικός σκοπός της διερεύνησης του κεφαλαίου αυτού είναι η δημιουργία περιπτώσιολογικών μελετών και η αξιολόγηση τους με στατικά κριτήρια και κατασκευαστικούς περιορισμούς, ώστε να διερευνηθεί η συνολική απόδοση του προτεινόμενου μοτίβου ύφανσης. Η αξιολόγηση κινείται σε δυο κατευθύνσεις ανάλογα με τις διαστάσεις των περιπτώσιολογικών μελετών, οι οποίες έχουν μεταβολές σε επιφάνεια διπλής καμπυλότητας:

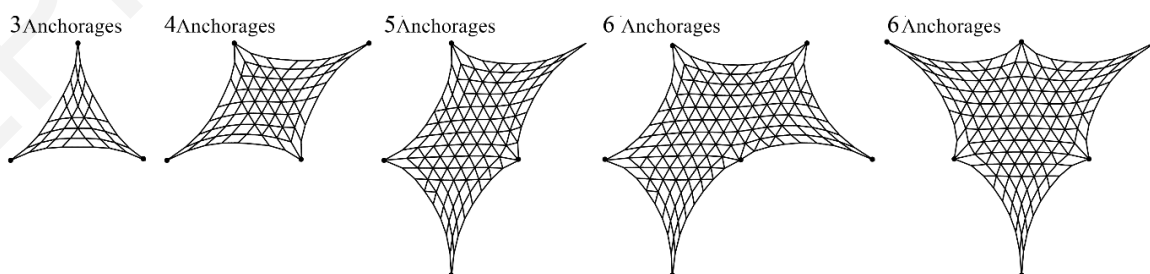
- Η πρώτη κατεύθυνση έχει να κάνει με παραδείγματα πειραματισμού σε μικρή διάσταση και επιδιώκει να αξιολογήσει τη δυνατότητα του αλγόριθμου να προτείνει ελαστικά πλέγματα έτοιμα για κατασκευή με ακρίβεια μέσω συγκεκριμένων ρομποτικών συστημάτων και εργαλείου τελικής δράσης,
- Η δεύτερη κατεύθυνση έχει να κάνει με παραδείγματα σε μεγαλύτερες διαστάσεις πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας και επιδιώκει την αξιολόγηση του αλγόριθμου να προτείνει μορφές γεωμετρικά και στατικά επαρκείς.

5.2_ ΜΟΤΙΒΟ ΥΦΑΝΣΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

Η εξέλιξη του μοτίβου ύφανσης των ελαστικών νημάτων θεωρείται ο συνδεδεμένος κρίκος μεταξύ ψηφιακών διαδικασιών εξεύρεσης μορφής και κατασκευής (Gale and Lewis, 2016)

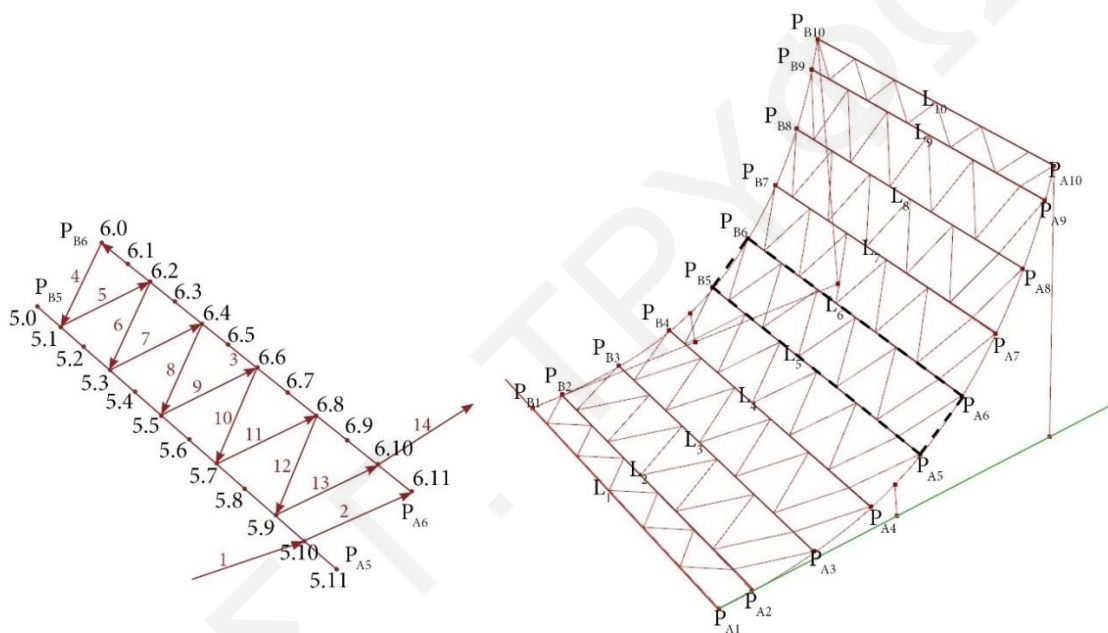
και μπορεί να κατευθύνει τη διαδικασία ανάπτυξης του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης. Ως εκ τούτου, το αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης προσδιορίζεται σταδιακά μέσα από πειραματισμό και φυσικά πρωτότυπα (Κεφάλαιο 6) με την παράλληλη ψηφιακή προσομοίωση της συμπεριφοράς των νημάτων μέσω της μεθόδου ελαστικών σωματιδίων (Kilian and Ochsendorf, 2005) στο ψηφιακό περιβάλλον *Kangaroo*® (Piker, 2013), *plug-in* για *Grasshopper*®. Βασικά κριτήρια για τον προσδιορισμό του μοτίβου ύφανσης είναι η εφελκυστική συμπεριφορά του πλέγματος κατά τη φάση εξεύρεσης μορφής (*form-finding*) και οι περιορισμοί που το αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης μπορεί να έχει στη φάση της προσθετικής διαδικασίας όπου η παραμόρφωση και συγκόλληση των νημάτων λαμβάνουν χώρα.

Στα πλαίσια αυτής την έρευνας, μια σειρά από πρωταρχικές μελέτες με βασικές παραμέτρους και αρχές ύφανσης είχαν εκπονηθεί, συμβάλλοντας στην εξέλιξη του μοτίβου ύφανσης (Kontonourkis and Tryfonos, 2014; Kontonourkis and Tryfonos, 2015a). Αρχικά οι διερευνήσεις βασίστηκαν στην πρόσθεση υλικού εσωτερικά ενός κλειστού πολύγωνου με συγκεκριμένο αριθμό από αγκυρώσεις, δημιουργώντας σταδιακή εφελκυστική παραμόρφωση στα υφιστάμενα νήματα. Μέσα από την αξιολόγηση των πρώτων αποτελεσμάτων διαφάνηκε η αναγκαιότητα συνδυασμού της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής (*form-finding*) με την πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής και την τεχνική ύφανσης (Εικόνα 5.1). Κι αυτό λόγω ενός αριθμού από μηχανικούς περιορισμούς του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης. Συγκεκριμένα, το εργαλείο είχε τη δυνατότητα επαναλαμβανόμενης προσθήκης και αρχικής παραμόρφωσης του νήματος για τη δημιουργία των κόμβων χωρίς την διακοπή της κίνησης του όπως επίσης και τη δυνατότητα δημιουργίας μόνο ενός κόμβου σε κάθε θέση του πλέγματος, κάτι το οποίο δεν μπορούσε να επιτευχθεί με τις αρχικές προτάσεις μοτίβων.



Εικόνα 5.1. Αρχική διερεύνηση της διαδικασίας ύφανσης των ελαστικών πλεγμάτων (Kontonourkis and Tryfonos, 2014).

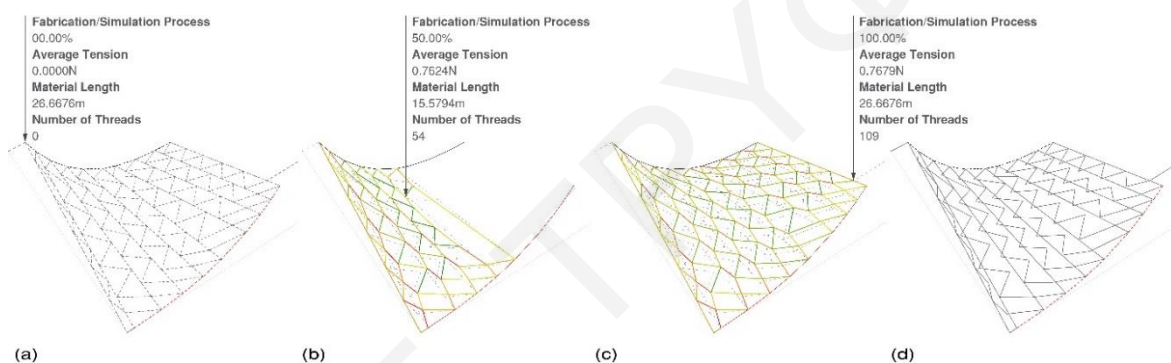
Λαμβάνοντας υπόψη τους πιο πάνω περιορισμούς, προτείνεται ένα συνεχόμενο μοτίβο ύφανσης, το οποίο θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει τις δυνατότητες του εργαλείου αλλά και της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα. Έτσι, αναπτύσσεται και εξελίσσεται σε πειραματικό επίπεδο (Εικόνα 5.2) μια νέα μορφή πλέγματος, η οποία παράγεται από ένα συνεχές νήμα. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη δομή βρίσκεται σε απόσταση από δυο άκαμπτα καλώδια που έχουν τη μορφή καμπυλών A και B, στις οποίες αγκυρώνονται τα πρώτα νήματα και μετέπειτα υποδιαιρούνται σε μικρότερα τρίγωνα μέσα από ένα διαδοχικό ρυθμό ύφανσης που περιγράφεται στην Εικόνα 5.2



Εικόνα 5.2. Διάγραμμα ύφανσης μεταξύ δύο πρωτεύοντων ελαστικών νημάτων και σχέσεις κόμβων (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

Συνοπτικά, η τοποθέτηση των σημείων (P_{Ai} και P_{Bi}) στις καμπύλες A και B ορίζεται από τις παραμέτρους (A_i) και (B_i), οι οποίες παίρνουν τιμές από 25% μέχρι 75% της απόστασης των μεταξύ τους υποδιαιρέσεων. Οι αντίστοιχες απέναντι αγκυρώσεις (P_{Ai} και P_{Bi}) συνδέονται με γραμμές (L_i), όπου ορίζουν τα πρωτεύοντα ελαστικά νήματα. Η υποδιαίρεση των πρωτεύοντων ελαστικών νημάτων (L_i) με τη μονή ακέραια τιμή (D) αποσκοπεί στην δημιουργία σημείων (P) για την ύφανση - σύνδεση και το σχηματισμό τριγωνισμών μεταξύ των βασικών ελαστικών νημάτων (L_i). Τέλος, ο ρυθμός ύφανσης και δημιουργίας των γραμμών περιγράφεται από την εν' συνεχή σχέση $L_i (Pa)$, $L_{i-1} (Pb)$ και $L_{i-1} (Pb_n)$, $L_i (Pa_n)$, όπου $a=0,2,3,4,n$ και $b=1,3,5,7,n'$ ανά γραμμή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το $i-1=P$ επιτυγχάνοντας το τελικό αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει την γεωμετρία του ελαστικού πλέγματος (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

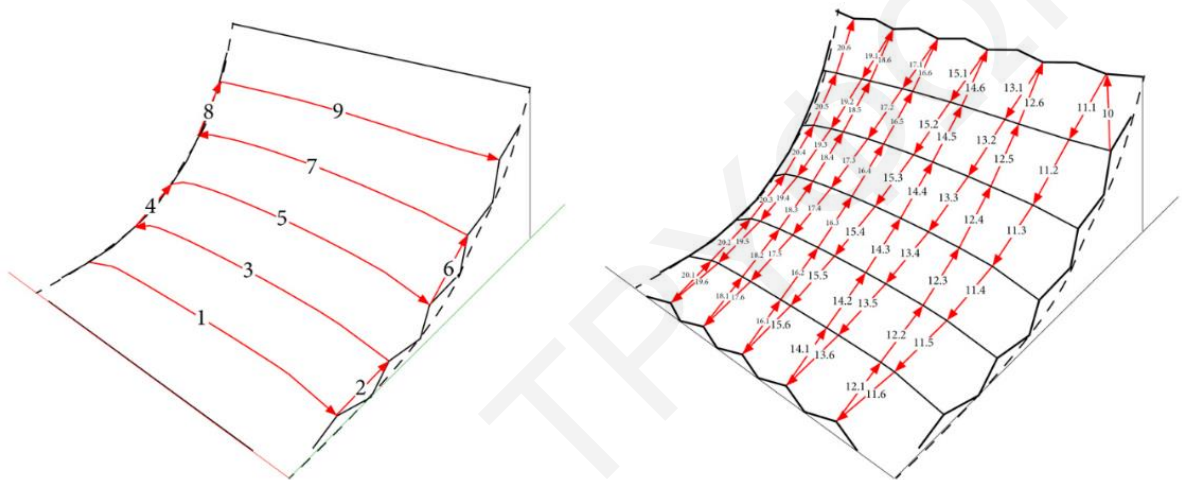
Παρατηρώντας την διαδικασία προσομοίωσης την κίνησης της ρομποτικής μηχανής με την χρήση *HAL®* (Schwartz, 2013) και *Kangaroo®, plug-in για Grasshopper®* (Εικόνα 5.3), διαφαίνεται η συνεχόμενη περιστροφή και αλλαγή της φοράς κίνησης του εργαλείο τελικής δράσης, κάτι το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει απρόσμενες περιστροφές στο υλικού κατά το σχηματισμό των κόμβων. Αυτό θα προκαλούσε ανεπιθύμητες μεταβολές στην παραμόρφωση των νημάτων και θα οδηγούσε σε ανακρίβειες κατά τη διαδικασία εξεύρεσης και προσομοίωσης του πλέγματος. Επίσης, κατά τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής (*form-finding*) και αλλαγής της διάστασης, ή και των υποδιαίρέσεων της, το πλέγμα θα μπορούσε να εμφανίζει προβλήματα στις συνδέσεις μεταξύ των μονάδων-επιφανειών αλλά και στην ισορροπία του συνόλου.



Εικόνα 5.3. Προσθετική διαδικασία, εξεύρεση μορφής και κατασκευαστική προσομοίωση για τη δημιουργία της πορείας κίνησης του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης (Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

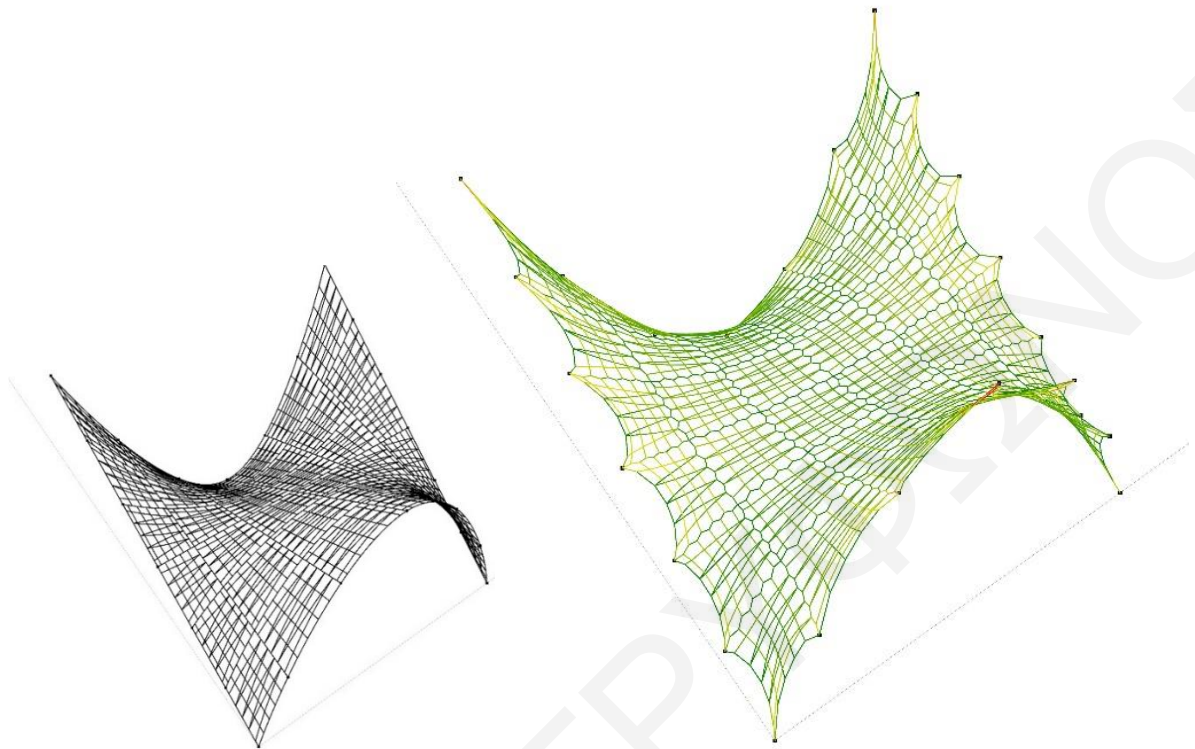
Λαμβάνοντας υπόψη τους προηγούμενους πειραματισμούς, το μοτίβο διαδοχικής ύφανσης εξελίσσεται για να καταλήξει στον τελικό σχεδιασμό του και στη δημιουργία ενός αλγόριθμου διαδοχικής ύφανσης των νημάτων (Εικόνα 5.4). Αρχικά, για το σχηματισμό του μοτίβου χρησιμοποιούνται δύο καμπύλες A και B σε απόσταση (x), στις οποίες η αρχή και το τέλος τους σχηματίζουν δυο γραμμές C και D. Αυτές χωρίζονται σε ίσες αποστάσεις σημείων μέσω της παραμέτρου [N], που αντιπροσωπεύει ακέραιο αριθμό ($N > 9$). Τα σημεία συνδέονται με την επαναλαμβανόμενη διαδοχική σχέση $A_x, B_x, B_{x+2}, A_{x+2}$ μέχρι ($x = N-2$) για το σχηματισμό των αρχικών γραμμών – ελατηρίων. Για παράδειγμα, όταν το N είναι 13 (Εικόνα 5.4) οι συνδέσεις - κόμβοι στη πρώτη διεύθυνση είναι A3, B3, B5, A5, A7, B7, B9, A9, A11, B11, όπου οδηγούν στην δημιουργία των γραμμών - ελατηρίων 1-9. Στην συνέχεια, η τελευταία γραμμή-ελατήριο συνδέεται με το σημείο D2 και δημιουργεί την γραμμή-ελατήριο ‘Σύνδεσμος διαδοχικής ροής’ 10. Αυτή έχει μηδενική αρχική παραμόρφωση και δεν συμμετέχει στην συνολική παραμόρφωση του δομικού πλέγματος. Η διαδοχική διαδικασία σύνδεσης νημάτων και δημιουργίας κόμβων συνεχίζει με την σχέση

D_2 , C_3 , D_{2+w} , C_{3+i} , όπου στην καμπύλη D το x είναι ζυγός αριθμός (w) που αυξάνεται ανά δύο και στην καμπύλη C ακεραίος αριθμός (i) που αυξάνεται ανά δύο. Η γραμμές - ελατήρια που σχηματίζονται διαχωρίζουν τις υφιστάμενες γραμμές σε μικρότερες στην άλλη διεύθυνση και δημιουργούν τους διαδοχικούς κόμβους-συνδέσεις μεταξύ τους. Για παράδειγμα, όταν $N=13$ η σύνδεση D_2 , C_3 τέμνει την γραμμή 9 ως 1 και δημιουργεί τις γραμμές - ελατήρια 11.1-11.6. Τέλος, τα περιμετρικά σημεία θεωρούνται αρθρώσεις του πλέγματος (Kontonourkis and Tryfonos, 2018; Tryfonos, 2018).

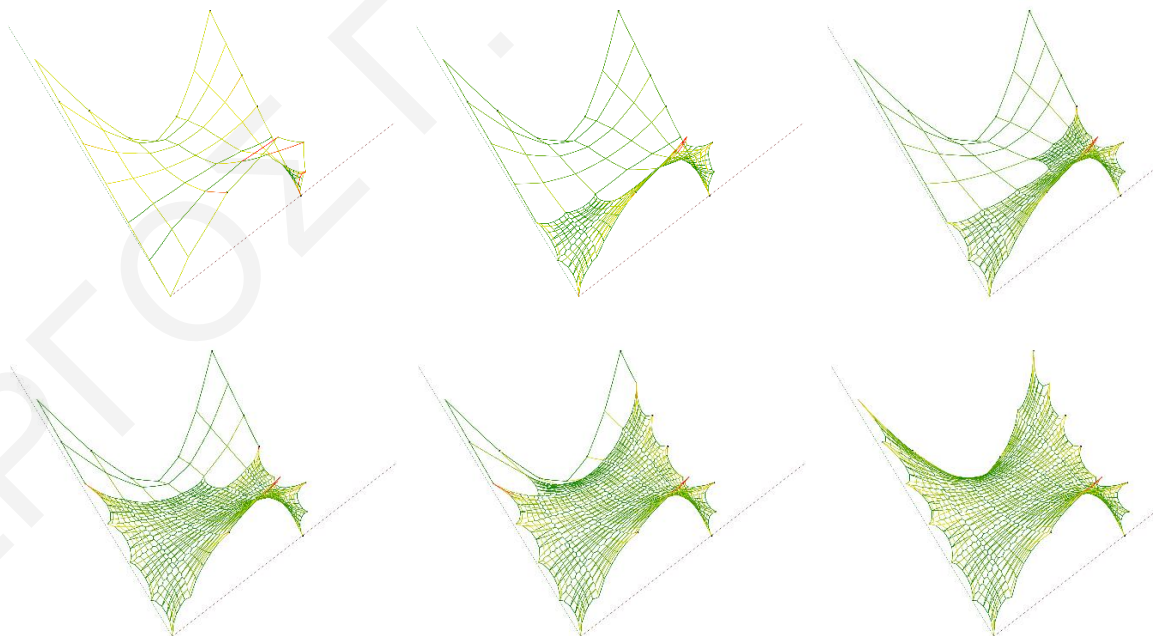


Εικόνα 5.4 Διάγραμμα τελικού ρυθμού ύφανσης, παραμόρφωσης νημάτων και δημιουργίας κόμβων με $N=13$.

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος διαδοχικός ρυθμός ύφανσης που δημιουργείται περιορίζει τις περιστροφές του εργαλείου τελικής δράσης στις συνδέσεις με τις εξωτερικές καμπύλες και γραμμές. Επίσης, το μοτίβο παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής και επανάληψης του σε οποιαδήποτε επιφάνεια αλλά και επέκτασης του στους τρεις άξονες XYZ, επιτρέποντας την προσαρμογή της διάστασης του μοτίβου (Εικόνα 5.5). Μέσα από την αρχική προσομοίωση ύφανσης 36 μονάδων διαφαίνεται η ικανότητα του συστήματος να επεκτείνεται σε πολλαπλές κλίμακες, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της ρομποτικής μηχανής και του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και της αντοχής των ελαστικών νημάτων σε παραμορφώσεις από εξωτερικά φορτία. Επεκτείνοντας, διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός πρόσθεσης των διαδοχικών κόμβων και νημάτων, η συνεχόμενη εναλλαγή της διεύθυνσης ύφανσης από την καμπύλη $A+B$ και $C+D$ και η χρήση ‘συνδέσμων ροής’ μπορεί να βοηθήσουν στην εξεύρεση μορφής (form-finding) και προσομοίωσης μεγαλύτερων διαστάσεων εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.5. Αρχική και τελική μορφή εφελκυσμένου πλέγματος 36 μονάδων μέσω της προσομοίωσης με τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής. Αριστερά: Οι γραμμές και οι κόμβοι του αρχικού μοτίβου ύφανσης, Δεξιά: Το αποτέλεσμα της μορφής του πλέγματος με $L/D=85\%$ και θέση κόμβων = 50%.



Εικόνα 5.6. Διαδοχική προσομοίωση της πρόσθεσης 36 μονάδων και διαδικασία εξεύρεσης μορφής.

5.3_ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Η σχεδιαστική ανάπτυξη των περιπτωσιολογικών μελετών στοχεύει στη διερεύνηση της γεωμετρικής και στατικής συμπεριφοράς των εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και των ρομποτικών μηχανισμών. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δυνατότητας κίνησης του εργαλείου τελικής δράσης και της ρομποτικής μηχανής.

Για την ανάπτυξη του μοτίβου ύφανσης αρχικά ορίζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν τη γεωμετρική καμπυλότητα, τη μεταβολή της επιφάνειας, τού μέγεθος του και περιγράφονται πιο κάτω:

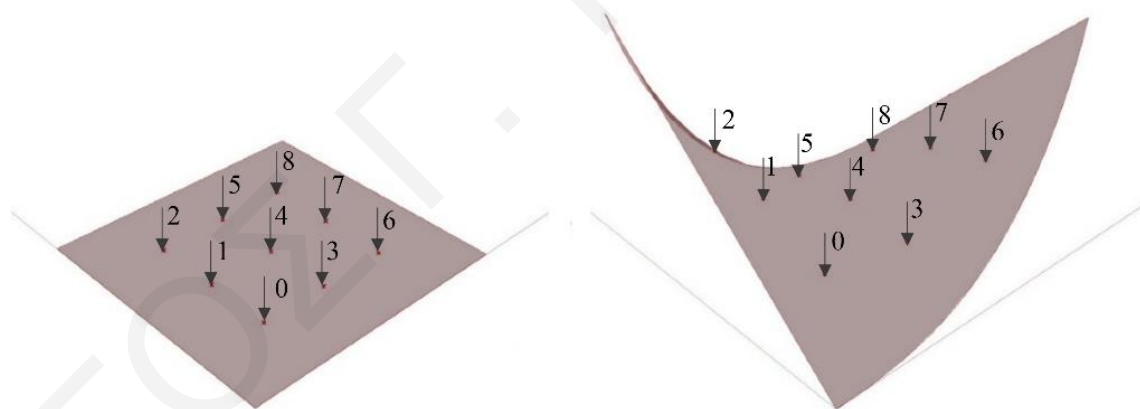
- **D** - διαίρεση της επιφάνειας σε μονάδες, στις οποίες προσαρμόζεται το μοτίβο ύφανσης,
- **Y** - απόσταση των δύο βασικών καμπυλών A και B,
- **X** - διάνυσμα απόστασης μεταξύ της αρχής και του τέλους των καμπυλών A και B,
- **Z** - μεταβολή της καμπύλης A και B στον κατακόρυφο άξονα που επιτυγχάνεται με την μετακίνηση τριών σημείων: αρχή, μέση και τέλος.

Πιο συγκεκριμένα, για την ανάπτυξη των περιπτωσιολογικών μελετών μικρού μεγέθους χρησιμοποιείται μία μονάδα επιφάνειας με διαστάσεις $X, Y, Z = 0.7\mu$ και $D = 1$. Το μέγεθος αυτό καθορίζεται από περιορισμούς που έχουν να κάνουν με τον χώρο εργασίας και την εφικτή απόσταση στην οποία μπορεί να φτάσει η ρομποτική μηχανή (ABB IRB2600), η οποία είναι 1,65m. Επιπλέον, για την αξιολόγηση του αλγόριθμου όσον αφορά την ανάπτυξη δομών σε οποιαδήποτε μέγεθος και *Gaussian* καμπυλότητα, χρησιμοποιείται επιφάνεια με διαστάσεις $X, Y, Z = 4$ και $D = 6$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία 36 συνολικά μονάδων ύφανσης σε μία επιφάνεια με μέγεθος πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας. Οι αλλαγές στους άξονες X και Y έχουν σκοπό την κατανόηση της προτεινόμενης ακολουθίας ύφανσης αλλά και την απόδοση του ελαστικού υλικού σε μεγαλύτερη διάσταση με την εφαρμογή εξωτερικών φορτίων.

5.3.1_ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Για τη δημιουργία των περιπτωσιολογικών μελετών δημιουργούνται οκτώ κατηγορίες τυπολογίας σε σύστημα $1x1x1m$, πράγμα που επιτρέπει την εύκολη μεταβολή της

διάστασης τους στις δύο περιπτώσεις αξιολόγησης. Παρόμοια μέθοδος ανάλυσης χρησιμοποιείται και από τους Bridgens και Birchall (2012), οι οποίοι μελετούν επτά περιπτώσεις μεταβολών τριών διαφορετικών κατηγοριών γεωμετρίας “*the conic, hyperbolic paraboloid (‘hypar’) and barrel vault*”. Επίσης, διερευνούν χαρακτηριστικά του υλικού και της συμπεριφορά της μορφής, τα οποία επηρεάζουν την διαδικασία σχεδιασμού και στατικής ανάλυσης. Κατά συνέπεια, για τη μεταβολή των οκτώ κατηγοριών τυπολογίας η αρχική γεωμετρία των καμπυλών A και B βρίσκεται σε ευθεία γραμμή και αναλόγως των παραμέτρων, ένα ή δύο από τα τρία σημεία (αρχή, μέση και τέλος), μεταβάλλονται σταδιακά για να δημιουργήσουν οκτώ υποκατηγορίες. Σημαντικό για τη μελέτη είναι η σύγκριση των γεωμετρικών μεταβολών της επιφάνειας, η οποία επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της αρχικής τιμής *Gaussssian* καμπυλότητας (K_a) και της τελικής τιμής *Gaussssian* καμπυλότητας (K_t) και προκύπτει από τη μορφή του ελαστικού πλέγματος σε ισορροπία. Για τη μέτρηση της αρχικής τιμής, η *Gaussssian* καμπυλότητα (K_a) ορίζεται με βάση εννέα εσωτερικά σημεία, ένα εκ των οποίων είναι το κέντρο της επιφάνειας και υπολογίζεται ως μέσος όρος μετακίνησης (Kontonourkis and Tryfonos, 2018; Tryfonos, 2018) (Εικόνα 5.7).

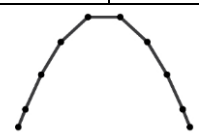
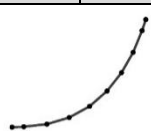
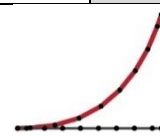
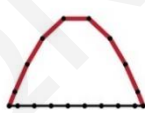


Εικόνα 5.7. Σημεία μέτρησης τιμής *Gaussssian* καμπυλότητας (K_a) σε δύο παραδείγματα περιπτώσιολογικών μελετών.

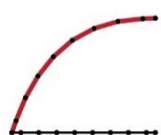



Σκοπός του παραμετρικού μοντέλου μετακίνησης της επιφάνειας είναι η διερεύνηση της μεταβολής κάθε κατηγορίας τυπολογίας μέσα από τη εφαρμογή του μοτίβου στην αρχική και στην τελική επιφάνεια, η οποία προκύπτει μέσα από την προσομοίωση της φυσικής συμπεριφοράς του εφελκόμενου ελαστικού πλέγματος. Οι κατηγορίες τυπολογίας, οι μεταβολές (Z) στον κατακόρυφο άξονα και το αποτέλεσμα της καμπυλότητας ανά σημείο

$Ka = (-) \begin{bmatrix} 2 & 5 & 8 \\ 1 & 4 & 7 \\ 0 & 3 & 6 \end{bmatrix}$ παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, Πίνακα 5.2 και στους Πίνακες I.1-

I.8.

Κατηγορίες τυπολογίας Καμπύλες		A			B			C			D		
		A	B		A	B		A	B		A	B	
C [m]	Αρχή	0	0		0	0		0	0		0	0	
	Μέσο	0-0.7	0-0.7		0-0.1	0-0.1		0	0-0.1		0	0-0.7	
	Τέλος	0	0		0-0.8	0-0.8		0	0-0.8		0	0	
Μεταβολή όψης πλέγματος													
(-)Ka		0	0	0	0	0	0	0.15	0.85	1.24	1.77	0	1.77
		0	0	0	0	0	0	0.09	0.6	1.09	0.75	0	0.75
		0	0	0	0	0	0	0.05	0.33	0.66	0.30	0	0.30

Πίνακας 5.1. Κατηγορίες τυπολογιών A ως D. Μεταβολή των καμπύλων A ή και B και αποτελέσματα μέγιστης μεταβολής καμπυλότητας.

Κατηγορίες τυπολογίας Καμπύλες		E			F			G			H		
		A	B		A	B		A	B		A	B	
C [m]	Αρχή	0	0		0-0.8	0		0	0-0.8		0	0.8	
	Μέσο	0	0-0.7		0	0-0.8		0-0.1	0-0.1		0.1	0.1-0.8	
	Τέλος	0	0-0.8		0-0.8	0		0-0.8	0		0.8	0	
Μεταβολή όψης πλέγματος													
(-)Ka		1.46	0.44	0.05	2.79	0	2.79	1.46	1.92	1.32	7.92	1.18	0.07
		0.81	0.24	0.03	12.68	0	12.68	2.01	3.02	2.01	6.38	1.18	0.07
		0.44	0.14	0.02	2.79	0	2.79	1.32	1.92	1.46	1.56	0.82	0.07

Πίνακας 5.2. Κατηγορίες τυπολογιών E ως H. Μεταβολή των καμπύλων A ή και B και αποτελέσματα μέγιστης μεταβολής στην καμπυλότητα.

Αναλυτικά, η κατηγορία τυπολογίας A (Εικόνα 5.8) παρουσιάζει μεταβολή στο μεσαίο σημείο στην καμπύλη A και B από 0-0,7 m με τα σημεία αρχής και τέλους να παραμένουν σταθερά με μηδενική τιμή μεταβολής. Οι μεταβολή των παραμέτρων δημιουργεί οκτώ περιπτώσεις γεωμετριών (A.1) ως (A.8) (Πίνακας I.1). Η κάθε μεταβολή συμβαίνει με την αύξηση των μεσαίων σημείων ανά 0.1 m. Μέσω της μεταβολής αυτής παρατηρείται ότι και στις οκτώ περιπτώσεις η τιμή της *Gaussian* καμπυλότητας (*Ka*) είναι μηδενική.



Εικόνα 5.8. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας A.

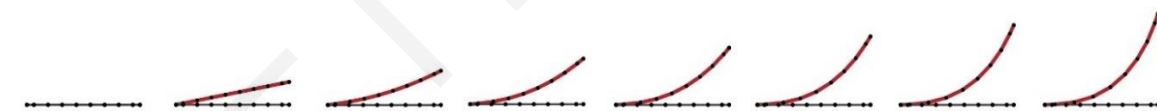
Παρομοίως, στην κατηγορία τυπολογίας B (Εικόνα 5.9) παρουσιάζονται οκτώ περιπτώσεις μεταβολής των καμπύλων A και B. Η μεταβολή συμβαίνει με τη μετακίνηση

των μεσαίων σημείων σε (B.1) = 0 , (B.2) = 0.05m και (B.3)-(B.8) = 0.1 m και τη μεταβολή της παραμέτρου στα τελικά σημεία των καμπύλων με αύξηση 0,1m ανά περίπτωση, δηλαδή από (B.1) = 0 μέχρι (B.8) = 0,8 m (Πίνακας I.2). Οι μεταβολές προκαλούν αλλαγή της γεωμετρίας σε αντίθεση με την τιμή της *Gaussian* καμπυλότητας (K_a), η οποία παραμένει μηδενική. Στην κατηγορία τυπολογίας A και B η μηδενική τιμή (K_a) είναι αποτέλεσμα της εξίσωσης $K_a = \frac{1}{R_1} * \frac{1}{R_2}$, όπου R_2 παραμένει πάντοτε σταθερό και ορίζεται ως $R_2 = \infty$ και κατά συνέπεια $K_a = 0$ (Block et al., 2014).



Εικόνα 5.9. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας B.

Στην κατηγορία τυπολογίας C (Εικόνα 5.10) η καμπύλη A παραμένει σταθερή και οι μεταβολές συμβαίνουν μόνο στην καμπύλη B, όπου το μεσαίο σημείο μεταβάλλεται στην περίπτωση (C.2) με τιμή 0,1 m και παραμένει σταθερό στις υπόλοιπες περιπτώσεις, από (C.3) έως (C.8). Παράλληλα, το τελικό σημείο μεταβάλλεται κατά 0.1 m ανά περίπτωση από (C.1) μέχρι (C.8), με μέγιστη τιμή το 0,8 m (Πίνακας I.3). Η μεταβολή προκαλεί σταδιακή αύξηση της *Gaussian* καμπυλότητας στους δύο άξονες (UV) της γεωμετρίας ανά περίπτωση με μέγιστη τιμή $K_a = -1.24$ μονάδες στο σημείο 8.



Εικόνα 5.10. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας C.

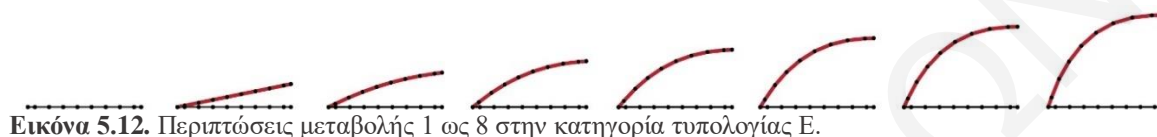
Παρομοίως, στην κατηγορία τυπολογίας D (Εικόνα 5.11) η μεταβολή συμβαίνει μόνο στην καμπύλη B, όπου τα σημεία αρχής και τέλους παραμένουν σταθερά και το μεσαίο σημείο μεταβάλλεται 0,1 m ανά περίπτωση από (D.1) έως (D.8) με μέγιστη τιμή 0,7 m (Πίνακας I.4). Η μεταβολή προκαλεί συμμετρική αλλαγή της καμπυλότητας στα σημεία 0,1,2 και 6,7,8 αντίστοιχα, με μέγιστη τιμή $K_a = -1.77$ μονάδες στα σημεία 2 και 8. Σε όλες τις περιπτώσεις η καμπυλότητα των σημείων 3,4,5 παραμένει μηδενική.



Εικόνα 5.11. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας D.

Ο συνδυασμός των περιπτώσεων C και D δημιουργεί την κατηγορία τυπολογίας E (Εικόνα 5.12). Δηλαδή η καμπύλη A παραμένει σταθερή και οι μεταβολές συμβαίνουν στο μεσαίο και τελικό σημείο της καμπύλης B. Στην περίπτωση (E.2) το μεσαίο σημείο και το

τελικό σημείο μεταβάλλονται στον κατακόρυφο άξονα με τιμές 0,1 και 0,2 m αντίστοιχα. Ακολούθως, στις περιπτώσεις (E.3) ως (E.8) τα σημεία μεταβάλλονται ανά 0,1 m ανά περίπτωση με μέγιστη τιμή 0,7 m στο μεσαίο σημείο και 0,8m στο τελικό σημείο. Η μετακίνηση των σημείων προκαλεί μέγιστη μεταβολή της καμπυλότητας $K\alpha = -1.46$ μονάδες στο σημείο 2 και ελάχιστη μεταβολή στα σημεία 6,7,8 με τιμή $K\alpha$ από -0,3 ως -0,5 μονάδες (Πίνακας I.5).



Εικόνα 5.12. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας E.

Η κατηγορία τυπολογίας F (Εικόνα 5. 13) παρουσιάζει μεταβολή και στις δύο καμπύλες. Η καμπύλη A διατηρεί το μεσαίο σημείο σταθερό και μεταβάλλει την αρχή και το τέλος της. Αντιθέτως, η καμπύλη B διατηρεί την αρχή και το τέλος σταθερό και η μεταβολή συμβαίνει στο μεσαίο σημείο. Τα τρία μεταβαλλόμενα σημεία μετακινούνται στον κατακόρυφο άξονα με την ίδια αριθμητική τιμή ανά περίπτωση.

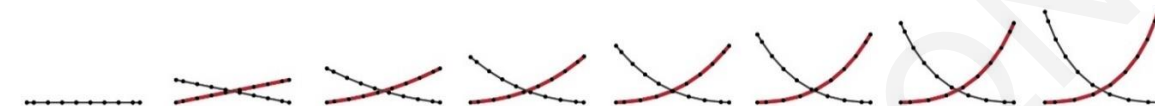


Εικόνα 5. 13. Περίπτωση μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας F.

Οι τιμή των παραμέτρων της περίπτωσης (D.1) ισούται με 0, στην περίπτωση (F.2) η τιμή ορίζεται στα 0.2 m και από την περίπτωση (F.3) ως (F.8) η μετατόπιση συμβαίνει 0.1 m ανά περίπτωση με μέγιστή τιμή 0.8 m (Πίνακας I.6). Η σταδιακή μεταβολή των παραμέτρων του ύψους προκαλεί μεταβολή της *Gaussian* καμπυλότητας στα σημεία 0,1,2 και 6,7,8. Τα σημεία 0,2,6,8 και 1,7 παρουσιάζουν την ίδια τιμή καμπυλότητας, με μέγιστη τιμή $K\alpha$ στα σημεία 0,2,6,8 $K\alpha = -2,79$ μονάδες και στα σημεία 1,7 $K\alpha = -12,68$ μονάδες. Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της *Gaussian* καμπυλότητας των σημείων 3,4,5 είναι $K\alpha = 0$.

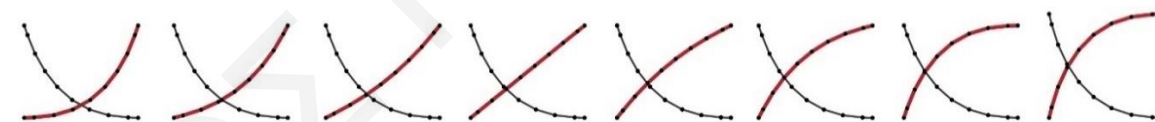
Αντίθετα από την κατηγορία τυπολογίας C όπου η μεταβολή συμβαίνει στην B καμπύλη, στην κατηγορία τυπολογίας G (Εικόνα 5.14) η μεταβολή συμβαίνει και στις δύο καμπύλες. Στην καμπύλη A το τελικό σημείο και στην καμπύλη B το αρχικό σημείο παραμένουν αμετάβλητα. Η μεταβολή στην καμπύλη A, ορίζεται από τη σταδιακή αύξηση της τιμής του αρχικού σημείου με μετακίνηση στον κατακόρυφο άξονα από 0-0,8 m στις περιπτώσεις από (G.0) ως (G.8) και μεταβολή του μεσαίου σημείου μόνο στην περίπτωση (G.1) με τιμή 0,1 m. Παρομοίως, στην καμπύλη B η μεταβολή στο κατακόρυφο άξονα συμβαίνει με τη σταδιακή αύξηση της τιμής του τελικού σημείου από 0 - 0,8 m ανά περίπτωση από (G.0) ως

(G.8) και παράλληλη μεταβολή του μεσαίου σημείου στην περίπτωση (G.1) (Πίνακας I.7). Σε κάθε περίπτωση, η *Gaussian* καμπυλότητα αυξάνεται ανάλογα με τη μετακίνηση των σημείων στον κατακόρυφο άξονα. Βάσει των αποτελεσμάτων και των συγκρίσεων των περιπτώσεων παρατηρείται ίδια τιμή *Gaussian* καμπυλότητας στα σημεία 0 και 8, 2 και 6, 1 και 7, 3 και 5, με τιμές καμπυλότητας $K\alpha=-1,32$, $K\alpha=-1.46$, $K\alpha=-2.01$, $K\alpha=-1.92$ μονάδες αντίστοιχα, και μέγιστη τιμή στο σημείο 4 με $K\alpha=-3.02$ μονάδες.



Εικόνα 5.14. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας G.

Η κατηγορία τυπολογίας H (Εικόνα 5.15) παρουσιάζει περιπτώσεις, οι οποίες είναι συνέχεια των μεταβολών που εμφανίζονται στην κατηγορία τυπολογίας G και συγκεκριμένα της περίπτωσης (G.8). Σε αυτή την κατηγορία τυπολογίας επιχειρείται μεταβολή στον κατακόρυφο άξονα του μεσαίου σημείου της καμπύλης B από 0.1 ως 0.8, δημιουργώντας 7 επιπρόσθετες περιπτώσεις (Πίνακας I.8). Η μεταβολή αυτή προκαλεί αύξηση και μετατόπιση της μέγιστης τιμής της *Gaussian* καμπυλότητας από το σημείο 4 στο σημείο 1 και 2. Στην περίπτωση (F.6) παρουσιάζεται μέγιστη τιμή $K\alpha = -7.01$ μονάδες στο σημείο 1 και $K\alpha = 4.26$ μονάδες στο σημείο 2. Η περίπτωση (H.8) παρουσιάζει μέγιστη τιμή $K\alpha=-7.92$ μονάδες στο σημείο 2 και $K\alpha = -6.35$ μονάδες στο σημείο 1.



Εικόνα 5.15. Περιπτώσεις μεταβολής 1 ως 8 στην κατηγορία τυπολογίας H.

Μέσα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρείται πως η κατηγορία τυπολογίας D παρουσιάζει την μέγιστη τιμή *Gaussian* καμπυλότητας $K\alpha = -12.68$ μονάδες και οι κατηγορίες τυπολογίας A και B, μηδενική τιμή. Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο Κεφάλαιο 3.2, στο οποίο γίνεται αναφορά στη δημιουργία αντικλαστικών επιφανειών και στην εφελκυστική συμπεριφορά τους, σημειώνεται ότι η έλλειψη καμπυλότητας απαιτεί περισσότερη παραμόρφωση των νημάτων (Lewis, 2003; Lewis and Gosling, 1993). Κατά συνέπεια, οι κατηγορίες τυπολογίας A και B αναμένεται να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη παραμόρφωση και η κατηγορία τυπολογίας F την ελάχιστη παραμόρφωση. Οι μορφές που προκύπτουν από την κατηγορία τυπολογίας F κατατάσσονται στην κατηγορία μορφής σέλας και θεωρούνται ιδανικές για εφελκυστικές κατασκευές (Bechthold, 2008).

Συγκριτικά, με τη μετακίνηση της καμπύλης B και τη δημιουργία των περιπτώσεων της κατηγορίας τυπολογίας C μέγιστης καμπυλότητας $K_a = -1.24$ μονάδες στο σημείο 8 σε σχέση με την κατηγορία τυπολογίας G που μεταβάλει παρομοίως και τις δύο καμπύλες (A και B), παρατηρείται αύξηση της καμπυλότητας σε $K_a = -3.02$ μονάδες με μετατόπιση στο σημείο 4 (κέντρο). Παράλληλα, δημιουργείται συμμετρική κατανομή της καμπυλότητας στα περιφερειακά σημεία 0,1,2,3,5,6,7,8. Επίσης συγκρίνοντας τις κατηγορίες τυπολογίας A και D, παρατηρείται συμμετρική αύξηση της καμπυλότητας στα σημεία 0,1,2 και 6,7,8 με μέγιστη και ελάχιστη τιμή $K_a = -1.77$ μονάδες και $K_a = -0.30$ μονάδες αντίστοιχα. Αντιθέτως, η καμπυλότητα στα σημεία 3,4,5 παραμένει πάντοτε μηδενική. Τέλος, στις περιπτώσεις της κατηγορίας τυπολογίας H παρατηρείται αύξηση της καμπυλότητας σε $K_a = -7.92$ μονάδες σε σύγκριση με τις περιπτώσεις της κατηγορίας τυπολογίας G. Κατά συνέπεια, διαπιστώνεται ότι η μετακίνηση των στηρίξεων για επίτευξη ασυμμετρίας μπορεί να προκαλέσει αύξηση της καμπυλότητας.

5.3.2_ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Προκειμένου να δημιουργηθεί η τελική μορφή του εφελκόμενου ελαστικού πλέγματος και να οριστεί η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα διερευνάται αλγόριθμος εξεύρεσης μορφής (form-finding) με τη χρήση της μεθόδου ελαστικών σωματιδίων βάσει του *Kangaroo*, *plugin* (Piker, 2013) για *Grasshopper*® (Rutten, 2018), στο περιβάλλον του προγράμματος *Rhinoceros 5*® (Robert McNeel, 2018). Βασικός σκοπός του αλγόριθμου είναι η δημιουργία μίας συνολικής ροής εργασίας για την επεξεργασία της γεωμετρίας των ελαστικών πλεγμάτων από νήματα ελαστομερούς πολυουρεθάνης (*Polyurethane Elastomer*) και εν συνεχεία, η ρομποτική κατασκευή της. Το ελαστομερές πολυουρεθάνης διαθέτει μεγάλες δυνατότητες εφελκυσμού και παραμόρφωσης $\sigma_{ts} = 25$ MPa με μέτρο ελαστικότητας $E = 0.02$ GPa, κάτι το οποίο επιτρέπει τον πειραματισμό σε κατασκευές μικρών διαστάσεων.

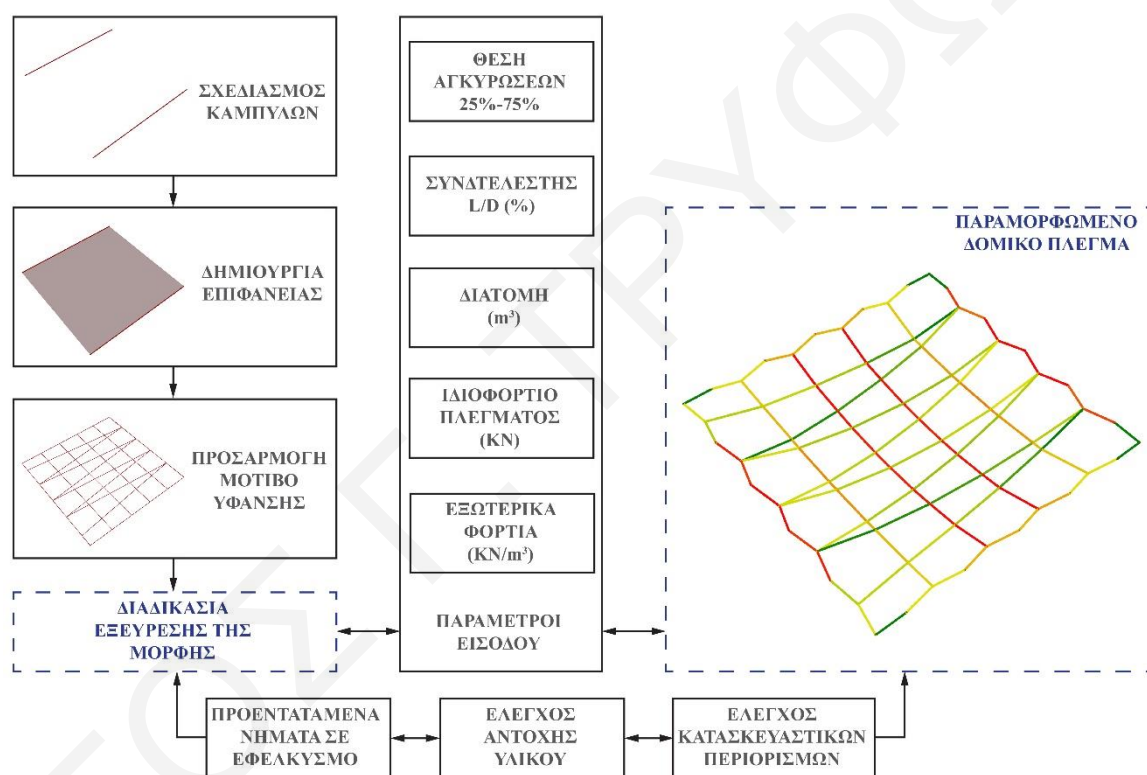
Ο αλγόριθμος εξεύρεσης μορφής (form-finding) βασίζεται σε σχεδιαστικές και στατικές παραμέτρους και στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Εκτενέστερα, η διαδικασία αρχίζει με τον καθορισμό δύο καμπύλων στο περιβάλλον του *Rhinoceros 5*® και *Grasshopper*® (Rutten, 2018). Οι δυο καμπύλες μετατρέπονται σε επιφάνεια και μετέπειτα υποδιαιρούνται σε μονάδες επιφάνειας ανάλογα με τις παραμέτρους υποδιαίρεσης (*Div*). Ακολούθως, στις μονάδες επιφάνειας προσαρμόζεται το μοτίβο ύφανσης όπως αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο_5.2, καθορίζοντας παράλληλα τα ελατήρια και τους κόμβους του πλέγματος. Οι

κόμβοι που βρίσκονται στις εξωτερικές πλευρές των μονάδων αλλά και της αρχικής επιφάνειας καθορίζονται ως αγκυρώσεις στο αρχικό πλέγμα. Επιπρόσθετα, οι περιμετρικοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να μετακινούνται 25 - 75 % σε σχέση με τις γειτνιαζουσες αγκυρώσεις για να αποφεύγονται επικαλύψεις μεταξύ τους (Εικόνα 5.16). Η πιο πάνω μεταβολή επηρεάζει την γωνία σύνδεσης των νημάτων με τους κόμβους και κατά συνέπεια, επηρεάζει την τυπολογία του πλέγματος, την καμπυλότητα και τέλος τη στατική συμπεριφορά του (Beccarelli, 2015; Jae-Yeol and Jang-Bog, 2002; Lewis, 2003).

Επιπρόσθετα, για τη δημιουργία της αρχικής παραμόρφωσης στα νήματα χρησιμοποιείται η παράμετρος L/D. Αυτή μεταβάλλει το αρχικό μήκος του ελατηρίου σε σχέση με την αρχική απόσταση από τον κόμβο - σημείο μεταξύ 70 – 100 % με το ποσοστό 100 % να καθορίζει $L = D$ (Εικόνα 5.16). Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τη δυνατότητα του εργαλείου τελικής δράσης να εκτελεί με ακρίβεια τις λειτουργίες της συγκόλλησης και του ελέγχου του μήκους του νήματος. Σύμφωνα με την έρευνα των (Kilian and Ochsendorf, 2005) και (Ahlquist and Menges, 2012), η προσομοίωση της συμπεριφοράς κατασκευών με την τεχνική ελαστικών σωματιδίων (particle-spring behavior) μερικές φορές μπορεί να προκαλέσει θλίψη σε κάποια εκ των μελών τους, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη χαλάρωση των νημάτων σε φυσικό περιβάλλον. Έτσι, η μεταβολή του αρχικού μήκους των νημάτων και η μείωση του συντελεστή (L/D) επιδιώκει τον έλεγχο και την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων.

Η μεταβολή του συντελεστή (L/D) επηρεάζει τη σταθερά του ελατηρίου (K) με το μέτρο ελαστικότητας (E) (Argyris et al., 1974; Lewis, 2003) και υπολογίζεται για κάθε ελατήριο από την εξίσωση $K = \frac{A \cdot E}{L}$ (Argyris et al., 1974; Lewis, 2003) (Εικόνα 5.16). Επιπρόσθετα, για την προσομοίωση του ιδιοβάρους της κατασκευής, το ιδιοφορτίο των νημάτων υπολογίζεται ως γραμμικό φορτίο με πυκνότητα υλικού $\rho = 0.89$ και εμβαδό κυκλικής διατομής νήματος διαμέτρου (d), το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται από $\delta = 0.0008 - 0.02$ m με $(\delta) = 0.0008$ m. Επίσης, το βάρος του κόμβου υπολογίζεται ως σημειακό φορτίο και αντιπροσωπεύεται από μια σφαίρα ακτίνας πενταπλάσιας του (δ) με πυκνότητα σιλικόνης $\rho = 1.8 \text{ Mg/m}^3$ (Ashby et al., 2010). Έτσι, για την πειραματική κατεύθυνση καθορίζεται το σφαιρίδιο του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης, η τιμή $\delta_{\text{σφ}} = 0.0056$ m και το σημειακό φορτίο σε κάθε κόμβο $F = -0.012985$ N. Επιπρόσθετα, τα εξωτερικά φορτία μεταφράζονται από επιφανειακά σε σημειακά βάσει της γεωμετρίας του πλέγματος (mesh) που δημιουργείται από τους κόμβους με κάθετη φόρτιση για την στατική ανάλυση 1 kN/m^2

(Stranghöner and Uhlemann, 2016). Τέλος, για την αξιολόγηση της αντοχής της κατασκευής εξετάζεται η αντοχή της τάσης του κάθε νήματος (S_v) ξεχωριστά. Η αντοχή του νήματος βασίζεται στη σχέση $s_v < \frac{\sigma_{ts} \cdot A}{S.F}$ όπου A το εμβαδό της κυκλικής διατομής, $S.F$ ο συντελεστής ασφαλείας με 1.2 μονάδες για εφελκόμενες εφήμερες κατασκευές μικρού μεγέθους από μόνο ελαστικά υλικά και μεμβράνες σε προένταση με χρήση στατικής ανάλυση (Stranghöner and Uhlemann, 2016). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σε περίπτωση συνδυασμού υλικών, όπως συρματόσχοινα, ο συντελεστής είναι $S.F = 1.35$ μονάδες (Pyl et al., 2016).

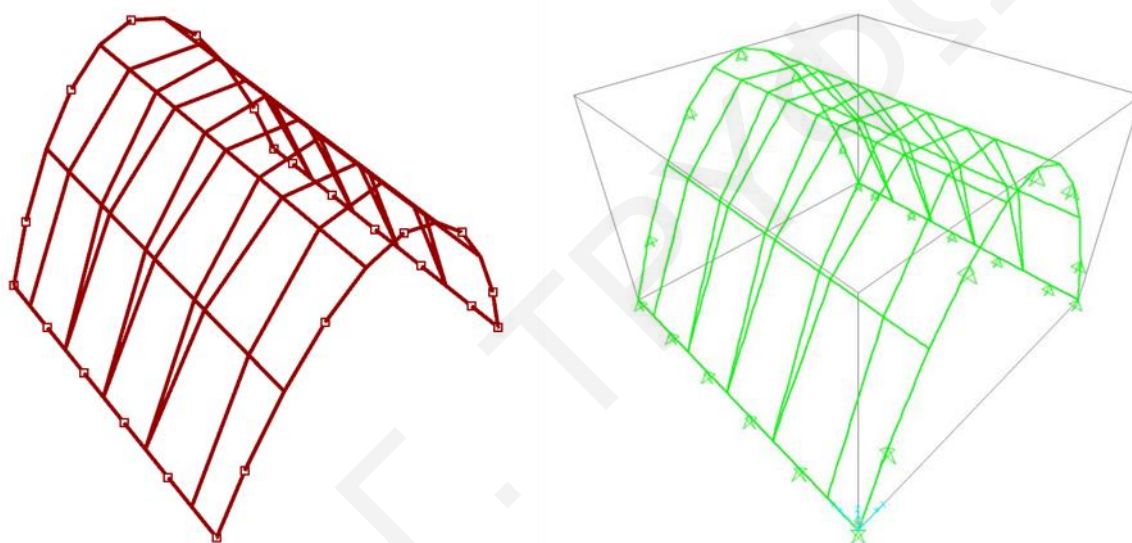


Εικόνα 5.16. Διάγραμμα διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης.

5.3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΡΦΗΣ ΜΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διαδικασία εξεύρεσης μορφής (form-finding) δημιουργεί την τελική μορφή του πλέγματος, το οποίο αξιολογείται μέσω στατικής ανάλυσης. Ακολούθως, τα δεδομένα μεταφέρονται στο ρομποτικό βραχίονα για την κατασκευή. Η στατική ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης CSI SAP2000 (Wolfgang, 2015). Πιο συγκεκριμένα, η αρχική γεωμετρία από το πρόγραμμα *Kangaroo plug-in* μεταφέρεται στο *CSI SAP2000* με τη χρήση *GeometryGym SAP2000* (Mirtschin, 2018) *plug-in* για *Grasshopper* (Εικόνα 5.17).

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα *CSI SAP2000* αποφασίζεται η χρήση της λύσης A.8, η οποία έχει την δυσμενέστερη γεωμετρική συμπεριφορά με μηδενική τιμή ($K\alpha$) για δημιουργία του ελαστικού πλέγματος (Block et al., 2014), κάτι τι οποίο επεξηγείται στο Κεφάλαιο_5.3.1. Η συγκεκριμένη λύση αναμένεται να παρουσιάσει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στους κόμβους και οριακές παραμορφώσεις στα νήματα. Οι οριακές παραμορφώσεις αξιολογούν την αξιοπιστία του προτεινόμενου αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής να δημιουργεί ελαστικά πλέγματα χωρίς χαλαρώσεις στα νήματα (Εικόνα 5.17).

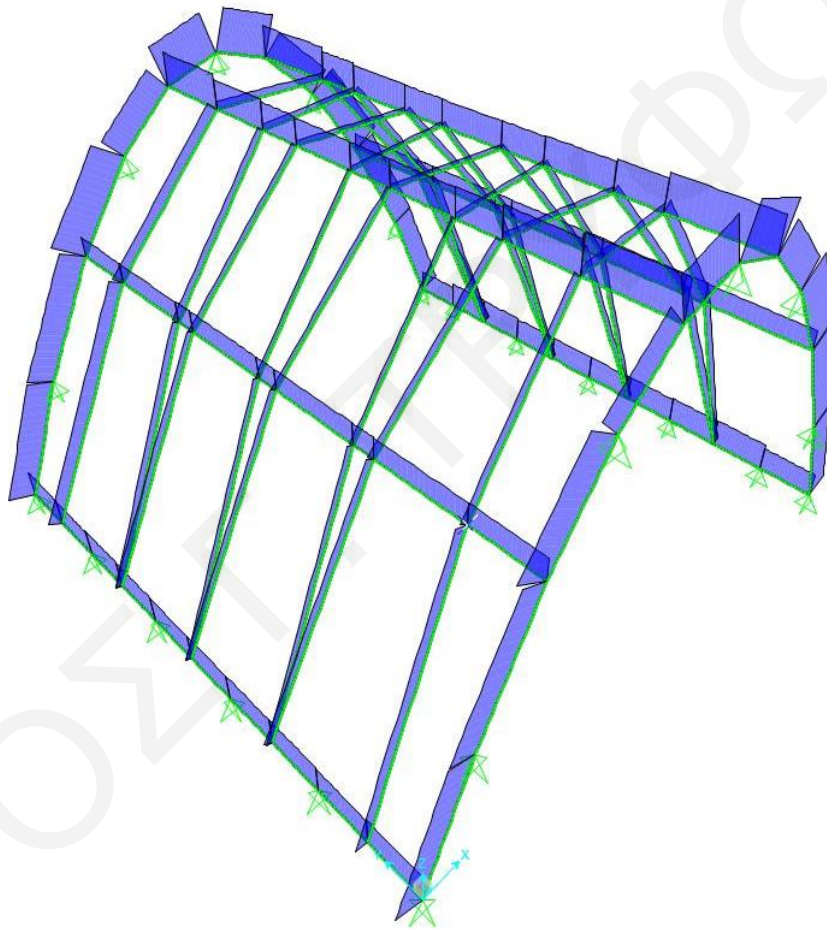


Εικόνα 5.17. Διαδικασία μεταφοράς αρχικής γεωμετρίας πριν από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής στο στατικό πρόγραμμα μη-γραμμικής ανάλυσης *SAP2000*.

Ως ακολούθως, τα ελατήρια ορίζονται ως συρματόσκοινα με υλικό τένοντα και διατομή 0.8 mm, και τα σημεία αγκύρωσης ως αρθρώσεις με ελευθερία περιστροφής και στους τρεις άξονες. Το ελαστικό υλικό (τένοντας) προσομοιώνεται με μέτρο ελαστικότητας $E = 2000 \text{ kN/m}^2$, βάρος ανά μονάδα όγκου $\rho = 9.0296 \text{ kN/m}^3$, ελάχιστο όριο διαρροής $F_y = 2500 \text{ kN/m}^2$ και ελάχιστο όριο εφελκυστικής τάσης $F_u = 2500 \text{ kN/m}^2$ (Ashby et al., 2010). Επιπρόσθετα, το βάρος του κάθε κόμβου ορίζεται ως σημειακό κατακόρυφο φορτίο σε κάθε σύνδεση (*Joint*) με $F = -0.012985 \text{ N}$. Τέλος, η παραμόρφωση μέσω της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής των ελατηρίων μεταφέρεται στο στατικό μοντέλο του *SAP2000* και ορίζεται ως δύναμη παραμόρφωσης (*Deformation*) σε κάθε καλώδιο.

Για τη στατική επίλυση χρησιμοποιείται μη-γραμμική ανάλυση *P-Delta*, η οποία συστήνεται για συστήματα με μεγάλες παραμορφώσεις, όπου τα φορτία εφαρμόζονται σταδιακά στις μετατοπίσεις, υπολογίζοντας με ακρίβεια την παραμόρφωση του στατικού

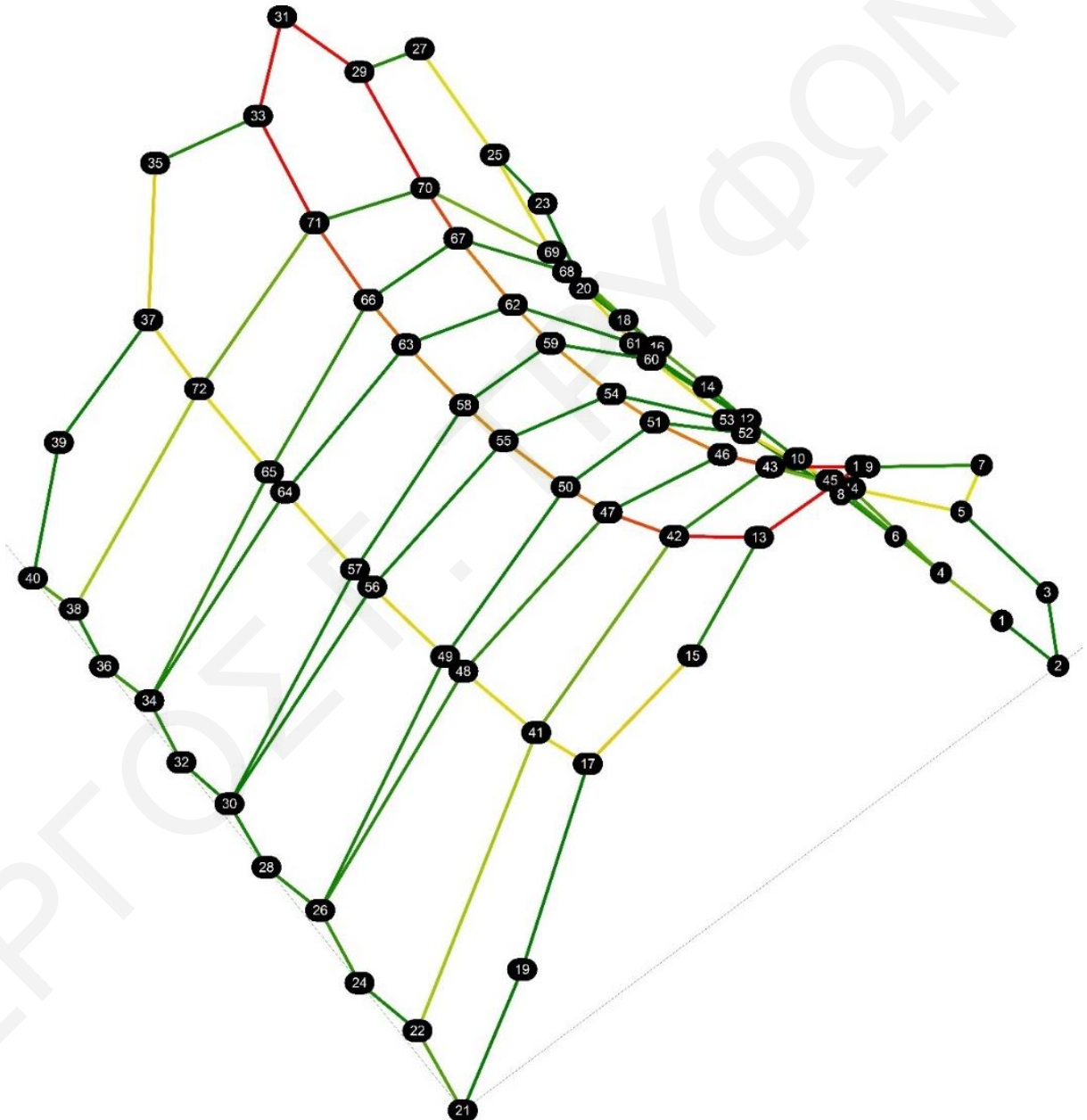
συστήματος (Wolfgang, 2015). Σε αυτή την περίπτωση, στην πρώτη φάση το σύστημα φορτίζεται με τη δύναμη παραμόρφωσης και το ιδιοφορτίο και στη δεύτερη φάση προστίθενται τα εξωτερικά φορτία. Από τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης και συγκεκριμένα το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων (Εικόνα 5.18) παρατηρείται ότι το σύστημα αναπτύσσει μόνο εφελκυστικές δυνάμεις, που αποδεικνύει την ικανότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής να προτείνει ελαστικά εφελκόμενα πλέγματα χωρίς να δημιουργούνται καμπτικές ροπές και χαλαρώσεις στα νήματα.



Εικόνα 5.18. Διαδικασία μη-γραμμικής ανάλυσης και απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων στην αρχική μορφή του πλέγματος.

Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα από την ανάλυση μεταφέρονται και τυγχάνουν επεξεργασίας ως μετατοπίσεις των συνδέσεων στο πρόγραμμα *Grasshopper*® (Εικόνα 5.19), στο οποίο παρατηρείται μέγιστη απόκλιση 2.28 mm (Πίνακας 5.3). Η απόκλιση οφείλεται στη διαδικασία ανάλυσης των καλωδίων στο πρόγραμμα *SAP2000* αφού το αρχικό μήκος των καλωδίων στο στατικό μοντέλο ορίζει το αρχικό μήκος των νημάτων και κατά συνέπεια το ιδιοβάρος των καλωδίων. Αντιθέτως, το μήκος των καλωδίων στο

παράδειγμα της περιπτωσιολογικής μελέτης είναι το 70 % της αρχικής γεωμετρίας, το οποίο δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω της διαδικασίας στατικής ανάλυσης του *SAP2000*. Έτσι το σύστημα φορτίζεται με επιπλέον 30% ιδιοφορτίο από τα καλώδια με αποτέλεσμα να δημιουργεί επιπλέον μετατοπίσεις στους κόμβους. Με την αφαίρεση του ιδιοφορτίου από τα νήματα η απόκλιση μειώνεται στα 0.73 mm (Πίνακας 5.4)



Εικόνα 5.19. Αποτέλεσμα μετακίνησης κόμβων μέσω του προγράμματος *CSI SAP2000* και μεταφορά δεδομένων στο πρόγραμμα *Grasshopper*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Κόμβοι	Προσαρμογή μοτίβο στην επιφάνεια			Διαδικασία εξεύρεσης της μορφής με Kangaroo plug-in			Μη-γραμμική ανάλυση P-Delta με CSI SAP2000			Απόκλιση [m]
	X	Y	Z	X	Y	Z	U1	U2	U3	
18	0.7	0.63	0.0	0.7	0.63	0.0	0.7	0.63	0.0	0.0
1	0.7	0.07	0.0	0.7	0.07	0.0	0.7	0.07	0.0	0.0
10	0.7	0.35	0.0	0.7	0.35	0.0	0.7	0.35	0.0	0.0
28	0.0	0.28	0.0	0.0	0.28	0.0	0.0	0.28	0.0	0.0
32	0.0	0.42	0.0	0.0	0.42	0.0	0.0	0.42	0.0	0.0
24	0.0	0.14	0.0	0.0	0.14	0.0	0.0	0.14	0.0	0.0
36	0.0	0.56	0.0	0.0	0.56	0.0	0.0	0.56	0.0	0.0
6	0.7	0.21	0.0	0.7	0.21	0.0	0.7	0.21	0.0	0.0
14	0.7	0.49	0.0	0.7	0.49	0.0	0.7	0.49	0.0	0.0
20	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
31	0.35	0.7	0.49	0.35	0.7	0.49	0.35	0.7	0.49	5.1515e-10
11	0.35	0.0	0.49	0.35	0.0	0.49	0.35	0.0	0.49	5.1515e-10
27	0.492378	0.7	0.40042	0.492378	0.7	0.40042	0.492378	0.7	0.40042	1.7475e-6
7	0.492378	0.0	0.40042	0.492378	0.0	0.40042	0.492378	0.0	0.40042	1.7475e-6
15	0.207622	0.0	0.40042	0.207622	0.0	0.40042	0.207622	0.0	0.40042	1.7478e-6
35	0.207622	0.7	0.40042	0.207622	0.7	0.40042	0.207622	0.7	0.40042	1.7478e-6
39	0.060319	0.7	0.149713	0.060319	0.7	0.149713	0.06032	0.7	0.14971	2.9577e-6
19	0.060319	0.0	0.149713	0.060319	0.0	0.149713	0.06032	0.0	0.14971	2.9577e-6
23	0.639681	0.7	0.149713	0.639681	0.7	0.149713	0.63968	0.7	0.14971	2.9586e-6
3	0.639681	0.0	0.149713	0.639681	0.0	0.149713	0.63968	0.0	0.14971	2.9586e-6
38	0.0	0.63	0.0	0.00884	0.629278	0.012148	0.00898	0.629271	0.012846	0.000712
22	0.0	0.07	0.0	0.00884	0.070722	0.012148	0.00898	0.070729	0.012846	0.000712
33	0.278941	0.7	0.466332	0.29625	0.667236	0.428508	0.295731	0.667424	0.429	0.00074
13	0.278941	0.0	0.466332	0.29625	0.032764	0.428508	0.295731	0.032576	0.429	0.00074
9	0.421059	0.0	0.466332	0.403614	0.032813	0.429072	0.404142	0.032613	0.429587	0.000764
29	0.421059	0.7	0.466332	0.403614	0.667187	0.429072	0.404142	0.667387	0.429587	0.000764
25	0.564498	0.7	0.296332	0.545631	0.657818	0.279481	0.546363	0.658222	0.279507	0.000836
5	0.564498	0.0	0.296332	0.545631	0.042182	0.279481	0.546363	0.041778	0.279507	0.000836
17	0.135502	0.0	0.296332	0.154624	0.041853	0.277729	0.153868	0.041414	0.277798	0.000877
37	0.135502	0.7	0.296332	0.154624	0.658147	0.277729	0.153868	0.658586	0.277798	0.000877
72	0.135502	0.61645	0.296332	0.160527	0.591214	0.238956	0.160133	0.591157	0.239824	0.000955
41	0.135502	0.08355	0.296332	0.160527	0.108786	0.238956	0.160133	0.108843	0.239824	0.000955
71	0.278941	0.602106	0.466332	0.294315	0.586852	0.3621	0.294146	0.586484	0.362983	0.000972
42	0.278941	0.097894	0.466332	0.294315	0.113148	0.3621	0.294146	0.113516	0.362983	0.000972
16	0.7	0.56	0.0	0.687656	0.559531	0.015744	0.687303	0.559523	0.016715	0.001034
4	0.7	0.14	0.0	0.687656	0.140469	0.015744	0.687303	0.140477	0.016715	0.001034
44	0.564498	0.12645	0.296332	0.534103	0.146549	0.22907	0.534342	0.146698	0.230157	0.001123
69	0.564498	0.57355	0.296332	0.534103	0.553451	0.22907	0.534342	0.553302	0.230157	0.001123
70	0.421059	0.587894	0.466332	0.404098	0.57432	0.354934	0.404154	0.573887	0.356004	0.001155
43	0.421059	0.112106	0.466332	0.404098	0.12568	0.354934	0.404154	0.126113	0.356004	0.001155
45	0.564498	0.15355	0.296332	0.533993	0.170087	0.220135	0.534166	0.170288	0.221396	0.001289
68	0.564498	0.54645	0.296332	0.533993	0.529913	0.220135	0.534166	0.529712	0.221396	0.001289
34	0.0	0.49	0.0	0.009658	0.489801	0.010972	0.01024	0.489798	0.012204	0.001363
26	0.0	0.21	0.0	0.009658	0.210199	0.010972	0.01024	0.210202	0.012204	0.001363
67	0.421059	0.532106	0.466332	0.40271	0.524001	0.329688	0.402795	0.523472	0.331069	0.001481
46	0.421059	0.167894	0.466332	0.40271	0.175999	0.329688	0.402795	0.176528	0.331069	0.001481
8	0.7	0.28	0.0	0.691487	0.280078	0.009011	0.690783	0.280079	0.010331	0.001496
12	0.7	0.42	0.0	0.691487	0.419922	0.009011	0.690783	0.419921	0.010331	0.001496
66	0.278941	0.517894	0.466332	0.295417	0.511017	0.32377	0.295415	0.51047	0.325236	0.001565
47	0.278941	0.182106	0.466332	0.295417	0.188983	0.32377	0.295415	0.18953	0.325236	0.001565
30	0.0	0.35	0.0	0.007734	0.35	0.007912	0.008511	0.35	0.009323	0.001611
65	0.135502	0.50355	0.296332	0.166155	0.491377	0.209245	0.165896	0.491193	0.210907	0.001692
48	0.135502	0.19645	0.296332	0.166155	0.208623	0.209245	0.165896	0.208807	0.210907	0.001692
63	0.278941	0.462106	0.466332	0.296605	0.458278	0.308299	0.296598	0.457828	0.310022	0.001781
50	0.278941	0.237894	0.466332	0.296605	0.241722	0.308299	0.296598	0.242172	0.310022	0.001781
52	0.564498	0.26645	0.296332	0.53247	0.272652	0.199585	0.532641	0.272804	0.201399	0.001828
61	0.564498	0.43355	0.296332	0.53247	0.427348	0.199585	0.532641	0.427196	0.201399	0.001828
64	0.135502	0.47645	0.296332	0.166129	0.466803	0.203884	0.165901	0.466625	0.205703	0.001842
49	0.135502	0.22355	0.296332	0.166129	0.233197	0.203884	0.165901	0.233375	0.205703	0.001842
62	0.421059	0.447894	0.466332	0.402076	0.444691	0.305613	0.402157	0.444284	0.307439	0.001873
51	0.421059	0.252106	0.466332	0.402076	0.255309	0.305613	0.402157	0.255716	0.307439	0.001873
53	0.564498	0.29355	0.296332	0.532632	0.297647	0.196869	0.532789	0.297759	0.198752	0.001893
60	0.564498	0.40645	0.296332	0.532632	0.402353	0.196869	0.532789	0.402241	0.198752	0.001893
54	0.421059	0.307894	0.466332	0.401584	0.309157	0.298173	0.401691	0.309353	0.300131	0.001971
59	0.421059	0.392106	0.466332	0.401584	0.390843	0.298173	0.401691	0.390647	0.300131	0.001971
55	0.278941	0.322106	0.466332	0.297048	0.322897	0.296946	0.29706	0.323023	0.298916	0.001974
58	0.278941	0.377894	0.466332	0.297048	0.377103	0.296946	0.29706	0.376977	0.298916	0.001974
57	0.135502	0.36355	0.296332	0.166963	0.362569	0.194256	0.166634	0.362545	0.196512	0.00228
56	0.135502	0.33645	0.296332	0.166963	0.337431	0.194256	0.166634	0.337455	0.196512	0.00228

Πίνακας 5.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων μετακίνησης κόμβων και απόκλισης από το αρχικό μοτίβο ύφανσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Κόμβοι	Προσαρμογή μοτίβο στην επιφάνεια			Διαδικασία εξόρυξης της μορφής με Kangaroo plug-in			Μη-γραμμική ανάλυση P-Delta με CSI SAP2000			Απόκλιση [m]
	X	Y	Z	X	Y	Z	U1	U2	U3	
17	0.7	0.63	0.0	0.7	0.63	0.0	0.7	0.63	0.0	0.0
1	0.7	0.07	0.0	0.7	0.07	0.0	0.7	0.07	0.0	0.0
9	0.7	0.35	0.0	0.7	0.35	0.0	0.7	0.35	0.0	0.0
27	0.0	0.28	0.0	0.0	0.28	0.0	0.0	0.28	0.0	0.0
31	0.0	0.42	0.0	0.0	0.42	0.0	0.0	0.42	0.0	0.0
23	0.0	0.14	0.0	0.0	0.14	0.0	0.0	0.14	0.0	0.0
35	0.0	0.56	0.0	0.0	0.56	0.0	0.0	0.56	0.0	0.0
5	0.7	0.21	0.0	0.7	0.21	0.0	0.7	0.21	0.0	0.0
13	0.7	0.49	0.0	0.7	0.49	0.0	0.7	0.49	0.0	0.0
19	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
30	0.35	0.7	0.49	0.35	0.7	0.49	0.35	0.7	0.49	5.1515e-10
10	0.35	0.0	0.49	0.35	0.0	0.49	0.35	0.0	0.49	5.1515e-10
26	0.492378	0.7	0.40042	0.492378	0.7	0.40042	0.492378	0.7	0.40042	1.7475e-6
6	0.492378	0.0	0.40042	0.492378	0.0	0.40042	0.492378	0.0	0.40042	1.7475e-6
14	0.207622	0.0	0.40042	0.207622	0.0	0.40042	0.207622	0.0	0.40042	1.7478e-6
34	0.207622	0.7	0.40042	0.207622	0.7	0.40042	0.207622	0.7	0.40042	1.7478e-6
38	0.060319	0.7	0.149713	0.060319	0.7	0.149713	0.06032	0.7	0.14971	2.9577e-6
18	0.060319	0.0	0.149713	0.060319	0.0	0.149713	0.06032	0.0	0.14971	2.9577e-6
22	0.639681	0.7	0.149713	0.639681	0.7	0.149713	0.63968	0.7	0.14971	2.9586e-6
2	0.639681	0.0	0.149713	0.639681	0.0	0.149713	0.63968	0.0	0.14971	2.9586e-6
37	0.0	0.63	0.0	0.008952	0.629262	0.01286	0.009005	0.629263	0.013094	0.00024
21	0.0	0.07	0.0	0.008952	0.070738	0.01286	0.009005	0.070737	0.013094	0.00024
12	0.278941	0.7	0.466332	0.295956	0.032635	0.429596	0.295678	0.032545	0.4295	0.000308
32	0.278941	0.0	0.466332	0.295956	0.667365	0.429596	0.295678	0.667455	0.4295	0.000308
8	0.421059	0.0	0.466332	0.403904	0.03268	0.430157	0.404194	0.032581	0.430086	0.000315
28	0.421059	0.7	0.466332	0.403904	0.66732	0.430157	0.404194	0.667419	0.430086	0.000315
15	0.564498	0.7	0.296332	0.687357	0.559507	0.016762	0.687228	0.559511	0.017099	0.000361
3	0.564498	0.0	0.296332	0.687357	0.140493	0.016762	0.687228	0.140489	0.017099	0.000361
40	0.135502	0.0	0.296332	0.160317	0.108849	0.241183	0.159964	0.108863	0.241009	0.000394
71	0.135502	0.7	0.296332	0.160317	0.591151	0.241183	0.159964	0.591137	0.241009	0.000394
47	0.135502	0.61645	0.296332	0.166071	0.208753	0.212684	0.16563	0.208851	0.21274	0.000455
64	0.135502	0.08355	0.296332	0.166071	0.491247	0.212684	0.16563	0.491149	0.21274	0.000455
63	0.278941	0.602106	0.466332	0.166078	0.466681	0.207533	0.165623	0.466584	0.207647	0.000479
48	0.278941	0.097894	0.466332	0.166078	0.233319	0.207533	0.165623	0.233416	0.207647	0.000479
68	0.7	0.56	0.0	0.534078	0.553331	0.231637	0.534555	0.553264	0.231628	0.000482
43	0.7	0.14	0.0	0.534078	0.146669	0.231637	0.534555	0.146736	0.231628	0.000482
33	0.564498	0.12645	0.296332	0.010118	0.489784	0.012205	0.010357	0.489789	0.012638	0.000495
25	0.564498	0.57355	0.296332	0.010118	0.210216	0.012205	0.010357	0.210211	0.012638	0.000495
67	0.421059	0.587894	0.466332	0.533902	0.529766	0.222974	0.534393	0.529666	0.223026	0.000503
44	0.421059	0.112106	0.466332	0.533902	0.170234	0.222974	0.534393	0.170334	0.223026	0.000503
42	0.564498	0.15355	0.296332	0.404166	0.125933	0.357954	0.404204	0.126169	0.357498	0.000515
69	0.564498	0.54645	0.296332	0.404166	0.574067	0.357954	0.404204	0.573831	0.357498	0.000515
41	0.0	0.49	0.0	0.294157	0.113358	0.364849	0.294088	0.113564	0.364348	0.000546
70	0.0	0.21	0.0	0.294157	0.586642	0.364849	0.294088	0.586436	0.364348	0.000546
11	0.421059	0.532106	0.466332	0.690941	0.419914	0.010292	0.690641	0.419916	0.010791	0.000583
7	0.421059	0.167894	0.466332	0.690941	0.280086	0.010292	0.690641	0.280084	0.010791	0.000583
29	0.7	0.28	0.0	0.008332	0.35	0.00928	0.008664	0.35	0.009791	0.000609
16	0.7	0.42	0.0	0.154213	0.041604	0.278663	0.153739	0.041343	0.278353	0.000624
36	0.278941	0.517894	0.466332	0.154213	0.658396	0.278663	0.153739	0.658657	0.278353	0.000624
55	0.278941	0.182106	0.466332	0.16687	0.337448	0.198389	0.166317	0.33746	0.198678	0.000624
56	0.0	0.35	0.0	0.16687	0.362552	0.198389	0.166317	0.36254	0.198678	0.000624
45	0.135502	0.50355	0.296332	0.402815	0.176333	0.333541	0.402859	0.176609	0.332961	0.000643
66	0.135502	0.19645	0.296332	0.402815	0.523667	0.333541	0.402859	0.523391	0.332961	0.000643
24	0.278941	0.462106	0.466332	0.545976	0.658024	0.280311	0.546497	0.658292	0.280042	0.000644
4	0.278941	0.237894	0.466332	0.545976	0.041976	0.280311	0.546497	0.041708	0.280042	0.000644
50	0.564498	0.26645	0.296332	0.402207	0.255574	0.310403	0.402236	0.255781	0.309756	0.00068
61	0.564498	0.43355	0.296332	0.402207	0.444426	0.310403	0.402236	0.444219	0.309756	0.00068
46	0.135502	0.47645	0.296332	0.295321	0.189322	0.327831	0.295347	0.189613	0.327213	0.000684
65	0.135502	0.22355	0.296332	0.295321	0.510678	0.327831	0.295347	0.510387	0.327213	0.000684
53	0.421059	0.447894	0.466332	0.401741	0.309285	0.303278	0.401778	0.309385	0.30259	0.000696
58	0.421059	0.252106	0.466332	0.401741	0.390715	0.303278	0.401778	0.390615	0.30259	0.000696
60	0.564498	0.29355	0.296332	0.532303	0.427245	0.203158	0.532938	0.427165	0.203463	0.000709
51	0.564498	0.40645	0.296332	0.532303	0.272755	0.203158	0.532938	0.272835	0.203463	0.000709
57	0.421059	0.307894	0.466332	0.296933	0.37702	0.302112	0.296971	0.376956	0.301394	0.000722
54	0.421059	0.392106	0.466332	0.296933	0.32298	0.302112	0.296971	0.323044	0.301394	0.000722
49	0.278941	0.322106	0.466332	0.296493	0.24201	0.312973	0.296517	0.242245	0.312281	0.000732
62	0.278941	0.377894	0.466332	0.296493	0.45799	0.312973	0.296517	0.457755	0.312281	0.000732
59	0.135502	0.36355	0.296332	0.532445	0.40228	0.200531	0.533092	0.40222	0.200871	0.000733
52	0.135502	0.33645	0.296332	0.532445	0.29772	0.200531	0.533092	0.29778	0.200871	0.000733

Πίνακας 5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων μετακίνησης κόμβων και απόκλισης από το αρχικό μοτίβο ύφανσης χωρίς ιδιοφορτίο σε νήματα.

5.4_ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

Η γεωμετρική ανάπτυξη και η διαδικασία προσομοίωσης των διαφορετικών κατηγοριών τυπολογίας και των περιπτώσεων τους αποσκοπεί στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και επιλογή των καταλληλότερων για κατασκευή. Παρόλα αυτά, η πολλαπλότητα των παραμέτρων και περιορισμών που ελέγχουν το τελικό αποτέλεσμα, όπως αρχική παραμόρφωση των νημάτων, τυπολογία αγκυρώσεων και κόμβων, διατομή νήματος και κόμβων, αντοχή υλικού στις παραμόρφωσης από εξωτερικά φορτία, ελάχιστη εφελκυστική τάση για ακρίβεια κατασκευής μέσω του εργαλείου τελικής δράσης και αποφυγή δημιουργίας χαλαρώσεων στα καλώδια, ορίζουν ένα σύνθετο πρόβλημα αφού υπάρχει ανάγκη παράλληλης αξιολόγησης σχεδιαστικών, στατικών και κατασκευαστικών στόχων.

Με την εφαρμογή της πολυκριτηριακής διαδικασίας μέσω της χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων (*Genetic Algorithms*) πολλαπλών – στόχων (*multi-objective*) παρέχεται η δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου των πολλαπλών παραμέτρων-γενοτύπων αλλά και αξιολόγησης των στόχων. Συγκεκριμένα, η συνεχής μεταβολή της αρχικής παραμόρφωσης των νημάτων, η μετατόπιση των αγκυρώσεων και η μεταβολή της κυκλικής διατομής δημιουργούν ένα κλειστό βρόγχο συνεχόμενης ανατροφοδότησης (Lhote et al., 1999) όπου οι παράμετροι επικοινωνούν με τα αποτελέσματα, δημιουργώντας ένα πλήθος (*population*) από αποδεκτές λύσεις. Οι αποδεκτές λύσεις συσχετίζονται με τις εφελκυστικές δυνάμεις, το μήκος, την αντοχή και τις παραμορφώσεις των νημάτων σε εξωτερικές δυνάμεις καθώς και στην ακρίβεια του εργαλείου τελικής δράσης. Οι επιλογή τους γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση της εφελκυστικής τάσης παράλληλα με τον έλεγχο της αντοχής των νημάτων και των θλιπτικών τους τάσεων, το ελάχιστο μήκος νημάτων και παραμόρφωσης τους από εξωτερικά φορτία, λαμβάνοντας υπόψη το βέλτιστο μέτωπο *Pareto* (*Pareto-optimality*), όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.3. Αναλυτικά, η λογική λειτουργίας ενός Γενετικού Αλγόριθμου βασίζεται σε αρχές γενετικής αφού χαρακτηριστικά από δυο λύσεις μέσω της διαδικασίας διασταύρωσης (*crossover*) και μετάλλαξης (*mutation*) δημιουργούν απογόνους. Μετά την αξιολόγηση της απόδοσης των απογόνων, αυτοί κατατάσσονται σε ένα νέο πληθυσμό μιας νέας γενεάς. Η διαδικασία επιλογής, διασταύρωσης (*crossover*) και μετάλλαξης (*mutation*) συνεχίζεται μέχρι την εξεύρεση της περίπτωσης με τον ελάχιστο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης, ελάχιστης παραμόρφωσης του μήκους του νήματος σε εξωτερικά φορτία και ελάχιστο μήκος νήματος ή μέχρι τη δημιουργία των επιθυμητών γενεών (Εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.20. Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης κλειστού βρόγχου ανατροφοδότησης.

Προς αυτή την κατεύθυνση, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα *Octopus® plug-in* (Vierlinger and Bollinger, 2014), ένα εργαλείο Γενετικών Αλγόριθμων πολλαπλών – στόχων (*multi-objective*) βασισμένο στο περιβάλλον του προγράμματος *Galapagos®*, *plug-in* στο *Grasshopper®* (Rutten, 2018). Το πρόγραμμα μπορεί να καθορίσει αντικειμενικούς στόχους (*objectives*), που μπορεί να είναι οποιαδήποτε αριθμητική τιμή, για παράδειγμα το στατικό αποτέλεσμα τάσης, παραμόρφωσης, ή μέτρηση ποσότητας νημάτων. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να ψάχνει για τους καλύτερους συμβιβασμούς (*trade-offs*) μέσα από πολλαπλά κριτήρια καταλληλότητας, εμφανίζοντας τις διάφορες λύσεις σε ένα τρισδιάστατο βέλτιστο μέτωπο *Pareto* (*Pareto optimality*). Μέσα από το τρισδιάστατο μέτωπο *Pareto* αναζητούνται συμβιβασμοί μεταξύ διαφόρων στόχων (μέγιστα και ελάχιστα) και φάσματα από τον πληθυσμό των λύσεων με τη χρήση ελιτισμού και αλγόριθμων ‘*Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*’ (*SPEA-2*) ή ‘*Hypervolume Estimation Algorithm*’ (*HypE*) *Reduction* και *Mutation* (Bader and Zitzler, 2010).

Για την πολυκριτηριακή ανάλυση των περιπτώσεων της κάθε κατηγορίας τυπολογιών αποφασίζεται η χρήση του αλγόριθμου αναζήτησης ‘*Hypervolume Estimation Algorithm*’ *HypE*. Ο αλγόριθμος *HypE*, συγκριτικά με τους υπόλοιπους αλγόριθμους αναζήτησης όπως ‘*Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*’ (*SPEA2*) ή ‘*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*’ (*NSGA-II*) (Deb et al., 2000), θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματικός και ανταγωνιστικός σε προβλήματα τριών διαστάσεων αφού εφαρμόζει με πειστικό τρόπο το μέτρο του *Lebesgue* σε διαδικασίες αναζήτησης πολλαπλών – στόχων (*multi-objective*) (Bader and Zitzler, 2010). Χρησιμοποιείται ένας πληθυσμός 100 σχεδιαστικών λύσεων σε 500 γενεές, με πιθανότητα ελιτισμού (*elitism*) 50%, μετάλλαξης (*mutation*) 60%, πιθανότητα μετάλλαξης (*mutation probability*) 35% και διασταύρωσης (*crossover*) 60 %.

Αναλυτικά, οι παράμετροι των αγκυρώσεων, η διατομή του νήματος και ο συντελεστής μήκους νήματος και απόστασης (L/D) θεωρούνται ως οι γενότυποι (παράμετροι) που μεταβάλλονται. Οι αγκυρώσεις μεταβάλλονται από το 25 - 75 % της θέσης των περιμετρικών νημάτων, η διατομή του νήματος από 8 - 20 mm και ο συντελεστής (L/D) των νημάτων 70 - 100% της αρχικής τους απόστασης. Οι δύο παράμετροι επηρεάζουν το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με τη χρήση του *Kangaroo® plug-in*. Τα αποτελέσματα εξετάζονται όσον αφορά τη στατική συμπεριφορά τους, συσχετίζοντας την αντοχή των νημάτων και το συντελεστή ασφαλείας με τη διατομή (δ), το μέτρο ελαστικότητας (E) και την παραμόρφωση (ΔL) με ή χωρίς εξωτερικά φορτία. Ως βασική παράμετρος καταλληλότητας είναι η διατήρηση της ελάχιστης παραμόρφωσης των νημάτων στο σύστημα $\Delta L > 2$ mm, το οποίο έχει να κάνει με την ακρίβεια του εργαλείου τελικής δράσης για τον έλεγχο του νήματος με απόκλιση ± 1 mm. Οι περιπτώσεις που τηρούν τις παραμέτρους καταλληλότητας σχηματίζουν το πληθυσμό για κάθε γενεά και αξιολογούνται με στόχο τη μείωση του μέσου όρου της εφελκυστικής τάσης, τη μείωση του συνολικού μήκους των παραμορφωμένων νημάτων και τη μείωση της παραμόρφωσης από εξωτερικά φορτία. Οι πιο πάνω στόχοι αξιολόγησης, μαζί με την καμπυλότητα προσδιορίζουν την δυνατότητα κατασκευής και ισορροπίας του συστήματος για κάθε περίπτωση τυπολογίας.

5.5_ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διερεύνηση χωρίζεται σε δυο κατευθύνσεις ανάλογα με τις διαστάσεις του πλέγματος στοχεύοντας:

- Στη διερεύνηση περιπτώσεων μικρών διαστάσεων για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή του προτεινόμενου μοτίβου ύφανσης στην επιφάνεια, τον αποδοτικότερο έλεγχο και ακρίβεια στην κατασκευή ως αποτέλεσμα της κίνησης του προτεινόμενου αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης,
- Στη διερεύνηση περιπτώσεων μεγαλύτερων διαστάσεων πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας για την αποδοτικότερη εξεύρεση μορφής και στατικής επίλυση τους σε ενοποιημένο πλαίσιο.

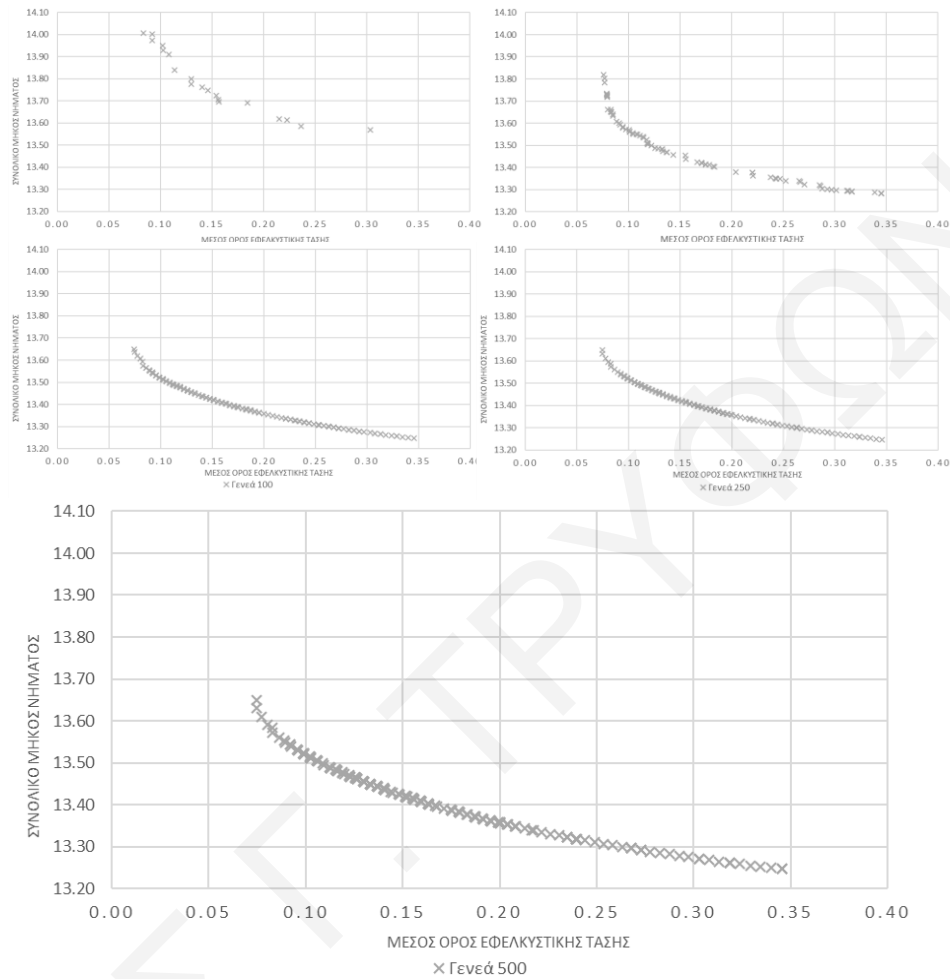
Αναλυτικά, τα παραδείγματα περιπτώσιολογικών μελετών που χρησιμοποιούνται στη κατεύθυνση μικρού μεγέθους αξιολόγησης βασίζονται σε μία μονάδας ύφανσης 0.7 x 0.7 m. Σε αυτή την περίπτωση, βαρύτητα στην αξιολόγηση έχουν τα αποτελέσματα στατικής

και γεωμετρικής συμπεριφοράς του προτεινόμενου μοτίβου διαδοχικής ύφανσης στις οκτώ τυπολογικές και στις οκτώ διαφοροποιήσεις τους για κατασκευή από ρομποτικό βραχίονα και αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει της μεταβολής της *Gaussian* καμπυλότητας και της συνολικής καταγραφής των εφελκυστικών δυνάμεων των νημάτων βάσει της αρχικής παραμόρφωσης τους στο σύστημα. Λόγω της περιορισμένης δυνατότητας του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης να χειρίζεται ελαστικά νήματα με συγκεκριμένη διατομή, η πολυκριτηριακή ανάλυση περιορίζεται στην διερεύνηση τυπολογιών πλεγμάτων με διατομή νήματος 0.8 mm. Επομένως, στα μικρά μεγέθη περιπτώσεων διερεύνησης δεν λαμβάνονται υπόψη εξωτερικές δύναμης αφού αυτές θα δημιουργούσαν τεράστιες παραμορφώσεις λόγω της μικρής διατομής. Ως εκ τούτου, η ανάλυση βασίζεται μόνο στο ιδιοβάρος της κατασκευής χωρίς εξωτερικά φορτία. Κατά συνέπεια, η παραμόρφωση των νημάτων λόγω εξωτερικών φορτίων είναι πάντοτε μηδενική, επιτρέποντας μόνο το συσχετισμό της συμπεριφοράς του ελαστικού υλικού με τη προτεινόμενη κατασκευαστική διαδικασία του μοτίβου ύφανσης.

Αντιθέτως, στη κατεύθυνση της πραγματικής αρχιτεκτονικής κλίμακας σε μεγαλύτερο μέγεθος περιπτώσεων γίνεται επεξεργασία των οκτώ τυπολογιών λαμβάνοντας υπόψη την παραμόρφωση των νημάτων από εξωτερικά φορτία και κάτω από πραγματικές συνθήκες. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μέγεθος της επιφάνειας έχει διαστάσεις 4 x 4 m και διαχωρίζεται σε κάρναβο 6 x 6 με σύνολο 36 μονάδες. Τα αποτελέσματα εξετάζονται βάσει της παραμόρφωσης τους λόγω εξωτερικών φορτίων και γεωμετρικών μεταβολών, υπολογίζοντας της αλλαγή της *Gaussian* καμπυλότητας, το αποτέλεσμα της διατομής του νήματος και τη συνολική εφελκυστική απόδοση του πλέγματος. Επιπλέον, τα αποτελέσματα από την διαδικασία εξεύρεσης μορφής καθορίζουν τις παραμέτρους που απαιτούνται από το εργαλείο τελικής δράσης και το συνολικό κατασκευαστικό σύστημα. Συνεπώς, η δεύτερη κατηγορία στοχεύει στη συνολική διερεύνηση και αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου για βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελαστικού πλέγματος. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τις δυσμενέστερες και καλύτερες γεωμετρίες για την εφαρμογή του προτεινόμενου μοτίβου ύφανσης.

Κατά τη διάρκεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης το μέτωπο Pareto παρουσιάζει τις επικρατέστερες συμβιβαστικές λύσεις ελαστικών πλεγμάτων. Έτσι οι καλύτεροι συμβιβασμοί για τις γενεές 0, 25^η, 100^η, 250^η, και 500^η περιγράφουν τη σχέση του μέσου

όρου εφελκυστικής τάσης και του συνολικού μήκους παραμορφωμένου υλικού (Εικόνα 5.21).



Εικόνα 5.21. Γραφική παράσταση σχέσης μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και συνολικού μήκους παραμορφωμένου υλικού για τους καλύτερους συμβιβασμούς στις γενεές 0, 25η, 100η, 250η, και 500^η.

Επεκτείνοντας, με την ανάλυση της τελευταίας γενεάς (500^η) γίνονται συσχετισμοί του συντελεστή L/D , της διατομής νήματος, της μεταβολής καμπυλότητας και εφελκυστικής τάσης καθώς και της εξωτερικής παραμόρφωσης. Η ανάλυση επιδιώκει την αξιολόγηση του αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης, όσον αφορά τη δυνατότητα του να παράγει λύσεις που να συσχετίζονται με την προτεινόμενη διαδοχική διαδικασία ύφανσης. Ο έλεγχος στοχεύει στη μελέτη της απόδοσης των ορίων αρχικής παραμόρφωσης του νήματος (μέγιστα και ελάχιστα), της καμπυλότητας του δομικού πλέγματος που προκύπτει και της συμπεριφοράς του πλέγματος σε εξωτερική κατακόρυφη φόρτιση. Οι κατασκευαστικοί περιορισμοί του ρομποτικού συστήματος ή και του εργαλείου τελικής

δράσης αλλά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των νημάτων επηρεάζουν τη διερεύνηση των καλύτερων λύσεων.

Κατ' επέκταση, οι λύσεις που αναπτύσσονται και στις δύο κατευθύνσεις διερεύνησης του μεγέθους της κατασκευής αξιολογούνται όσον αφορά την:

- Καλύτερη στατική συμπεριφορά για κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση οι εφελκυστικές δυνάμεις και παραμορφώσεις των νημάτων πρέπει να παρουσιάζουν καλύτερα αποτέλεσμα σε σχέση με λύσεις στο μέτωπο Pareto, ή
- Καλύτερη γεωμετρική συμπεριφορά για κατασκευή. Σε αυτή την περίπτωση οι μεταβολές στην καμπυλότητα του ελαστικού πλέγματος μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής είναι καλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες λύσεις στο μέτωπο Pareto.

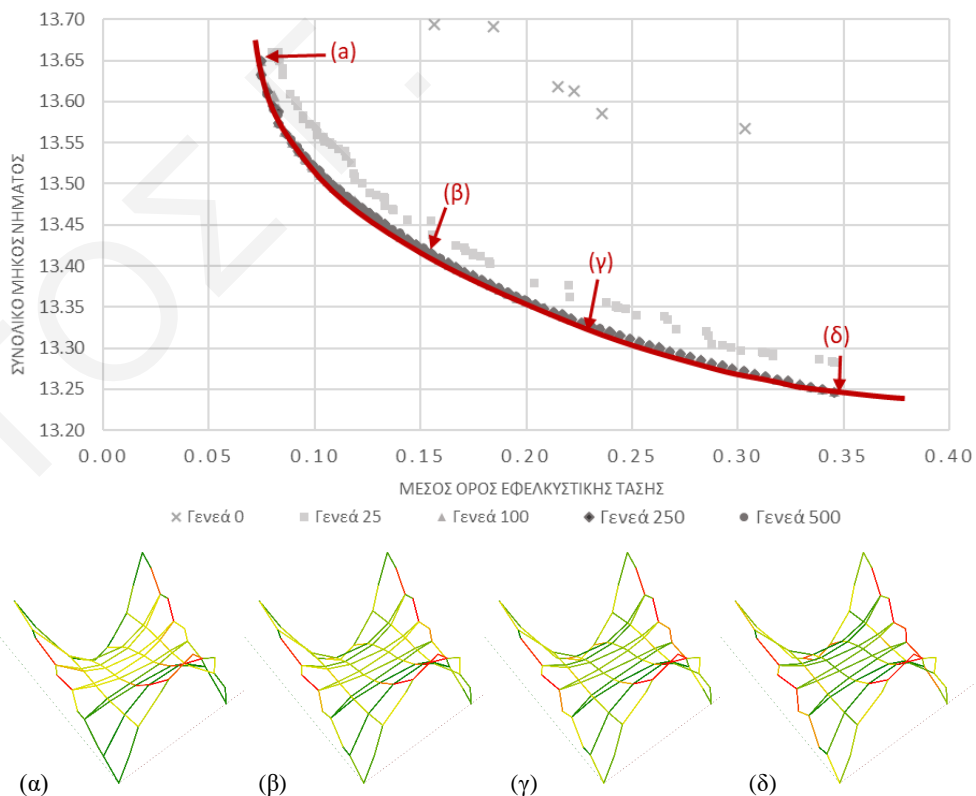
Ο διαχωρισμός των λύσεων και η επιλογή των καλύτερων όσον αφορά σχεδιαστικά ή στατικά κριτήρια μπορεί να συσχετιστεί με τις δυο βασικές διερευνήσεις της προτεινόμενης μεθοδολογίας όπου ο σχεδιασμός της μορφής και η στατική ανάλυση της επηρεάζουν τη διαδικασία φυσικής κατασκευής της (Dunn, 2012; Kolarevic, 2003). Δηλαδή, η πρώτη κατεύθυνση έχει ως πρωταρχικό στόχο την επιλογή μορφών που διατηρούν όσο γίνεται την αρχική γεωμετρία τους και είναι στατικά επαρκείς για την κατασκευή τους. Η δεύτερη κατεύθυνση στοχεύει στην επιλογή μορφών με καλύτερη απόδοση και στατική συμπεριφορά για την κατασκευή τους (Kolarevic, 2003).

5.5.1_ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΟΤΙΒΟΥ ΥΦΑΝΣΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Αρχικά, η διερεύνηση επικεντρώνεται σε μονάδες μικρού μεγέθους με διαστάσεις 0.7x0.7x0.7 m, όπου οκτώ τυπολογίες εξετάζονται όσον αφορά τη διαφοροποίηση της καμπυλότητας της γεωμετρίας και της αρχικής παραμόρφωσης των νημάτων και αναζητείται ο μέγιστος και ελάχιστος συντελεστής L/D. Με αυτό τον τρόπο διερευνάται η σχέση μεταξύ στατικής συμπεριφοράς και γεωμετρικής μεταβολής. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι λύσεις με το μεγαλύτερο συντελεστή L/D, δηλαδή μικρότερη αρχική παραμόρφωση, αναπτύσσουν μικρότερες αξονικές δυνάμεις και έχουν μικρότερη μεταβολή της καμπυλότητάς τους και κατ' επέκταση είναι καλύτερες γεωμετρικά. Αντιθέτως, οι λύσεις με το μικρότερο συντελεστή L/D, δηλαδή μεγαλύτερη αρχική παραμόρφωση στα

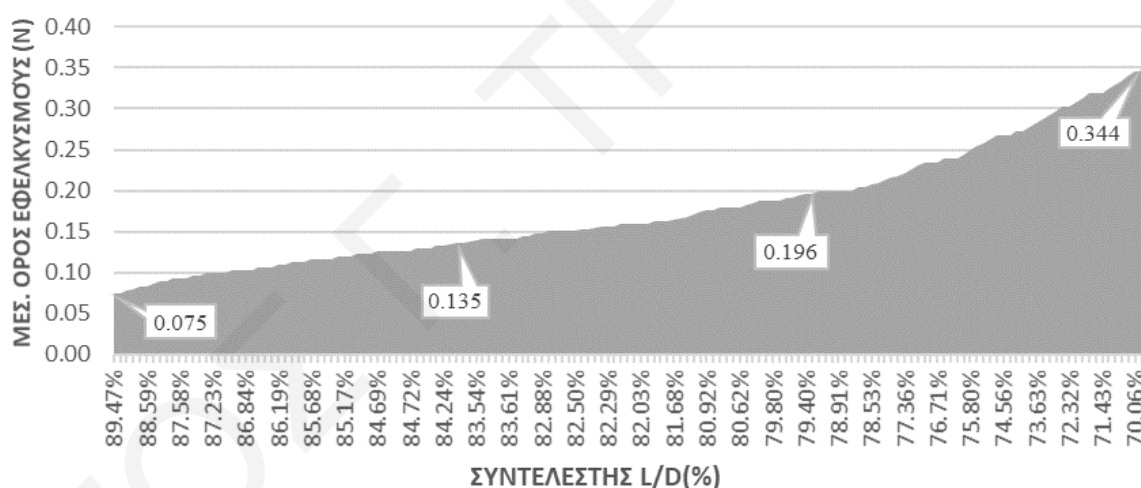
ελαστικά νήματα, αναπτύσσουν μεγαλύτερες αξονικές δύναμης με μεγαλύτερη καμπυλότητα και λιγότερο απαιτούμενο μήκος νήματος, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι λύσεις να έχουν καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 5.22 παρουσιάζονται οι καλύτεροι συμβιβασμοί (trade-offs) για κάθε γενεά στην περίπτωση (F.8). Η γραφική παράσταση περιγράφει τη σχέση μεταξύ του μέσο όρου της εφελκυστικής τάσης και του μήκους του παραμορφωμένου νήματος, όπου στην 500^η γενεά διαφαίνεται η καμπύλη του βέλτιστου Pareto. Βάσει της κατανομής των αποτελεσμάτων στο μέτωπο Pareto, επιλέγονται τέσσερις λύσεις και αναλύονται περαιτέρω. Η λύση Εικόνα 5.22.α παρουσιάζει τον ελάχιστο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης 0.075 N, το μεγαλύτερο συντελεστή $(L/D) = 89.50 \%$, παραμόρφωση μήκους νήματος 0.345 m και μέγιστο απαιτούμενο μήκος νήματος 8.719 m. Επιπρόσθετα η κατανομή των φορτίων επιφέρει την ελάχιστη γεωμετρική μεταβολή με αύξηση της Gaussian καμπυλότητας $K = -2.832$ μονάδες. Αντιθέτως, η λύση Εικόνα 5.22.δ παρουσιάζει το μέγιστο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης 0.344 N, το χαμηλότερο συντελεστή $(L/D) = 70.1 \%$, τη μεγαλύτερη παραμόρφωση του υλικού 1.725 m και είναι η πιο οικονομική λύση με απαιτούμενο υλικό κατασκευής 6.798 m.



Εικόνα 5.22. Αποτελέσματα πληθυσμού λύσεων μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη χρήση Γενετικού Αλγόριθμου πολλαπλών-στόχων για την περίπτωση F.8.

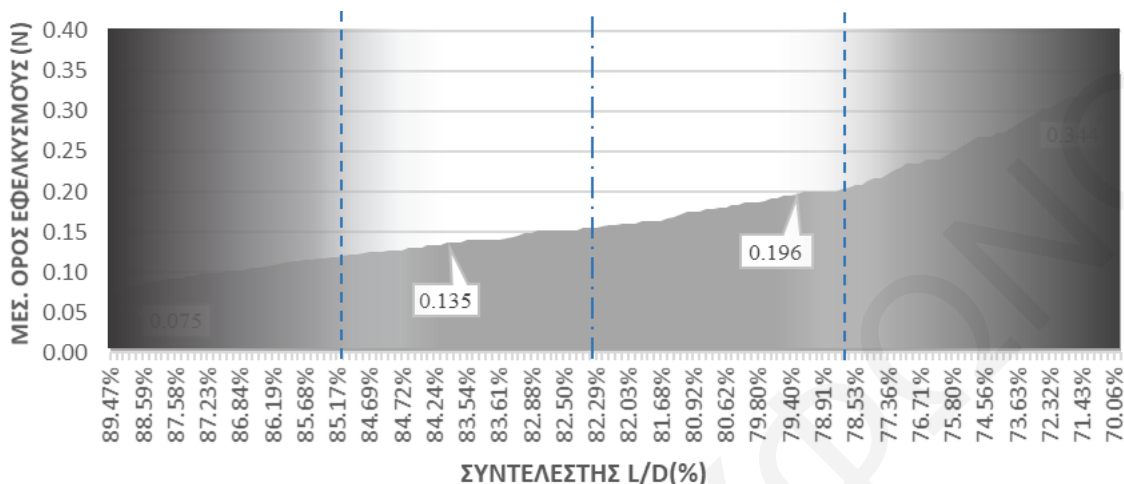
Η περίπτωση δ χαρακτηρίζεται ως στατικά βέλτιστη αφού έχει το μέγιστο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης και το λιγότερο απαιτούμενο μήκος νήματος. Με βάση τα δεδομένα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης στο Κεφάλαιο 3.2, τα συστήματα με μεγάλη προένταση έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε εξωτερικά φορτία (Lewis, 2003). Κατά συνέπεια, τα στατικά συστήματα με το μεγαλύτερο μέσο όρο εφελκυστικής δύναμης και μικρότερο συντελεστή L/D (Εικόνα 5.23) μπορούν να θεωρηθούν καλύτερα όσον αφορά τη στατικότητα τους σε σύγκριση με συστήματα με λιγότερη εφελκυστική δύναμη. Επιπρόσθετα, μέσα από τον υπολογισμό της *Gaussian* καμπυλότητας παρατηρείται ότι η λύση δ παρουσιάζει $K = -3.689$ μονάδες (Πίνακας 5.5) με μέγιστη γεωμετρική μεταβολή, σε αντίθεση με την λύση α που παρουσιάζει $K = -2.832$ μονάδες και έχει την ελάχιστη γεωμετρική μεταβολή. Έτσι, η περίπτωση με το μεγαλύτερο συντελεστή (L/D) μπορεί να προτιμηθεί σχεδιαστικά σε σχέση με περιπτώσεις όπου εμφανίζεται μικρότερη τιμή συντελεστή (L/D) και μέσου όρου εφελκυστικής δύναμης (Εικόνα 5.23).



Εικόνα 5.23. Γραφική παράσταση σχέσης μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και συντελεστή (L/D).

Κατά συνέπεια, οι λύσεις από τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης χαρακτηρίζονται από στατική ισορροπία και διατηρούν τους περιορισμούς του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Ως αποτέλεσμα, αποφασίζεται η επιλογή περιπτώσεων που είναι προς το κέντρο και είναι καλύτερες όσον αφορά την κατασκευασιμότητα τους σε σύγκριση με τα οριακά αποτελέσματα (Εικόνα 5.24). Επιπρόσθετα, η οριακή τιμή του συντελεστή (L/D) μπορεί να προκαλέσει αστοχία κατά την διάρκεια της δημιουργίας των συνδέσεων των νημάτων από το εργαλείο τελικής δράσης, καθώς και αστοχία στον υπολογισμό του μήκους τού νήματος. Επίσης, η οριακή τιμή ελάχιστης εφελκυστικής τάσης μπορεί να προκαλέσει χαλαρώσεις

στα νήματα κατά την σταδιακή συγκόλληση τους στη κατασκευή, κάτι το οποίο καθορίζεται και από την ακρίβεια ελέγχου του νήματος από το εργαλείο τελικής δράσης.



Εικόνα 5.24. Εύρος επιλογής λύσεων βάσει του συντελεστή L/D για την περίπτωση F.8.

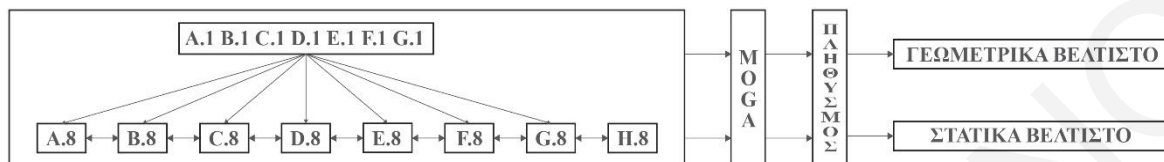
Έτσι, αποδεκτές λύσεις για κατασκευή με καλύτερη στατική συμπεριφορά και εξοικονόμηση υλικού χαρακτηρίζονται αυτές που πλησιάζουν τον ελάχιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) και παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο όρο εφελκυστικής δύναμης, αυξάνοντας παράλληλα την παραμόρφωση στα νήματα αλλά και την καμπυλότητα τους (Πίνακας 5.5.Γ). Επίσης, αποδεκτές λύσεις για κατασκευή με καλύτερη γεωμετρική απόδοση θεωρούνται αυτές με μικρότερο μέσο όρο εφελκυστικής δύναμης (Πίνακας 5.5.Β) και αυξανόμενο συντελεστή (L/D), οι οποίες παρουσιάζουν λιγότερη παραμόρφωση στα νήματα και κατ' επέκταση μειωμένη μεταβολή της καμπυλότητας τους όπως επίσης και αύξηση της ποσότητα υλικού τους.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις		A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]		89.50%	83.90%	79.30%	70.10%
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]		0.075	0.135	0.196	0.344
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]		8.719	8.133	7.688	6.798
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]		0.345	0.686	1.012	1.725
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(Kf)$		9.491	9.858	10.087	10.348
$K\tau = -6.6592$	$K = (-K\alpha) - (K\tau)$	-2.832	-3.198	-3.428	-3.689

Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα λύσεων για την περίπτωση F.8. Α: Η ακραία λύση με την καλύτερη γεωμετρική απόδοση, Β: Η κατασκευάσιμη λύση που επιλέγεται με την καλύτερη γεωμετρική απόδοση, Γ: Η κατασκευάσιμη λύση που επιλέγεται με τη καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ: Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

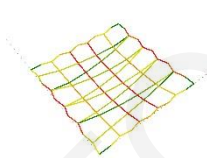
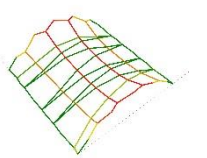
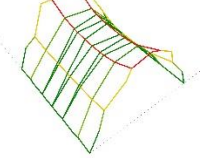
Επεκτείνοντας τη διερεύνηση, για την κατανόηση της συμπεριφοράς της προτεινόμενης διαδικασίας ύφανσης των ελαστικών νημάτων στις διάφορες γεωμετρίες γίνεται σύγκριση μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων μεταβολών στις κατηγορίες τυπολογιών. Καθ' ότι τα γεωμετρικά αποτελέσματα δημιουργούνται από το ίδιο αρχικό πλέγμα με διαφορετικές

μεταβολές στα σημεία των καμπύλων του ύψους, πέραν της απλής σύγκρισης, σε κάθε πληθυσμό γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των κατηγοριών τυπολογίας και των περιπτώσεων (Εικόνα 5.25).



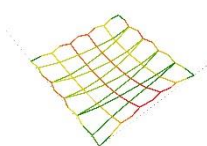
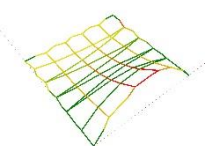
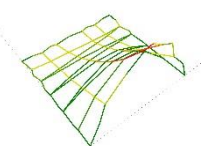
Εικόνα 5.25. Διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης και σύγκρισης κατηγοριών τυπολογίας.

Αναλυτικά, η κατηγορία τυπολογίας A (Εικόνα 5.26, Πίνακας I.9, Πίνακας I.16), κατά τη μεταβολή των παραμέτρων του ύψους της, παρουσιάζει μείωση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 11.40 % από την περίπτωση (A.1) με $L/D = 93.7\%$ στην περίπτωση (A.8) με $L/D = 82.3\%$, η οποία είναι η δυσμενέστερη περίπτωση. Παράλληλα, η μεταβολή της γεωμετρίας προκαλεί αύξηση του απαιτούμενου υλικού για κατασκευή κατά 2.4884 m. Το εφελκύμενο ελαστικό πλέγμα αναπτύσσει εφελκυστικές δυνάμεις, όπου στη περίπτωση (A.8) παρουσιάζει το μέγιστο όρο εφελκυστικής δύναμης με τιμή 0.135 N, με ελάχιστη εφελκυστική δύναμη 0.0141 N και μέγιστή 0.0558 N. Συγκριτικά με την περίπτωση (A.1), η περίπτωση (A.8) παρουσιάζει αύξηση των εφελκυστικών δυνάμεων κατά 0.077 N. Αποτέλεσμα των εφελκυστικών δυνάμεων είναι η αύξηση του μέσου όρου καμπυλότητας της γεωμετρίας σε $K = -7.0521$ μονάδες.

A1	A4	A8
		
Συντελεστής L/D 93.7% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.058 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 7.8971 $K = (-K\alpha) - (K\tau)$ -0.9597	Συντελεστής L/D 86.8% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.1015 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.2557 $K = (-K\alpha) - (K\tau)$ 2.4254	Συντελεστής L/D 82.3% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.135 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 10.3855 $K = (-K\alpha) - (K\tau)$ 6.0924

Εικόνα 5.26. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας A και τις περιπτώσεις 1,4,8.

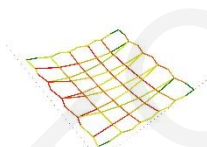
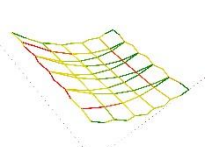
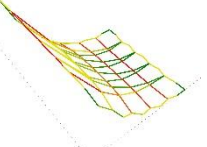
Με την μεταβολή του ύψους της καμπύλης B στην κατηγορία τυπολογίας D, παρατηρείται βελτιστοποίηση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) (Εικόνα 5.27, Πίνακας I.9, Πίνακας I.31 - Πίνακας I.37). Για παράδειγμα, στην περίπτωση (A.8) και (D.8) παρατηρείται μείωση του επιτρεπόμενου συντελεστή κατά 3.6 % στην τιμή 85.9 %, μείωση του υλικού για κατασκευή καθώς και του μέσου όρου εφελκυστικών δυνάμεων σε 8.6886 και 0.1136 N αντίστοιχα.

D2	D5	D8
 <p>Συντελεστής L/D 94.6% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0506 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0223 K = (-Kα)- (Kτ) 1.0656</p>	 <p>Συντελεστής L/D 88.6% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0908 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0479 K = (-Kα)- (Kτ) -0.7851</p>	 <p>Συντελεστής L/D 85.9% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.1136 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.6886 K = (-Kα)- (Kτ) -1.728</p>

Εικόνα 5.27. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας D και τις περιπτώσεις 2,5,8.

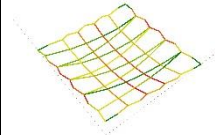
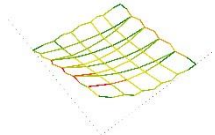
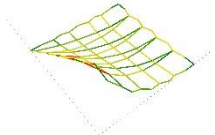
Στην κατηγορία τυπολογίας D, από την περίπτωση (D.1) ως την περίπτωση (D.8), ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής μειώνεται κατά 7.8 % από 93.7 % σε 85.94 %, ενώ το αναγκαίο υλικό για κατασκευή και ο μέσος όρος εφελκυστικής δύναμής αυξάνεται από 0.7915 m και 0.0556 N στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Οι μεταβολές αυτές οδηγούν στην αλλαγή της *Gaussian* καμπυλότητας του πλέγματος από $K_{D1} = 0.9597$ σε $K_{D8} = 2.7632$ μονάδες.

Στην κατηγορία τυπολογίας B (Εικόνα 5.28, Πίνακας I.9, Πίνακας I.17 -Πίνακας I.23), με τη μεταβολή των παραμέτρων του ύψους των καμπύλων A και B, προκαλείται μείωση του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 2.7 % από 93.7 % στην περίπτωση (B.1) σε 91 % στην περίπτωση (B.8). Η μείωση του συντελεστή (L/D) και η μεταβολή της γεωμετρίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου όρου εφελκυστικής τάσης κατά 0.0101 N από 0.058 N στην περίπτωση (B.1) σε 0.0681 N στην περίπτωση (B.8). Η μέγιστη μεταβολή της *Gaussian* καμπυλότητας παρατηρείται στη περίπτωση (B.8) με μέσο όρο $K = -1.5822$ μονάδες.

B2	B5	B8
 <p>Συντελεστής L/D 93.4% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0588 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0065 K = (-Kα)- (Kτ) -0.8131</p>	 <p>Συντελεστής L/D 91.9% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0656 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.5569 K = (-Kα)- (Kτ) -0.0496</p>	 <p>Συντελεστής L/D 91.0% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0681 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 9.6662 K = (-Kα)- (Kτ) -0.6225</p>

Εικόνα 5.28. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας B και τις περιπτώσεις 2,5,8

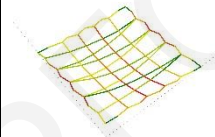
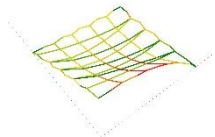
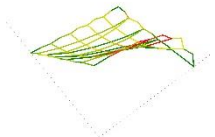
Αντιθέτως, συγκρίνοντας τη μεταβολή της καμπύλης B στην κατηγορία τυπολογίας C (Εικόνα 5.29, Πίνακας I.9, Πίνακας I.24, Πίνακας I.30) σε σχέση με την κατηγορία τυπολογίας B, παρατηρείται πως ο επιτρεπόμενος συντελεστής (L/D) είναι μεγαλύτερος. Δηλαδή, στην περίπτωση (B.8) και (C.8) παρατηρείται αύξηση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 2.4 % στην τιμή 93.4 %, όπου οδηγεί στην μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων με μέσο όρο 0.0542 N.

C2	C5	C8
 <p>Συντελεστής L/D 93.6% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0521 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0206 K = (-Kα)- (Kτ) 1.1887</p>	 <p>Συντελεστής L/D 93.1% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0596 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.1162 K = (-Kα)- (Kτ) 0.6103</p>	 <p>Συντελεστής L/D 93.4% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0542 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.5257 K = (-Kα)- (Kτ) 0.4247</p>

Εικόνα 5.29. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας C και τις περιπτώσεις 2,5,8.

Αναλυτικά, στην κατηγορία τυπολογίας C, από την περίπτωση (C.1) έως (C.8), παρατηρείται μείωση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 0.3 % από 93.7 % σε 93.4 % αντίστοιχα. Αποτέλεσμα της μείωσης του επιτρεπόμενου συντελεστή είναι η αύξηση του αναγκαίου υλικού για την κατασκευή κατά 0.6286 m και μείωση του μέσου όρου εφελκυστικής δύναμης κατά 0.0038 N. Οι μεταβολές αυτές οδηγούν στην αλλαγή της καμπυλότητας του πλέγματος. Στην περίπτωση (C.8) η *Gaussian* καμπυλότητα αυξάνεται $K = -1.4241$ μονάδες από $K_{C1} = 0.9597$ σε $K_{C8} = -0.4644$ μονάδες.

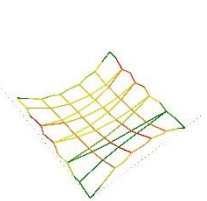
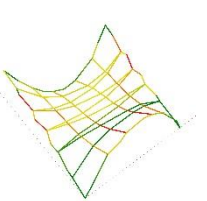
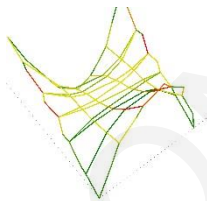
Στην κατηγορία τυπολογίας C η μεταβολή της καμπύλης B δημιουργεί κοιλότητα. Αντιθέτως στην κατηγορία τυπολογίας E με τη μεταβολή της καμπύλης B και την δημιουργία κυρτής καμπύλης (Εικόνα 5.30, Πίνακας I.9, Πίνακας I.38, Πίνακας I.44) παρουσιάζεται μείωση στον μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) κατά 1.16 % με τιμή 92.2% στην περίπτωση (E.8). Κατά συνέπεια, η ποσότητα του υλικού και οι εφελκυστικές δυνάμεις αυξάνονται κατά 0.3198 m από 8.5257 m σε 8.8455 m και ο μέσος όρος εφελκυστικής τάσης 0.0093 N από 0.0542 N σε 0.0635 N αντίστοιχα.

E2	E5	E8
 <p>Συντελεστής L/D 94.6% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0521 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0206 K = (-Kα)- (Kτ) 1.1887</p>	 <p>Συντελεστής L/D 93.7% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0551 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.3217 K = (-Kα)- (Kτ) 0.582</p>	 <p>Συντελεστής L/D 92.2% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0635 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.8455 K = (-Kα)- (Kτ) -0.0693</p>

Εικόνα 5.30. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας E και τις περιπτώσεις 2,5,8.

Η κατηγορία τυπολογίας E παρουσιάζει μεταβολή επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 1.5 % από την περίπτωση (E.1) 93.7 % στην περίπτωση (E.8) με 92.2 %. Παρομοίως, το απαιτούμενο υλικό και ο μέσος όρος των εφελκυστικών δυνάμεων αυξάνεται κατά 0.9484 m στα 8.8455 m και 0.0055 N στα 0.0635 N αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή η *Gaussian* καμπυλότητα αυξάνεται κατά $K = -1.6992$ μονάδες από $K_{E1} = 0.9597$ σε $K_{E8} = -0.7395$ μονάδες.

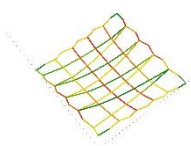
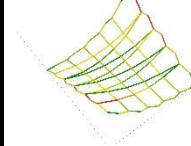
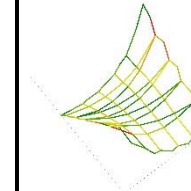
Στην κατηγορία τυπολογίας F (Εικόνα 5.31, Πίνακας I.9, Πίνακας I.45, Πίνακας I.51) η αντίθετη μεταβολή των καμπύλων A και B οδηγεί στην δημιουργία μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή $L/D = 89.54 \%$, ο οποίος είναι 7.2% μεγαλύτερος από τη δυσμενέστερη περίπτωση (A.8).

F2	F5	F8
 <p>Συντελεστής L/D 93.7%</p> <p>Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0548</p> <p>Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.0177</p> <p>$K = (-K\alpha) - (K\tau)$ 0.4269</p>	 <p>Συντελεστής L/D 91.0%</p> <p>Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.068</p> <p>Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.208</p> <p>$K = (-K\alpha) - (K\tau)$ -1.6655</p>	 <p>Συντελεστής L/D 89.5%</p> <p>Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.075</p> <p>Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.7223</p> <p>$K = (-K\alpha) - (K\tau)$ -2.7935</p>

Εικόνα 5.31. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας F και τις περιπτώσεις 2,5,8.

Η αύξηση του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του υλικού από την περίπτωση (F.1) στην περίπτωση (F.8) κατά 0.8252 m , το οποίο είναι 1.6632 m λιγότερο σε σχέση με την περίπτωση (A.8). Ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής (L/D) προκαλεί εφελκυστικές δυνάμεις με μέσο όρο 0.075 N στην περίπτωση (F.8), ο οποίος είναι 0.017 N μεγαλύτερος από την περίπτωση (F.1) και 0.06 N μικρότερος από την περίπτωση (A.8). Αποτέλεσμα της μεταβολής της γεωμετρίας και του συντελεστή (L/D) είναι η μεταβολή της *Gaussian* καμπυλότητας κατά $K = -10.4124$ μονάδες από $K_{F1} = -0.9597$ σε $K_{F8} = 9.4527$ μονάδες.

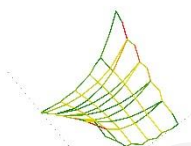
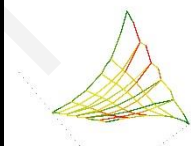
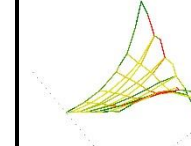
Παρομοίως, στην περίπτωση G (Εικόνα 5.32, Πίνακας I.9, Πίνακας I.52, Πίνακας I.58) χρησιμοποιούνται παράμετροι μεταβολής που μπορούν να συσχετιστούν με την περίπτωση B. Η μεταβολή της καμπύλης A, με τη μετακίνηση του αρχικού σημείου και όχι του τελικού, προκαλεί μείωση του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D). Δηλαδή, από την περίπτωση (G.1) στην περίπτωση (G.8) παρατηρείται μείωση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 1.8% από 92.7% σε 91.9% , το οποίο είναι 0.9% μεγαλύτερο της περίπτωσης (B.8) με $L/D = 91.0 \%$. Σε αυτή την περίπτωση η μείωση του συντελεστή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου υλικού κατά 1.0537 m από (B.8) $= 9.6662 \text{ m}$ σε (G.8) $= 8.6125 \text{ m}$.

G2	G5	G8
 <p>Συντελεστής L/D 94.0% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0556 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 7.9575 K = (-K_α)-(-K_τ) 0.9803</p>	 <p>Συντελεστής L/D 92.5% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0603 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.1344 K = (-K_α)-(-K_τ) 0.3052</p>	 <p>Συντελεστής L/D 91.9% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.061 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.6125 K = (-K_α)-(-K_τ) -0.0759</p>

Εικόνα 5.32. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας G και τις περιπτώσεις 2,5,8.

Επιπρόσθετα, με τη μεταβολή του συντελεστή κατά 1.84 % από (G.1) σε (G.8), παρατηρείται αύξηση στο υλικό κατασκευής κατά 0.7154 m στην περίπτωση G.8 = 8.6125 m και στις εφελκυστικές δύναμης του συστήματος με μέσο όρο (G.8) = 0.061 N και αύξηση κατά 0.003 N. Συγκρίνοντας την τελική καμπυλότητα K_{τ} της περίπτωσης (G.1) με την τελική καμπυλότητα K_{τ} της περίπτωσης (G.8), παρατηρείται αύξηση της συμπεριφοράς της *Gaussian* καμπυλότητας κατά $K = -4.9431$ μονάδες, από $K_{G1} = 0.9597$ σε $K_{G2} = 3.9834$ μονάδες.

Στην κατηγορία τυπολογίας H (Εικόνα 5.33, Πίνακας I.58 - Πίνακας I.65), με την μεταβολή της κοιλότητας της καμπύλης B σε κυρτή, παρουσιάζεται μείωση του επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D) κατά 0.6 % από 91.9 % στην περίπτωση (H.1) σε 91.3 % στην περίπτωση (H.8).

H2	H5	H8
 <p>Συντελεστής L/D 91.9% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.061 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.6125 K = (-K_α)-(-K_τ) -0.0759</p>	 <p>Συντελεστής L/D 92.5% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.0597 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.394 K = (-K_α)-(-K_τ) -0.2995</p>	 <p>Συντελεστής L/D 91.3% Μέσος όρος εφελκυστικής δύναμης [N] 0.068 Απαιτούμενο μήκος νήματος [m] 8.6644 K = (-K_α)-(-K_τ) -2.0616</p>

Εικόνα 5.33. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή (L/D) για την κατηγορία τυπολογίας H και τις περιπτώσεις 2,5,8

Παράλληλα, η μεταβολή αυτή προκαλεί μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων κατά 0.007 N με μέγιστο μέσο όρο εφελκυστικής δύναμης 0.068 N στην περίπτωση (H.8). Αντιθέτως, το υλικό αυξάνεται κατά 0.0519 m με μέγιστο μήκος υλικού για κατασκευή 8.6644 m στην περίπτωση (H.8). Στην περίπτωση (H.8) η καμπυλότητα παρουσιάζει αύξηση της *Anticlastic* συμπεριφοράς κατά $K = -1.1822$ μονάδες από $K_{H1} = -3.9834$ σε $K_{H8} = -5.1656$ μονάδες.

Λόγω της αναλογίας μήκους νήματος και εφελκυστικών δυνάμεων, τα αποτελέσματα συσχετίζονται με περιπτώσεις μέγιστου και ελάχιστου επιτρεπόμενου συντελεστή (L/D), κάτι το οποίο δίνει τη δυνατότητα γεωμετρικής και στατικής αξιολόγησης κάθε ακραίας

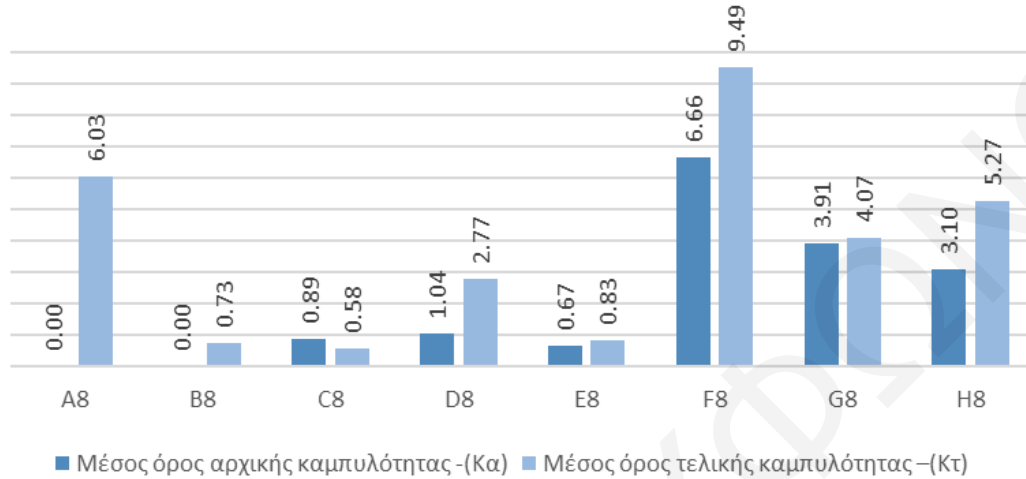
περίπτωσης στον πλήθος των λύσεων (Πίνακας 5.6). Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των ακραίων περιπτώσεων για κάθε κατηγορία, συσχετίζοντας το μέγιστο συντελεστή L/D που απαιτείται για τον μηδενισμό των χαλαρώσεων στα νήματα, τον ελάχιστο συντελεστή L/D που μπορεί να χειριστεί το εργαλείο τελικής δράσης, την αρχική *Gaussian* καμπυλότητα της επιφάνειας, την τελική *Gaussian* καμπυλότητα του δομικού πλέγματος και το μέσο όρο της εφελκυστικής τάσης.

Μέγιστος συντελεστής L/D								
	A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8
Μέσος όρος αρχικής καμπυλότητας (-K _α)	0.000	0.000	0.889	1.035	0.670	6.659	3.908	3.104
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας (-K _τ)	6.032	0.730	0.576	2.768	0.833	9.491	4.065	5.274
Συντελεστής L/D	82.24%	90.85%	93.45%	85.82%	91.85%	89.47%	91.88%	91.21%
Μέσος όρος τάσης [N]	0.136	0.069	0.053	0.115	0.066	0.075	0.061	0.069
K = (-K_α)-(-K_τ)	-6.032	-0.730	0.313	-1.733	-0.163	-2.832	-0.158	-2.170
Ελάχιστος συντελεστής L/D								
	A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8
Μέσος όρος αρχικής καμπυλότητας (-K _α)	0.000	0.000	0.889	1.035	0.670	6.659	3.908	3.104
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας (-K _τ)	6.717	1.328	1.363	3.035	1.128	10.348	4.768	5.554
Συντελεστής L/D	70.05%	70.09%	70.02%	70.04%	70.10%	70.10%	70.05%	70.01%
Μέσος όρος τάσης [N]	0.314	0.372	0.381	0.345	0.379	0.344	0.367	0.368
K = (-K_α)-(-K_τ)	-6.717	-1.328	-0.474	-2.000	-0.458	-3.689	-0.861	-2.450

Πίνακας 5.6. Περιπτώσεις λύσεων με μέγιστο και ελάχιστο συντελεστή L/D για τις κατηγορίες τυπολογίας A.8-H.8.

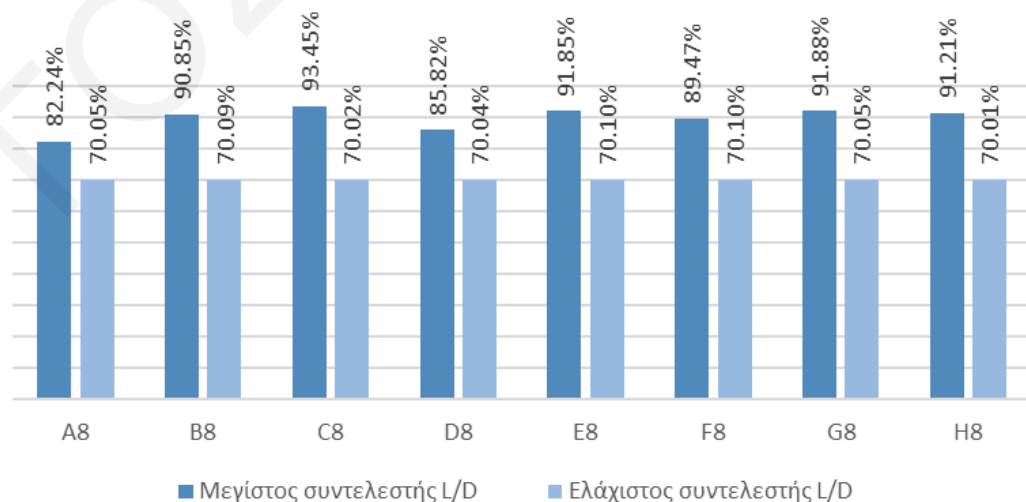
Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η περίπτωση A.8 έχει την μεγαλύτερη μεταβολή της *Gaussian* καμπυλότητας από επιφάνεια κύλισης (*ruled surface*) $K = 0$ μονάδες σε *anticlastic* δομικό πλέγμα με μέσο όρο *Gaussian* καμπυλότητας $K_t = -6.032$ μονάδες και το ελάχιστο απαιτούμενο συντελεστή L/D για μηδενισμό των χαλαρώσεων στα νήματα $L/D = 82.24\%$. Έτσι, η περίπτωση A.8 απαιτεί την μεγαλύτερη αρχική παραμόρφωση στα νήματα για να μπορεί να κατασκευαστεί. Σε αντίθεση, η περίπτωση G.8 δίνει την καλύτερη κατασκευάσιμη σχεδιαστική επίλυση με την ελάχιστη μεταβολής *Gaussian* καμπυλότητα από $K_a = -3.908$ μονάδες σε $K_t = -4.065$ μονάδες με μεταβολή -0.158 μονάδες και το μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή $L/D = 91.88\%$. Κατά συνέπεια, στην επιφάνεια G.8 το μοτίβο

προσαρμόζεται χωρίς χαλαρώσεις στα νήματα με την ελάχιστη αρχική παραμόρφωση, επιτρέποντας την κατασκευή από το εργαλείο τελικής δράσης (Εικόνα 5.34).

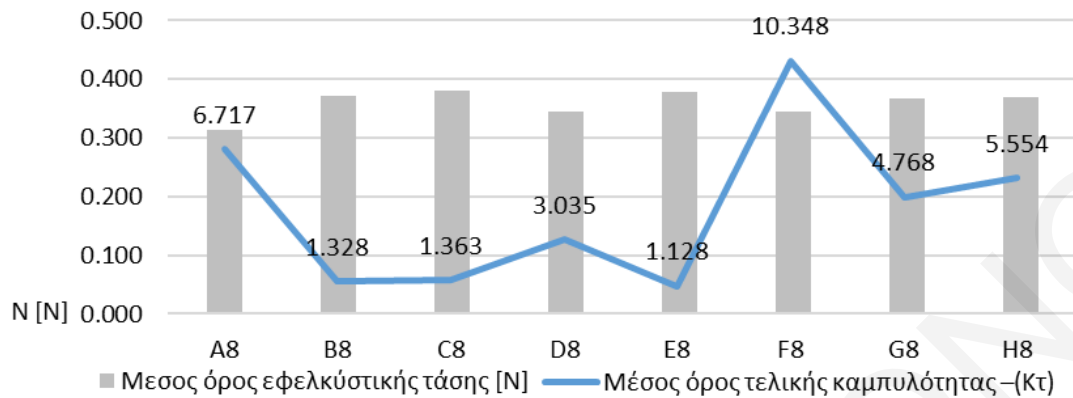


Εικόνα 5.34. Γραφική παράσταση συσχετισμού της αρχικής *Gaussian* καμπυλότητας με την τελική *Gaussian* καμπυλότητα στις επιφάνειες των ελαστικών πλεγμάτων.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Πίνακας 5.6) που αναφέρονται στη μεταβολή από μέγιστο σε ελάχιστο συντελεστή L/D (Εικόνα 5.35) αποδεικνύουν ότι η περίπτωση F.8 παρουσιάζει την καλύτερη *antitlastic* βελτίωση με μέγιστη μεταβολή *Gaussian* καμπυλότητας $K = -0.857$ μονάδες από $K_t = -9.491$ μονάδες σε $K_t = -10.348$ μονάδες. Αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως η λύση ελαστικού πλέγματος με την καλύτερη στατική συμπεριφορά σε κατακόρυφη εξωτερική φορτίση (Beccarelli, 2015; Lewis, 2003) με μέσο όρο εφελκυστικής τάσης 0.344 N (Εικόνα 5.36 και Εικόνα 5.37).

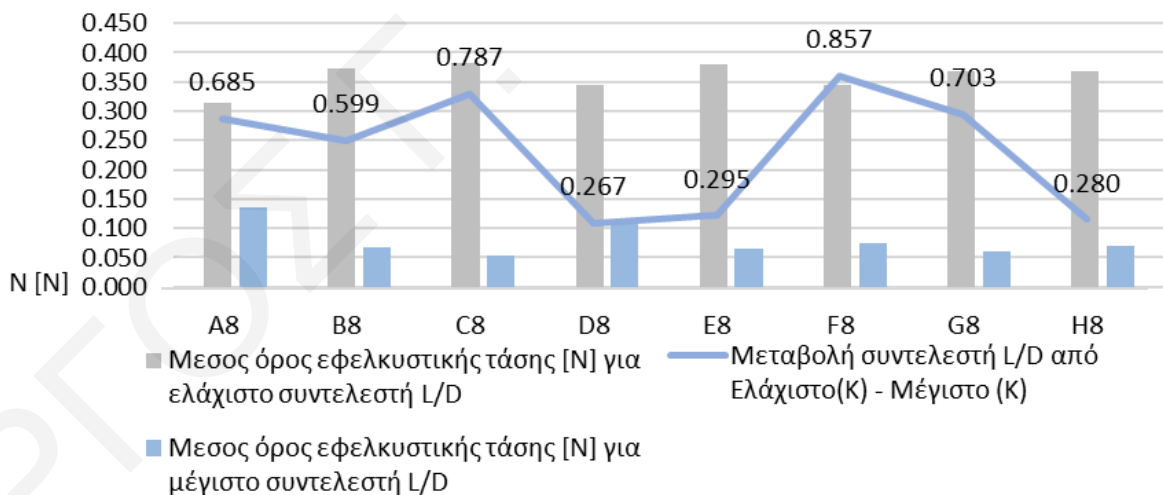


Εικόνα 5.35. Γραφική παράσταση που παρουσιάζει τη μεταβολή από τον μέγιστο στον ελάχιστο συντελεστή L/D .



Εικόνα 5.36. Γραφική παράσταση μέσου όρου εφελκυστικής τάσης και μέσου όρου τελικής καμπυλότητας.

Επιπλέον, διερευνώντας τα καλύτερα κατασκευαστικά αποτελέσματα γίνεται συσχετισμός της μεταβολής του συντελεστή L/D. Η μεταβολή του συντελεστή L/D επηρεάζει την *Gaussian* καμπυλότητα των δομικών πλεγμάτων, όπου στη περίπτωση D.8 έχει τις ελάχιστες γεωμετρικές μεταβολές από $K = -0.267$ σε $K = -1.733$ σε $K = -2.000$ μονάδες, με αύξηση του μέσου όρου εφελκυστικής τάσης κατά 0.23 N από 0.115 N (μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής L/D) σε 0.345 N (ελάχιστος επιτρεπόμενος συντελεστής L/D) (Εικόνα 5.37).



Εικόνα 5.37. Γραφική παράσταση συσχετισμού μεταβολής του συντελεστή L/D και του αποτελέσματος μεταβολής *Gaussian* καμπυλότητας.

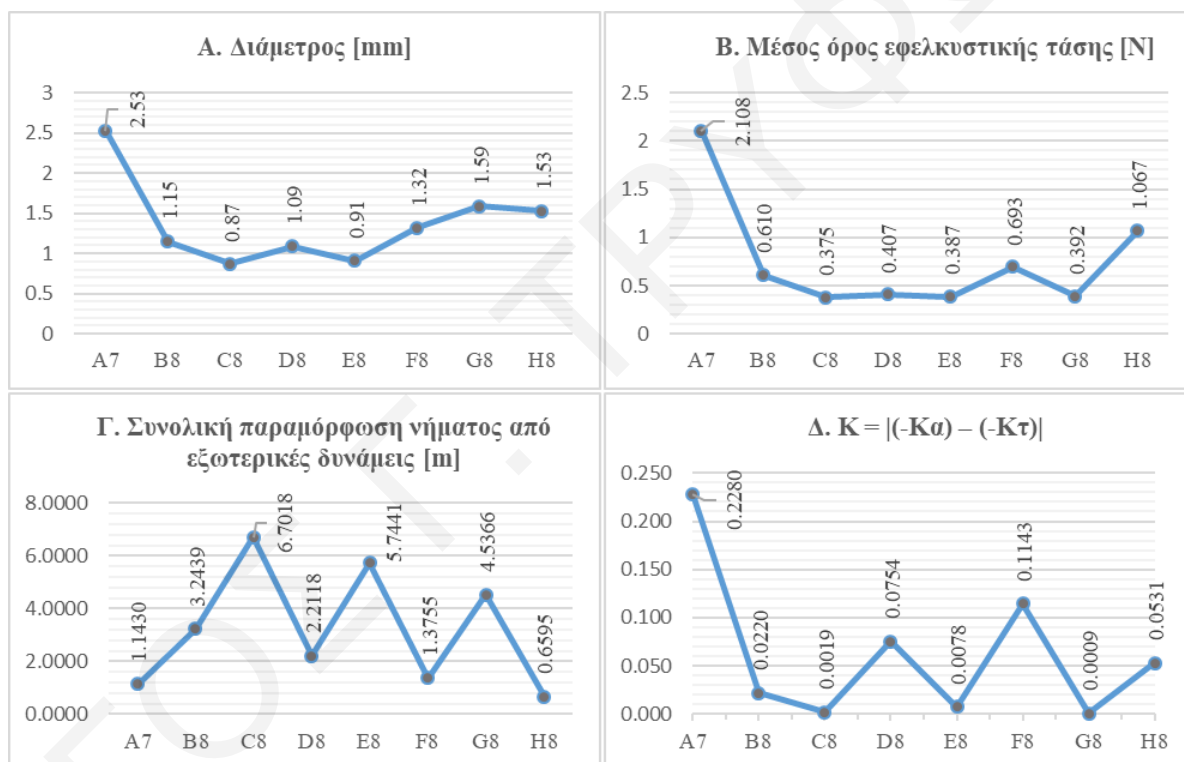
5.5.2_ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΕΥΡΕΣΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα οκτώ παραδείγματα περιπτώσιολογικών μελετών με διαστάσεις 4x4 m και 36 επαναλαμβανόμενες μονάδες ως προς την αποτελεσματικότερη εφαρμογή του προτεινόμενου μοτίβου ύφανσης στη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης.

Όπως και στην περίπτωση διερεύνησης κατασκευών σε μικρό μέγεθος 0.7 x 0.7 m (Κεφάλαιο 5.5.1), σε αυτό το κεφάλαιο η εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων πολλαπλών στόχων (MOGA) στοχεύει στην πολυκριτηριακή ανάλυση έχοντας υπόψη τις παραμέτρους του υλικού και της γεωμετρίας, αλλά και των στατικών και κατασκευαστικών περιορισμών. Σε αυτό το μέγεθος ανάλυσης των κατασκευών, στόχος είναι η μείωση του μέσου όρου των εφελκυστικών δυνάμεων, της ποσότητας του υλικού, που συσχετίζεται με το ιδιοβάρος της κατασκευής και της παραμόρφωσης των νημάτων από εξωτερική κατακόρυφη φόρτιση 1 kN/m², η οποία κατανέμεται στους κόμβους του δομικού πλέγματος. Αυτό γίνεται μέσα από τον παραμετρικό έλεγχο της μεταβολής του συντελεστή L/D, της μεταβολής της διατομής των νημάτων και της μετακίνησης της θέσης των κόμβων. Η συνεχόμενη ανατροφοδοτούμενη διαδικασία (Lhote et al., 1999) προσφέρει τη δυνατότητα αξιολόγησης των λύσεων μέσω του βέλτιστου Pareto, κατηγοριοποιώντας τις με βάση τη γεωμετρική και τη στατική συμπεριφορά τους. Οι λύσεις με τη λιγότερη παραμόρφωση των νημάτων σε εξωτερικές φορτίσεις θεωρούνται στατικά καλύτερες για κατασκευή και οι λύσεις με μικρότερη μεταβολή της καμπυλότητας τους θεωρούνται γεωμετρικά καλύτερες για κατασκευή. Η πιο πάνω κατηγοριοποίηση έχει ως στόχο την ανάδειξη των βέλτιστων και δυσμενέστερων σχεδιαστικών λύσεων.

Αναλυτικά, συγκρίνοντας τη γεωμετρική συμπεριφορά τους διαφαίνεται ότι η περίπτωση A.8 έχει το μεγαλύτερο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης (Εικόνα 5.38.B) με 2.1076 N σε αντίθεση με την περίπτωση C.8 όπου εμφανίζει το μικρότερο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης 0.375 N. Αναλογικά, η διατομή του υλικού που απαιτείται για την εφαρμογή της τεχνικής ύφανσης από το εργαλείο τελικής δράσης (Εικόνα 5.38.A) στην περίπτωση A.8 είναι η μεγαλύτερη και στην περίπτωση C.8 η μικρότερη με $\delta_{A.8} = 2.53$ mm και $\delta_{C.8} = 0.87$ mm αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η περίπτωση C.8 με την μικρότερη διατομή εμφανίζει την μεγαλύτερη συνολική παραμόρφωση των νημάτων με 6.7018 m (Εικόνα 5.38.Γ) λόγω εξωτερικών φορτίων. Επιπρόσθετα, η περίπτωση A.8 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μεταβολή

Gaussian καμπυλότητα (Εικόνα 5.38.Δ), από $K_{\alpha} = 0$ σε $K_{\tau} = -0.228$ μονάδες και αυτό συμπίπτει με την ανάγκη χρήσης περισσότερου υλικού με συνολικό μήκος 316.421 m. Αντιθέτως, η περίπτωση C.8 παρουσιάζει λιγότερη μεταβολή στην καμπυλότητα με τιμή $K = 0.0019$ μονάδες, από $K_{\alpha} = 0.027$ σε $K_{\tau} = 0.0251$ μονάδες και το λιγότερο απαιτούμενο υλικό για κατασκευή του πλέγματος με συνολικό μήκος 233.515 m. Επειδή η περίπτωση G.8 βασίζεται στην ίδια μεταβολή και στις δύο καμπύλες για τη δημιουργία επιφάνειας, η οποία έχει καλύτερη *anticlastic* καμπυλότητα σέλας (Bechthold, 2008), αυτή είναι βέλτιστη όσον αφορά τη μεταβολή της καμπυλότητας με τιμή $K=0.0009$ και τον μεγαλύτερο συντελεστή $L/D = 85.98 \%$.



Εικόνα 5.38. Γραφικές παραστάσεις καλύτερων γεωμετρικά λύσεων συμπεριφοράς σε σχέση με τη στατική τους απόδοση.

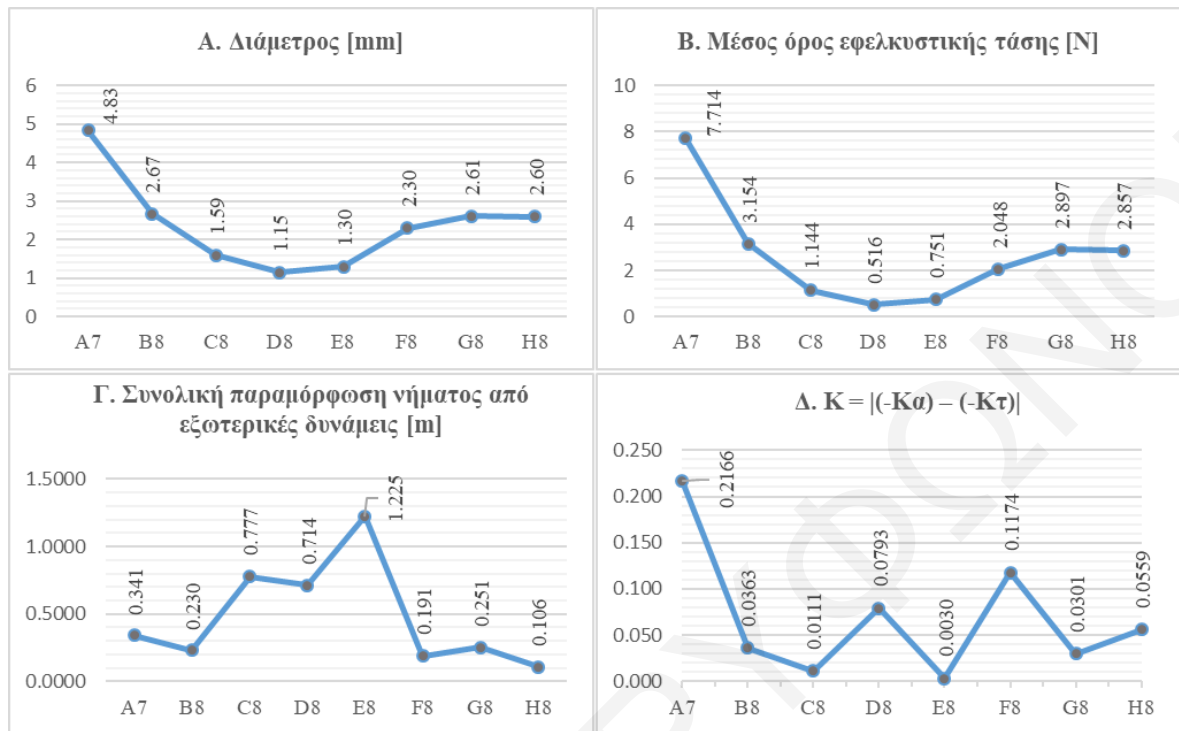
Συμπερασματικά, η κατηγορία G θεωρείται η γεωμετρικά βέλτιστη επιφάνεια στην οποία προσαρμόζεται το προτεινόμενο μοτίβο ύφανσης με το μεγαλύτερο συντελεστή L/D και την ελάχιστη γεωμετρική μεταβολή. Παρ' όλα αυτά, η περίπτωση G.8 με διατομή υλικού 1.59 mm, μέσο όρο εφελκυστικής τάσης 0.3924 N και συνολικό απαιτούμενο μήκος νήματος 298.93 m (Πίνακας 5.7), παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη παραμόρφωση σε εξωτερικά φορτία 4.5366 m και έχει χαμηλή στατική απόδοση σε σχέση με την περίπτωση H.8 που έχει τη μικρότερη παραμόρφωση νημάτων σε εξωτερική φόρτιση με 0.6595 m.

Περιπτώσεις	A7	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8
L/D [%]	70.00	70.00	70.00	73.27	70.00	70.00	85.98	70.00
Διάμετρος [mm]	2.53	1.15	0.87	1.09	0.91	1.32	1.59	1.53
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	2.1076	0.6102	0.375	0.407	0.387	0.6931	0.3924	1.067
Συνολικό μήκος νήματος [m]	316.421	264.388	233.515	270.084	241.439	269.645	298.9334	249.868
Συνολική παραμόρφωση νήματος από εξωτερικές δυνάμεις [m]	1.1430	3.2439	6.7018	2.2118	5.7441	1.3755	4.5366	0.6595
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας (-K _τ)	0.228	0.022	0.0251	0.1073	0.0125	0.3177	0.1179	0.1474
K = (-K _α) - (-K _τ)	-0.228	-0.022	0.0019	-0.0754	0.0078	-0.1143	0.0009	-0.0531

■ Μέγιστο ■ Ελάχιστο

Πίνακας 5.7. Επιλεγμένες βέλτιστες γεωμετρικά λύσεις κάθε κατηγορίας σε σχέση με τη στατική απόδοση τους.

Σε συνέχεια, συγκρίνοντας τις επιλεγμένες λύσεις όσον αφορά τη στατική συμπεριφορά τους, διαφαίνεται ότι η περίπτωση A.8 παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης (Εικόνα 5.39.B) 7.7135 N και η περίπτωση D.8 το χαμηλότερο μέσο όρο εφελκυστικής τάσης με τιμή 0.5155 N. Αναλογικά, η διατομή (Εικόνα 5.39.A) και το μήκος του υλικού που απαιτείται για χρήση από το εργαλείο τελικής δράσης στην περίπτωση A.8 είναι $\delta = 4.83$ mm και 316.423 m αντίστοιχα και χαρακτηρίζεται ως η πιο ασύμφορη κατηγορία με απαιτούμενο υλικό 1.5283 m³. Σε αντίθεση, η περίπτωση D.8 μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πιο οικονομική με διατομή $\delta_{D.8} = 1.15$ mm και μήκος νήματος στα 260.309 m που αναλογεί σε 0.2994 m³ απαιτούμενου υλικού. Επιπλέον, η περίπτωση C.8, η οποία είναι καλύτερη γεωμετρικά, έχει τη μικρότερη καμπυλότητα και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξωτερική παραμόρφωση (Εικόνα 5.39.Γ) στα νήματα της υπό την άσκηση εξωτερικής κατακόρυφης φόρτισης. Σε αντίθεση, η περίπτωση H.8 μπορεί να χαρακτηριστεί ως η καλύτερη στατικά με την μικρότερη παραμόρφωση (Εικόνα 5.39.B) στα νήματα κατά την άσκηση εξωτερικών κατακόρυφων φορτίων με τιμή 0.10604 m (Πίνακας 5.8).



Εικόνα 5.39. Γραφικές παραστάσεις καλύτερων στατικά λύσεων σε σχέση με τη γεωμετρική τους μεταβολή.

Περίπτώσεις	A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8
L/D [%]	70.00	70.00	70.09	70.60	70.00	70.00	70.00	70.00
Διάμετρος [mm]	4.83	2.67	1.59	1.15	1.3	2.3	2.61	2.6
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	7.7135	3.1535	1.1443	0.5155	0.7506	2.0484	2.897	2.8569
Συνολικό μήκος νήματος [m]	316.423	264.317	233.675	260.309	241.409	269.571	245.080	249.199
Συνολική παραμόρφωση νήματος από εξωτερικές δυνάμεις [m]	0.3415	0.2304	0.7773	0.7141	1.2249	0.1905	0.2505	0.10604
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας (-K _τ)	0.2166	0.0363	0.0381	0.1112	0.0233	0.3208	0.1489	0.1502
$K = (-K\alpha) - (-K\tau)$	-0.2166	-0.0363	-0.0111	-0.0793	-0.003	-0.1174	-0.0301	-0.0559

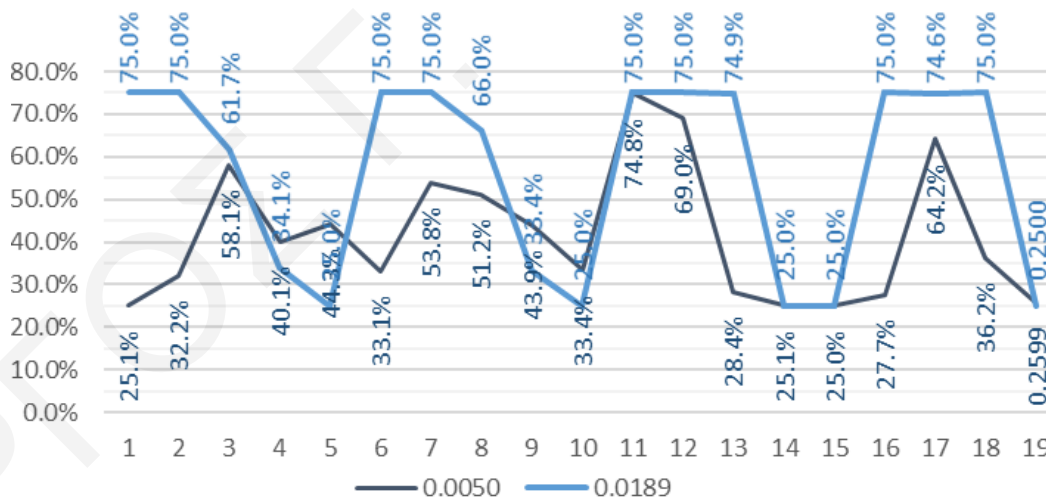
■ Μέγιστο ■ Ελάχιστο

Πίνακας 5.8. Επιλεγμένες βέλτιστες στατικά λύσεις κάθε κατηγορίας σε σχέση με τη γεωμετρική μεταβολή τους.

Συμπερασματικά, η κατηγορία H.8 παρουσιάζει τη λιγότερη εξωτερική παραμόρφωση στα νήματα και θεωρείται η επιφάνεια στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί αποδοτικότερα η προτεινόμενη διαδικασία ύφανσης. Σε αντίθεση, η κατηγορία A.8 με μηδενική *Gaussian* καμπυλότητα επιφάνειας θεωρείται η δυσμενέστερη στατικά αφού έχει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση στα νήματα και ως εκ τούτου είναι δύσκολη η εφαρμογή σε αυτήν της

προτεινόμενης κατασκευαστικής τεχνικής. Επίσης, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καταπόνηση στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα κατά τη διαδικασία κατασκευής της.

Επιπρόσθετα, επειδή στις περισσότερες λύσεις ο συντελεστής L/D είναι σταθερός στα 70 %, διερευνάται η αποτελεσματικότητα της μετακίνησης των αρθρώσεων και της θέσης των κόμβων (Εικόνα I.1 - Εικόνα I.8). Για παράδειγμα, στην περίπτωση B.8 απομονώνονται δύο λύσεις με συντελεστή $L/D = 70\%$ και διατομή $\delta = 0.004\text{ mm}$, στις οποίες μελετάται η μετακίνηση των αρθρώσεων από 25 - 75 % και η συμπίπτουσα θέση των κόμβων. Η μετακίνηση των αρθρώσεων στις δύο λύσεις (Εικόνα 5.40) επιφέρει μείωση της παραμόρφωσης των νημάτων λόγω εξωτερικής φόρτισης αλλά και του μέσου όρου εφελκυστικής τάσης κατά 0.0139 m, από 0.0189 m σε 0.005 m και κατά 0.0005 N, από 0.0336 N σε 0.0331 N. Η μετακίνηση των αρθρώσεων θεωρείται σημαντική παράμετρος στη βελτιστοποίηση της στατικής συμπεριφοράς του εφελκυσμένου πλέγματος, αφού σε περιπτώσεις όπου ο συντελεστής L/D και η μεταβολή της διατομής δεν μπορούν να επηρεάσουν περαιτέρω τη στατική βελτιστοποίηση του συστήματος, η μεταβολή της θέσης των κόμβων μπορεί να επιφέρει περαιτέρω ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης λόγω κατακόρυφων εξωτερικών φορτίων και εφελκυστικής τάσης.



Εικόνα 5.40. Γραφική παράσταση δύο λύσεων με συντελεστή $L/D = 70\%$ και διατομή νήματος $\delta = 0.004\text{ mm}$ στην περίπτωση B.8 που εμφανίζουν διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις αρθρώσεις και μετατοπίσεις των κόμβων τους. Αυτό επιφέρει μεταβολή της παραμόρφωσης των νημάτων από εξωτερικά φορτία από 0.005 m σε 0.0189 m.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής, στατικού ελέγχου και βελτιστοποίησης αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο κατασκευαστικό μοτίβο προσθετικής ύφανσης με ελαστικά νήματα μπορεί να προσαρμόζεται σε πολλαπλές επιφάνειες με διαφορετική καμπυλότητα. Επιπρόσθετα, επιφάνειες με παραμέτρους όμοιες

των κατηγοριών A και B θεωρούνται δυσμενέστερες για εφαρμογή του μοτίβου ύφανσης, αφού αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις λόγω εξωτερικών φορτίων και απαιτούν μεγάλες αξονικές δυνάμεις, κάτι το οποίο επιβαρύνει τη διαδικασία κατασκευής. Σε αντίθεση, επιφάνειες όμοιες των κατηγοριών C και D πλεονεκτούν στην κατασκευαστική διαδικασία, αφού δημιουργούν την ελάχιστη επιβάρυνση στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα και απαιτούν το ελάχιστο υλικό για κατασκευή. Επιπλέον, επιφάνειες όμοιες με την κατηγορία H αναπτύσσουν τις ελάχιστες παραμορφώσεις στα νήματα υπό την άσκηση κατακόρυφων εξωτερικών φορτίων και έχουν την καλύτερη στατική συμπεριφορά. Τέλος, επιφάνειες με όμοιες παραμέτρους των κατηγοριών E και G παρουσιάζουν την ελάχιστη γεωμετρική μεταβολή κατά τη διαδικασία προσαρμογής του προτεινόμενου μοτίβου στην επιφάνεια τους.

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης των εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων για κατασκευή από ρομποτικό βραχίονα αξιολογείται μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης με τη χρήση Γενετικών Αλγόριθμων πολλαπλών στόχων. Έχοντας ένα πλήθος από κατασκευαστικές και στατικές παραμέτρους και περιορισμούς, μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης παράγονται επιθυμητές λύσεις, όσον αφορά την γεωμετρική και στατική τους συμπεριφορά. Οι λύσεις αξιολογούνται για την εξεύρεση της μορφής του μοτίβου ύφανσης, το οποίο μπορεί να εφαρμόζεται σε επιφάνεια, αναλύοντας παράλληλα τις δυσμενέστερες και βέλτιστες εξ αυτών, οι οποίες θα μπορούσαν να περάσουν στη διαδικασία κατασκευής τους μέσω ρομποτικού βραχίονα και εργαλείου τελικής δράσης.

Αναλυτικά, η πιο πάνω διαδικασία αξιολόγησης επιτυγχάνεται με τη διαφοροποίηση της αρχικής καμπυλότητας της επιφάνειας των οκτώ κατηγοριών τυπολογίας, στις οποίες εφαρμόζεται το μοτίβο ύφανσης. Η πολυκριτηριακή ανάλυση επηρεάζεται από το αρχικό μήκος των νημάτων και τη θέση των κόμβων και στοχεύει στην επιλογή ανακλαστικών γεωμετριών χωρίς χαλαρώσεις στα νήματα του πλέγματος. Έτσι, προτείνονται λύσεις που διαχωρίζονται σε στατικά και γεωμετρικά βέλτιστες. Οι στατικά βέλτιστες λύσεις έχουν μικρότερη παραμόρφωση των νημάτων λόγω εξωτερικών φορτίων και οι γεωμετρικά βέλτιστες έχουν την λιγότερη γεωμετρική μεταβολή που ελέγχεται με βάση την *Gaussian* καμπυλότητα τους.

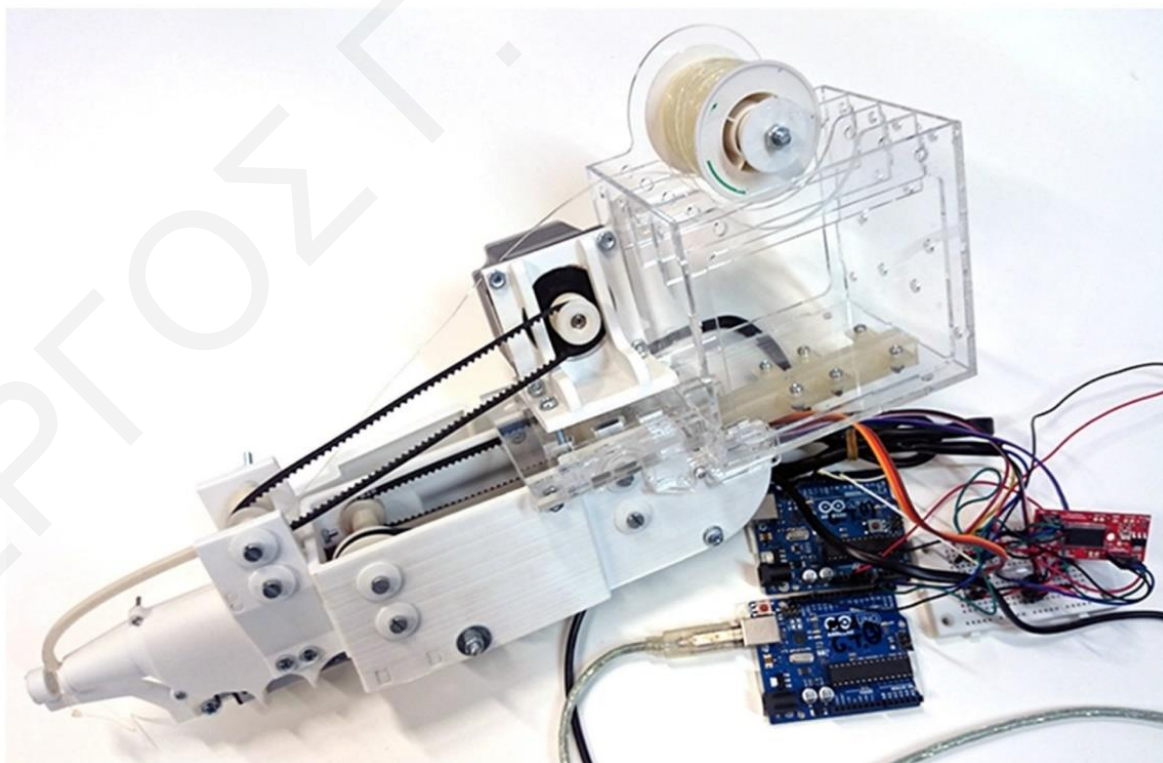
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδεικνύουν την ανάγκη αλληλεπίδρασης των δύο βασικών πεδίων της ερευνάς, δηλαδή της εφαρμογής ρομποτικού βραχίονα και εργαλείου τελικής δράσης για τη συνεχόμενη ύφανση του πλέγματος και τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και παραμετρικής βελτιστοποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, εισάγοντας κατασκευαστικές δυνατότητες και περιορισμούς. Αυτοί έχουν να κάνουν με την αποτελεσματικότητα δημιουργίας της αρχικής παραμόρφωσης στα νήματα, αλλά και τη δημιουργία των κόμβων, κάτι το οποίο βασίζεται στο εργαλείο τελικής δράσης. Επίσης, ένα άλλο σημαντικό στοιχείο έχει να κάνει με την διερεύνηση του αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής. Η αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου εξεύρεσης μορφής επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των μετατοπίσεων στους κόμβους μέσω της χρήσης του στατικού προγράμματος μη-γραμμικής ανάλυσης *CSI SAP2000* (Wolfgang, 2015). Τέλος, η διαδικασία εξεύρεσης μορφής και στατικής ανάλυσης συσχετίζεται με την ακρίβεια στην διαδικασία εφαρμογής του μοτίβου ύφανσης σε κάθε επιφάνεια πλέγματος, επιτυγχάνοντας την παραγωγή και την επιλογή μορφών ‘έτοιμων προς κατασκευή’.

6.0_ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΕΛΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ

6.1_ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο εστιάζεται στη διερεύνηση της προσθετικής διαδικασίας ύφανσης των νημάτων ελαστομερούς πολυουρεθάνης (*Polyurethane Elastomer*) μέσα από το σχεδιασμό του εργαλείου τελικής δράσης. Μετά την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας μέσω των διαδικασιών εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης (Κεφάλαιο 5.0), η έρευνα επικεντρώνεται στην κατασκευή της μέσω ρομποτικών μηχανισμών που αποσκοπούν στην προσθήκη ελαστικών νημάτων και στη δημιουργία των κόμβων του πλέγματος. Αυτό απαιτεί μετάφραση των ψηφιακών δεδομένων του πλέγματος σε συνεχόμενη κίνηση ύφανσης από την ρομποτική μηχανή αλλά και ακρίβεια στην προσθήκη του υλικού μέσω του εργαλείου τελικής δράσης (Κεφάλαιο 7.0).

Το εργαλείο τελικής δράσης εξελίσσεται μέσω μιας σειράς από δοκιμές εφαρμογής και διαδικασίες σωστού – λάθους (Εικόνα 6.1), διερευνώντας παράλληλα σε πειραματικό επίπεδο την ιδιαιτερότητα του υλικού όσον αφορά την ελαστικότητα και τον τρόπο συγκόλλησης του.



Εικόνα 6.1. Αρχικό φυσικό πρωτότυπο του εργαλείου τελικής δράσης και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ενεργοποιητών.

Επειδή βασικό στοιχείο της υλικότητας του νήματος είναι η σιλικόνη, για την συγκόλληση των νημάτων αποφασίζεται η χρήση κολλητικής σιλικόνης με διαδικασία τήξης, χύτευσης και σταθεροποίησης. Με βάση τις παρατηρήσεις από τις δοκιμές και τις απαιτήσεις ελέγχου των ελαστικών νημάτων, το εργαλείο τελικής δράσης εξελίσσεται έχοντας ως βάση λειτουργίας του τρεις ενέργειες:

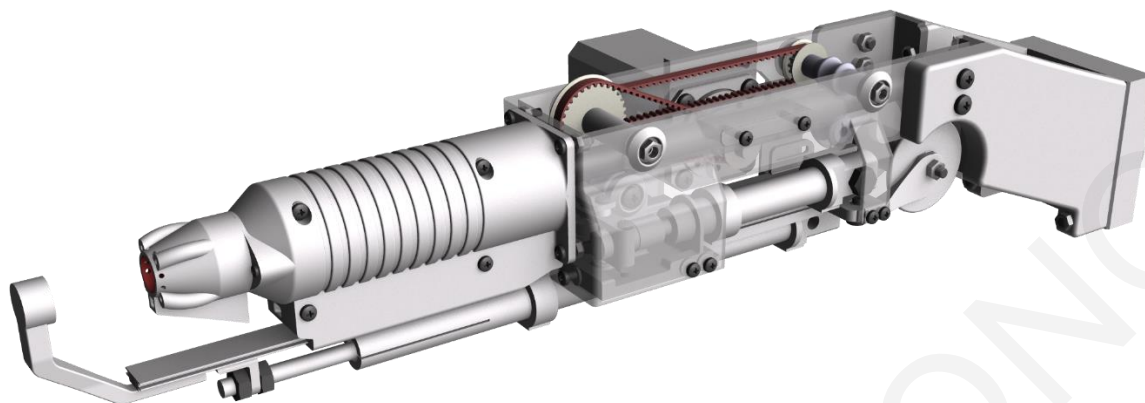
1. Αρχική παραμόρφωση και τροφοδοσία του νήματος,
2. Τροφοδοσία και τήξη της κολλητικής σιλικόνης,
3. Συγκράτηση και δημιουργία των κόμβων.

Αυτές βασίζονται στην μετάφραση των δεδομένων της επιλεγόμενης γεωμετρίας, η οποία προκύπτει μέσω της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, η σταδιακή μετατόπιση των κόμβων μεταφράζεται σε σημεία κίνησης του εργαλείου τελικής δράσης και εντολές ενεργοποίησης των τριών ενεργειών. Παράλληλα, γίνεται προσομοίωση του συνόλου των κινήσεων των ρομποτικών μηχανισμών, συμπεριλαμβάνοντας την κίνηση και την ενεργοποίηση τους από ένα ρομποτικό βραχίονα.

6.2_ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΕΛΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ

Μέσα από την εξέλιξη του προτεινόμενου εργαλείου τελικής δράσης, αυτό καταλήγει να συγκροτείται από δύο γραμμικούς και ένα κυκλικό ενεργοποιητή, των οποίων η κίνηση ελέγχει τα κινητά μέρη του. Ο προγραμματισμός και συγχρονισμός της κίνησης των ενεργοποιητών είναι υπεύθυνος για κάθε μια από τις διαδικασίες που αναφέρονται πιο πάνω, οι οποίες μέσω της βαθμονόμησης της κίνησης τους επιτυγχάνουν τη πρόσθεση των νημάτων. Ο σχεδιασμός της μορφής του εργαλείου τελικής δράσης (Εικόνα 6.2) καθορίζεται από παραμέτρους όπως:

- το μέγεθος των ενεργοποιητών,
- τη διατομή του υλικού που χειρίζεται τη σιλικόνη συγκόλλησης,
- τη διάμετρο του νήματος και τη βάση (άξονας $J6$) τοποθέτησης του εργαλείου τελικής δράσης με τον βραχίονα αλλά και το συνολικό βάρος του εργαλείου,
- το μέγεθος που καταλαμβάνουν τα κινητά μέρη.



Εικόνα 6.2. Τελική μορφή εργαλείου τελικής δράσης που προέκυψε μέσα από διαδικασία εξέλιξης.

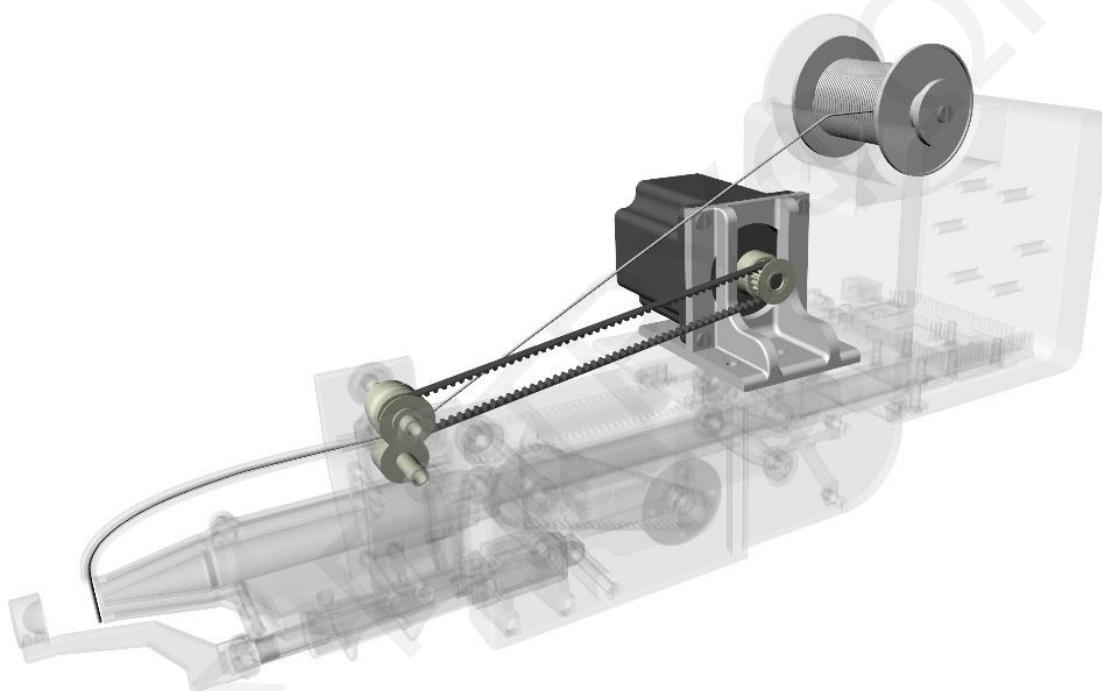
Για την κατασκευή και εξέλιξη του εργαλείου τελικής δράσης αποφασίζεται η εκτύπωση του σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με χρήση των υλικών *ABS* και *PLA*. Έτσι, για την συναρμολόγηση του εργαλείου τελικής δράσης σχεδιάζονται και εκτυπώνονται η θήκη και η βάση για τα κινητά και μηχανικά μέρη, στα οποία συναρμολογούνται και τοποθετούνται οι ενεργοποιητές με την χρήση κοχλιών. Για την τροφοδοσία των υλικών της σιλικόνης στην συσκευή τήξης αποφασίζεται η χρήση προκατασκευασμένων κυλίνδρων από *PLA*, οι οποίοι επικαλύπτονται με τραχύ γυαλόχαρτο για αύξηση των τριβών και περιστρέφονται έτσι που να καθοδηγούν το υλικό στην αναμενόμενη θέση. Η περιστροφή των κυλίνδρων γίνεται σε συνδυασμό με οδοντωτούς μιάντες, οδοντοτροχούς και γρανάζια, οι οποίοι μεταφέρουν την κίνηση από τους ενεργοποιητές στους κυλίνδρους τροφοδοσίας.

6.2.1_ ΈΛΕΓΧΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΝΗΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία τροφοδοσίας του ελαστικού νήματος αποσκοπεί στον ακριβή έλεγχο της κίνησης του νήματος από το καρούλι μέχρι το σημείο συγκόλλησης για τη δημιουργία του κόμβου. Το μήκος του ελαστικού νήματος είναι σημαντική παράμετρος στο φυσικό μοντέλο, αφού καθορίζει την αρχική παραμόρφωση που προκαλείται τοπικά στο κάθε νήμα και παραμορφώνει σταδιακά το εφελκόμενο ελαστικό πλέγμα. Επιπρόσθετα, η διάμετρος του υλικού έχει συγκεκριμένους περιορισμούς λόγω της ανάγκης χειρισμού των αξονικών δυνάμεων από το εργαλείο, της στατικής επάρκειας του εργαλείου (χρήση υλικών *PLA/ABS*) και των ασκούμενων δυνάμεων από το μηχανισμό εκτέλεσης της λειτουργίας.

Αρχικά, για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του νήματος αποφασίζεται η χρήση διπολικού βηματικού μοτέρ *NEMA 17 17HS08-1004S* με 1.8° ανά βήμα. Στο άκρο του βηματικού μοτέρ τοποθετείται οδοντοτροχός *15T* (Wanner, 2016), ο οποίος με την περιστροφή του

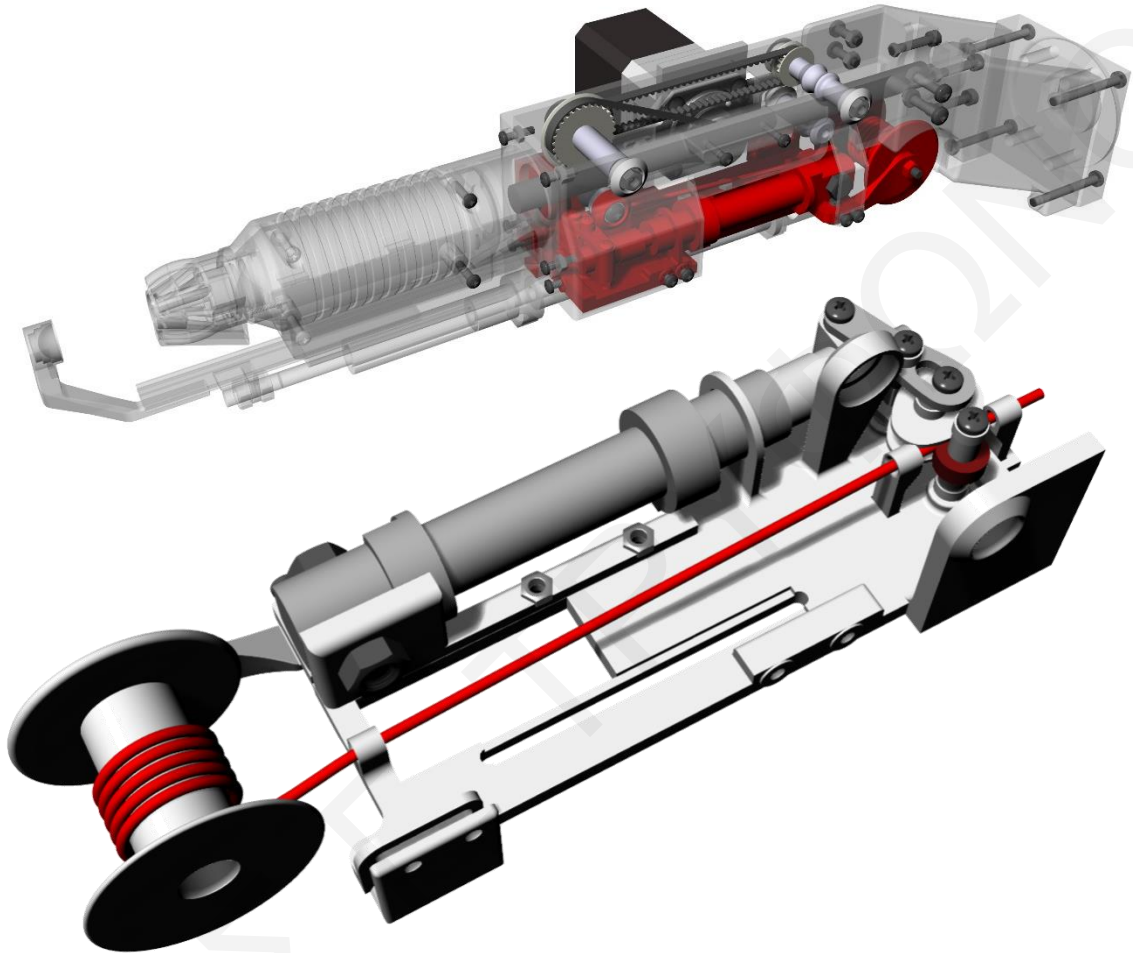
μεταδίδει την κίνηση σε οδοντικό μάντα (Wanner, 2016) και στη συνέχεια σε ιδίου τύπου οδοντοτροχό, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον περιστρεφόμενο κύλινδρο. Η πλήρης περίμετρος των 360⁰ μοιρών του βηματικού μοτέρ ισούται με την πλήρη περιστροφή των κυλίνδρων και το μήκος του νήματος που μπορεί να τροφοδοτήσει. Επίσης το καρούλι του υλικού τοποθετείται στο πίσω και κάτω μέρος του εργαλείου τελικής δράσης για εύκολη πρόσβαση και έλεγχο από το σχεδιαστή-χειριστή (Εικόνα 6.3) (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).



Εικόνα 6.3. Αρχικός μηχανισμός ελέγχου τροφοδοσίας του νήματος (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

Κατά τη διάρκεια εξέλιξης του εργαλείου παρατηρείται η ανάγκη βελτίωσης του ελέγχου παροχής και παραμόρφωσης του νήματος. Έτσι, για τη δημιουργία της σωστής αρχικής παραμόρφωσης, το νήμα κινείται διαμέσου δύο κυλίνδρων επικαλυμμένων με γυαλόχαρτο σε μεταβαλλόμενη απόσταση, εκ των οποίων ο ένας παραμένει σταθερός και ο δεύτερος μετατοπίζεται σε απόσταση 1.5 mm. Η μεταβολή της απόστασης επιτυγχάνεται μέσω του κυλίνδρου με πνευματικό έμβολο. Ως αποτέλεσμα, με τη χρήση γυαλόχαρτου αυξάνεται η τριβή στο νήμα και με τη γραμμική κίνηση του πνευματικού εμβόλου επιτυγχάνεται η μεταβολή της απόστασης των κυλίνδρων. Με το κλείσιμο του εμβόλου αυξάνεται η απόσταση των κυλίνδρων ελευθερώνοντας το νήμα και με το άνοιγμα του εμβόλου η απόσταση των κυλίνδρων μειώνεται συγκρατώντας το νήμα. Ο περιορισμός ροής του

νήματος δημιουργεί την απαιτούμενη παραμόρφωση σε αυτό, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα (Εικόνα 6.4).



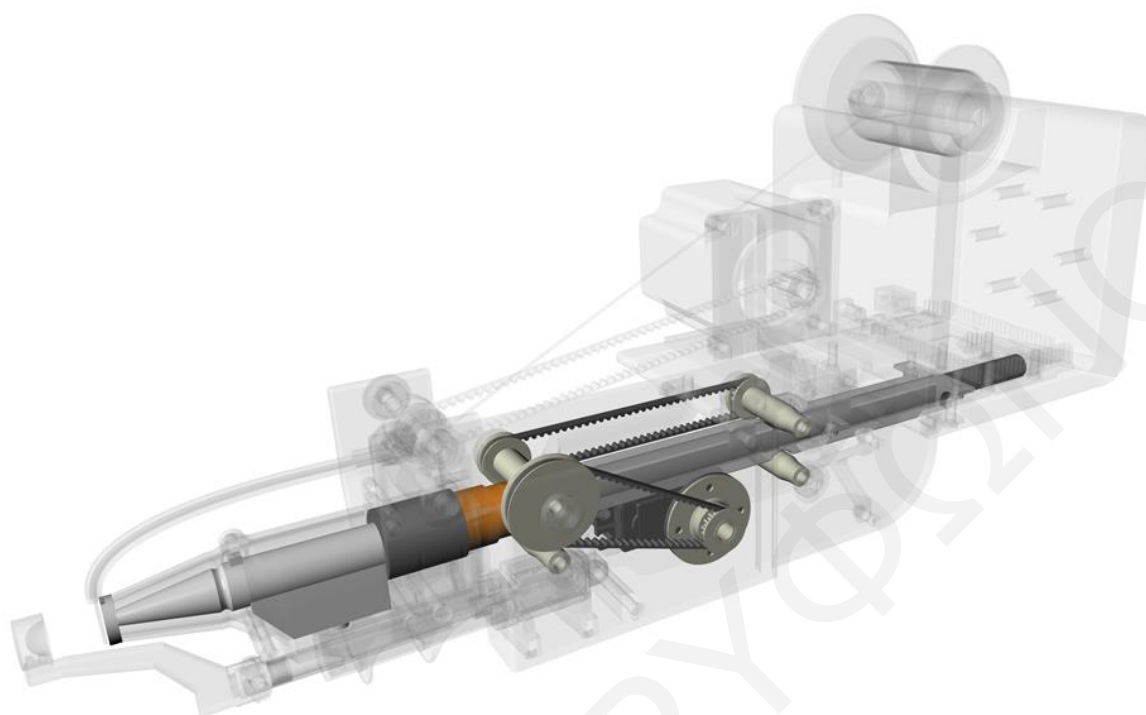
Εικόνα 6.4. Λεπτομέρεια ελέγχου του αρχικού μήκους νήματος και συγκράτησή του για την επίτευξη αρχικής παραμόρφωσης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται σε μεγέθυνση οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία.

Οι αρχικές δοκιμές έδειξαν πως η περιστροφή του βηματικού μοτέρ προκαλεί καθυστέρηση στην κίνηση του ρομποτικού βραχίονα και προβλήματα συγχρονισμού ταχύτητας και μήκους, κάνοντας πιο δύσκολο τον υπολογισμό του μήκους του νήματος και γενικά την κατασκευαστική διαδικασία. Έτσι, για τον υπολογισμό του αρχικού μήκους του νήματος αποφασίζεται να χρησιμοποιηθεί διάνυσμα κίνησης του εργαλείου τελικής δράσης. Συγκεκριμένα, το διάνυσμα υπολογίζεται από τον αλγόριθμο ελέγχου κίνησης του ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος ελευθερώνει ή συγκρατεί το νήμα σε προγραμματισμένη θέση από τον κόμβο και σε απόσταση που αντιπροσωπεύει το αρχικό μήκος του νήματος.

6.2.2_ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΤΗΞΗ ΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ

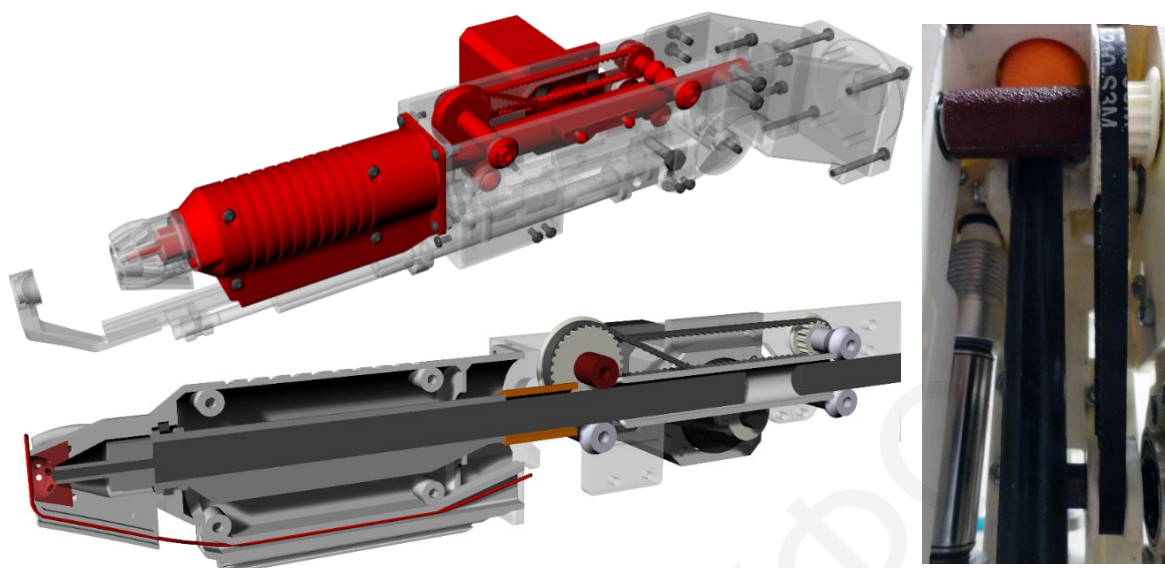
Για τη συγκόλληση των νημάτων μεταξύ τους και τη δημιουργία των αναμενόμενων κόμβων, αποφασίζεται η χρήση τεχνικής θέρμανσης και τήξης σιλικόνης (*hold meld silicone*). Σε αρχικά πειράματα παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, η μεγάλη θερμοκρασία επηρεάζει το σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ελαστικό νήμα να αστοχεί κατά τη διάρκεια εφελκυσμού του. Για αποφυγή της αστοχίας των ελαστικών νημάτων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης απαιτείται η βαθμονόμηση των θερμοκρασιών τήξης περίπου στους 120°C και η συγκράτηση του περιμετρικού τμήματος του σημείου συγκόλλησης. Επειδή το υλικό των νημάτων και η ράβδος τήξης αποτελούνται από υλικό της ίδια οικογένειας ελαστομερών, ο συνδυασμός τους θεωρείται ιδανικός για τη δημιουργία των συνδέσεων – κόμβων. Πρόκληση στην διαδικασία αυτή είναι η δημιουργία σταθερού μεγέθους σφαιρικών κόμβων που βοηθούν στην συγκόλληση των νημάτων μέσω της τήξης της σιλικόνης.

Αρχικά, η τροφοδοσία της ράβδου τήξης 11 mm γίνεται με την χρήση βηματικού μοτέρ *27:1 Planetary Gearbox Nema 17 (17HS19-1684S-PG27)* με 1.8⁰ μοίρες ανά βήμα. Με την περιστροφή του βηματικού μοτέρ ο οδοντοτροχός *S3M 15T (Wanner, 2016)* που βρίσκεται στο άκρο του μεταδίδει την περιστροφική κίνηση μέσω ιμάντα *S3M 210mm(70T)* (Wanner, 2016) σε οδοντοτροχό *S3M 30T*. Σκοπός της αύξησης του μεγέθους του οδοντοτροχού είναι η μείωση της ταχύτητας περιστροφής των κυλίνδρων σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του βηματικού μοτέρ, στοχεύοντας παράλληλα στην αύξηση της ροπής περιστροφής που δημιουργείται από τους κυλίνδρους (Εικόνα 6.5) (Kontovourkis and Tryfonos, 2015b; Kontovourkis and Tryfonos, 2016).



Εικόνα 6.5. Αρχική λεπτομέρεια τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλικόνης (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

Για τον καλύτερο έλεγχο της τροφοδοσίας της ράβδου τήξης, ο οδοντοτροχός *S3M 30T* συνδέεται επιπρόσθετα με τον οδοντοτροχό *S3M 15T*. Αυτοί είναι συνδεδεμένοι στη βάση των κυλίνδρων και μεταφέρουν την περιστροφική κίνηση μέσω του μάντα *S3M 255mm(85T)* (Wanner, 2016). Για τη διατήρηση της σωστής πορείας κίνησης της ράβδου τήξης σχεδιάζεται σωλήνας και παθητικοί κύλινδροι περιστροφής από υλικό (*PLA*), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως οδηγοί για την κίνηση της ράβδου σιλικόνης και την τροφοδοσία της συσκευής τήξης. Έτσι, με την περιστροφή των δύο κυλίνδρων το υλικό σπρώχνεται μέσα στην συσκευή τήξης. Αυτό μετατρέπει το στερεό υλικό σε υγρό, όπου στην θερμοκρασία 120°C χύνεται στο ημισφαίριο στο μπροστινό μέρος του εργαλείου τελικής δράσης για τη συγκόλληση του ελαστικού νήματος σιλικόνης και τη δημιουργία του κόμβου. Ως ακολούθως, για την καλύτερή ρύθμιση της θερμοκρασίας τήξης και έλεγχου του βηματικού μοτέρ, η συσκευή τήξης αναβαθμίζεται με την προσθήκη θερμοστάτη και ελεγχόμενου άκρου ροής πίεσης, που διακόπτει τη ροή της σιλικόνης όταν το βηματικό μοτέρ φτάσει σε κατάσταση ηρεμίας (Εικόνα 6.6).

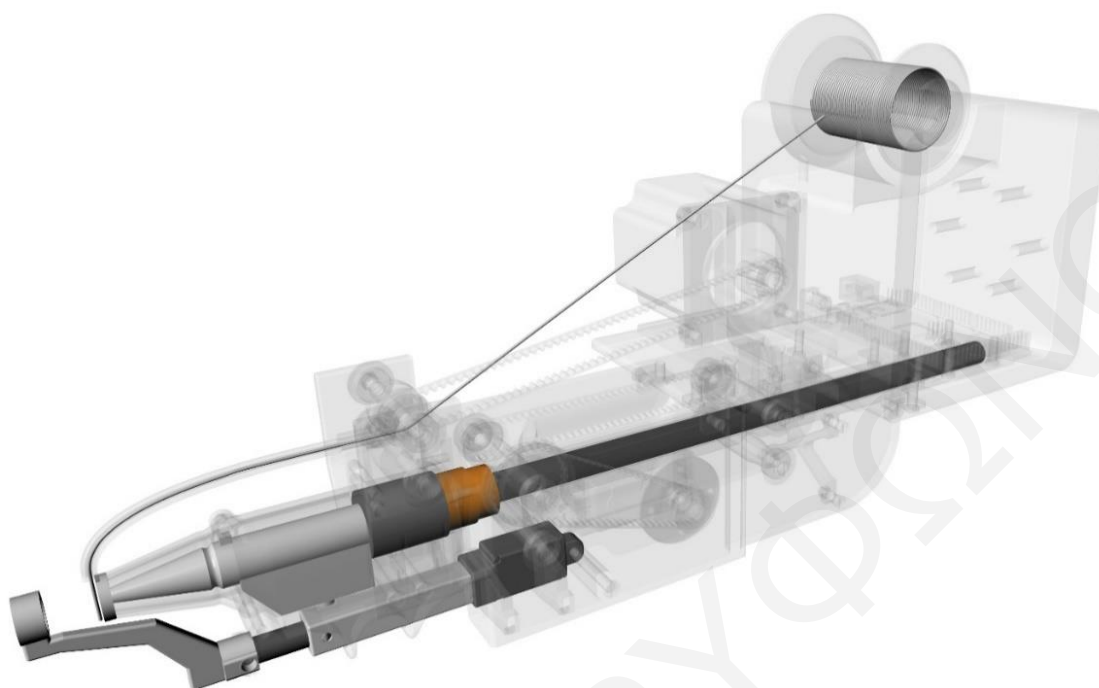


Εικόνα 6.6. Λεπτομέρεια μηχανισμών για την τροφοδοσία και τήξη της κολλητικής σιλικόνης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται σε μεγέθυνση τομής οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία.

6.2.3 ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΜΒΩΝ

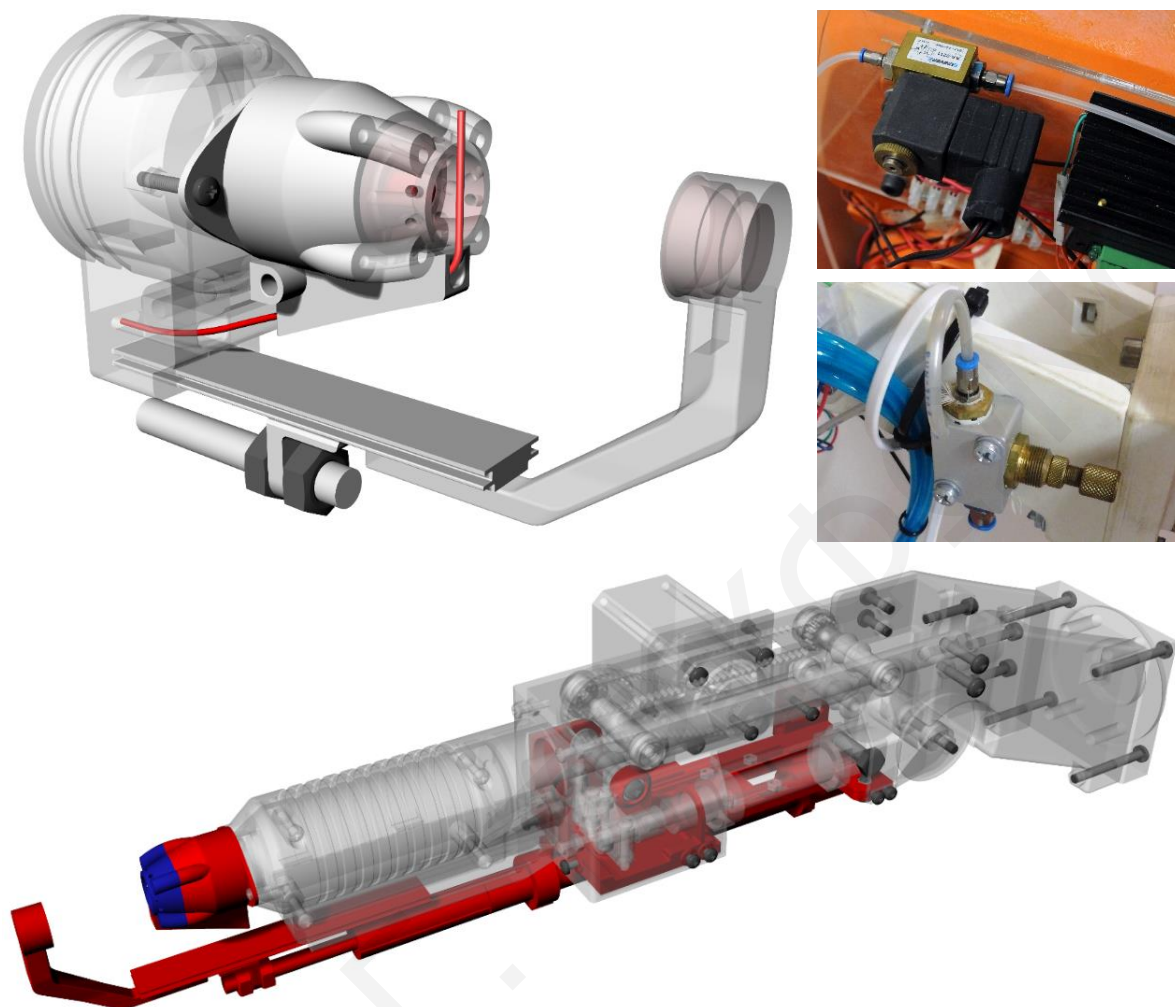
Σημαντικό χαρακτηριστικό στη διαδικασία ανάπτυξης των κόμβων και στον έλεγχο του νήματος είναι η προσέγγιση του εργαλείου στο επίπεδο δημιουργίας του και η συγκράτηση του νήματος. Η συγκράτηση των νημάτων κρίνεται απαραίτητη για τη μείωση των αστοχιών που προκαλούνται από την δημιουργία μεγάλης προέντασης που προκύπτει από την αρχική παραμόρφωση τους και την αυξημένη θερμοκρασία κατά τη διαδικασία τήξης της κολλητικής σιλικόνης.

Αρχικά, για τον έλεγχο της διαδικασίας συγκράτησης χρησιμοποιείται γραμμικός ενεργοποιητής. Με το σχεδιασμό και την τρισδιάστατη εκτύπωση μίας προκατασκευασμένης προεξοχής – αρπαγής στο μπροστινό μέρος του εργαλείου τελικής δράσης, ελέγχεται ο τρόπος που γίνεται η προσέγγιση του επιπέδου δημιουργίας του κόμβου και η συγκράτηση του υλικού από το εργαλείο τελικής δράσης. Η προεξοχή έχει ημισφαιρικό σχήμα με σκοπό τη μορφοποίηση και τη δημιουργία των σφαιρικών κόμβων. Με το κλείσιμο του γραμμικού ενεργοποιητή, η προεξοχή κινείται γραμμικά στο κατακόρυφο επίπεδο της συσκευής τήξης και συγκρατεί τα νήματα για τη δημιουργία του κόμβου (Εικόνα 6.7) (Kontovourkis and Tryfonos, 2015b; Kontovourkis and Tryfonos, 2016).



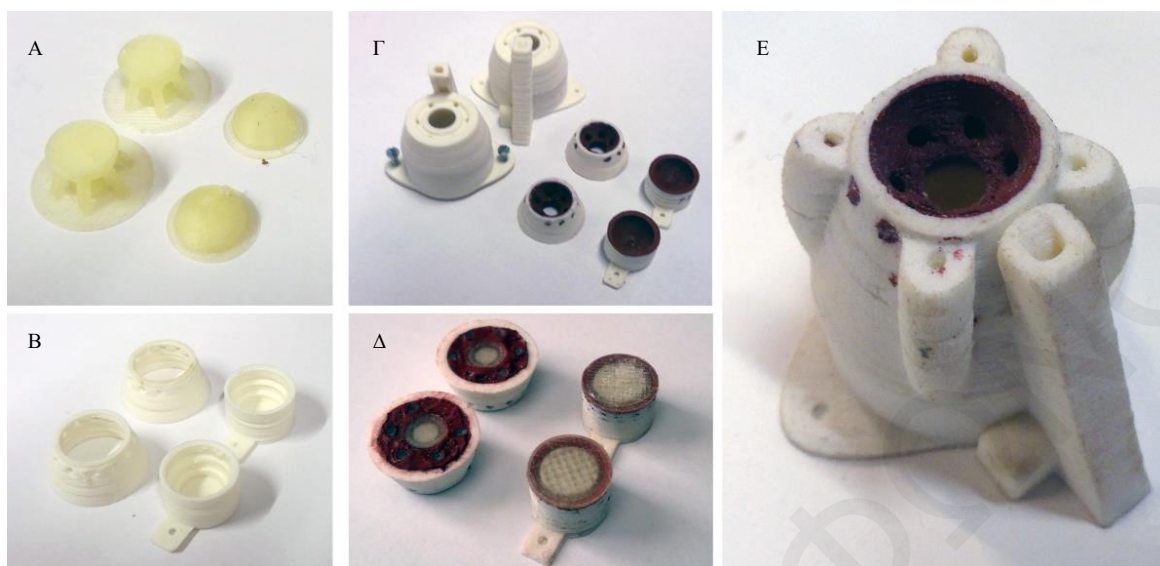
Εικόνα 6.7. Αρχική λεπτομέρεια συγκράτησης και δημιουργίας των κόμβων με γραμμικό ενεργοποιητή (Kontonourkis and Tryfonos, 2015b; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

Ακολουθώντας με τη διερεύνηση του μηχανισμού αποφασίζεται η χρήση πνευματικού πιστονιού στη θέση του ηλεκτρικού γραμμικού ενεργοποιητή. Πλεονεκτήματα της αλλαγής σε πνευματικό ενεργοποιητή είναι η γρηγορότερη ανταπόκριση του ανοίγματος και του κλεισίματος της προεξοχής - αρπαγής και η συνεχόμενη άσκηση δύναμης κατά την διαδικασία συγκράτησης των νημάτων. Η διαδικασία δημιουργίας του κόμβου απαιτεί χρόνο τήξης περίπου 5 λεπτά πράγμα που δημιουργεί καθυστέρηση στη συνολική διαδικασία. Έτσι, αποφασίζεται η χρήση ψυχτικού αερίου (προπάνιο C_3H_8) στο άκρο, το οποίο διοχετεύεται και ελέγχεται από βαλβίδα αέρος και ροής. Συγκεκριμένα, με το άνοιγμα της βαλβίδας, αέρος διοχετεύεται το ψυχτικό αέριο στην βαλβίδα ροής και μέσω της βαθμονόμησης της για αποφυγή παραμόρφωσης του κόμβου επιταχύνεται η σταδιακή ψύξη του από $120^{\circ}C$ σε $-40^{\circ}C$ σε 10 sec. Για τη διαφυγή του αερίου από το σημείο συγκόλλησης στην περιοχή του ημισφαιρίου σχεδιάζονται οπές διαφυγής μέσα από τις οποίες διαπερνά το αέριο στη θήκη χύτευσης χωρίς να τραυματίζεται ο κόμβος. Ως αποτέλεσμα, με το άνοιγμα του γραμμικού ενεργοποιητή ο κόμβος απελευθερώνεται ενεργοποιώντας την ελαστική συμπεριφορά του νήματος και στη συνέχεια το εργαλείο τελικής δράσης απομακρύνεται από το επίπεδο συγκόλλησης (Εικόνα 6.8).



Εικόνα 6.8. Αρχική λεπτομέρεια συγκράτησης και δημιουργίας των κόμβων με γραμμικό ενεργοποιητή. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι ενεργοποιητές και τα κινητά μέρη που συμμετέχουν στην διαδικασία. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η λεπτομέρεια ψεκασμού ψυχρού αέρος μαζί με τις βαλβίδες ελέγχου ροής.

Τέλος, για την καλύτερη λειτουργία και αποκόλληση του κόμβου από το σημείο συγκράτησης αποφασίζεται η επικάλυψη του άκρου δημιουργίας χύτευσης και ψεκασμού του κόμβου με σιλικόνη που μπορεί να αντέχει σε θερμοκρασίες 250°C. Γι' αυτό, εκτυπώνονται σε τρισδιάστατο εκτυπωτή μήτρες από υλικό *PVA* (*polyvinyl alcohol*) (Εικόνα 6.9.A). Το *PVA* είναι υλικό που διασπάται στο νερό επιτρέπονται τη δημιουργία κενών μέσα σε μία θήκη από *ABS* (Εικόνα 6.9.B). Έτσι, οι θήκες ενώνονται με τις μήτρες από *PVA* και γεμίζουν με σιλικόνη (Εικόνα 6.9.Γ,Δ). Στη συνέχεια βυθίζονται στο νερό και έτσι το *PVA* διασπάται, παράγοντας το αρνητικό σφαιρίδιο για τη δημιουργία του κόμβου αλλά και των οπών ψεκασμού του αερίου (Εικόνα 6.9.E).



Εικόνα 6.9. Η διαδικασία δημιουργίας του άκρου και η ενίσχυση του με αντικολλητική σιλικόνη αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Α: Μήτρες από υλικό PVA, Β: Θήκες από υλικό ABS, Γ και Δ: Το αποτέλεσμα βαπτίσματος και συναρμολόγησης του θηκών-μητρών με τη χρήση της σιλικόνης, Ε: Η λεπτομέρεια του άκρου με τη σιλικόνη, η οποία δημιουργεί το ημισφαίριο του κόμβου και τις σπές για ψεκασμό με ψυκτικό αέριο.

6.3_ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΕΛΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ

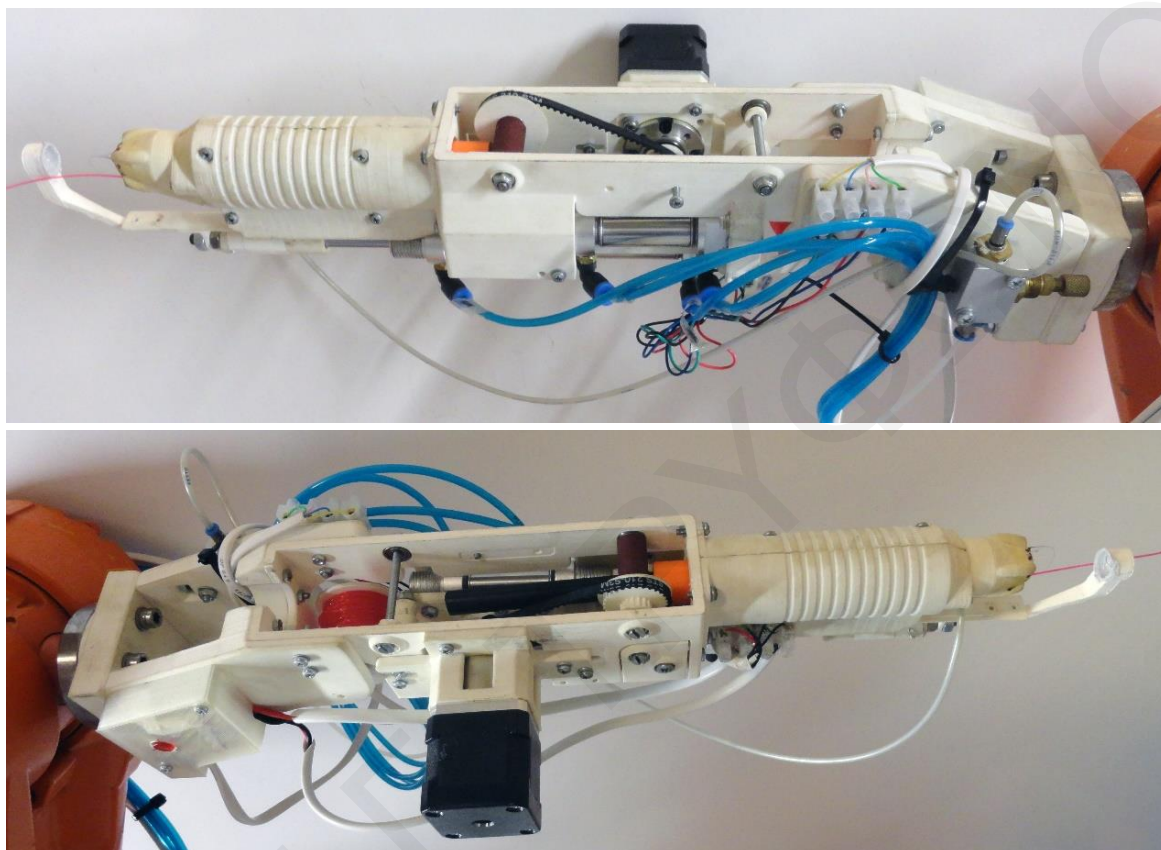
Όπως έχει αναφερθεί, για την ανάπτυξη του εργαλείου τελικής δράσης κατασκευάζονται δοκιμαστικά πρωτότυπα σε κλίμακα 1:1, τα οποία περνούν από τη διαδικασία σωστού και λάθους (*trial and error*), επιδιώκοντας τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των μηχανικών μερών τους και τέλος της συναρμολόγησή τους.

Έτσι, η τελική μορφή του εργαλείου τελικής δράσης χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Τη βάση για την ομαδοποίηση των ηλεκτρονικών τμημάτων, παροχής αερίων και σύνδεσης με το άκρο του ρομποτικού βραχίονα,
- Τη θήκη για τους ενεργοποιητές και τα μηχανικά τμήματα,
- Τη θήκη για τη συσκευή τήξης και τα εξαρτήματα της διαδικασία δημιουργίας του κόμβου.

Όπως έγινε με όλα τα αρχικά πρωτότυπα, η κατασκευή του βελτιωμένου εργαλείου τελικής δράσης επιτυγχάνεται μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης των μερών του χρησιμοποιώντας υλικά *ABS* και *PLA* (Εικόνα 6.10). Όλες οι θήκες για τα ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη του εργαλείου σχεδιάζονται, εκτυπώνονται και συναρμολογούνται μεταξύ τους. Τέλος, οι ενεργοποιητές συνδέονται με τα κινητά μέρη. Η βάση όπου ομαδοποιούνται τα ηλεκτρονικά καλώδια και παροχές αερίων προσαρμόζεται στο άκρο του ρομποτικού

βραχίονα (Εικόνα 6.11.A). Σε αυτό το τμήμα ενσωματώνονται καλώδια, συνδέσεις για ενεργοποιητές και τροφοδοσία αέρος. Επίσης, στη βάση σχηματίζεται η λεπτομέρεια σύνδεσης και βιδώνεται στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα (*axis J6*).



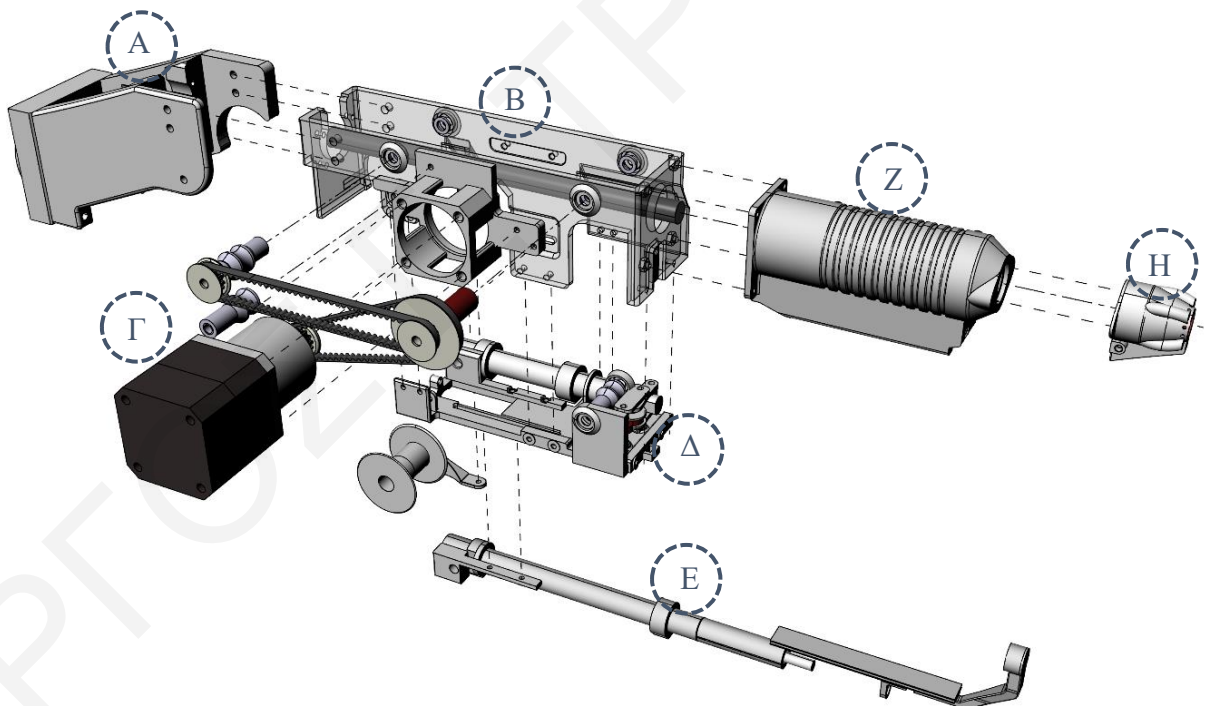
Εικόνα 6.10. Πρωτότυπο αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης συναρμολογημένο μαζί με τα ηλεκτρομηχανολογικά του τμήματα.

Η θήκη του ενεργοποιητές και τα μηχανικά τμήματα (Εικόνα 6.11.B) προσαρμόζεται και βιδώνεται στο μπροστινό σημείο της βάσης, η οποία υποδιαιρείται σε δυο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα της θήκης βρίσκεται τα εξαρτήματα των βηματικών μοτέρ και των μηχανικών λεπτομερειών (οδοντοτροχοί, ιμάντες και κύλινδροι) που είναι υπεύθυνα για την διαδικασία τροφοδοσίας και τήξης της ράβδου σιλικόνης (Εικόνα 6.11.Γ). Στο δεύτερο τμήμα της θήκης βρίσκεται το σύστημα ελέγχου μήκους νήματος με το πνευματικό πιστόνι συγκράτησης του ελαστικού νήματος και οι μηχανικές λεπτομέρειες άρθρωσης των κυλίνδρων (Εικόνα 6.11.Δ). Επιπρόσθετα, στο κάτω τμήμα ενσωματώνεται το πνευματικό πιστόνι που είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση και δημιουργία των κόμβων (Εικόνα 6.11.E) μαζί με τη βάση στήριξης για το καρούλι του ελαστικού νήματος. Τα δύο τμήματα συνδέονται και βιδώνονται κατακόρυφα μεταξύ τους, πετυχαίνοντας τον έλεγχο της τροφοδοσίας των

υλικών μέσω των μηχανικών και κινητών μερών αλλά και τον προγραμματισμό των ενεργοποιητών.

Τέλος, στο μπροστινό μέρος της θήκης για τους ενεργοποιητές και τα μηχανικά τμήματα προστίθεται και βιδώνεται η θήκη για την συσκευή τήξης (Εικόνα 6.11.Z). Στο άκρο της συσκευής τήξης βιδώνεται η λεπτομέρεια δημιουργίας του σφαιριδίου και ψεκασμού του κόμβου (Εικόνα 6.11.H). Επιπρόσθετα, στο κάτω μέρος της θήκης βρίσκεται ο οδηγός τροφοδοσίας του ελαστικού νήματος και η είσοδος για το ψυκτικό αέριο.

Μέσα από τη συναρμολόγηση των τριών βασικών τμημάτων επιδιώκεται ο έλεγχος και συγχρονισμός των διαδικασιών με σταθερό τρόπο. Παράλληλα, ο διαχωρισμός των τμημάτων δίνει τη δυνατότητα επανασχεδιασμού και αλλαγής επιμέρους τμημάτων εκεί όπου είναι αναγκαίο, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς κίνησης των μηχανικών και κινηματικών μερών του εργαλείου.



Εικόνα 6.11. Τα τμήματα του εργαλείου τελικής δράσης. Α: Η βάση σύνδεσης του εργαλείου τελικής δράσης με το ρομποτικό βραχίονα, Β: Η θήκη για τα κινητά μέρη και στήριξη των ενεργοποιητών, Γ: Η λεπτομέρεια της διαδικασίας τροφοδοσίας της ράβδου σιλικόνης, Δ: Η λεπτομέρεια του συστήματος ελέγχου μήκους νήματος, Ε: Η λεπτομέρεια για τη συγκράτηση και δημιουργία των κόμβων, Ζ: Η θήκη για τη συσκευή τήξης και Η: Η λεπτομέρεια του σφαιριδίου για ψεκασμό του κόμβου.

6.4_ ΠΡΟΓΡΑΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΤΕΛΙΚΗΣ ΔΡΑΣΗΣ

Για τον προγραμματισμό του εργαλείου τελικής δράσης χρησιμοποιούνται δύο βασικά συστήματα:

- Ένα ανοιχτό σύστημα προγραμματισμού της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα, της ενεργοποίησης των πνευματικών εμβόλων και των αναμεταδοτών (*Relay*) τάσης με σκοπό τον έλεγχο του μήκους, της τροφοδοσίας του νήματος (Κεφάλαιο 6.2.1), αλλά και της διαδικασίας συγκράτησης και δημιουργίας των κόμβων (Κεφάλαιο 6.2.3),
- Ένα κλειστό επαναλαμβανόμενο σύστημα μέσω της χρήσης *Arduino UNO* και πλακέτας βηματικού προγράμματος οδήγησης για τον έλεγχο της διαδικασίας τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλικόνης (Κεφάλαιο 6.2.2).

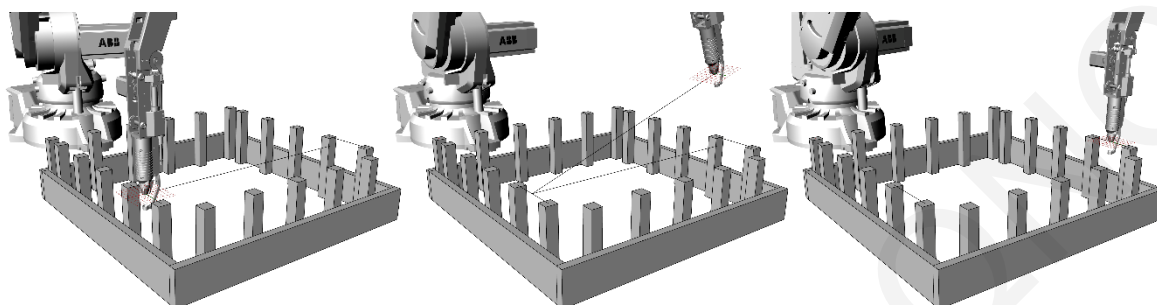
Μέσω προγραμματισμού στο *HAL plug-in για Grasshopper* καθορίζεται η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα (Κεφάλαιο 6.5) στις συντεταγμένες των επιπέδων για δημιουργία των κόμβων και συντονίζονται τα δύο βασικά συστήματα για την ενεργοποίηση του εργαλείου τελικής δράσης (Εικόνα 6.12). Τα σημεία δημιουργίας των κόμβων καθορίζονται με τη χρήση του *Kangaroo plug-in για Grasshopper*, όπου με τη σταδιακή προσομοίωση της προσθήκης νημάτων υπολογίζεται η χρονική παραμόρφωση του πλέγματος. Για τη δημιουργία της συνεχόμενης πορείας κίνησης τα νήματα προσομοιώνονται ως γραμμές - ελατήρια.



Εικόνα 6.12. Διάγραμμα συντονισμού των βασικών συστημάτων.

Η αρχή και το τέλος της γραμμής ορίζουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες των επιπέδων προσέγγισης του εργαλείου τελικής δράσης. Μεταξύ της απόστασης των δύο επιπέδων δημιουργείται τρίτο επίπεδο που καθορίζει το μήκος και την αρχική παραμόρφωση του νήματος που δημιουργείται σε αυτό (Εικόνα 6.13). Το τρίτο επίπεδο εκφράζεται από ένα διάνυσμα με αρχή τις συντεταγμένες της παραμόρφωσης του αρχικού επιπέδου και με τέλος τις συντεταγμένες του τελικού μη παραμορφωμένου επιπέδου. Επίσης με μέτρο το μήκος της γραμμής πριν από την παραμόρφωση (L), η οποία πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή (L/D) και καθορίζεται από την διαδικασία ελέγχου και εξεύρεσης της μορφής. Το τέλος του

διανύσματος ορίζει τις συντεταγμένες του επίπεδου για την ενεργοποίηση του πνευματικού πιστονιού και τη διεκπεραίωση της διαδικασίας ελέγχου του μήκους του νήματος (Εικόνα 6.13).

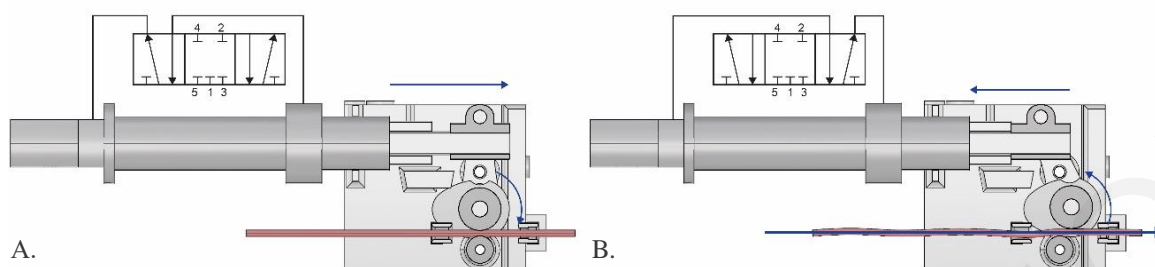


Εικόνα 6.13. Επίπεδα προσέγγισης του εργαλείου τελικής δράσης μέσα από την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 6.14. Αρχικοί πειραματισμοί μετακίνησης εργαλείου τελικής δράσης για τη δημιουργία της υπολογισμένης παραμόρφωσης στο νήμα (Kontovourkis and Tryfonos, 2015b; Kontovourkis and Tryfonos, 2016).

Η κίνηση του πνευματικού πιστονιού επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ηλεκτρονικής βαλβίδας αέρος 5/3 που ελέγχεται από τον ενεργοποίηση δύο εξόδων *DO1* και *DO2* από τη ψηφιακή πλακέτα του *IRC5 Controller*. Αναλυτικά, με την ενεργοποίηση της *DO1* και απενεργοποίηση της *DO2*, το πιστόνι ανοίγει μεταδίδοντας τη γραμμική κίνηση στο μηχανισμό ελέγχου μήκους νήματος. Στην περίπτωση αυτή (Εικόνα 6.15.A) ο κινηματικός μηχανισμός κλείνει με αποτέλεσμα να συγκρατεί το νήμα δημιουργώντας την αρχική παραμόρφωση κατά την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα. Αυτό συμβαίνει από το τέλος του διανύσματος μέχρι την δημιουργία του επόμενου κόμβου (Εικόνα 6.16.A). Αντιθέτως, με την απενεργοποίηση της *DO1* και ενεργοποίηση της *DO2*, το πιστόνι κλείνει δημιουργώντας αντίθετη κίνηση στο μηχανισμό ελέγχου μήκους νήματος (Εικόνα 6.15.B). Έτσι, ο μηχανισμός ανοίγει επιτρέποντας την τροφοδοσία του νήματος από το καρούλι. Η πιο πάνω κατάσταση παρουσιάζεται κατά την κίνηση της ρομποτικής μηχανής από τον κόμβο στο τέλος του διανύσματος (Εικόνα 6.16.B).

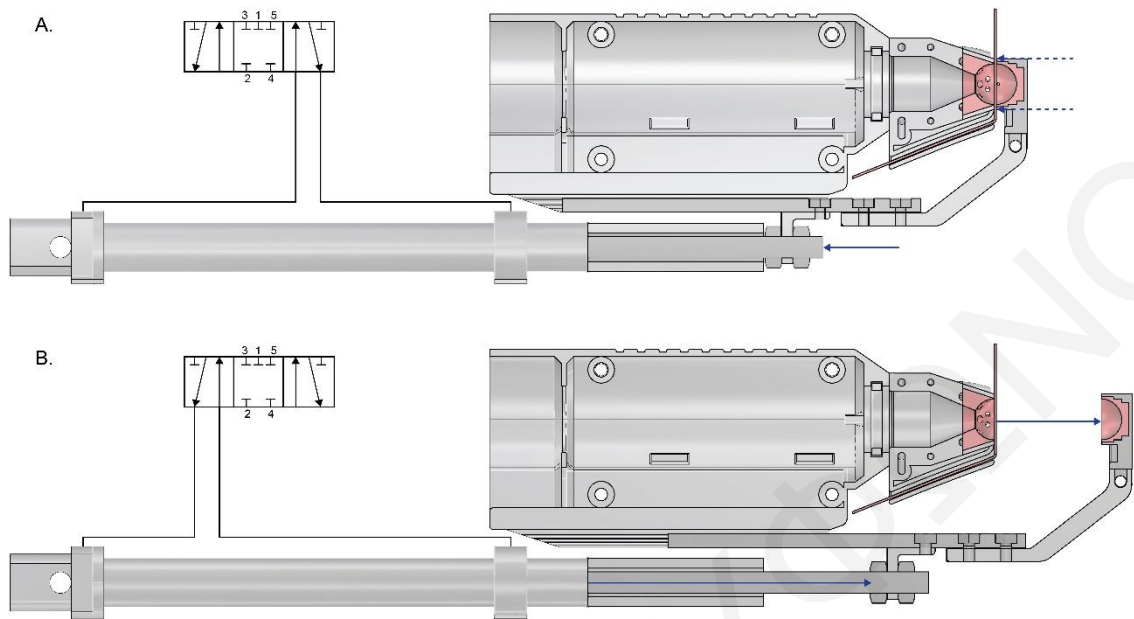


Εικόνα 6.15. Λεπτομέρεια κίνησης για έλεγχο και αρχικής παραμόρφωσης του νήματος. Α: Ο μηχανισμός συγκρατεί το νήμα προκαλώντας την αναμενόμενη αρχική παραμόρφωση, Β: Ο μηχανισμός ελευθερώνει το νήμα αυξάνοντας το μήκος του.



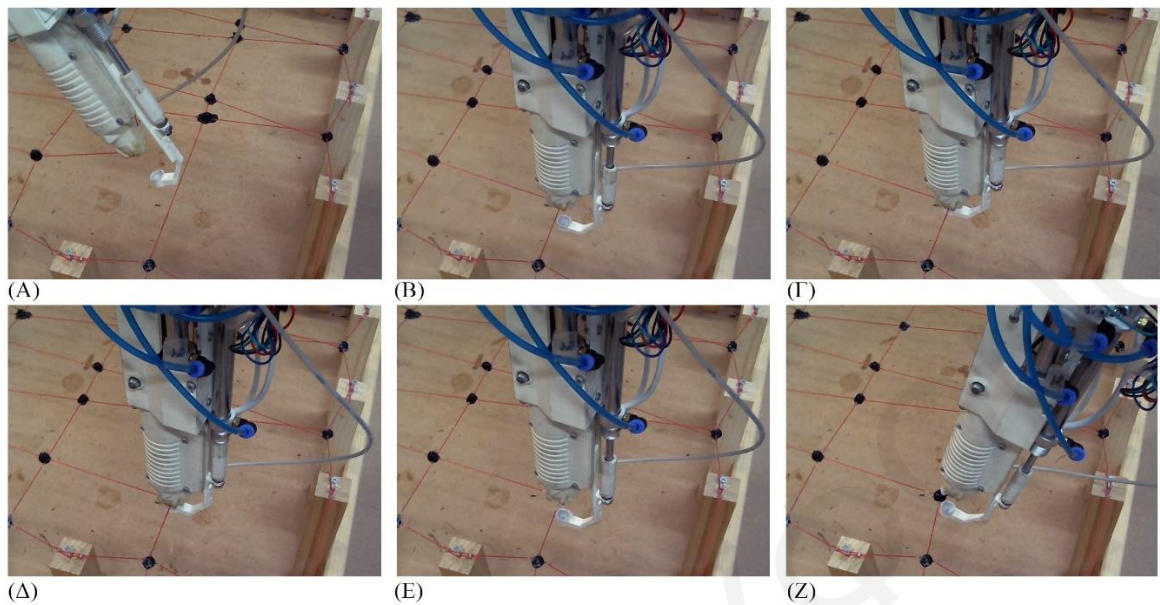
Εικόνα 6.16. Οι δύο περιπτώσεις λειτουργίας της διαδικασίας ελέγχου και τροφοδοσίας του μήκους του νήματος. Α: Ο μηχανισμός είναι κλειστός και συγκρατεί το νήμα, Β: Το διάνυσμα κίνησης από τον κόμβο, όπου το νήμα είναι ελεύθερο και παίρνει το αναμενόμενο μήκος στο τέλος της πορείας.

Οι κόμβοι δημιουργούνται στις συντεταγμένες των επιπέδων με τη χρήση μιας ψηφιακής εισόδου και τεσσάρων ψηφιακών εξόδων της πλακέτα του *IRC5 Controller* σε συνδυασμό με μια πλακέτα *Arduino UNO*. Οι δύο ψηφιακές έξοδοι *DO3* και *DO4* αναλαμβάνουν τον έλεγχο της βαλβίδας αέρος 5/3. Η ενεργοποίηση της διοχετεύει με αέρα το πνευματικό πιστόνι που είναι υπεύθυνο για τη διαδικασία συγκράτησης του νήματος και δημιουργίας του κόμβου. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση της *DO3* και απενεργοποίησης της *DO4* έχει ως αποτέλεσμα το άνοιγμα του πιστονιού (Εικόνα 6.17.A) επιτρέποντας την απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης από το δημιουργημένο κόμβο. Σε αντίθεση, η απενεργοποίηση της *DO3* και ενεργοποίηση της *DO4* έχει ως αποτέλεσμα το κλείσιμο του πιστονιού (Εικόνα 6.17.B και Εικόνα 6.18.B) και συγκράτηση των νημάτων για την έναρξη της διαδικασία δημιουργίας του κόμβου.



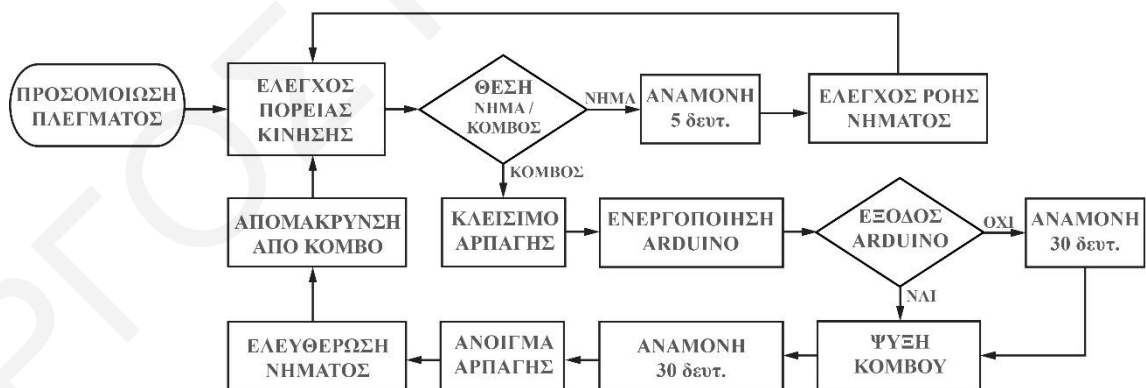
Εικόνα 6.17. Λεπτομέρεια κίνησης για την συγκράτηση των νημάτων και δημιουργία του κόμβου, A: Το πιστόνι κλείνει και συγκρατεί τα νήματα για τη δημιουργία του κόμβου, B: Το πιστόνι ανοίγει για την απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης από τον κόμβο.

Η ψηφιακή έξοδος *DO5* αναλαμβάνει την ενεργοποίηση αναμεταδότη (*Relay*) που τροφοδοτεί και ενεργοποιεί την πλακέτα με τάση 6V. Η ενεργοποίηση της πλακέτας *Arduino* αναλαμβάνει την διεκπεραίωση της διαδικασίας τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλκόνης. Η χύτευση της σιλκόνης στο ημισφαίριο παρέχει το αναμενόμενο υλικό για δημιουργία του κόμβου (Εικόνα 6.18.Γ). Ακολούθως, το πρόγραμμα της πλακέτας *Arduino* με τη χρήση αναμεταδότη (*Relay*), αποστέλλει σήμα – τάση 24V στην είσοδο *D11* της ψηφιακής πλακέτας του *IRC5 Controller*, για τον τερματισμό της διαδικασίας τροφοδοσίας της κολλητικής σιλκόνης. Με τη ενεργοποίηση την ψηφιακής εισόδου ο αναμεταδότης τροφοδοσίας του *Arduino* και της πλακέτας του βηματικού μοτέρ απενεργοποιούνται. Με την απενεργοποίηση του *DO5* το πρόγραμμα ελέγχου της ρομποτικής διαδικασίας ενεργοποιεί την έξοδο *DO6* από την ψηφιακή πλακέτα του *IRC5 Controller*. Η έξοδος *DO6* ενεργοποιεί κλειστή βαλβίδα αέρος 3/2 με σκοπό τη διοχέτευση του ψυχτικού αερίου (προπάνιο C_3H_8) για 10 δευτερόλεπτα, μειώνοντας έτσι το χρόνο τήξης του κόμβου από 5 λεπτά σε 30 δευτερόλεπτα περίπου (Εικόνα 6.18.Δ).



Εικόνα 6.18. Λειτουργία δημιουργίας του κόμβου, Α: Το εργαλείο τελικής δράσης προσεγγίζει το νήμα, Β: Κλείσιμο του γραμμικού ενεργοποιητή, Γ: Τήξη και εισδοχή της σιλκόνης μέσα στο ημισφαίριο, Δ: Ψύξη του κόμβου, Ε: Άνοιγμα του γραμμικού ενεργοποιητή, Ζ: Απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης.

Αφού περάσουν 30 δευτερόλεπτα και ο κόμβος αποκτήσει την αναμενόμενη σταθερότητα, με την απενεργοποίηση της *DO6*, αυτός απελευθερώνεται (Εικόνα 6.18.Ε+Ζ). Στη συνέχεια, το πρόγραμμα της ρομποτικής διαδικασίας προχωρεί στη θέση ρύθμισης μήκους του επόμενου τμήματος νήματος και στην ενεργοποίηση της διαδικασίας ελέγχου του για τη δημιουργία της αναμενόμενης παραμόρφωσης σε αυτό (Εικόνα 6.19).

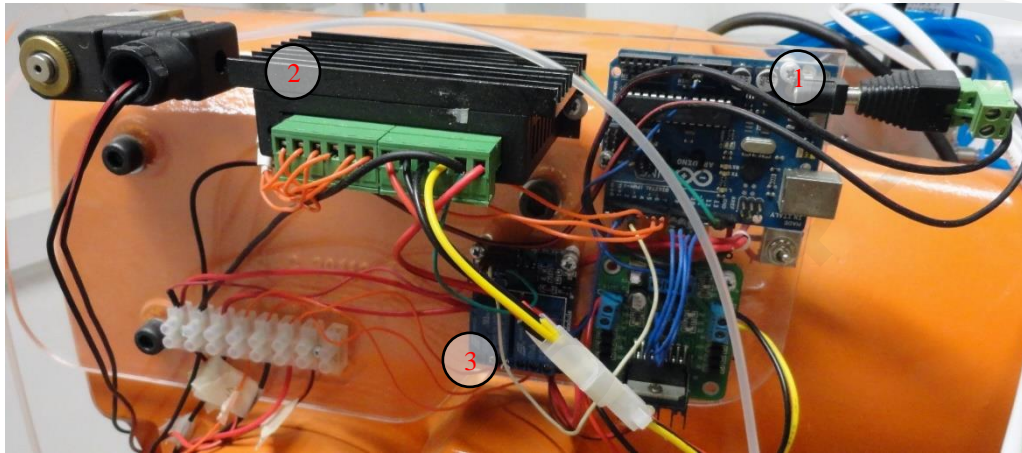


Εικόνα 6.19. Περιληπτικό διάγραμμα ελέγχου της ρομποτικής πλακέτας και της λειτουργίας του εργαλείου τελικής δράσης.

6.4.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΞΗΣ ΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ

Για την κίνηση του βηματικού μοτέρ και την τροφοδοσία της κολλητικής σιλκόνης στο ημισφαίριο χρησιμοποιείται πλακέτα *Arduino Uno* (Banzi, 2011). Βάσει των αναγκών

ελέγχου του εργαλείου τελικής δράσης, ο προγραμματισμός της διαδικασίας τροφοδοσίας και τήξης συνδυάζει ενεργοποίηση δύο αναμεταδοτών (*Relay*) και έλεγχο της πλακέτας του βηματικού μοτέρ (*CNC Single Axis 4A TB6600 2/4 Phase Hybrid Stepper Motor Driver*). Για τον έλεγχο της πλακέτας του βηματικού προγράμματος οδήγησης χρησιμοποιείται προγραμματισμός στη γλώσσα *Arduino* (Banzi, 2011) για τις περιστροφές του βηματικού μοτέρ (Εικόνα 6.20).



Εικόνα 6.20. Η πλακέτα *Arduino* (1), η οποία ελέγχεται από τον *IRC5* του ρομποτικού βραχίονα και αποστέλλει βήματα στη πλακέτα του βηματικού μοτέρ (2) για την ενεργοποίηση του αναμεταδότη (*Relay*) (3).

Αναλυτικά, η περιστροφή του βηματικού μοτέρ συσχετίζεται με την περιστροφή του κυλίνδρου με περίμετρο $d \approx 23 \text{ mm}$ και τη χύτευση $V_m \approx 608 \text{ mm}^3$ κολλητικής σιλικόνης στο ημισφαίριο για σχηματισμό του κόμβου. Ο όγκος υπολογίζεται από την σχέση $V_m = V_{\max} - V_t$ και περιγράφει τη χωρητικότητα της σφαίρας $V_{\max} \approx 663 \text{ mm}^3$, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα που καταλαμβάνουν δύο ελαστικά νήματα με διάμετρο $dt \approx 0.8 \text{ mm}$ $V_t \approx 44 \text{ mm}^3$. Με βάση την ακτίνα $r \approx 6 \text{ mm}$ της ράβδου κολλητικής σιλικόνης και το απαιτούμενο υλικού $V_m \approx 619 \text{ mm}^3$ και μέσω της εξίσωσης του όγκου κυλίνδρου $h = \frac{V_m}{\pi \cdot r^2}$, υπολογίζεται ότι χρειάζονται $h \approx 31.49 \text{ mm}$ ράβδου σιλικόνης.

Η πλήρης περιστροφή της τροχαλίας *S3M 30T* (Wanner, 2016), η οποία συνδέεται με τον κύλινδρο τροφοδοσίας, ισοδυναμεί με περίμετρο $d \approx 25 \text{ mm}$ συνυπολογίζοντας την επικάλυψη με γυαλόχαρτο. Έτσι, για την τροφοδοσία του αναμενόμενου μήκους της ράβδου σιλικόνης $h \approx 5.47 \text{ mm}$ απαιτείται περιστροφή της τροχαλίας κατά $\varphi \approx 85.61^\circ$. Επειδή η σύνδεση της τροχαλίας με το βηματικό μοτέρ είναι 1:2 και γίνεται με σύστημα ιμάντα (τροχαλία *S3M 30T* συνδέεται με τροχαλία *S3M 15T*), η γωνία περιστροφής στο άκρο του βηματικού μοτέρ διπλασιάζεται σε $\varphi \approx 171.22^\circ$. Βάσει της παραμέτρου 27:1 του βηματικού

μοτέρ, η περιστροφή του άξονα ισοδυναμεί με $\varphi_s \approx 4622^\circ$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το βηματικό μοτέρ κάνει 1.8° ανά βήμα και ορίζεται να κάνει x16 μικρό-βήματα, η γωνία μειώνεται στις 0.112° μέσω της πλακέτας του βηματικού προγράμματος οδήγησης. Ως αποτέλεσμα, για την ολοκλήρωση της γωνιάς περιστροφής χρειάζονται 41276 βήματα.

Αυτό οδηγεί στον προγραμματισμό 4 βασικών βημάτων σε γλώσσα *Arduino*:

- 2552 βήματα με ταχύτητα 120 mms + παύση 2s,
- 20000 βήματα με ταχύτητα 120 mms+ παύση 5s,
- 20000 βήματα με ταχύτητα 120 mms + παύση 2s,
- (-)1276 βήματα με ταχύτητα 120mms + παύση 1s + ενεργοποίηση (Relay24V).

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο αλγόριθμος σε γλώσσα *Arduino*, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λειτουργία τροφοδοσίας της ράβδου σιλικόνης:

```

1.  const int stepPin = 5; // θύρα για τη εντολή των μικρό-βημάτων
2.  const int dirPin = 6; // φορά περιστροφής
3.  const int RelayStepper = 2; // ο αναμεταδότης (Relay) τροφοδοσίας της πλακέτας του βηματικού
   προγράμματος οδήγησης με 12V
4.  const int RelayPin = 3; // ο αναμεταδότης (Relay) για την ενεργοποίηση του σήματος στο βραχίονα με 24V
5.  const int A = 120; // ταχύτητα μικρό-βημάτων σε μικροδευτερόλεπτα
6.  int x = 20000; // μικρό-βήματα
7.  int y = 1276; // μικρό-βήματα για τοποθέτηση και απομάκρυνση της σιλικόνης

8.  void setup()
9.  {
10. pinMode(RelayStepper, OUTPUT);
11. pinMode(RelayPin, OUTPUT);
12. pinMode(stepPin, OUTPUT);
13. pinMode(dirPin, OUTPUT);
14. digitalWrite( RelayPin, LOW);
15. delay(1000);
16. digitalWrite( RelayStepper, HIGH);
17. delay(1000);
18. for (int i = 0; i <= (y*2) ; i = i + 1)
19. {
20. digitalWrite(dirPin, HIGH);
21. digitalWrite(stepPin, HIGH);
22. delayMicroseconds(A);
23. digitalWrite(stepPin, LOW);
24. delayMicroseconds(A);
25. }
26. delay(2000);
27. for (int i = 0; i <= x ; i = i + 1)
28. {
29. digitalWrite(dirPin, HIGH);
30. digitalWrite(stepPin, HIGH);
31. delayMicroseconds(A);
32. digitalWrite(stepPin, LOW);
33. delayMicroseconds(A);
34. }
35. delay(5000);
36. for (int i = 0; i <= x ; i = i + 1)
37. {
38. digitalWrite(dirPin, HIGH);
39. digitalWrite(stepPin, HIGH);

```

```

40. delayMicroseconds(A);
41. digitalWrite(stepPin, LOW);
42. delayMicroseconds(A);
43. }
44. Serial.print("DoneExtrude2");
45. delay(2000);
46. for (int i = 0; i <= y ; i = i + 1)
47. {
48. digitalWrite(dirPin, LOW);
49. digitalWrite(stepPin, HIGH);
50. delayMicroseconds(A);
51. digitalWrite(stepPin, LOW);
52. delayMicroseconds(A);
53. }
54. digitalWrite( RelayStepper, LOW);
55. delay(1000);
56. }

57. void loop()
58. {
59. digitalWrite( RelayPin, HIGH);
60. }

```

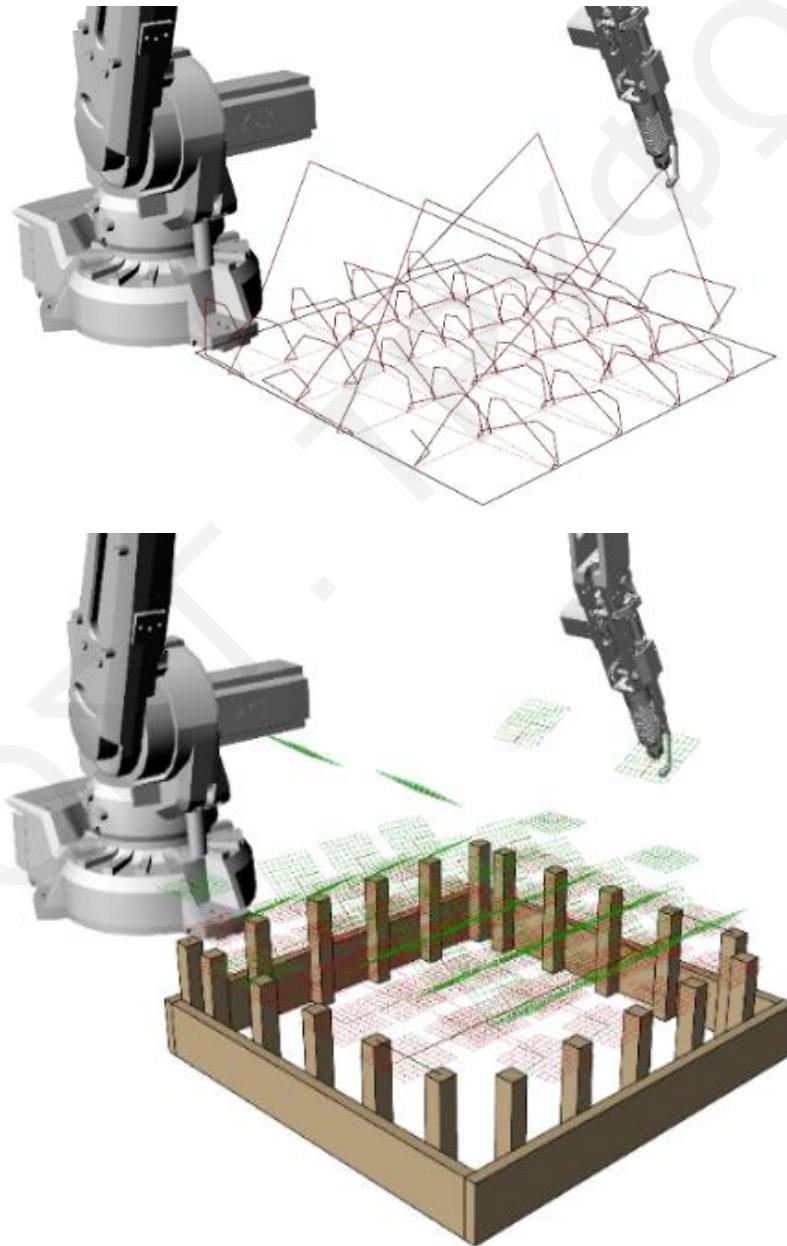
Μέσα από τη διερεύνηση κρίνεται ότι ο ρυθμός κίνησης του βηματικού μοτέρ είναι κατάλληλος αφού αποφεύγεται η ολίσθηση της σιλικόνης στην τροχαλία κατά τη διοχέτευση της στο μηχανισμό τήξης. Επίσης, η παύση των 5 δευτερολέπτων αυξάνει την ακρίβεια χύτευσης της υγρής σιλικόνης. Επιπρόσθετα, η 1^η και 4^η κίνηση αποσκοπούν στον περιορισμό της παρατεταμένης ροής της σιλικόνης μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τροφοδοσία και τήξης.

Έτσι, ο προγραμματισμός του Arduino Uno αρχικά επιτυγχάνει την ενεργοποίηση του αναμεταδότη (Relay) 12V και της πλακέτας του βηματικού μοτέρ. Μέσω του προγράμματος αποστέλλονται σε αυτόν τα βήματα που αναφέρονται πιο πάνω για την διεκπεραίωση της διαδικασίας τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλικόνης. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, ο αναμεταδότης (Relay) 12V απενεργοποιείται, ξεκινώντας την ίδια στιγμή τον αναμεταδότη (Relay) 24V για την αποστολή σήματος στην είσοδο *DII* της πλακέτα του *IRC5 controller*. Παράλληλα, η πλακέτα *Arduino Uno* απενεργοποιείται και έτσι η λειτουργία του εργαλείου τελικής δράσης και η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα προχωρά στη φάση καθορισμού του αρχικού μήκους και προσθήκης του επόμενου νήματος.

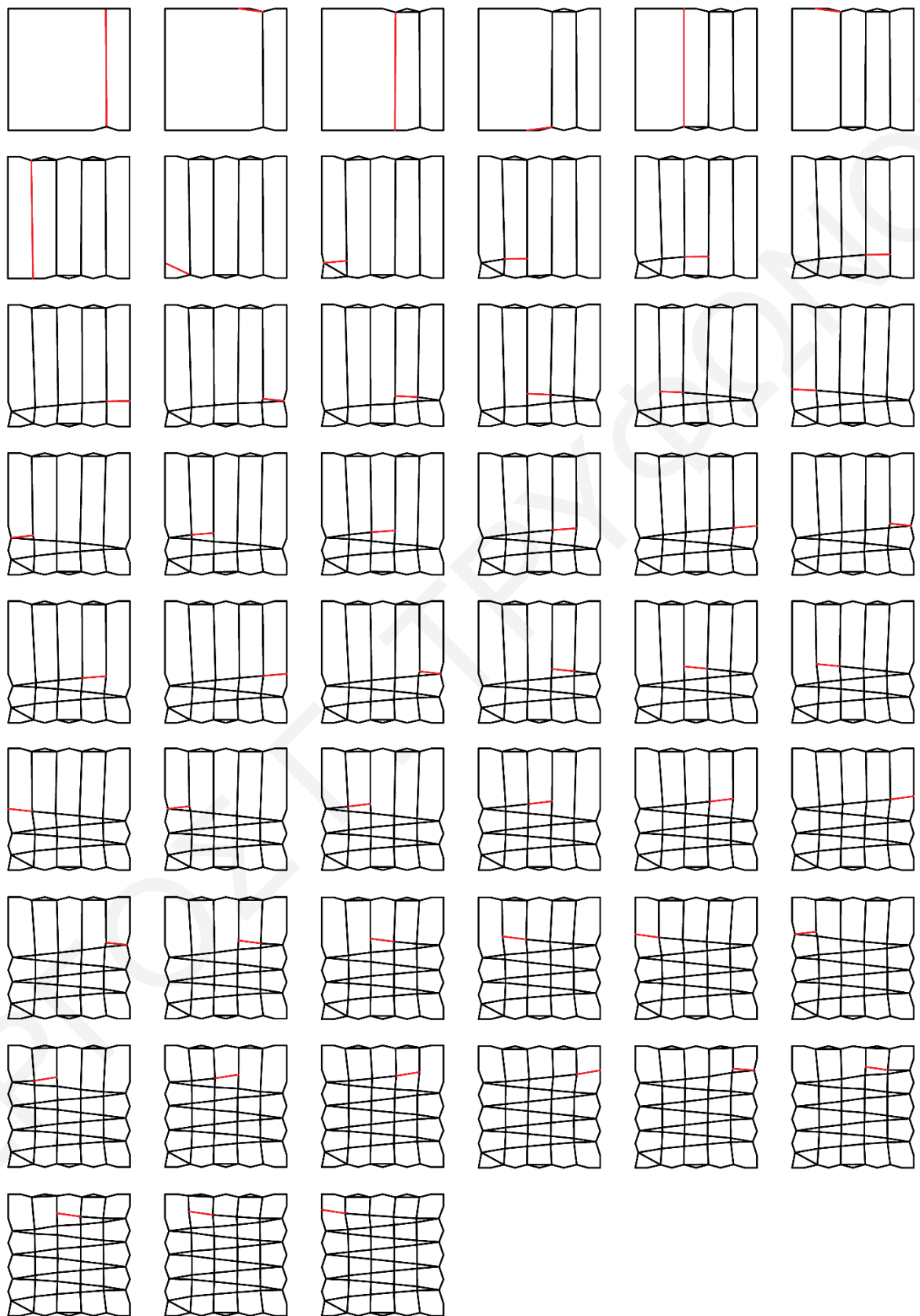
6.5_ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

Η πορεία κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και ο αλγόριθμος λειτουργίας της ρομποτικής μηχανής παράγονται αυτόματα μετά που επιλέγεται η σχεδιαστική λύση μέσω της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Για τον καλύτερο έλεγχο

της ρομποτικής κίνησης που προκύπτει μέσω της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής, γίνεται επαλήθευση του παραγόμενου μοτίβου με τη σταδιακή προσομοίωση και στατική ανάλυση του ρυθμού ύφανσης νημάτων και κόμβων (Εικόνα 6.22). Η σταδιακή επαλήθευση επαναλαμβάνεται για κάθε κόμβο ξεχωριστά μέχρι να εντοπιστούν τα σημεία δημιουργίας των κόμβων. Ο αλγόριθμος ελέγχου αποτελείται από την πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής (Εικόνα 6.21.A) και τις θέσεις των επιπέδων ενεργοποίησης των δύο βασικών λειτουργιών του εργαλείου τελικής δράσης (Εικόνα 6.21.B).

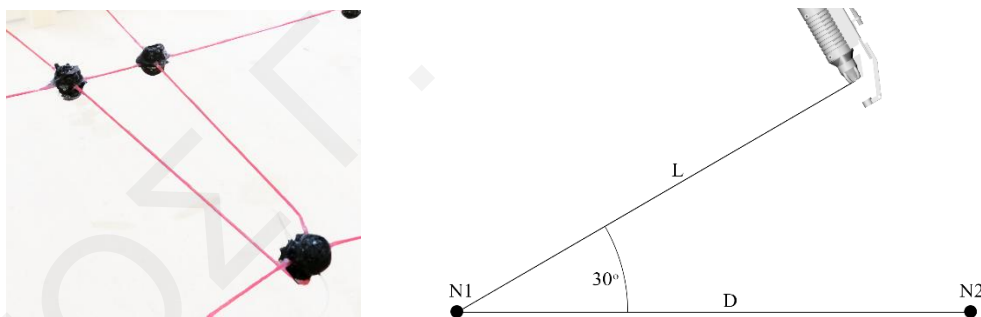


Εικόνα 6.21. Ο αλγόριθμος κίνησης της ρομποτικής μηχανής συνδυάζει: Α: Την πορεία κίνησης της ρομποτικής μηχανής, Β: Τα σημεία της πορείας κίνησης στα οποία ενεργοποιούνται οι βασικές λειτουργίες του εργαλείου τελικής δράσης. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σημεία δημιουργίας του κόμβου και με πράσινο τα σημεία ενεργοποίησης της διαδικασίας ελέγχου του μήκους νήματος.



Εικόνα 6.22. Σταδιακή επαλήθευση δημιουργίας της μορφής και στατικής ανάλυση για εξεύρεση της πορείας κίνησης της ρομποτικής μηχανής (Tryfonos, 2018).

Λόγω της συνεχούς παραμόρφωσης των νημάτων κατά τη διαδικασία κατασκευής, ο αλγόριθμος ελέγχου υποδιαιρείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο χρησιμοποιεί την διαδικασία εξεύρεσης μορφής για να υπολογίσει τη μετατόπιση του αρχικού κόμβου όταν ελευθερώνεται από το εργαλείο τελικής δράσης, δημιουργώντας το διάνυσμα για τον επόμενο κόμβο. Το διάνυσμα καθορίζεται από την επιλεγμένη λύση, την παράμετρο του απαιτούμενου συντελεστή L/D και την απόσταση των κόμβων κατά τη διαδικασία προσαρμογής του μοτίβου στην επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται το διάνυσμα που ορίζει το απαιτούμενο μήκος νήματος για τη δημιουργία του επόμενου κόμβου. Επιπλέον, για την δημιουργία της αναμενόμενης παραμόρφωσης του νήματος στις περιοχές δημιουργίας των τριγωνισμών, η απόσταση μετακίνησης του εργαλείου τελικής δράσης συνυπολογίζεται με την περιστροφή του κόμβου, αφαιρώντας από το μήκος του νήματος το $\frac{1}{4}$ της περιφέρειας του κόμβου που ισούται με $\pi = 40,84$ mm και ακτίνα $\rho = 26$ mm. Ως αποτέλεσμα, η φορά του διανύσματος καθορίζεται ως η φορά απομάκρυνσης με γωνία 30° στο κάθετο επίπεδο δημιουργίας του κόμβου με το υφιστάμενο νήμα δημιουργίας του κόμβου και το επόμενο σημείο (Εικόνα 6.23). Επιπλέον, η γωνιά των 30° βοηθά στην αποφυγή σύγκρουσης του εργαλείου τελικής δράσης με την υφιστάμενη κατασκευή.



Εικόνα 6.23. Αριστερά η περιστροφή του κόμβου στο σημείο τριγωνισμού των νημάτων. Δεξιά η γωνία υπολογισμού του αρχικού μήκους του νήματος (L) από τον αρχικό κόμβο ($N1$). Η απόσταση L καθορίζεται από τον συντελεστή L/D .

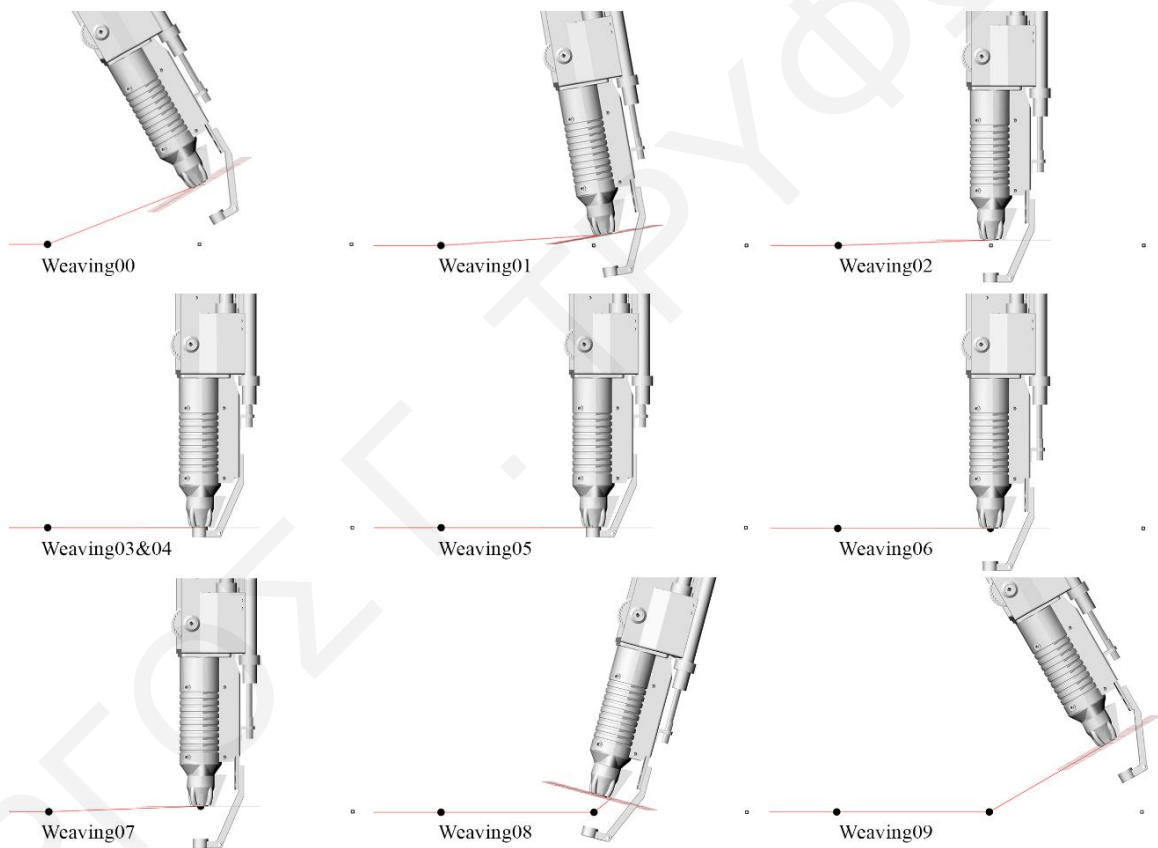
Ακολουθώς, στο δεύτερο στάδιο, η διαδικασία εξεύρεσης μορφής βοηθά στον καθορισμό της φοράς κίνησης του εργαλείου, η οποία ορίζεται από την αρχική παραμόρφωση του μήκους του νήματος ($N1$) μέχρι τη θέση δημιουργίας του επόμενου κόμβου ($N2$). Επειδή κατά την μετακίνηση του εργαλείου τελικής δράσης στον επόμενο κόμβο το αρχικό μήκος του νήματος παραμένει σταθερό, μέσα από την διαδικασία ελέγχου του νήματος και την προσομοίωση της παραμόρφωσης του πλέγματος κατά τη μετακίνηση του ρομποτικού βραχίονα, προσδιορίζεται το σημείο δημιουργίας του επόμενου κόμβου με ακρίβεια. Ακολουθώς, το σημείο το οποίο ορίζεται ως το τέρμα του νήματος θεωρείται αγκύρωση και

έχει απόκλιση 1 cm από το αρχικό σημείο. Η διαδικασία εντοπισμού του σημείου δημιουργίας του επόμενου κόμβου επαναλαμβάνεται σε αριθμό ίσο με αυτό των κόμβων και των βασικών επιπέδων προσέγγισης του εργαλείου τελικής δράσης.

Στη συνέχεια, το βασικό επίπεδο δημιουργίας του κόμβου υποδιαιρείται σε 9 επίπεδα που αντιπροσωπεύουν τα σημεία προσέγγισης, ενεργοποίησης της διαδικασίας δημιουργίας του κόμβου και απελευθέρωσης – απομάκρυνσης του εργαλείου τελικής δράσης. Έτσι δημιουργείται το βασικό σκέλος του αλγόριθμου ελέγχου της ρομποτικής μηχανής και ενεργοποίησης του εργαλείου τελικής δράσης. Αναλυτικά, το επίπεδο δημιουργίας του κόμβου μετατοπίζεται στον κατακόρυφο άξονα κατά 60 mm και περιστρέφεται 10° δημιουργώντας το πρώτο σημείο προσέγγισης (Εικόνα 6.24.*Weaving00*). Σε αυτό το σημείο ο αλγόριθμος ορίζει ρομποτική κίνηση αρθρώσεων (*AbsJ*) για αποφυγή μεγάλων περιστροφών κατά τη διαδικασία ύφανσης, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια στην συνδεσμολογία του εργαλείου τελικής δράσης κατά την προσέγγιση στο υφιστάμενο ελαστικό πλέγμα. Παράλληλα, προτού αρχίσει η κίνηση, επιβεβαιώνεται ότι το νήμα ελέγχεται από το μηχανισμό τροφοδοσίας και το πιστόνι συγκράτησης του άκρου είναι ανοικτό. Στην συνέχεια, το επίπεδο του κόμβου μετατοπίζεται σε απόσταση 10 mm στον κατακόρυφο άξονα και 10 mm μπροστά στον άξονα X με περιστροφή στον άξονα Y κατά 10° δημιουργώντας το δεύτερο επίπεδο. Το δεύτερο επίπεδο δημιουργεί την πορεία εισδοχής του εργαλείου τελικής δράσης στο ελαστικό πλέγμα (Εικόνα 6.24.*Weaving01*), αποφεύγοντας συγκρούσεις με την υφιστάμενη κατασκευή. Ακολούθως, για την δημιουργία του τρίτου επιπέδου, το βασικό επίπεδο μετατοπίζεται κατά 5 mm στον άξονα Z (Εικόνα 6.24.*Weaving02*), δημιουργώντας το σημείο τελικής προσέγγισης και ευθυγραμμίζοντας το νήμα στη θέση του.

Το τέταρτο και βασικό επίπεδο (Εικόνα 6.24.*Weaving03*) ενεργοποιεί τη λειτουργία συγκράτησης των νημάτων και το πέμπτο επίπεδο παραμένει (Εικόνα 6.24.*Weaving04*) στην ίδια θέση, ενεργοποιώντας τη λειτουργία τροφοδοσίας και τήξης της κολλητικής σιλικόνης μέσω του βηματικού μοτέρ που ελέγχεται από την πλακέτα Arduino. Με το τέλος της κίνησης του βηματικού μοτέρ η πλακέτα Arduino αποστέλλει σήμα στην πλακέτα του IRC5 controller για παραμονή στο ίδιο επίπεδο (Εικόνα 6.24.*Weaving05*) και ενεργοποίηση της βαλβίδας ψεκασμού του ψυκτικού αερίου για 10s (επίπεδο έξι). Με το τερματισμό της διαδικασίας ψεκασμού, ο κόμβος ηρεμεί για 30s και στη συνέχεια στο επίπεδο επτά το εργαλείο παραμένει στην ίδια θέση (Εικόνα 6.24.*Weaving06*), όπου ενεργοποιείται η

διαδικασία αρπαγής και συγκράτησης των νημάτων. Στη συνέχεια, το βασικό επίπεδο μετατοπίζεται κατά 5 mm στον άξονα Z, δημιουργώντας το όγδοο επίπεδο (Εικόνα 6.24.Weaving07), στο οποίο ελευθερώνεται η ροή του νήματος. Ακολούθως, το βασικό επίπεδο μετατοπίζεται 60 mm στον άξονα Z, 50 mm μπροστά στον άξονα X και περιστρέφεται -10° στον άξονα Y, δημιουργώντας το ένατο επίπεδο (Εικόνα 6.24.Weaving08), στο οποίο επιχειρείται η απομάκρυνση του εργαλείου τελικής δράσης από το δημιουργημένο κόμβο. Τέλος, ο ρομποτικός βραχίονας μεταφέρει το εργαλείο τελικής δράσης στο βασικό επίπεδο υπολογισμού του μήκους του νήματος για τη δημιουργία του επόμενου κόμβου (Εικόνα 6.24.Weaving08).



Εικόνα 6.24. Επίπεδα τοποθέτησης και ελέγχου του εργαλείου τελικής δράσης από το ρομποτικό βραχίονα για τη δημιουργία ενός κόμβου σε προκαθορισμένο επίπεδο.

Η Εικόνα 6.25 παρουσιάζει το αλγόριθμο ελέγχου της διαδικασίας δημιουργίας του κόμβου και του υπολογισμού του αρχικού μήκους του επόμενου νήματος στη γλώσσα προγραμματισμού *Rapid*, ο οποίος εκτελείται από τον *IRC5 controller* του ρομποτικού βραχίονα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ο αναμενόμενος αριθμός των κόμβων.

MODULE Weaving_Thread

```

VAR speeddata SpeedGT:=[10,5,5000,1000]; //
PERS tooldata
GTToolV2:=[TRUE,[[[-41.5698,0,423.3292],[1,0,0,0]],[2,[-17.2809,-32.6431,226.4935],[1,0,0,0],0,0,0]];
VAR bool MyFlag:=FALSE;
CONST jointtarget Weaving00:=[[-13.824,-20.608,56.055,21.148,27.609,143.998],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving01:=[[827.1,-124.956,226.821],[-0.0043,0.995,0.0496,0.087],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving02:=[[817.149,-125.951,221.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving03:=[[817.149,-125.951,216.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving04:=[[817.149,-125.951,216.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving05:=[[817.149,-125.951,216.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving06:=[[817.149,-125.951,216.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving07:=[[817.149,-125.951,221.821],[0,0.9988,0.0498,0],[-1,0,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST robtarget Weaving08:=[[822.125,-125.454,231.821],[0.0065,0.9902,0.0494,-0.1304],[-1,-1,1,0],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];
CONST jointtarget Weaving09:=[[-10.914,-10.616,48.046,19.836,24.932,147.388],[0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]];

```

PROC Main()

```

ConfJ \Off;
ConfL \Off;
Set DO01; // activate hold thread
Reset DO04; // deactivate close Gripper
Set DO03; // activate open Gripper
MoveAbsJ Weaving00,SpeedGT,Fine,GTToolV2;
MoveLDO Weaving01,SpeedGT,Fine,GTToolV2; WObj:=WObj0;
MoveLDO Weaving02,SpeedGT,Fine,GTToolV2; WObj:=WObj0;
Reset DO03; // deactivate open gripper
MoveLDO Weaving03,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO04,1; // activate close gripper
MoveLDO Weaving04,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO05,1; // activate Arduino
WaitDI DI01, 1 \MaxTime:=30 \TimeFlag:=MyFlag;
Reset DO05; //reset Arduino
WaitTime \InPOS, 10;
MoveLDO Weaving05,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO06,1; // cooling air
WaitTime \InPOS, 10;
Reset DO06; // deactivate cooling air
Reset DO04; // deactivate close gripper
Reset DO01; // deactivate hold thread
WaitTime \InPOS, 30;
MoveLDO Weaving06,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO03,1; //open gripper
MoveLDO Weaving07,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO02,1; // release thread
MoveLDO Weaving08,SpeedGT,Fine,GTToolV2\WObj:=WObj0,DO02,0; // deactivate release thread
Reset DO03; // deactivate open gripper
MoveAbsJ Weaving09,SpeedGT,Fine,GTToolV2;

```

ENDPROC
ENDMODULE

Εικόνα 6.25. Ο αλγόριθμος που εκτελείται από τον ελεγκτή IRC5 με την προγραμματική γλώσσα *Rapid* για τη δημιουργία ενός κόμβου και το μέτρημα του μήκους του νήματος για τον επόμενο κόμβο.

6.6_ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός του εργαλείου τελικής δράσης γίνεται με βάση τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η πρόσθεση των κόμβων και του ελαστικού νημάτος καθορίζονται από ψηφιακές παραμέτρους εξεύρεσης μορφής (form-finding) και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Οι ιδιαιτερότητες του μοτίβου ύφανσης επηρεάζουν τη σχεδιαστική εξέλιξη του εργαλείου τελικής δράσης και τον προγραμματισμό ελέγχου της λειτουργίας του αλλά και της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα. Μέσα από τη διαδικασία σωστού – λάθους επιτυγχάνεται η βελτίωση του εργαλείου τελικής δράσης και κατ' επέκταση η ακρίβεια στο χειρισμό των υλικών, κάτι το οποίο επηρεάζει τη διαδικασία κατασκευής των εφελκόμενων πλεγμάτων στο σύνολο τους.

Έτσι, βασικός σκοπός αυτής της διερεύνησης είναι η δημιουργία του αλγόριθμου ελέγχου του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και ο προγραμματισμός της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζεται η ενεργοποίηση του εργαλείου τελικής δράσης, η οποία συμπεριλαμβάνει τη δημιουργία των κόμβων και τη μέτρηση του μήκους του νημάτος. Επίσης, δίνονται εξηγήσεις όσον αφορά την παραμόρφωση του υλικού κατά τη φάση τοποθέτησης του με τρόπο που αυτό να ανταποκρίνεται στη συμπεριφορά των ρομποτικών μηχανισμών, στοχεύοντας στην αποτελεσματική αλλά και με ακρίβεια κατασκευαστική ύφανση των προτεινόμενων εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων.

7.0_ ΦΥΣΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

7.1_ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο συζητά τα αποτελέσματα της παραγωγής φυσικών μοντέλων με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα και του προτεινόμενου αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης, τα οποία έχουν προκύψει μέσα από τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Σκοπός των πειραμάτων είναι ο συσχετισμός των ψηφιακών και των φυσικών μοντέλων και ο έλεγχος της ακρίβειας τους αλλά και της παράλληλης εξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά τις δυνατότητες του εργαλείου τελικής δράσης, του αλγόριθμου ελέγχου της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα αλλά και της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής. Τα πιο πάνω επηρεάζονται από παραμέτρους και περιορισμούς στη λειτουργία των μηχανικών τμημάτων του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και της προσομοίωσης και της συμπεριφοράς του υλικού. Κατ' επέκταση, μέσα από την ανάλυση των πειραμάτων ελέγχεται η δυνατότητα της προτεινόμενης ενοποιημένης μεθοδολογίας να δημιουργεί μέσω μιας συγκεκριμένης διαδικασίας ύφανσης, ψηφιακά μοντέλα εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να αναπαραχθούν στο φυσικό χώρο.

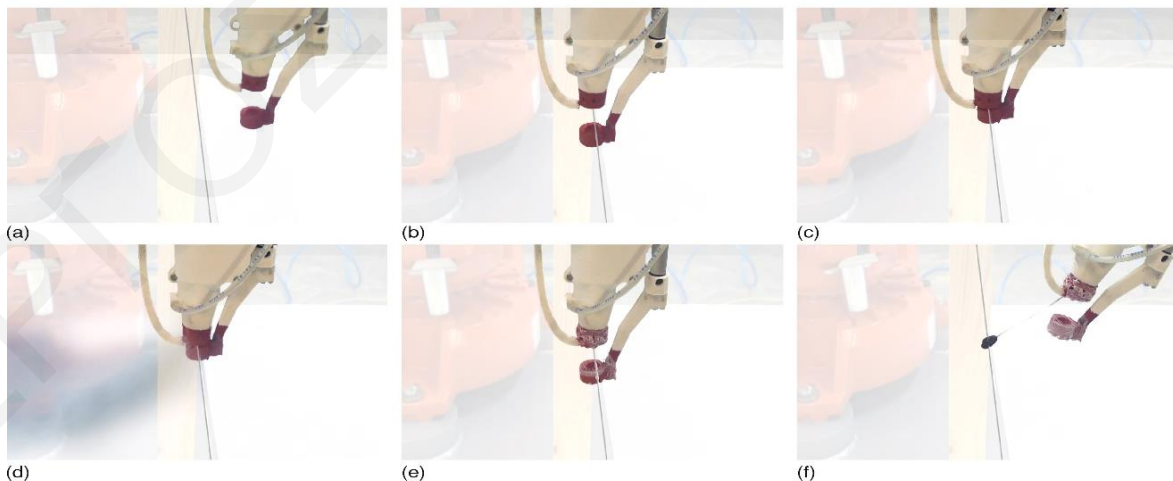
7.2_ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Τα φυσικά αποτελέσματα των ελαστικών πλεγμάτων βασίζονται στο αλγόριθμο λειτουργίας των ρομποτικών μηχανισμών, αφού με την κίνηση τους και την ενεργοποίηση των βασικών λειτουργιών τους τοποθετείται ελαστικό νήμα και κόμβοι σε προϋπολογισμένες θέσεις. Μέσα από την ανάλυση των δεδομένων της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης καθορίζεται η θέση των κόμβων και το αρχικό μήκος των νημάτων. Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μηχανισμών όσον αφορά τη δημιουργία των κόμβων, τα αποτελέσματα των φυσικών πειραμάτων καταγράφονται μέσω φωτογράφισης και αναλύονται με σκοπό τη βελτίωση της προτεινόμενης διαδικασίας. Τέλος, τα φυσικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα ψηφιακά μοντέλα.

Στην αρχική διερεύνηση, τα πειράματα στοχεύουν στην ανατροφοδότηση της προτεινόμενης ενοποιημένης διαδικασίας σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής ελαστικών πλεγμάτων με σκοπό την εξέλιξη της. Σημαντικό ζητούμενο είναι η σχέση

μεταξύ των αποτελεσμάτων της πολυκριτηριακής ανάλυσης και των φυσικών πειραματισμών. Έτσι, σε πρώτη φάση μεταφέρεται η πληροφορία των ψηφιακών αποτελεσμάτων του μοτίβου στον αλγόριθμο ελέγχου για την εκτέλεση του φυσικού πειράματος. Ο ρομποτικός βραχίονας χαρακτηρίζεται από ακρίβεια στην επανάληψη των κινήσεων του και αυτό είναι ένας παράγοντας που επιτρέπει την πιστή παραγωγή μορφών στο φυσικό χώρο. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια του εργαλείου τελικής δράσης θεωρείται πρωταρχικό ζητούμενο στη διερεύνηση των πειραμάτων αφού αυτό είναι υπεύθυνο για την αρχική παραμόρφωση των νημάτων και τη δημιουργία των κόμβων. Σε αντίθεση με τον ρομποτικό βραχίονα που είναι βιομηχανικός, το εργαλείο, λόγω της αυτοσχέδιας φύσης του, χρειάζεται μια σειρά από ελέγχους για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του.

Για αυτό το σκοπό, ο αρχικός πειραματισμός επικεντρώνεται στον έλεγχο του εργαλείου τελικής δράσης μέσω της δημιουργίας κόμβων πάνω σε ένα ελαστικό νήμα. Ο πρώτος πειραματισμός στοχεύει στη βελτίωση του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και την εξέλιξη του αλγόριθμου ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα. Αυτά συσχετίζονται με την ποσότητα χύτευσης του υλικού, τη βελτίωση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης του κόμβου, την ακρίβεια τοποθέτησης του μέσω του ψηφιακού μοντέλου αλλά και την αποτελεσματική διαδικασία απομάκρυνσης και προσέγγισης του νήματος (Εικόνα 7.1) (Kontovourkis and Tryfonos, 2015a; Kontovourkis and Tryfonos, 2016).



Εικόνα 7.1. Αρχικό πείραμα δημιουργίας του κόμβου σε υφιστάμενο περιμετρικό πλαίσιο από ελαστικό νήμα (Kontovourkis and Tryfonos, 2015a; Kontovourkis and Tryfonos, 2016).

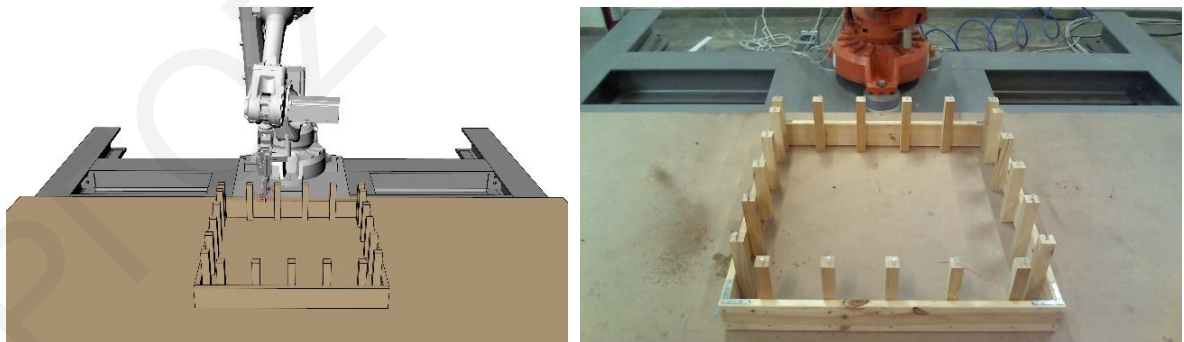
Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του πρώτου πειράματος βοηθούν στην εξέλιξη του αλγόριθμου ελέγχου των ρομποτικών μηχανισμών όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6. Σε αυτό γίνεται δοκιμή σε ένα απλό σύστημα δυο νημάτων που είναι σε παραμόρφωση (Εικόνα

7.2). Μέσα από τη διερεύνηση αξιολογείται η δυνατότητα μεταφοράς της πληροφορίας από τον ψηφιακό στο φυσικό χώρο. Συγκεκριμένα, αναζητούνται τρόποι βελτιστοποίησης των διαδικασιών αρχικής παραμόρφωσης του νήματος και εξεύρεσης της θέσης του επόμενου κόμβου στο παραμορφωμένο νήμα. Ένα σημαντικό στοιχείο του πειράματος είναι η ακρίβεια της κατασκευής και η βαθμονόμηση της βάσης, πάνω στην οποία συγκρατούνται τα νήματα, κάτι που επηρεάζει την πειραματική διαδικασία λόγω των αρχικών σφαλμάτων.



Εικόνα 7.2. Πείραμα εξεύρεσης μορφής και συσχέτιση με προσθήκη δυο ελαστικών νημάτων (Kontonourkis and Tryfonos, 2015a; Kontonourkis and Tryfonos, 2016).

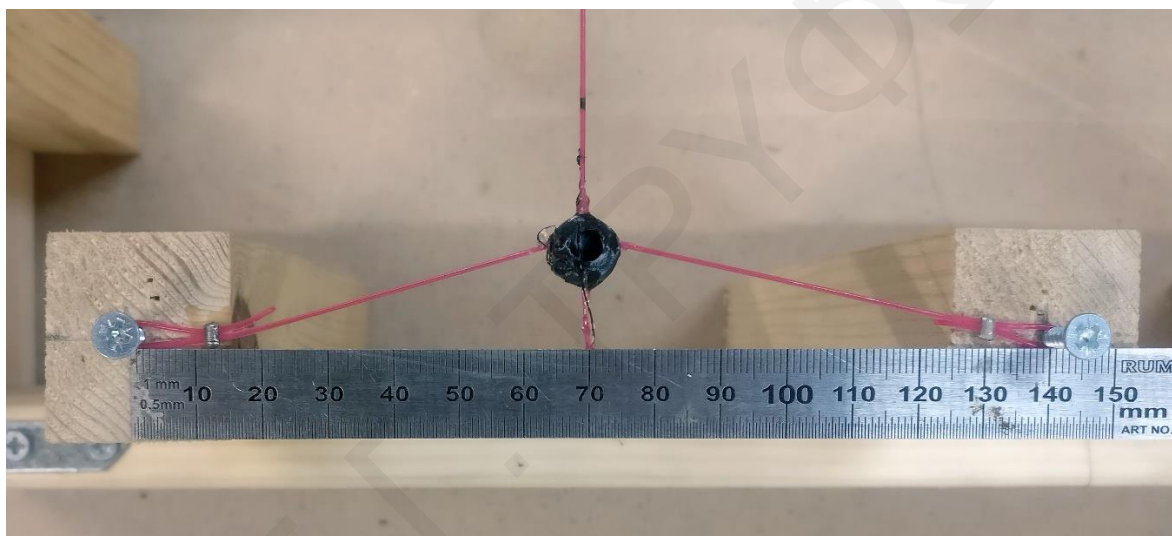
Στο δεύτερο πείραμα, για τον περιορισμό του αρχικού σφάλματος, δημιουργείται ενιαία βάση η οποία μεταφέρεται στο ψηφιακό μοντέλο και συγχρονίζεται με την προσομοίωση του ρομποτικού βραχίονα (Εικόνα 7.3). Κατασκευάζεται από ένα ξύλινο πλαίσιο με πηγάκια και στην κορυφή του τοποθετούνται ξυλόβιδες, οι οποίες θεωρούνται ως αρθρώσεις στο ψηφιακό μοντέλο.



Εικόνα 7.3. Ξύλινη βάση για την κατασκευή του ελαστικού πλέγματος. Αριστερά η ψηφιακή προσομοίωση, Δεξιά η τοποθέτηση της βάσης και βαθμονόμηση της.

Με την χρήση μεταλλικών σφικτήρων στις άκρες του κάθε νήματος δημιουργείται η περίμετρος του ελαστικού πλέγματος. Το μήκος της περιμέτρου αντιπροσωπεύει πιστά το ψηφιακό μοντέλο, το οποίο μέσω της αγκύρωση του στις ξυλόβιδες δημιουργεί την απαιτούμενη αρχική παραμόρφωση. Μετά από τις αναγκαίες ανθρώπινες παρεμβάσεις στο φυσικό μοντέλο για τη δημιουργία του περιμετρικού ελατηρίου, γίνεται η βαθμονόμηση του.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της τοποθέτησης του εργαλείου τελικής δράσης στο μέσο του νήματος – μεταξύ δύο αρθρώσεων. Ακολουθώς, μετριέται και αξιολογείται η απόσταση από τις αρθρώσεις, κάτι το οποίο τις περισσότερες φορές υποδεικνύει μετακίνηση τους από 0.95-8.28 mm με μέσο όρο 3.72 mm (Εικόνα 7.4.). Η διαδικασία ελέγχου επαναλαμβάνεται σε όλη την περίμετρο της βάσης. Ο ανθρώπινος παράγοντας είναι σημαντικός στη διαδικασία αφού μέσω της χειρωνακτικής τοποθέτησης των αρχικών νημάτων προκύπτουν σφάλματα που υπολογίζονται στο 0.1-0.2 mm των παραμορφωμένων νημάτων. Ο υπολογισμός του σφάλματος υπολογίζεται από το ύψος του τριγώνου που σχηματίζει το παραμορφωμένο νήμα με τις δύο αρθρώσεις.

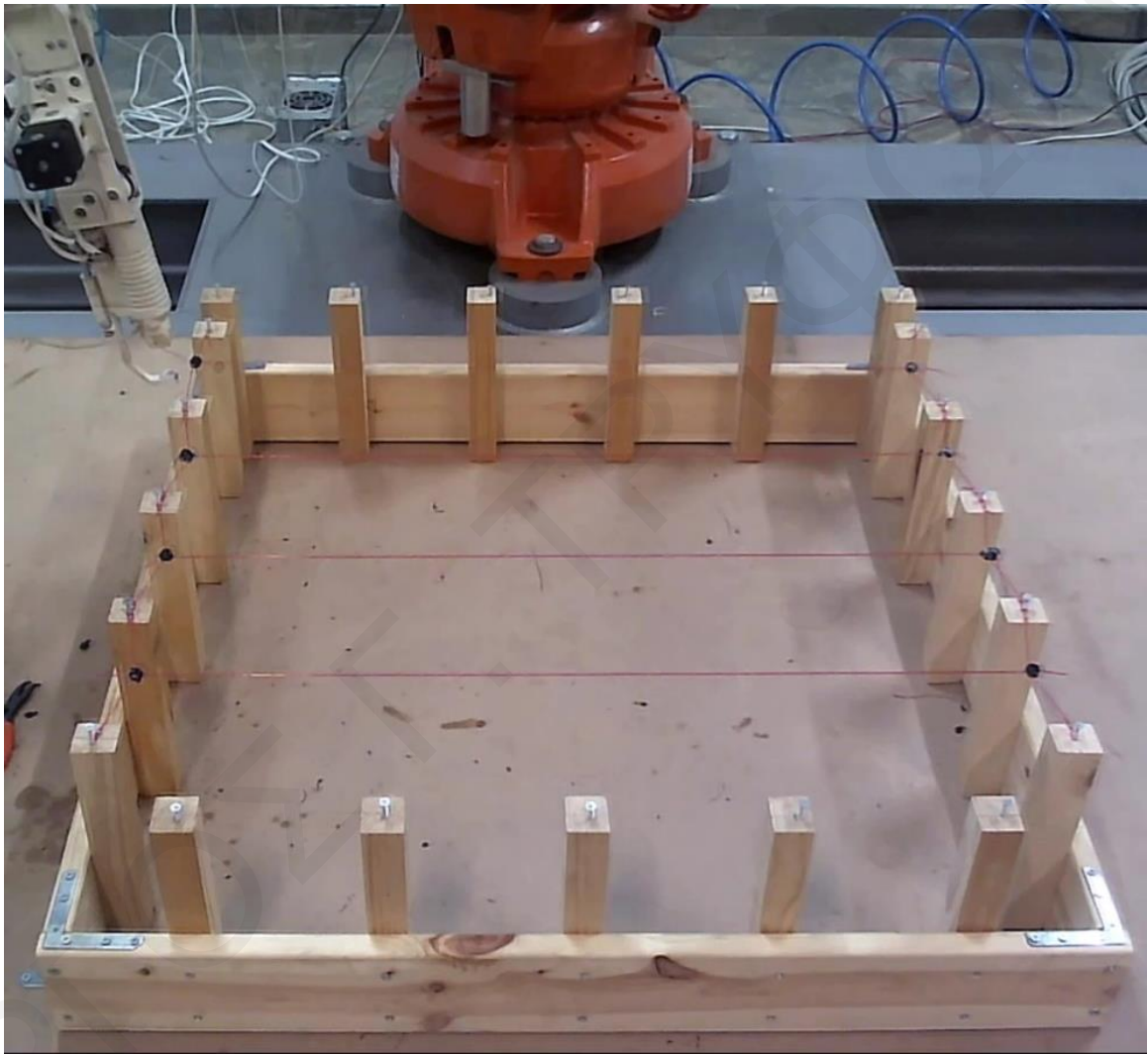


Εικόνα 7.4. Αξιολόγηση της τοποθέτησης των αρθρώσεων με τη μέτρηση της απόστασης τους.

7.2.1_ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΦΑΝΣΗΣ

Το ολοκληρωμένο πείραμα βασίζεται στην κατασκευή ενός πρωτότυπου μικρών διαστάσεων 0.7x0.7 m με την εφαρμογή του μοτίβου ύφανσης, όπως αυτό εμφανίζεται στην κατηγορία A-G.1 (Πίνακας I.9), δηλαδή την επίπεδη γεωμετρία. Η επίπεδη γεωμετρία ανήκει στην οικογένεια μηδενικής καμπυλότητας (K_a) και θεωρείται μια από τις δυσμενέστερες γεωμετρίες για εφαρμογή ελαστικών πλεγμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του εργαλείου τελικής δράσης θεωρείται ιδανική επιλογή, όπου θα μπορούσε να αποφορτίσει το εργαλείο από μεγάλες αξονικές δυνάμεις, αφού σε αυτή την λύση εμφανίζεται αρχική προένταση με συντελεστή (L/D) 70 - 93.7% (Πίνακας I.9) επίσης, θεωρείται ιδανική περίπτωση αξιολόγησης του ιδιοβάρους της κατασκευής, η οποία στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει μεταβολές στην καμπυλότητα της από 0.0138 - 0.9597

(Πίνακας I.9) μονάδες που οφείλονται καθαρά στο ιδιοβάρος του νήματος και των κόμβων. Ως αποτέλεσμα την ανάγκης βαθμονόμησης της βάσης και των περιμετρικών νημάτων στις αρθρώσεις, η μεταβολή των περιμετρικών κόμβων ορίζεται στο 50%, δηλαδή στο μέσο της θέσης των περιμετρικών νημάτων, όπου θα μπορεί να γίνεται έλεγχος των αρχικών κόμβων και μείωση του σφάλματος στα πρωταρχικά νήματα (Εικόνα 7.5).



Εικόνα 7.5. Αρχικά νήματα 1-4 κατά τη διαδικασία δημιουργίας του ολοκληρωμένου πειράματος.

Επιπρόσθετα, ο καθορισμός του συντελεστή L/D σε 90%, δηλαδή στο εύρος των σχεδιαστικών κατασκευαστικών λύσεων από 87.7 - 93.7% (Πίνακας I.9), αποσκοπεί στην προστασία του συνολικού πλέγματος από δυνάμεις που μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα στην τοποθέτηση των νημάτων από το εργαλείο τελικής δράσης λόγω του συνεχούς πειραματισμού, κάτι το οποίο προκαλεί αστοχία στα μηχανικά μέρη του από φθορές και επηρεάζει την απόδοση λειτουργίας του. Για τους πιο πάνω λόγους κρίνεται αναγκαία η αποφόρτιση του από μεγάλες δυνάμεις. Συγκεκριμένα, βασικές φθορές που εντοπίζονται

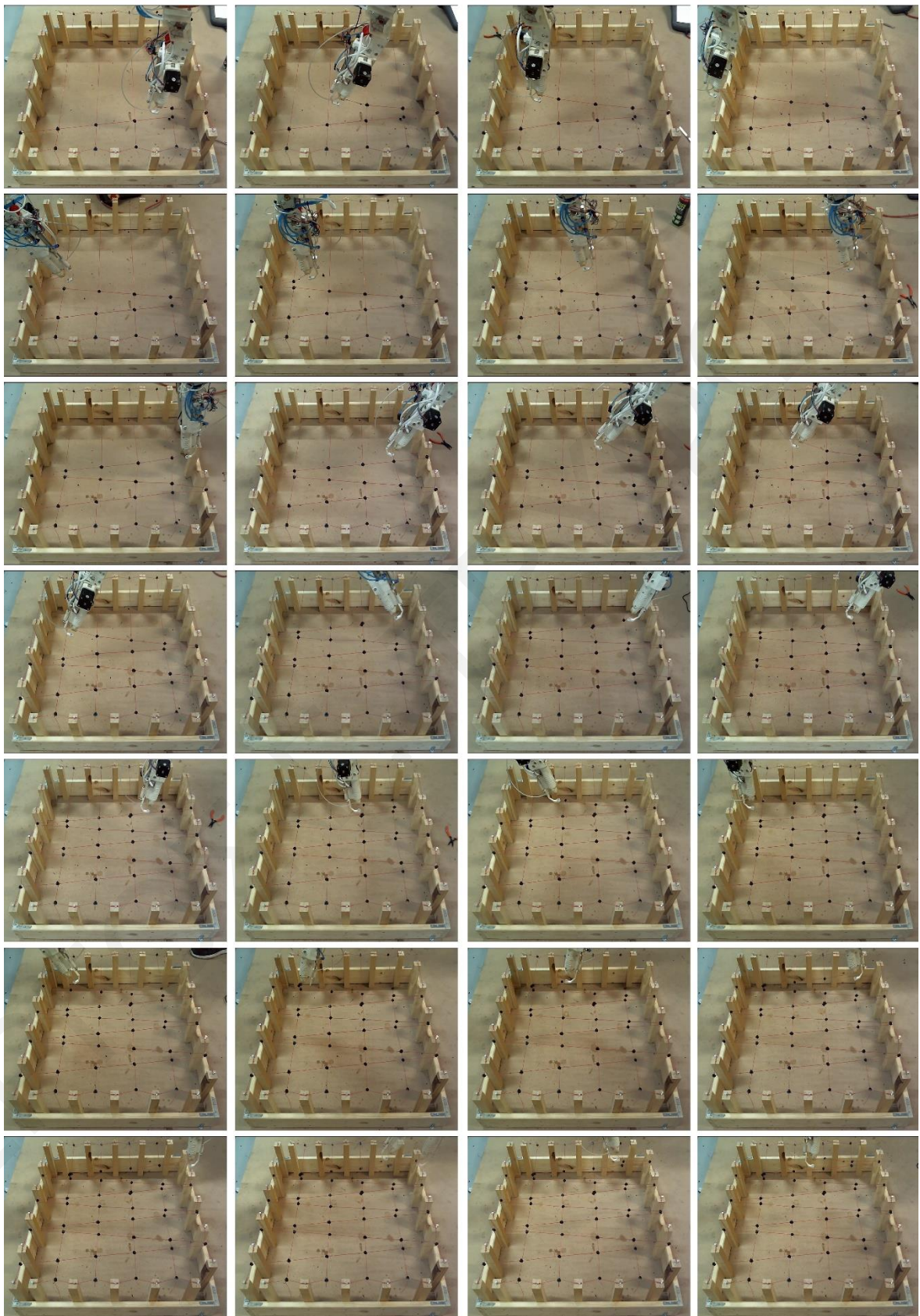
κατά τη διαδικασία ύφανσης και επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι στη λεπτομέρεια συγκράτησης των νημάτων και δημιουργίας του κόμβου. Επίσης, υπάρχει ο κίνδυνος θραύσης του εργαλείου αρπαγής-συγκράτησης των νημάτων αλλά και υπερθέρμανσης της θήκης τήξης της κολλητικής σιλικόνης (Εικόνα 7.6).



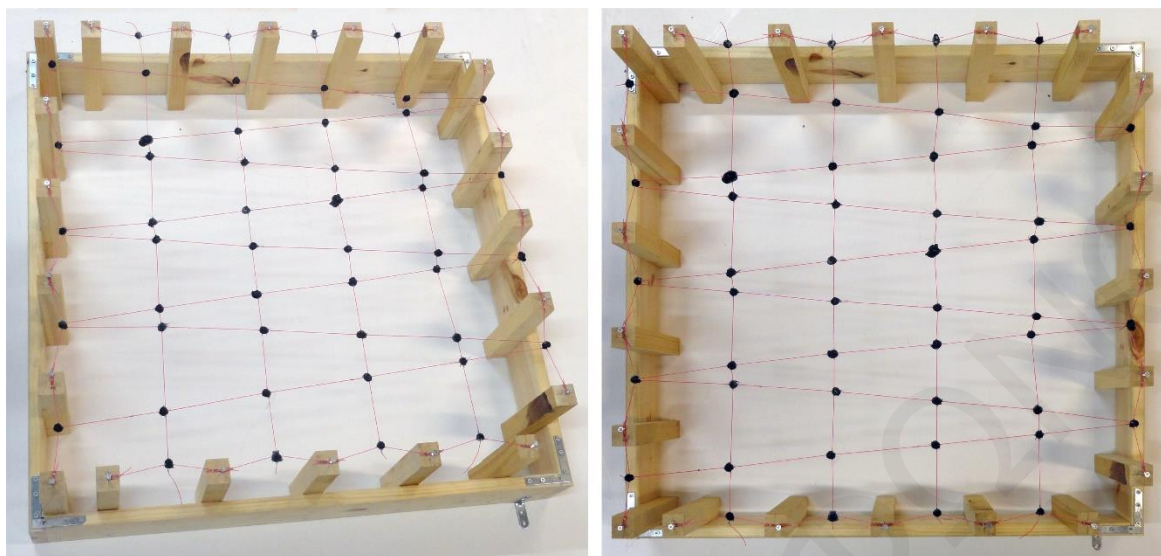
Εικόνα 7.6. Φθορές άκρου ημισφαιρίου και αστοχία αρπαγής.

Η διαδικασία τοποθέτησης όλων των νημάτων και κόμβων στο συνολικό πείραμα ολοκληρώνεται μέσα σε χρονικό διάστημα 78h. Αναλυτικά, οι 30h από τις 78h καταναλώθηκαν στο συγχρονισμό και τη βαθμονόμηση των μοντέλων βάσει εξωτερικής περιμέτρου των νημάτων σε ψηφιακό και φυσικό περιβάλλον. Ο χρόνος λειτουργίας τους ρομποτικού βραχίονα για την κατασκευή υπολογίστηκε στα 74 min συνολικά. Ο χρόνος δημιουργίας κόμβων στη μεγαλύτερη απόσταση υπολογίστηκε στα 2 min. και στην ελάχιστη απόσταση στα 1.40 min. περίπου. Ο υπόλοιπος χρόνος καταναλώθηκε για την επιθεώρηση των κόμβων, τη συντήρηση, την προετοιμασία, την καταγραφή και το μέτρημα του νήματος, ώστε να επιτευχθεί μείωση των διαδοχικών σφαλμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ύφανσης (Εικόνα 7.7 και Εικόνα 7.8), το τελικό αποτέλεσμα φωτογραφήθηκε και έγινε σύγκριση του με το αποτέλεσμα της ψηφιακής διαδικασίας εξεύρεσης μορφής.



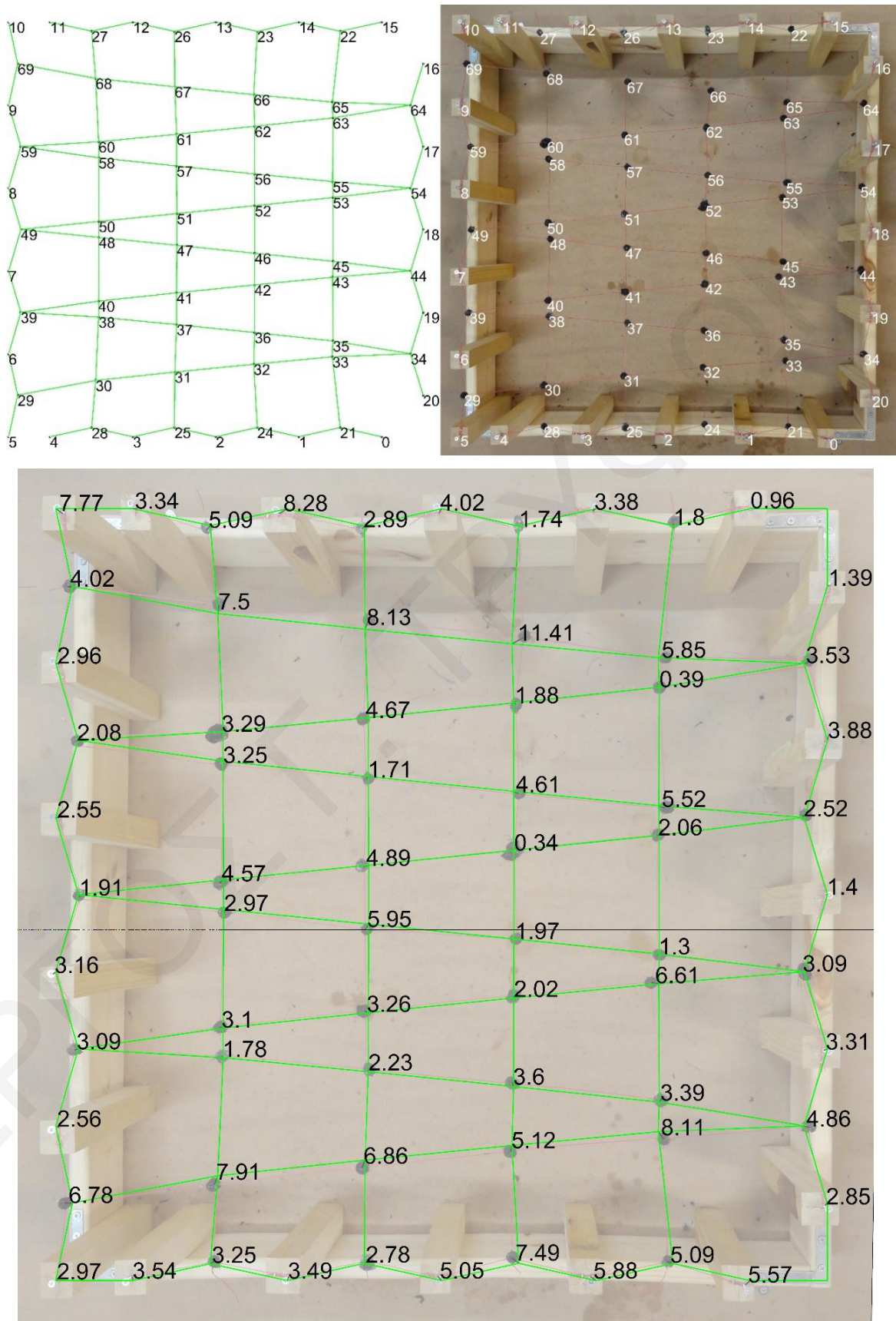
Εικόνα 7.7. Διαδοχικές λήψεις από την διαδικασία κατασκευής του ελαστικού νήματος.



Εικόνα 7.8. Αποτέλεσμα ολοκληρωμένου πειράματος ύφανσης ελαστικού πλέγματος.

Κατά τη διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος 3 από τους 39 κόμβους, δηλαδή σε ποσοστό 8 % επί του συνόλου των κόμβων, δεν εντοπίστηκαν σωστά από τον αλγόριθμο ελέγχου της ρομποτικής μηχανής. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη φθορά του εργαλείου τελικής δράσης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Επίσης, παρατηρήθηκε ανομοιομορφία στη δημιουργία των κόμβων, κάτι το οποίο προκάλεσε ασάφειες όσον αφορά τον υπολογισμό της περιστροφής των περιμετρικών κόμβων, με αποτέλεσμα αυτό να επηρεάζει το μήκος των αρχικών νημάτων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μεταφορά του σφάλματος και τη λανθασμένη αρχική παραμόρφωση του νήματος στον επόμενο κόμβο.

Συγκρίνοντας τη θέση των κόμβων μέσα από το αποτέλεσμα του πειράματος σε σχέση με το αποτέλεσμα το οποίο είχε προκύψει κατά τη διαδικασία εξεύρεσης μορφής (Εικόνα 7.9), επιβεβαιώνεται το σφάλμα στο μήκος του νήματος στην περίμετρο της κατασκευής όπου οι περιμετρικοί κόμβοι είχαν κάποια περιστροφή άξονα. Αναλυτικά, τα αρχικά νήματα 1-4 τοποθετήθηκαν με ακρίβεια 3.72 mm, το οποίο είναι ο αρχικός μέσος όρος σφάλματος. Στο συνολικό πλέγμα, η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στους κόμβους κοντά στην περίμετρο με τιμή 11.4 mm, το οποίο οφείλεται στον λανθασμένο υπολογισμό του μήκους του νήματος και της αρχικής παραμόρφωσης στους περιμετρικούς κόμβους. Αντιθέτως, στους κεντρικούς κόμβους παρατηρείται ακρίβεια 0.34 mm. Ως αποτέλεσμα, ο μέσος όρος σφάλματος σε όλο το σύστημα υπολογίζεται στα 3.95 mm, δηλαδή 0.23 mm αύξηση από το αρχικό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τις φθορές του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης, υποδηλώνει ικανοποιητική ακρίβεια (Πίνακας 7.1).



Εικόνα 7.9. Σύγκριση αποκλίσεων σε [mm] του αποτελέσματος της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής με φυσικό πρωτότυπο σε άξονες XY.

Κόμβοι	Διαδικασία εξεύρεση μορφής [mm]		Διαδικασία ύφανσης του ελαστικού πλέγματος [mm]		Σφάλμα [mm]
	X	Y	X	Y	
	Περιμετρικοί κόμβοι τοποθετημένη από σχεδιαστή				
0	1306.54	-350.0	2302.34	-353.65	5.57
1	1166.54	-350.0	2161.88	-346.42	5.88
2	1026.54	-350.0	2023.18	-346.23	5.05
3	886.54	-350.0	1887.78	-346.74	3.49
4	746.54	-350.0	1745.73	-346.55	3.54
5	676.54	-350.0	1678.7	-347.96	2.97
6	676.54	-210.0	1678.94	-210.89	2.56
7	676.54	-70.0	1674.13	-72.05	3.16
8	676.54	70.0	1679.1	70.0	2.55
9	676.54	210.0	1679.36	209.09	2.96
10	676.54	350.0	1683.08	345.8	7.77
11	746.54	350.0	1749.88	349.97	3.34
12	886.54	350.0	1879.45	345.73	8.28
13	1026.54	350.0	2024.2	346.73	4.02
14	1166.54	350.0	2163.62	348.32	3.38
15	1306.54	350.0	2306.94	350.87	0.96
16	1376.54	280.0	2377.87	280.42	1.39
17	1376.54	140.0	2377.11	143.84	3.88
18	1376.54	0.0	2375.15	0.0	1.4
19	1376.54	-140.0	2373.39	-141.02	3.31
20	1376.54	-280.0	2374.33	-281.79	2.85
Μέσος όρος αρχικού σφάλματος					3.72
Εσωτερικοί κόμβοι δημιουργημένοι από το αλγόριθμο λειτουργίας του IRB2600					
21	1236.33	-334.46	2231.42	-333.1	5.09
22	1236.33	334.46	2237.1	336.08	1.8
23	1096.43	334.26	2096.33	332.52	1.74
24	1096.43	-334.26	2090.51	-329.69	7.49
25	956.55	-334.31	1958.93	-332.87	2.78
26	956.55	334.31	1954.68	332.11	2.89
27	816.71	334.71	1813.54	330.73	5.09
28	816.71	-334.71	1819.58	-333.2	3.25
29	691.7	-279.64	1684.92	-279.6	6.78
30	823.51	-254.95	1820.55	-262.28	7.91
31	957.03	-240.76	1954.69	-247.2	6.86
32	1090.39	-227.48	2089.32	-232.49	5.12
33	1223.14	-214.95	2227.97	-221.46	8.11
34	1355.24	-209.78	2359.93	-211.03	4.86
35	1223.96	-188.18	2225.93	-185.42	3.39
36	1091.95	-174.0	2090.79	-170.59	3.6
37	960.1	-160.58	1960.1	-158.35	2.23
38	828.47	-147.88	1827.28	-146.56	1.78
39	696.93	-139.86	1693.94	-140.63	3.09
40	828.26	-121.03	1825.32	-120.06	3.1
41	960.06	-107.06	1957.15	-105.58	3.26
42	1091.87	-93.7	2092.6	-91.82	2.02
43	1223.67	-80.71	2217.12	-79.81	6.61
44	1355.57	-69.93	2352.51	-69.56	3.09
45	1223.98	-53.82	2222.87	-54.5	1.3
46	1092.24	-40.16	2094.19	-40.36	1.97
47	960.53	-26.77	1957.4	-31.83	5.95
48	828.85	-13.45	1829.59	-16.32	2.97
49	697.21	0.0	1698.12	-1.68	1.91
50	828.85	13.45	1825.21	10.68	4.57
51	960.53	26.77	1955.82	25.46	4.89
52	1092.24	40.16	2092.49	39.94	0.34
53	1223.98	53.82	2221.91	53.82	2.06
54	1355.57	69.93	2354.25	72.08	2.52

55	1223.67	80.71	2228.72	78.47	5.52
56	1091.87	93.7	2096.07	91.82	4.61
57	960.06	107.06	1959.0	105.71	1.71
58	828.26	121.03	1828.28	117.78	3.25
59	696.93	139.86	1694.85	139.73	2.08
60	828.47	147.88	1825.19	147.68	3.29
61	960.1	160.58	1955.45	160.13	4.67
62	1091.95	174.0	2093.65	173.19	1.88
63	1223.96	188.18	2224.35	188.24	0.39
64	1355.24	209.78	2358.74	210.29	3.53
65	1223.14	214.95	2228.98	214.73	5.85
66	1090.39	227.48	2100.43	232.91	11.41
67	957.03	240.76	1960.18	248.25	8.13
68	823.51	254.95	1824.42	262.4	7.5
69	691.7	279.64	1687.7	279.2	4.02
Μέσος όρος τελικού σφάλματος					3.95

Πίνακας 7.1. Συγκριτικός πίνακας αποκλίσεων σε άξονες ΧΥ μεταξύ ψηφιακής διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και φυσικού πρωτότυπου του ελαστικού πλέγματος.

7.3_ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά πρωτότυπα και οι παρατηρήσεις βοηθούν στην εξέλιξη της διαδικασίας και τον εντοπισμό των προβλημάτων που προκύπτουν, βοηθώντας στην ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Οι βελτιώσεις του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και του αλγόριθμου ελέγχου της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα οδηγούν σε ικανοποιητική ακρίβεια όσον αφορά τον έλεγχο του ελαστικού νήματος. Παρόλα αυτά, απομονώνοντας το τελικό φυσικό αποτέλεσμα, διαφαίνεται η ικανότητα του αλγόριθμου να προσδιορίζει τα σημεία για τη δημιουργία των κόμβων. Σημαντικός παράγοντας για την ακρίβεια της κατασκευής είναι ο ανθρώπινος, ο οποίος επηρεάζει την αρχική τοποθέτηση των νημάτων, δημιουργώντας το αρχικό σφάλμα, καθώς και τον συνολικό χρόνο κατασκευής της δομής.

Συμπερασματικά, η ακρίβεια στην κατασκευή του εργαλείου τελικής δράσης αλλά και ο προγραμματισμός τόσο του εργαλείου όσο και της ρομποτικής μηχανής αποτελούν τις δύο βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης, λόγω της φύσης της διαδικασίας κατασκευής όπου η ύφανση προϋποθέτει τη διαδοχική προσθήκη νημάτων αλλά και κόμβων, παρατηρείται μεταφορά και πρόσθεση σφαλμάτων με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται το συνολικό αποτέλεσμα. Τέλος, αν και η ανθρώπινη παρέμβαση προκαλεί αρχικά σφάλματα είναι αναγκαία αφού βοηθά στην επιθεώρηση και εν μέρη τη διόρθωση της διαδικασίας εκεί που κρίνεται αναγκαίο. Μειονέκτημα της ανθρώπινης παρέμβασης είναι το ότι προκαλεί καθυστέρηση και αυξάνει το χρόνο κατασκευής.

8.0_ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1_ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ

Η έρευνα επικεντρώνεται στην δημιουργία μιας ενοποιημένης διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και κατασκευής ελαστικών πλεγμάτων. Άξονας ανάπτυξης αποτελεί ο άμεσος συσχετισμός της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και του αλγοριθμικού ελέγχου των προτεινόμενων ρομποτικών μηχανισμών. Σημαντική πρόκληση της έρευνας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα ελαστικά νήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από ευκαμψία και μεγάλη αντοχή σε εφελκυστικές παραμορφώσεις, παράμετροι που έχουν μεγάλο βαθμό δυσκολίας στο χειρισμό τους αλλά και ασάφεια κατά τη διαδικασία εφαρμογής τους σε κατασκευές. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι στις υφιστάμενες κλασικές μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής εφελκόμενων πλεγμάτων, όπως επιπεδοποίηση και αποφόρτιση, παρατηρούνται αρκετές ασαφείς παραδοχές που οδηγούν σε ανακρίβειες κατά τη διαδικασία κατασκευής τους.

Ο αλγόριθμος εξεύρεσης μορφής βασίζεται σε αναφορές από τη διεθνή βιβλιογραφία, μέσα από την οποία αποδεικνύεται ότι η δημιουργία και η ανάλυση εφελκόμενων συστημάτων βασίζεται σε αξονικές δυνάμεις προέκτασης που προκύπτουν από την αρχική παραμόρφωση των νημάτων και μεταβολής της καμπυλότητας τους. Επιπρόσθετα, η κατασκευαστική διαδικασία βασίζεται στην εφαρμογή ενός μοτίβου συνεχούς ύφανσης που λαμβάνει υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες του εύκαμπτου υλικού από ελαστομερές πολουρεθάνης (*Polyurethane Elastomer*) αλλά και την κατασκευαστική δυνατότητα του με στόχο τη δημιουργία εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων σε πολλαπλές διαστάσεις. Η πολυπλοκότητα στην διερεύνηση των κατασκευαστικών παραμέτρων, των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και των γεωμετρικών παραμέτρων μεταβολής της μορφής οδηγούν στην εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης με σκοπό την αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων. Η πολυκριτηριακή ανάλυση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή Γενετικών Αλγόριθμων πολλαπλών στόχων (MOGA), βάσει της οποίας αναλύεται ένας μεγάλος αριθμός λύσεων και επιλέγονται οι καλύτερες για την κατασκευή τους. Τα αποτελέσματα, ανάλογα με την αρχική καμπυλότητα της μορφής τους, ορίζονται ως στατικά επαρκή και γεωμετρικά κατασκευάσιμα.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της προτεινόμενης ενοποιημένης διαδικασίας είναι η αυτόματη μεταφορά των αποτελεσμάτων της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής στον αλγόριθμο ελέγχου

του ρομποτικού βραχίονα. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται ο χειρισμός της ελαστικότητας του υλικού στο σχεδιασμό πλέγματος σε πολλαπλές διαστάσεις, κάτι το οποίο προσφέρει ακρίβεια όσον αφορά τη μεταφορά των δεδομένων στο επίπεδο προσομοίωσης και κατασκευής μέσω των ρομποτικών μηχανισμών. Επίσης, αξιοσημείωτο στοιχείο της προτεινόμενης ενοποιημένης διαδικασίας είναι και η δυνατότητα συνδυασμού του ρομποτικού βραχίονα με το εργαλείο τελικής δράσης για την κατασκευή των μορφών. Η διερεύνηση του αυτοσχεδίου εργαλείου τελικής δράσης βασίζεται στην ακρίβεια χειρισμού της αρχικής παραμόρφωσης του μήκους του υλικού, που οδηγεί στο χειρισμό των ελαστικών νημάτων, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσα από τα φυσικά πειράματα οδηγεί σε ωφέλημα συμπεράσματα όσον αφορά τη δυνατότητα κατασκευής τέτοιων συστημάτων.

8.2_ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η προτεινόμενη ενοποιημένη διαδικασία σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής έχει ως στόχο την εφαρμογή της στην κατασκευή σύνθετων μορφών από ελαστικά νήματα, οι οποίες, με βάση την ανάλυση της βιβλιογραφίας, απαιτούν ειδικούς και καινοτόμους χειρισμούς τόσο στη φάση σχεδιασμού όσο και στη φάση κατασκευής. Αυτό αποδεικνύει την πρωτοτυπία της έρευνας όσον αφορά την εξεύρεση μιας μεθοδολογίας για τον αποτελεσματικό χειρισμό ελαστικών νημάτων με μεγάλη αντοχή παραμόρφωσης για τη δημιουργία εφελκόμενων ελαστικών κατασκευών με ακρίβεια σε πολλαπλές διαστάσεις.

Κατ' επέκταση, η παρούσα έρευνα εστιάζεται στην εξεύρεση μορφής με την τεχνική ελαστικών σωματιδίων και προτείνεται μια νέα διαδικασία ύφανσης επιφανειών για τη δημιουργία ελαστικών πλεγμάτων. Η καινοτομία της διαδικασίας ύφανσης έγκειται στην ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών ελαστικότητας του νήματος από το στάδιο σχεδιασμού, κάτι το οποίο επιτυγχάνει τη διερεύνηση της διαδοχικής ύφανσης με ακρίβεια σε ψηφιακό περιβάλλον αλλά και την μεταφορά των ιδιοτήτων του υλικού σε φυσικό περιβάλλον μέσω του σχεδιασμού ενός καινοτόμου αυτοσχεδίου εργαλείου τελικής δράσης. Έτσι, η εξέλιξη του μοτίβου ύφανσης προσδιορίζεται από την προτεινόμενη τεχνική χειρισμού του υλικού και επηρεάζεται από στατικούς και γεωμετρικούς παράγοντες. Η αλληλένδετη σχέση μεταξύ σχεδιαστικών, στατικών και κατασκευαστικών παραμέτρων καθορίζει και την πρωτοτυπία του τρόπου ύφανσης των ελαστικών νημάτων, που βασίζεται στην αρχική παραμόρφωση τους και οδηγεί στη δημιουργία πλεγμάτων χωρίς χαλαρώσεις.

Λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών, στατικών και κατασκευαστικών παραμέτρων που εμπλέκονται σε τέτοιες διαδικασίες, συνήθως δημιουργούνται δυσκολίες όσον αφορά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την επιλογή των κατάλληλων λύσεων για κατασκευή. Αντιθέτως, στην παρούσα έρευνα, μέσω της εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης βασισμένης σε Γενετικούς Αλγόριθμους πολλαπλών στόχων (*MOGA*), επιτυγχάνεται μια πρωτότυπη διαδικασία αλγοριθμικού ελέγχου και χειρισμού κατασκευαστικών και στατικών δεδομένων στο ίδιο σχεδιαστικό περιβάλλον. Επίσης, με τη χρήση στατικών υπολογισμών επιτυγχάνεται ακρίβεια στην προσομοίωση των πλεγμάτων, η οποία επιτρέπει τη γρήγορη διερεύνηση των λύσεων σε σχεδιαστικό περιβάλλον. Η αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγόριθμου με τη χρήση του στατικού προγράμματος μη-γραμμικής ανάλυσης *CSI SAP2000*, αποδεικνύει την αξιοπιστία της προτεινόμενης διαδικασίας όσον αφορά την προσομοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, τη δημιουργία εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων αλλά και τον έλεγχο της συνολικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

Πρόκληση σε τέτοιες διαδικασίες είναι η δυνατότητα του αλγόριθμου να δημιουργεί σύνθετες καμπύλες μορφές, οι οποίες να είναι έτοιμες για κατασκευή. Μέσα από την πρωτότυπη ενοποιημένη διαδικασία, η οποία αναπτύσσεται στην παρούσα έρευνα, αυτό γίνεται με επιτυχία αφού ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει την δυνατότητα διερεύνησης λύσεων σε επίπεδο εξεύρεσης μορφής, σχεδιαστικής και κατασκευαστικής υλοποίησης. Οι σχεδιαστικές λύσεις λαμβάνουν υπόψη στατικές παραμέτρους που έχουν να κάνουν με την παραμόρφωση των νημάτων και του πλέγματος από εξωτερικά φορτία, την αντοχή του υλικού, την κατασκευαστική δυσκολία, την ποσότητα του απαιτούμενου υλικού και γεωμετρικές μεταβολές σε σχέση με την αρχική σχεδιαστική επιφάνεια.

Η αποτελεσματική εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης στην παραμετρική διερεύνηση των τυπολογιών εισηγείται λύσεις που διαχωρίζονται σε γεωμετρικά και στατικά βέλτιστες, οι οποίες βασίζονται στη σχέση μορφής και στατικής συμπεριφοράς και περιγράφουν τον τρόπο εξέλιξης της κατασκευής από ψηφιακή γεωμετρία σε φυσική κατασκευή. Έτσι, τα στατικά βέλτιστα πλέγματα θεωρούνται λύσεις με μικρότερη παραμόρφωση στα νήματα που προκαλείται από εξωτερικό κατακόρυφο φορτίο. Σε αντίθεση, γεωμετρικά βέλτιστες θεωρούνται οι λύσεις με λιγότερη γεωμετρική μεταβολή όσον αφορά την Gaussian καμπυλότητα τους. Οι λύσεις και στις δυο περιπτώσεις είναι κατασκευάσιμες αφού βασίζονται σε κατασκευαστικές παραμέτρους και περιορισμούς. Η

επιλογή τους για κατασκευή εναπόκειται καθαρά στην αρχική σχεδιαστική πρόθεση. Η αποτελεσματική μεταφορά της πληροφορίας από τον ψηφιακό στο φυσικό χώρο μέσω του ενιαίου αλγόριθμου βοηθά στον έλεγχο της κίνησης της ρομποτικής μηχανής και στην ενεργοποίηση του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης, επιτυγχάνοντας την πρακτική εφαρμογή της διαδικασίας σε ολοκληρωμένο πείραμα μικρών διαστάσεων 0.7 x 0.7 m. Η ανάλυση των δεδομένων της διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και ο συνδυασμός τους με προγράμματα προσομοίωσης και ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα αυξάνει την ακρίβεια κατασκευαστικής εκτέλεσης από το εργαλείο τελικής δράσης σε επίπεδο αρχικής παραμόρφωσης του νήματος, δημιουργίας κόμβων και τελικής ύφανσης του πλέγματος.

Η εξέλιξη και βελτίωση του εργαλείου γίνεται μέσα από μια διαδικασία δοκιμής και λάθους, η οποία ανατροφοδοτεί και τον αλγόριθμο δημιουργίας των μορφών. Παρ' όλα αυτά, τα εργαστηριακά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται για το εργαλείο τελικής δράσης υπόκεινται σε φθορές λόγω της συνεχούς χρήσης τους και αυτό μειώνει την ακρίβεια όσον αφορά τη δημιουργία των κόμβων της κατασκευής. Συνυπολογίζοντας τη φθορά του εργαλείου και τα αρχικά σφάλματα λόγω του ανθρώπινου παράγοντα, παρατηρούνται μικρές ανακρίβειες σε τμήματα του φυσικού μοντέλου, κάτι το οποίο θεωρείται αμελητέο λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους της ενοποιημένης σχεδιαστικής και κατασκευαστικής μεθοδολογίας, οι οποίοι εκπληρώνονται με αποτελεσματικό τρόπο τόσο σε επίπεδο ψηφιακής εξεύρεσης μορφής όσο και σε επίπεδο μεταφοράς των δεδομένων και ρομποτικής διαδικασίας ύφανσης φυσικών πρωτοτύπων.

Παρόλες τις μεμονωμένες αποκλίσεις σε σημεία της κατασκευής, η πρωτότυπη διαδικασία ελέγχου της ελαστικότητας του νήματος με την χρήση ενός καινοτόμου εργαλείου τελικής δράσης ενσωματωμένου σε ρομποτικό βραχίονα για τη δημιουργία του εφελκόμενου ελαστικών πλέγματος θεωρείται αποτελεσματική αφού επιτυγχάνει να μεταφέρει με επιτυχία και με ακρίβεια τις πληροφορίες από την ψηφιακή διαδικασία εξεύρεσης μορφής και πολυκριτηριακής ανάλυσης στους μηχανισμούς για την κατασκευή της. Η ικανότητα παραμετρικής μεταβολής των διαστάσεων του πλέγματος σε σχεδιαστικό περιβάλλον μαζί με την προσομοίωση της συμπεριφοράς του επιφέρει καινοτομία όσον αφορά τη δυνατότητα του αλγόριθμου να επεξεργάζεται πολλαπλά μεγέθη κατασκευών σε πραγματική αρχιτεκτονική κλίμακα, κάτι το οποίο θα μπορούσε να ανοίξει νέους ορίζοντες διερεύνησης όσον αφορά στρατηγικές ανάπτυξης τέτοιων δομών.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της διαδικασίας είναι τα σφάλματα λόγω της επέμβασης του ανθρώπινου παράγοντα στη φάση κατασκευής, τα οποία θα μπορούσαν να διερευνηθούν μελλοντικά με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση τους. Με την περαιτέρω εξέλιξη και βελτιστοποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια της κατασκευής σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, η περαιτέρω εξέλιξη της προτεινόμενη ενοποιημένης διαδικασίας εξεύρεσης μορφής και ρομποτικής κατασκευής εφελκόμενων ελαστικών νημάτων μπορεί να βρει εφαρμογή σε μεγαλύτερες κλίμακες και σε συνθετότερες μορφές πλεγμάτων, με πιθανή εφαρμογή της στην ανάπτυξη υποστηρικτικών συστημάτων εφελκόμενων κελυφών.

Επίσης, η κατασκευή του εργαλείου τελικής δράσης με τη χρήση υλικών με μεγαλύτερες αντοχές σε θερμότητα και δυνάμεις φόρτισης θα μπορούσε να επιφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής των ψηφιακών πλεγμάτων και μείωση των σφαλμάτων στο ελάχιστο. Ως αποτέλεσμα, η χρήση τέτοιων υλικών μπορεί να οδηγήσει στη διερεύνηση μεγαλύτερων διατομών, όπου απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για την αρχική παραμόρφωση του νήματος. Κατ' επέκταση, η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί για τη δημιουργία κατασκευών μεγαλύτερου μεγέθους που φέρουν μεγαλύτερη προένταση και ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα κατακόρυφα εξωτερικά φορτία. Τέλος, μελλοντικά θα μπορούσαν να διερευνηθούν εναλλακτικοί ρυθμοί διαδοχικής ύφανσης εφελκόμενων ελαστικών πλεγμάτων σε πολλαπλές κλίμακες και να υλοποιηθούν μέσω του εργαλείου τελικής δράσης με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της στατικής και γεωμετρικής συμπεριφορά τους αλλά και την μείωση του χρόνου και των σφαλμάτων στη διαδικασία κατασκευής τους.

9.0_ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aboul-Nasr, G. & Mourad, S.,A. 2015, "An extended force density method for form finding of constrained cable nets", *Case Studies in Structural Engineering*, vol. 3, pp. 19-32.
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. & Williams, C. 2014, *Shell structures for architecture : form finding and optimization*, 1st edn, Routledge, New York.
- Adrian-Florin, N., Florentin-Marian, I. & Alexandru, T.G. 2015, "Forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameter's modeling", *Proceedings in Manufacturing Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 157-164.
- Ahlquist, S., Askarinejad, A., Charaoui, R., Kalo, A., Liu, X. & Shah, K. 2014, "Post-forming Composite Morphologies: Materialization and design methods for inducing form through textile material behavior", *ACADIA 14: Design Agency [Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, USC School of Architecture, Los Angeles, California, 23-25 October, pp. 267.
- Ahlquist, S., Erb, D. & Menges, A. 2015, "Evolutionary structural and spatial adaptation of topologically differentiated tensile systems", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 29, no. 04, pp. 393-415.
- Ahlquist, S. & Menges, A. 2012, "Integration of Behaviour-Based Computational and Physical Models Design Computation and Materialisation of Morphologically Complex Tension-Active Systems" in *Computational Design Modelling: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011*, eds. C. Gengnagel, A. Kilian, N. Palz & F. Scheurer, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 71-78.
- Ahlquist, S. & Menges, A. 2013, "Frameworks for Computational Design of Textile Micro-Architectures and Material Behavior in Forming Complex Force-Active Structures", *ACADIA 13: Adaptive Architecture [Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, University of Waterloo, Cambridge, Ontario, Canada, 24-26 October, pp. 281.
- Al-Haddad, T. 2009, *Force + Feedback + Fabrication: Integrating Structural Feedback Into Design Processes for Complex Surface-Active Form*, VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG, Saarbrücken, Germany.
- Allen, E., Zalewski, W. & Michel, N. 2010, *Form and forces : designing efficient, expressive structures*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J.

- Argyris, J.H., Angelopoulos, T. & Bichat, B. 1974, "A general method for the shape finding of lightweight tension structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 135-149.
- Ashby, M.F. 2011, "Appendix C - Material Indices" in *Materials Selection in Mechanical Design (Fourth Edition)*, ed. M.F. Ashby, 1st edn, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 559-564.
- Ashby, M.F., Shercliff, H.R. & Cebon, D. 2010, *Materials : engineering, science, processing and design*, 2nd edn, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Augugliaro, F., Zarfati, E., Mirjan, A. & D'Andrea, R. 2015, "Knot-tying with flying machines for aerial construction", *IROS 2015 - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, , eds. Z. Jianwei & K. Alois, , IEEE, Hamburg, Germany, 28 September - 02 October, pp. 5917.
- Bach, K., Otto, F. & Gass, S. 1988, *Form-Kraft-Masse = Form-force-mass*. 1st edn, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart.
- Bader, J. & Zitzler, E. 2010, "A Hypervolume-Based Optimizer for High-Dimensional Objective Spaces" in *New Developments in Multiple Objective and Goal Programming*, eds. D. Jones, M. Tamiz & J. Ries, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 35-54.
- Banzi, M. 2011, *Getting started with Arduino*, 2nd edn, O'Reilly, Farnham.
- Barnes, M.,R. 1977, *Form finding and analysis of tension space structures by dynamic relaxation*, .
- Barnes, M.,R. 1999a, "Form Finding and Analysis of Tension Structures by Dynamic Relaxation", *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, pp. 89-104.
- Barnes, M.R. 1988, *Form-finding and analysis of prestressed nets and membranes*.
- Barnes, M.R. 1999b, "Form Finding and Analysis of Tension Structures by Dynamic Relaxation", *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, pp. 89-104.
- Battison, E.A. 1973, "A New Look at the "Whitney" Milling Machine", *Technology and Culture*, vol. 14, no. 4, pp. 592-598.
- Beccarelli, P. 2015, "The Design, Analysis and Construction of Tensile Fabric Structures" in *Biaxial Testing for Fabrics and Foils : Optimizing Devices and Procedures*, ed. P. Beccarelli, 1st edn, Springer International Publishing, Nottingham, pp. 9-33.

- Bechthold, M. 2008, *Innovative surface structures : technology and applications*, 1st edn, Taylor & Francis, Abingdon, England.
- Bendsoe, M.P. 1995, "Introduction" in *Optimization of structural topology, shape, and material*, ed. M.P. Bendsoe, 1st edn, Springer, Heidelberg, pp. 1-4.
- Biggs, G. & MacDonald, B. 2003, "A survey of robot programming systems", *Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation*, , eds. R. Jonathan & W. Gordon, , Brisbane, Qld.: Australian Robotics and Automation Association, Brisbane, Australia, 1-3 December 2003, pp. 1.
- Bletzinger, K.U. & Ramm, E. 2001, "Structural optimization and form finding of light weight structures", *Computers & Structures*, vol. 79, no. 22, pp. 2053-2062.
- Bletzinger, K.U., Wüchner, R., Daoud, F. & Camprubí, N. 2005, "Computational methods for form finding and optimization of shells and membranes", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 30, pp. 3438-3452.
- Block, P., Knippers, J., Mitra, N.J. & Wang, W. 2014, *Advances in Architectural Geometry 2014*, Springer International Publishing.
- Bonwetsch, T. 2012, "Robotic Assembly Processes as a Driver in Architectural Design", *Nexus Network Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 483-494.
- Braumann, J. & Brell-Cokcan, S. 2011, "Parametric Robot Control: Integrated CAD/CAM for Architectural Design", *ACADIA 11: Integration through Computation [Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, Banff (Alberta), 13-16 October, pp. 242.
- Braumann, J. & Brell-Cokcan, S. 2012a, "Digital and Physical Tools for Industrial Robots in Architecture: Robotic Interaction and Interfaces", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 10, no. 4, pp. 541-554.
- Braumann, J. & Brell-Cokcan, S. 2012b, "Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design", *Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, , eds. H. Achten, J. Pavlicek, J. Hulin & D. Matejdan, , Czech Technical University in Prague, 12-14 September, 2012, pp. 479.
- Bridgens, B. & Birchall, M. 2012, *Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures*.
- Bruccoleri, M., D'Onofrio, C. & Commare, U.L. 2007, "Off-line Programming and simulation for automatic robot control software generation", *2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 23-27 June, pp. 491.

- Budig, M., Lauer, W.V., Petrovic, R. & Lim, J. 2014, "Design of Robotic Fabricated High Rises" in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, eds. W. McGee & M. Ponce de Leon, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 111-129.
- Caneparo, L. 2014, *Digital fabrication in architecture, engineering and construction*, 1st edn, Springer, London.
- Chaturvedi, S., Colmenares, E. & Mundim, T. 2011, "Knitectonics", *ACADIA 11: Integration through Computation [Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, The University of Calgary, Calgary/Banff, Canada, 13th -16th October, pp. 186.
- Day, A.S. 1966, "Analysis of plates by dynamic relaxation with special reference to boundary conditions", *Symp. on the Use of Electronic Digital Computers in Struct. Eng.* University of Newcastle, July, .
- De Kestelier, X. 2017, "Design potential for large-scale additive fabrication; free-form construction" in *Fabricate 2011*, eds. R. Glynn & B. Sheil, 1st edn, UCL Press, London, pp. 243-249.
- Deb, K. 2002, *Multiobjective optimization using evolutionary algorithms*, 1st edn, Wiley, Chichester U.A.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. & Meyarivan, T. 2000, "A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II" in *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI: 6th International Conference Paris, France, September 18-20, 2000 Proceedings*, eds. M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, et al, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 849-858.
- DeLanda, M. 2004, "Material complexity", *Digital Tectonics*, , pp. 14-21.
- Descamps, B. 2014, *Computational design of lightweight structures : form finding and optimization*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken,USA.
- Doerstelmann, M., Knippers, J., Menges, A., Parascho, S., Prado, M. & Schwinn, T. 2015, "ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14: Modular Coreless Filament Winding Based on Beetle Elytra", *Architectural Design*, vol. 85, no. 5, pp. 54-59.
- Dunn, N. 2012, *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence king publishing Ltd, London, UK.
- Dunnington, G., W., Dohse, F.-. & Gray, J. 2004, *Carl Friedrich Gauss : titan of science*, Mathematical Ass. of America, Washington, DC.

- Duro-Royo, J., Mogas-Soldevila, L. & Oxman, N. 2015, "Flow-based fabrication: An integrated computational workflow for design and digital additive manufacturing of multifunctional heterogeneously structured objects", *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 143-154.
- Eberhart, R. & Kennedy, J. 1995, "A new optimizer using particle swarm theory", *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, Nagoya, Japan, 4th -6th October, pp. 39.
- Gale, S. & Lewis, W.J. 2016, *Patterning of tensile fabric structures with a discrete element model using dynamic relaxation*.
- Glynn, R. & Sheil, B. 2017, *Fabricate 2011; Making Digital Architecture*, 1st edn, UCL Press, London.
- Goldberg, D.E. 1989, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, 1st edn, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Goldsmith, N.S. 2014, "Shape Finding or Form Finding?", *IASS-SLTE 2014: Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Brasilia, Brazil, 15th -19th September 2014, .
- Gramazio, F. & Kohler, M. 2008, *Digital Materiality in Architecture*, 1st edn, Lars Müller Publishers, Baden.
- Groover, M.P. 2010, *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 4th edn, J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Harding, J., Hills, S., BRANDT-OLSEN, C. & Melville, S. 2017, "The UWE Research Pavilion 2016", *IASS Symposium 2017 - Interfaces - Architecture. Engineering. Science*, IASS, Hamburg, Germany, 25 - 29 September 2017, .
- Hassan, M.M. 2013, "Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique", *Engineering Structures*, vol. 49, no. 1, pp. 643-654.
- Hooke, R. 1678, *Lectures de Potentia Restitutiva, Or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies*, 1st edn, John Martyn, Austria.
- Howe, A.S. 2000, "Designing for automated construction", *Automation in Construction*, vol. 9, no. 4, pp. 259-276.
- Ishii, K. 1999, "Form Finding Analysis in Consideration of Cutting Patterns of Membrane Structures", *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, pp. 105-119.

- Iwamoto, L. 2009, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, 1st edn, Princeton Architectural Press, New York.
- Jae-Yeol, K. & Jang-Bog, L. 2002, "A new technique for optimum cutting pattern generation of membrane structures", *Engineering Structures*, vol. 24, no. 6, pp. 745-756.
- Jones, D.R., Perttunen, C.D. & Stuckman, B.E. 1993, "Lipschitzian optimization without the Lipschitz constant", *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 79, no. 1, pp. 157-181.
- Kayser, M., Cai, L., Bader, C., Falcone, S., Inglessis, N., Darweesh, B., Costa, J. & Oxman, N. 2019, "FIBERBOTS: Design and Digital Fabrication of Tubular Structures Using Robot Swarms", *Robotic Fabrication in Architecture*, eds. J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne & T. Schork, Springer International Publishing, Cham, Art and Design 2018, pp. 285.
- Kefalas, A., G. 2003, "Cybernetics" in *Encyclopedia of Information Systems*, ed. Editor-in-Chief: Hossein Bidgoli, Elsevier, New York, pp. 365-378.
- Kilian, A. & Ochsendorf, J. 2005, "Particle-Spring Systems for Structural Form Finding", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS)*, vol. 46, no. 148, pp. 77-84.
- Kolarevic, B. 2001, "Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age", *Reinventing the Discourse - How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture [ACADIA 21]*, 11th-14th October, pp. 268.
- Kolarevic, B. 2003, *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, 1st edn, Spon Press, New York.
- Kontovourkis, O., Phocas, M.C. & Tryfonos, G. 2013, "Prototyping of an Adaptive Structure based on Physical Conditions", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 205-226.
- Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. 2014, "Physical input-driven offline robotic simulation through a feedback loop process", *Fusion, Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, ed. E. Thompson M., Northumbria University, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp. 411.
- Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. 2015a, "An additive robotic fabrication methodology for tensile mesh structures development", *IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions*, ed. P. Huybers, KIVI, Amsterdam, 17-20 August, .

- Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. 2015b, "Robotic Fabrication of Tensile Mesh Structures and Real Time Response - The Development and Simulation of a Custom-Made End Effector Tool", *Real Time - Proceedings of the 33rd eCAADe Conference*, , eds. B. Martens, G. Wurzer, T. Grasl, W. Lorenz E. & R. Schaffranek, , Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 16-18 September 2015, pp. 389.
- Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. 2016, "Design optimization and robotic fabrication of tensile mesh structures: The development and simulation of a custom-made end-effector tool", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 14, no. 4, pp. 333-348.
- Kontovourkis, O. & Tryfonos, G. 2018, "An integrated robotically-driven workflow for the development of elastic tensile structures in various scales", *SUSTAINABLE COMPUTATIONAL WORKFLOWS: Computational Design and Fabrication towards Sustainable Products and Processes - 6th eCAADe Regional International Symposium 2018*, , ed. O. Kontovourkis, , eCAADe, Nicosia, Cyprus, 24th-25th May 2018, pp. 111.
- Lee, J. 1987, "Computer-aided robot modeling, programming and simulation", *Robotics*, vol. 3, no. 3, pp. 399-408.
- Lewis, W.J. 2003, *Tension structures : form and behaviour*, Thomas Telford, London.
- Lewis, W.J. 2005, "Understanding novel structures through form-finding", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, vol. 158, no. 4, pp. 178-185.
- Lewis, W.J. & Gosling, P.D. 1993, "Stable Minimal Surfaces in Form-Finding of Lightweight Tension Structures", *International Journal of Space Structures*, vol. 8, no. 3, pp. 149-166.
- Lhote, F., Chazelet, P. & Dulmet, M. 1999, "The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing", *Annual Reviews in Control*, vol. 23, pp. 139-148.
- Linhard, J., Wuchner, R. & Bletzinger, K.U. 2008, "Introducing Cutting Patterns in Form Finding and Structural Analysis" in *Textile Composites and Inflatable Structures II*, eds. E. Onate & B. Kroplin, 1st edn, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 69-84.
- Linkwitz, K. 1999, "About formfinding of double-curved structures", *Engineering Structures*, vol. 21, no. 8, pp. 709-718.
- Malé-Aleman, M., Van Ameijde, J. & Viña, V. 2017, "(Fab)Bots; Customised Robotic Devices For Design & Fabrication" in *Fabricate 2011*, eds. R. Glynn & B. Sheil, 1st edn, UCL Press, London, pp. 39-46.

- Menges, A. 2011, "Integrative design computation: Integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions", *ACADIA 11: Integration through Computation [Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture]*, The University of Calgary, Banff (Alberta), Canada, 13-16 October, pp. 72.
- Menges, A. 2013, "Morphospaces of Robotic Fabrication" in *Rob / Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, eds. S. Brell-Çokcan & J. Braumann, Springer-Verlag Wien, Vienna, Austria, pp. 28-47.
- Mirjan, A., Augugliaro, F., D'Andrea, R., Gramazio, F. & Kohler, M. 2016, "Building a Bridge with Flying Robots" in *Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design 2016*, eds. D. Reinhardt, R. Saunders & J. Burry, 1st edn, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 34-47.
- Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M., Augugliaro, F. & D'Andrea, R. 2013, "Architectural fabrication of tensile structures with flying machines" in *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, eds. H. Bartolo, P. Bartolo, N. Alves, et al, 1st edn, CRC Press, London, pp. 513-518.
- Mirtschin, J. 2018, , *GeometryGym: OpenBIM tools for Architecture, Engineers and the Construction Industry*. Available: <https://geometrygym.wordpress.com> [2018, 09/01].
- Mogas-Soldevila, L., Duro-Royo, J. & Oxman, N. 2015, "Form Follows Flow: A Material - driven Computational Workflow For Digital Fabrication of Large - Scale Hierarchically Structured Objects", *ACADIA 2015, Computational ecologies: Design in the Anthropocene*, , eds. L. Combs & C. Perry, , University of Cincinnati School of Architecture and Interior Design, Cincinnati, Ohio, US, October 19-25, pp. 185.
- Moncrieff, E. 2005, "Systems for Lightweight Structure Design: the State-of-the-Art and Current Developments" in *Textile Composites and Inflatable Structures*, eds. E. Onate & B Kroplin, 1st edn, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 17-28.
- Naicu, D. & Williams, C. 2015, "The use of dynamic relaxation to solve the differential equation describing the shape of the tallest possible building", *VII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, , eds. E. Oñate, K.U. Bletzinger & B. Kröplin, , International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, Spain, 2015-10-19 - 2015-10-21, pp. 34.
- Noble, D.F. 2011, *Forces of production : a social history of industrial automation / David F. Noble*, 1st edn, Transaction Publishers, New York.
- Otto, F. 1984, *Schriften und Reden*, 1st edn, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.

- Otto, F. 1988, *Seifenblase, Foraming bubbles*, 1st edn, IL, Stuttgart.
- Otto, F., Rasch, B. & Schanz, S. 2006, *Frei Otto, Bodo Rasch: finding form : towards an architecture of the minimal*, 3rd edn, Axel Menges, Fellbach, Germany.
- Otto, F., Trostel, R. & Schleyer, F.,K. 1967, *Tensile structures : design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and membranes*, 2nd edn, Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
- Oxman, N., Laucks, J., Kayser, M., Duro-Royo, J. & Uribe, C.G. 2017, "Silk pavilion: a case study in fibre-based digital fabrication" in *Fabricate 2014*, eds. F. Gramazio, M. Kohler & S. Langenberg, 1st edn, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, pp. 248-255.
- Oxman, N. & Rosenberg, J.,L. 2007, "Material-based Design Computation: An Inquiry into Digital Simulation of Physical Material Properties as Design Generators", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 26-44.
- Oxman, R. & Oxman, R. 2010, "New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies", *Architectural Design*, vol. 80, no. 4, pp. 14-23.
- Paech, C. 2016, "Structural Membranes Used in Modern Building Facades", *Procedia Engineering*, vol. 155, pp. 61-70.
- Phocas, M.C. 2013, "Lightweight Tensile Structures towards an Architectural-Engineering Integration", *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 3, no. 4.
- Piker, D. 2013, "Kangaroo: Form Finding with Computational Physics", *Architectural Design*, vol. 83, no. 2, pp. 136-137.
- Pohl, G. & Nachtigall, W. 2015, "Buildings, Architecture, and Biomimetics" in *Biomimetics for Architecture & Design: Nature - Analogies - Technology*, eds. P. Goran & N. Werner, 1st edn, Springer International Publishing, Cham, pp. 9-24.
- Powell, M.J.D. 1998, "Direct search algorithms for optimization calculations", *Acta Numerica*, vol. 7, pp. 287-336.
- Prado, M., Dörstelmann, M., Solly, J. & Knippers, J. 2017, "Elytra filament pavilion:: robotic filament winding for structural composite building systems" in *Fabricate 2017*, eds. A. Menges, B. Sheil, R. Glynn & M. Skavara, UCL Press, , pp. 224-231.

- Prado, M., Dörstelmann, M., Schwinn, T., Menges, A. & Knippers, J. 2014, "Core-Less Filament Winding" in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, eds. W. McGee & M. Ponce de Leon, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 275-289.
- Pyl, L., Wang, X., De D., E., C., J., M., M. & De Laet, L. 2016, "Existing Eurocodes Applied to a Membrane Structure", *Procedia Engineering*, vol. 155, pp. 142-151.
- Reichert, S., Schwinn, T., La M., R., Waimer, F., Knippers, J. & Menges, A. 2014, "Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles", *Computer-Aided Design*, vol. 52, pp. 27-39.
- Reinhardt, D., Candido, C., Cabrera, D., Hannouch, A., Houda, M., Watt, R. & Wozniak, C.D. 2018, "ONSITE ROBOTIC FABRICATION FOR FLEXIBLE WORKSPACES Towards Design and Robotic Fabrication of an Integrated Responsive Ceiling- System for A Workspace Environment", *Learning, Adapting and Prototyping - Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference*, Tsinghua University, Beijing, China, 17-19 May 2018, pp. 59-68.
- Reinhardt, D., Saunders, R. & Burry, J. 2016, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Robert McNeel 2018, , *Rhinoceros* [Homepage of Robert McNeel & Associates], [Online]. Available: <http://www.rhino3d.com/> [2018, 23 September].
- Rowan, T.H. 1990, *Functional Stability Analysis of Numerical Algorithms. Ph.D. Dissertation*, The University of Texas.
- Rutten, D. 2018, , *Grasshopper*. Available: <http://www.grasshopper3d.com/> [2018, 12 December].
- Sadler, S. 2005, *Archigram : architecture without architecture*, 1st edn, MIT Press, Cambridge, Mass., London.
- Schek, H.J. 1974, "The force density method for form finding and computation of general networks", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 115-134.
- Schieber, G., Koslowski, V., Knippers, J., Dörstelmann, M., Prado, M., Vasey, L. & Menges, A. 2015, "Integrated Design and Fabrication Strategies for Fibrous Structures" in *Modelling Behaviour: Design Modelling Symposium 2015*, eds. R.M. Thomsen, M. Tamke, C. Gengnagel, B. Faircloth & F. Scheurer, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 237-245.

- Schwartz, T. 2013, "HAL" in *Rob / Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, eds. S. Brell-Çokcan & J. Braumann, Springer-Verlag Wien, Vienna, Austria, pp. 92-101.
- Schwinn, T., Davis Krieg, O. & Menges, A. 2012, "Robotically Fabricated Wood Plate Morphologies: Robotic prefabrication of a biomimetic, geometrical differentiated, lightweight, finger joint timber plate structure" in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, eds. S. Brell-Çokcan & J. Braumann, Springer Wien New York, Austria, pp. 48-61.
- Seidel, M. 2009, "Construction of Tensile Surface Structures" in *Tensile Surface Structures. A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*, ed. M. Seidel, 1st edn, Ernst & Sohn A Wiley Company, Berlin, pp. 85-196.
- Seyedahmadian, A., Torghabehi, O.,O. & Mcgee, W. 2015, "Developing a computational approach towards a performance based design and robotic fabrication of fibrous skin structures", *IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions*, , ed. P. Huybers, , KIVI, Amsterdam, 17-20 August, .
- Shea, K., Aish, R. & Gourtovaia, M. 2005, "Towards integrated performance-driven generative design tools", *Automation in Construction*, vol. 14, no. 2, pp. 253-264.
- Sivanandam, S.N. & Deepa, S.N. 2007, *Introduction to genetic algorithms*, 1st edn, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Stavrić, M., Sidānin, P. & Tepavčević', B. 2013, *Architectural scale models in the digital age : design, representation and manufacturing*, 1st edn, Wien : Springer, Vienna.
- Steinmann, W. & Saelhoff, A. 2016, "Essential Properties of Fibres for Composite Applications" in *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*, eds. S. Rana & R. Figueiro, 1st edn, Springer Singapore, Singapore, pp. 39-73.
- Stranghöner, N. & Uhlemann, J. 2016, *Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Symeonidou, I. 2015, "Analogue and digital form-finding of bending rod structures", *IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions*, IASS, Amsterdam, 20 August 2015, .
- Symeonidou, I. 2016, "Flexible matter: A real-time shape exploration employing analogue and digital form-finding of tensile structures", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 14, no. 4, pp. 322-332.

- Szulczyński, P. & Kozłowski, K. 2015, "Parametric programming of industrial robots", *Archives of Control Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 215-225.
- Tamre, K., Colletti, M., Grasser, G. & Weiler, A. 2017, "(FR)Agile Materiality:; Approximating Uncertain Fabrication Processes" in *Fabricate 2014*, eds. F. Gramazio, M. Kohler & S. Langenberg, 1st edn, UCL Press, London, pp. 174-181.
- Tryfonos, G. 2018, "Automated robotic toolpath generation of elastic mesh structure", *ArchiDOCT, Intelligence*, vol. 6, no. 1, pp. 65-77.
- Van Craenenbroeck, M. 2015, "Creating temporary doubly curved tensile membrane structures without cutting patterns using high strain fabrics", , eds. E. Oñate, K.-. Bletzinger & B. Kröplin, , CIMNE, Barcelona, 19-21 October, pp. 457.
- Van Laarhoven, P.J.M. & Aarts, E.H.L. 1987, "Simulated annealing" in *Simulated Annealing: Theory and Applications*, eds. P.J.M. van Laarhoven & E.H.L. Aarts, 1st edn, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 7-15.
- Vasey, L., Baharlou, E., Dörstelmann, M., Kosłowski, V., Prado, M., Schieber, G., Menges, A. & Knippers, J. 2015, "Behavioral design and adaptive robotic fabrication of a fiber composite compression shell with pneumatic formwork.", *ACADIA 2015, Computational ecologies: Design in the Anthropocene*, , eds. L. Combs & C. Perry, , University of Cincinnati School of Architecture and Interior Design, Cincinnati, Ohio, US, October 19-25, pp. 296.
- Veenendaal, D. & Block, P. 2012, "An overview and comparison of structural form finding methods for general networks", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 26, pp. 3741-3753.
- Vermisso, E. 2012, "The fabrication of fabrication: a second order design process", *International Journal of Architectural Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 401-422.
- Vierlinger, R. & Bollinger, K. 2014, "Accommodating Change in Parametric Design", *ACADIA 14: Design Agency [Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)]*, , eds. D. Gerber, A. Huang & J. Sanchez, , ACADIA, Riverside Architectural Press, Los Angeles, California, US, 23-25 October 2014, pp. 609.
- Wanner, K. 2016, 14 December-last update, *FingerTech Robotics*. Available: <http://www.fingertechrobotics.com> [2016, December/14].

- Werkbund, B. & Villa, S.M. 2001, *Frei Otto, Bodo Rasch : finding form : towards an architecture of the minimal : the Werkbund shows Frei Otto, Frei Otto shows Bodo Rasch : exhibition in the Villa Stuck, Munich, on the occasion of the award of the 1992 Deutscher Werkbund Bayern prize to Frei Otto and Bodo Rasch*, 3rd edn, Axel Menges, Stuttgart.
- Wessel, J.K. 2004, *The Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*, 1st edn, John Wiley & Sons , Inc., New Jersey.
- Wiener, N. 1965, *Cybernetics, Second Edition: or the Control and Communication in the Animal and the Machine*, Second edition edn, The MIT Press, USA.
- Williamson, F. 1980, "Richard courant and the finite element method: A further look", *Historia Mathematica*, vol. 7, no. 4, pp. 369-378.
- Willmann, J., Gramazio, F., Kohler, M. & Langenberg, S. 2012, "Digital by Material: Envisioning an Extended Performative Materiality in the Digital Age of Architecture" in *Rob / Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, eds. S. Brell-Çokcan & J. Braumann, Springer-Verlag Wien, Vienna, Austria, pp. 12-25.
- Wolfgang, S. 2015, *Building Support Structures, Analysis and Design with SAP2000 Software*, 2nd edn, Computer and Structures Inc., California.
- Yablonina, M., Prado, M., Baharlou, E. & Schwinn, T. 2017, "Mobile robotic fabrication system for filament structures" in *Fabricate 2017*, eds. A. Menges, B. Sheil, R. Glynn & M. Skavara, UCL Press, London, pp. 202-209.
- Yang, X.S. 2010, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*, 2nd edn, Luniver press, United Kingdom.
- Yunliang, D. 1986, "Shape optimization of structures: a literature survey", *Computers & Structures*, vol. 24, no. 6, pp. 985-1004.
- Zarfam, R., Talavera, C., DenBlanken, G., Rivera, R., Van Dessel, T. & Ozturk, C. 2014, *Membrane Structures: First Steps Towards Form Finding*, 1st edn, Membranas Estructurales.
- Zhang, J., Chaisombat, K., He, S. & Wang, C.H. 2012, "Glass/Carbon Fibre Hybrid Composite Laminates for Structural Applications in Automotive Vehicles", *Sustainable Automotive Technologies 2012*, , eds. A. Subic, J. Wellnitz, M. Leary & L. Koopmans, , Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 69.

- Zolkiewski, S. & Pioskowik, D. 2014, "Robot Control and Online Programming by Human Gestures Using a Kinect Motion Sensor", *New Perspectives in Information Systems and Technologies, Volume 1*, , eds. A. Rocha, A. Correia, F.B. Tan & K.A. Stroetmann, , Springer International Publishing, Cham, pp. 593.

10.0 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

10.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ Ι

A	1		2		3		4		5		6		7		8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΘΗΣ ΠΑΛΕΥΜΑΤΟΣ																
(-)Ka	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Ι.1. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας Α.

B	1		2		3		4		5		6		7		8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1	0	0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΘΗΣ ΠΑΛΕΥΜΑΤΟΣ																
(-)Ka	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Ι.2. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας Β.

C	1		2		3		4		5		6		7		8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
1	0	0	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΘΗΣ ΠΑΛΕΥΜΑΤΟΣ																
(-)Ka	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13

Πίνακας Ι.3. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας C.

D	1		2		3		4		5		6		7		8									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
0.5	0	0	0	0.1	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7								
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΨΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ																								
(-)Ka	0	0	0	0.04	0	0.04	0.18	0	0.18	0.41	0	0.41	0.73	0	0.73	1.08	0	1.08	1.44	0	1.44	1.77	0	1.77
	0	0	0	0.04	0	0.04	0.16	0	0.16	0.33	0	0.33	0.50	0	0.50	0.63	0	0.63	0.72	0	0.72	0.75	0	0.75
	0	0	0	0.04	0	0.04	0.14	0	0.14	0.24	0	0.24	0.31	0	0.31	0.33	0	0.33	0.32	0	0.32	0.30	0	0.30

Πίνακας I.4. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας D.

E	1		2		3		4		5		6		7		8									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
0.5	0	0	0	0.1	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7								
1	0	0	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8								
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΨΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ																								
(-)Ka	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.15	0.08	0.04	0.33	0.14	0.04	0.57	0.21	0.04	0.84	0.29	0.04	1.14	0.37	0.04	1.46	0.44	0.05
	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.15	0.08	0.04	0.30	0.13	0.03	0.47	0.17	0.03	0.63	0.21	0.03	0.74	0.23	0.03	0.81	0.24	0.03
	0	0	0	0.04	0.04	0.04	0.14	0.07	0.03	0.26	0.11	0.03	0.36	0.13	0.02	0.43	0.15	0.02	0.45	0.15	0.02	0.44	0.14	0.02

Πίνακας I.5. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας E.

F	1		2		3		4		5		6		7		8									
0	0	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8	0								
0.5	0	0	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8								
1	0	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8	0								
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΨΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ																								
(-)Ka	0	0	0	0.61	0	0.61	1.26	0	1.26	1.91	0	1.91	2.41	0	2.41	2.71	0	2.71	2.82	0	2.82	2.79	0	2.79
	0	0	0	0.67	0	0.67	1.57	0	1.57	2.90	0	2.90	4.68	0	4.68	6.90	0	6.90	9.57	0	9.57	12.68	0	12.68
	0	0	0	0.61	0	0.61	1.26	0	1.26	1.91	0	1.91	2.41	0	2.41	2.71	0	2.71	2.82	0	2.82	2.79	0	2.79

Πίνακας I.6. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας F.

G	1			2			3			4			5			6			7			8		
0	0	0	0	0	0.2	0	0	0.3	0	0	0.4	0	0	0.5	0	0	0.6	0	0	0.7	0	0	0.8	0
0.5	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1	0	0	0	0.2	0	0	0.3	0	0	0.4	0	0	0.5	0	0	0.6	0	0	0.7	0	0	0.8	0	0
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΦΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ																								
Ka	0	0	0	0.15	0.16	0.15	0.33	0.34	0.33	0.56	0.60	0.55	0.81	0.91	0.78	1.06	1.25	1.00	1.29	1.60	1.19	1.46	1.92	1.32
	0	0	0	0.16	0.16	0.16	0.34	0.36	0.34	0.60	0.65	0.60	0.90	1.04	0.90	1.24	1.55	1.24	1.61	2.22	1.61	2.01	3.02	2.01
	0	0	0	0.15	0.16	0.15	0.33	0.34	0.33	0.54	0.60	0.56	0.78	0.91	0.81	1.00	1.25	1.06	1.19	1.60	1.29	1.32	1.92	1.46

Πίνακας I.7. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας G.

H	1			2			3			4			5			6			7			8		
0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0	0	0.8	0
0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	0.7	0.1	0.1	0.8	0.1
1	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8	0.8	0	0.8
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΦΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ																								
(-)Ka	1.46	1.92	1.32	1.72	1.64	0.93	2.10	1.52	0.65	2.62	1.48	0.45	3.24	1.39	0.30	4.26	1.29	0.18	5.96	1.14	0.08	7.92	1.18	0.07
	2.01	3.02	2.01	2.73	2.84	1.44	2.73	2.67	0.97	4.86	2.45	0.64	6.27	2.11	0.39	7.01	1.64	0.20	6.26	1.15	0.08	6.38	1.18	0.07
	1.32	1.92	1.46	1.83	2.16	1.33	2.31	2.21	1.02	2.69	2.05	0.69	2.76	1.71	0.42	2.40	1.25	0.21	1.88	0.85	0.08	1.56	0.82	0.07

Πίνακας I.8. Αποτέλεσμα μεταβολής Gaussian καμπυλότητας (Ka) στην κατηγορία τυπολογίας H.

10.2_ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ II

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.7	87.7	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.058	0.1156	0.2191	0.3898
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	7.8971	7.3892	6.7312	5.8971
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2767	0.5695	1.0851	1.806
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.9597	-0.2208	-0.0537	-0.0138
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.9597	0.2208	0.0537	0.0138

Πίνακας I.9. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για τις περιπτώσεις A,B,C,D,E,F,G.1*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	89.5	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0489	0.0918	0.2139	0.3839
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.1045	7.6645	6.8424	5.9942
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2049	0.4185	1.0396	1.7703
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.9858	0.083	0.3676	0.395
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.9858	-0.083	-0.3676	-0.395

Πίνακας I.10. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	90.1	82.9	77.2	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0762	0.1586	0.2417	0.3682
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0585	7.4141	6.905	6.2611
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.285	0.7168	1.1248	1.6748
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	0.8685	1.3982	1.4333	1.4647
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-0.8685	-1.3982	-1.4333	-1.4647

Πίνακας I.11. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	86.8	80.8	76.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1015	0.1732	0.2305	0.3497
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.2557	7.6803	7.3072	6.6517
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3772	0.735	1.018	1.5554
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	2.4254	2.6169	2.7217	2.8047
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-2.4254	-2.6169	-2.7217	-2.8047

Πίνακας I.12. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.4*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	84.7	80.8	76.3	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1181	0.1638	0.2269	0.3348
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.6292	8.2246	7.7721	7.1239
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.4334	0.6519	0.9627	1.4588
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	3.5299	3.6519	3.8507	4.0366
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-3.5299	-3.6519	-3.8507	-4.0366

Πίνακας I.13. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	83.5	79.9	75.7	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1269	0.1697	0.2302	0.326
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	9.1499	8.7388	8.2691	7.6441
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.4632	0.667	0.9694	1.4151
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	4.3552	4.5689	4.8319	5.0693
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-4.3552	-4.5689	-4.8319	-5.0693

Πίνακας I.14. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	82.9	78.7	73.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.132	0.1824	0.2523	0.3189
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	9.764	9.2406	8.676	8.2117
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.4936	0.736	1.082	1.394
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	5.1692	5.4518	5.7516	5.9318
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-5.1691	-5.4517	-5.7515	-5.9317

Πίνακας I.15. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	82.3	78.7	74.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.135	0.1801	0.2358	0.3146
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	10.3855	9.9131	9.4147	8.8106
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.5055	0.7407	1.0237	1.4084
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	6.0924	6.2674	6.5192	6.7295
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-6.0924	-6.2674	-6.5192	-6.7295

Πίνακας I.16. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση A.8*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.4	88.3	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0588	0.107	0.2088	0.3884
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0065	7.5655	6.8974	5.9979
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2887	0.5324	1.0495	1.8252
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.8131	-0.1274	0.05	0.0874
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.8131	0.1274	-0.05	-0.0874

Πίνακας I.17. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	87.4	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0631	0.1175	0.2004	0.389
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0759	7.6058	7.0568	6.091
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3128	0.5972	1.0267	1.8593
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.638	-0.0849	0.0391	0.0793
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.638	0.0849	-0.0391	-0.0793

Πίνακας I.18. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.2	87.7	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0653	0.1115	0.2019	0.386
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.2686	7.8648	7.2454	6.2772
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3268	0.5733	1.0513	1.8861
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.3019	0.1084	0.2695	0.3029
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.3019	-0.1084	-0.2695	-0.3029

Πίνακας I.19. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.9	87.4	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0656	0.112	0.1945	0.3823
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.5569	8.1361	7.5497	6.5167
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3325	0.5832	1.0336	1.9181
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.0496	0.3997	0.5399	0.5828
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	0.0496	-0.3997	-0.5399	-0.5828

Πίνακας I.20. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.5*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.6	87.1	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0661	0.1126	0.1913	0.3788
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.8937	8.4568	7.8737	6.7965
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3402	0.5951	1.0384	1.9551
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.2024	0.6566	0.8115	0.8697
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-0.2024	-0.6566	-0.8115	-0.8697

Πίνακας I.21. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.3	85.9	78.7	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0669	0.1245	0.2242	0.3759
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	9.2673	8.7195	7.9881	7.1056
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3515	0.6764	1.2457	2.0031
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.4224	0.9318	1.0816	1.1187
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-0.4224	-0.9318	-1.0816	-1.1187

Πίνακας I.22. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.0	84.4	77.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0681	0.1413	0.2358	0.3735
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	9.6662	8.9662	8.2654	7.4367
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3671	0.7931	1.3485	2.0625
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.6225	1.1749	1.2715	1.3207
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0000]$	-0.6225	-1.1749	-1.2715	-1.3207

Πίνακας I.23. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση B.8*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	88.3	79.6	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0521	0.1086	0.2235	0.3895
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0206	7.4825	6.7453	5.9322
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2516	0.5369	1.112	1.8152
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-1.1107	-0.1703	0.0297	0.067
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.078]$	1.1887	0.2483	0.0483	0.011

Πίνακας I.24. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.2*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.7	88.3	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0572	0.1076	0.2183	0.3889
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0016	7.5318	6.8145	5.9702
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2803	0.5344	1.0938	1.8228
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.7143	-0.0046	0.1629	0.1997
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.1766$]	0.8909	0.1812	0.0137	-0.0231

Πίνακας I.25. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.7	89.2	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0559	0.0973	0.2039	0.3875
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0717	7.6764	6.9575	6.0284
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2758	0.4879	1.0324	1.8314
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.5019	0.1178	0.366	0.411
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.3096$]	0.8115	0.1918	-0.0564	-0.1014

Πίνακας I.26. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.1	88.6	81.4	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0596	0.1027	0.1941	0.3858
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.1162	7.7144	7.0935	6.1027
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2974	0.5211	0.9932	1.8412
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.1516	0.4093	0.6037	0.6593
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = 0.4587$]	0.6103	0.0494	-0.145	-0.2006

Πίνακας I.27. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	88.3	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0607	0.1053	0.1972	0.3845
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.2022	7.7906	7.1645	6.1865
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3053	0.5418	1.0189	1.857
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	0.1619	0.6601	0.8642	0.9169
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.6105$]	0.4486	-0.0496	-0.2537	-0.3064

Πίνακας I.28. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.6*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	88.6	82.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0597	0.101	0.1711	0.3831
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3267	7.9354	7.4317	6.2808
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3044	0.5247	0.8982	1.8747
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.3798	0.8653	1.0654	1.1516
$K = (-K\alpha) - (-(K\tau)) [K\alpha = - 0.7558]$	0.376	-0.1095	-0.3096	-0.3958

Πίνακας I.29. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.4	88.0	81.7	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0542	0.1061	0.1863	0.3817
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.5257	8.0222	7.4504	6.3832
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2818	0.5565	0.9881	1.8948
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.4644	1.1135	1.2831	1.3597
$K = (-K\alpha) - (-(K\tau)) [K\alpha = - 0.8891]$	0.4247	-0.2244	-0.394	-0.4706

Πίνακας I.30. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση C.8*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	89.2	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0506	0.0981	0.2175	0.3878
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0223	7.5584	6.7717	5.9328
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.23	0.4713	1.0719	1.7966
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-1.0118	-0.1441	0.1423	0.1814
$K = (-K\alpha) - (-(K\tau)) [K\alpha = - 0.0538]$	1.0656	0.1979	-0.0885	-0.1276

Πίνακας I.31. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	88.3	79.6	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0606	0.1041	0.2174	0.3826
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.005	7.604	6.8573	6.031
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2604	0.4883	1.0628	1.7743
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.1691	0.3652	0.634	0.6668
$K = (-K\alpha) - (-(K\tau)) [K\alpha = - 0.2038]$	0.3729	-0.1614	-0.4302	-0.463

Πίνακας I.32. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.3*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	90.7	86.5	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0753	0.1195	0.1983	0.3751
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	7.9952	7.6233	7.1001	6.1769
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3198	0.5559	0.9598	1.7448
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.6171	1.0465	1.1903	1.2749
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.4099]$	-0.2072	-0.6366	-0.7804	-0.865

Πίνακας I.33. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	88.6	84.4	79.3	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0908	0.1397	0.2094	0.3672
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0479	7.6563	7.2006	6.3578
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3832	0.6498	1.006	1.7168
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	1.4062	1.6757	1.7642	1.8327
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.6211]$	-0.7851	-1.0546	-1.1431	-1.2116

Πίνακας I.34. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	87.4	82.6	78.7	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1	0.158	0.2128	0.3588
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.2109	7.7378	7.3732	6.5696
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.4276	0.7412	1.0235	1.6905
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	1.9647	2.1631	2.2454	2.3007
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.8029]$	-1.1618	-1.3602	-1.4425	-1.4978

Πίνακας I.35. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	86.5	82.0	77.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1081	0.1622	0.2259	0.352
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4956	7.9485	7.5146	6.8001
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.4726	0.7661	1.0966	1.679
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	2.459	2.5894	2.6372	2.6963
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.9413]$	-1.5177	-1.6481	-1.6959	-1.755

Πίνακας I.36. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.7*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	85.9	81.4	77.2	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.1136	0.1654	0.2246	0.3455
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.6886	8.2027	7.7795	7.0546
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.5202	0.7856	1.0966	1.6737
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	2.7632	2.8878	2.9658	3.0323
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 1.0352$]	-1.728	-1.8526	-1.9306	-1.9971

Πίνακας I.37. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση D.8*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	88.3	79.6	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0521	0.1086	0.2235	0.3895
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0206	7.4825	6.7453	5.9322
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2516	0.5369	1.112	1.8152
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-1.1107	-0.1703	0.0297	0.067
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.078$]	1.1887	0.2483	0.0483	0.011

Πίνακας I.38. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	88.9	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0508	0.1018	0.2053	0.3889
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.1067	7.61	6.9181	5.9938
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2418	0.5037	1.0331	1.8284
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.8763	-0.0711	0.1494	0.1972
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.1743$]	1.0506	0.2454	0.0249	-0.0229

Πίνακας I.39. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.6	89.2	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0503	0.0974	0.2041	0.3875
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.2345	7.7615	7.028	6.09
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2389	0.4815	1.039	1.8469
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.5833	0.1243	0.3619	0.4008
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 0.2967$]	0.88	0.1724	-0.0652	-0.1041

Πίνακας I.40. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.4*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.7	88.3	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0551	0.1067	0.2161	0.3859
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3217	7.8288	7.0909	6.2147
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.261	0.5418	1.1151	1.8719
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.1613	0.4174	0.5915	0.6228
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.4207]$	0.582	0.0033	-0.1708	-0.2021

Πίνακας I.41. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	88.3	81.4	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0605	0.1054	0.193	0.3844
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4409	8.0101	7.3945	6.3628
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2881	0.5442	1.0189	1.9051
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.247	0.6586	0.789	0.8239
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.5292]$	0.2822	-0.1294	-0.2598	-0.2947

Πίνακας I.42. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	87.7	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0619	0.1113	0.2001	0.3828
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.6282	8.1669	7.5405	6.5323
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3014	0.5893	1.0785	1.945
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.51	0.8481	0.96	0.9898
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.6133]$	0.1033	-0.2348	-0.3467	-0.3765

Πίνακας I.43. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.2	86.8	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0635	0.12	0.1948	0.3809
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.8455	8.3252	7.781	6.7231
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3163	0.6531	1.0821	1.9909
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.7395	1.0405	1.1019	1.1245
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.6702]$	-0.0693	-0.3703	-0.4317	-0.4543

Πίνακας I.44. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση E.8*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.7	88.9	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0548	0.0984	0.2054	0.3836
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0177	7.5922	6.8794	5.9849
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2548	0.4775	1.0189	1.7858
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	0.392	1.1455	1.3877	1.4369
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.8189]$	0.4269	-0.3266	-0.5688	-0.618

Πίνακας I.45. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	88.0	82.3	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0609	0.1051	0.1759	0.3778
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0276	7.6223	7.135	6.0759
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2793	0.5108	0.8752	1.7701
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	2.1196	2.6647	2.87	3.0029
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 1.7114]$	-0.4082	-0.9533	-1.1586	-1.2915

Πίνακας I.46. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.3	86.8	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0676	0.1154	0.1884	0.3716
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.0903	7.6501	7.1541	6.1855
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3042	0.5635	0.9419	1.7584
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.8922	4.395	4.6038	4.7693
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 2.7556]$	-1.1366	-1.6394	-1.8482	-2.0137

Πίνακας I.47. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.0	86.2	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.068	0.1198	0.1925	0.3655
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.208	7.7419	7.2457	6.3109
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3071	0.5911	0.9669	1.7495
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	5.5076	5.9861	6.261	6.5012
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 3.8421]$	-1.6655	-2.144	-2.4189	-2.6591

Πίνακας I.48. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.5*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	90.4	85.9	79.9	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0697	0.1194	0.1964	0.3598
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3912	7.896	7.3571	6.4485
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3117	0.589	0.9939	1.7465
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	7.0044	7.4326	7.7438	8.015
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 4.8817]$	-2.1227	-2.5509	-2.8621	-3.1333

Πίνακας I.49. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	89.5	85.0	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0753	0.1263	0.1838	0.3528
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.5373	8.013	7.5928	6.6085
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.339	0.6311	0.9402	1.7396
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	8.3761	8.7181	8.95	9.285
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 5.8387]$	-2.5374	-2.8794	-3.1113	-3.4463

Πίνακας I.50. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	89.50	83.90	79.30	70.10
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.075	0.135	0.196	0.344
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.719	8.133	7.688	6.798
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.345	0.686	1.012	1.725
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	9.491	9.858	10.087	10.348
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = -6.6592]$	-2.832	-3.198	-3.428	-3.689

Πίνακας I.51. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση F.8*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	94.0	88.6	80.2	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0556	0.105	0.2139	0.3886
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	7.9575	7.4915	6.7818	5.92
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2668	0.5167	1.063	1.8052
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	-0.6622	0.0546	0.2713	0.3141
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.3181]$	0.9803	0.2635	0.0468	0.004

Πίνακας I.52. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.2*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	93.1	88.3	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0604	0.106	0.2073	0.386
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	7.9407	7.5285	6.8602	5.9659
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2924	0.5223	1.0339	1.8004
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	-0.0314	0.5591	0.7402	0.7835
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 0.6961]$	0.7275	0.137	-0.0441	-0.0874

Πίνακας I.53. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.3*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.8	88.6	82.0	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0602	0.1007	0.1828	0.3819
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.025	7.6517	7.0846	6.0497
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.292	0.4973	0.9152	1.7912
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	0.6706	1.1921	1.4145	1.484
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 1.2012]$	0.5306	0.0091	-0.2133	-0.2828

Πίνακας I.54. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	87.4	80.8	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0603	0.1116	0.1967	0.3775
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.1344	7.6801	7.1001	6.1562
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2911	0.5555	0.9877	1.7835
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	1.4876	2.0456	2.2365	2.3098
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 1.7928]$	0.3052	-0.2528	-0.4437	-0.517

Πίνακας I.55. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	87.7	81.4	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0583	0.1062	0.1859	0.3742
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3082	7.8495	7.2848	6.2714
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.282	0.5305	0.9423	1.7887
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας $-(K\tau)$	2.274	2.8455	3.0658	3.16
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 2.4697]$	0.1957	-0.3758	-0.5961	-0.6903

Πίνακας I.56. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.6*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.2	87.7	80.2	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0596	0.1049	0.2008	0.3709
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4335	8.0032	7.3227	6.3977
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2935	0.5307	1.0288	1.7949
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.1389	3.6357	3.8773	4.0005
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 3.1887]$	0.0498	-0.447	-0.6886	-0.8118

Πίνακας I.57. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση G.7*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.9	87.4	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.061	0.108	0.1951	0.3683
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.6125	8.1291	7.5	6.5302
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3055	0.5614	1.0156	1.8131
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.9834	4.3947	4.6464	4.7629
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 3.9075]$	-0.0759	-0.4872	-0.7389	-0.8554

Πίνακας I.58. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για τις περιπτώσεις G.8 και H.1*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.9	87.4	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0622	0.1087	0.1888	0.3712
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4648	8.0086	7.4301	6.4218
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3126	0.563	0.9868	1.8208
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.7703	4.1645	4.3471	4.4704
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 3.8242]$	0.0539	-0.3403	-0.5229	-0.6462

Πίνακας I.59. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.2*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.9	88.0	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0632	0.1035	0.1897	0.3725
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3842	7.9767	7.3608	6.3603
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3186	0.5387	0.9927	1.8248
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.675	4.0172	4.2087	4.3017
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau)) [K\alpha = - 3.7451]$	0.0701	-0.2721	-0.4636	-0.5566

Πίνακας I.60. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση H.3*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.2	87.4	81.1	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.062	0.1105	0.1906	0.3734
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.3419	7.8945	7.3282	6.3327
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3148	0.5764	1.0002	1.8322
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.6826	4.0541	4.1764	4.2488
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 3.658$]	-0.0246	-0.3961	-0.5184	-0.5908

Πίνακας I.61. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση Η.4*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	88.0	81.4	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0597	0.105	0.1869	0.3741
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.394	7.9432	7.3605	6.335
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3	0.5511	0.9853	1.844
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	3.8074	4.147	4.2684	4.3251
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 3.5079$]	-0.2995	-0.6391	-0.7605	-0.8172

Πίνακας I.62. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση Η.5*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	92.5	88.3	80.2	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0595	0.1015	0.2037	0.3741
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4617	8.019	7.2944	6.3705
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.2954	0.5318	1.0776	1.8576
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	4.1589	4.3501	4.4827	4.5219
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 3.2822$]	-0.8767	-1.0679	-1.2005	-1.2397

Πίνακας I.63. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση Η.6*.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.3	86.8	81.4	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.0687	0.1167	0.1855	0.3725
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.4853	7.9903	7.4943	6.4489
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3371	0.6124	0.989	1.8666
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	4.5065	4.6391	4.7353	4.8029
$K = (-K\alpha)-(-(K\tau))$ [$K\alpha = - 3.0073$]	-1.4992	-1.6318	-1.728	-1.7956

Πίνακας I.64. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση Η.7*.

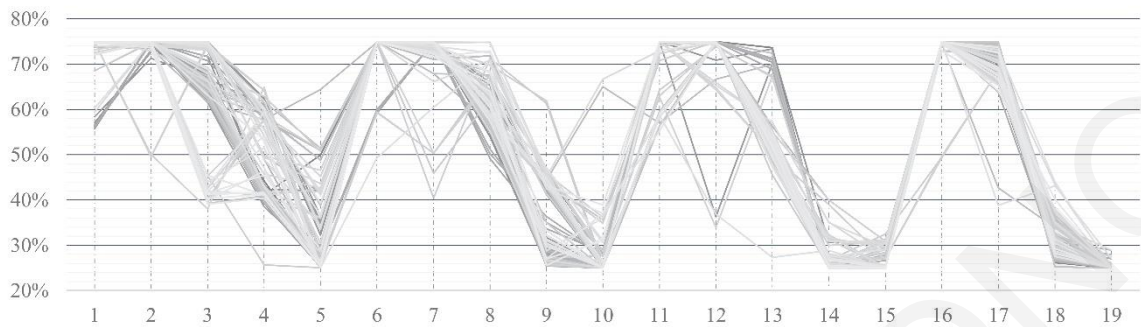
*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

Βέλτιστες επιλεγμένες λύσεις	A	B	Γ	Δ
Συντελεστής L/D [%]	91.3	85.9	80.5	70.0
Μέσος όρος εφελκυστικής τάσης [N]	0.068	0.1253	0.1958	0.3686
Απαιτούμενο μήκος νήματος [m]	8.6644	8.0995	7.5901	6.605
Συνολική παραμόρφωση υλικού [m]	0.3425	0.6728	1.0633	1.887
Μέσος όρος τελικής καμπυλότητας -(Κτ)	5.1656	5.3782	5.4546	5.5499
K = (-Κα)-(-Κτ) [Κα = - 3.104]	-2.0616	-2.2742	-2.3506	-2.4459

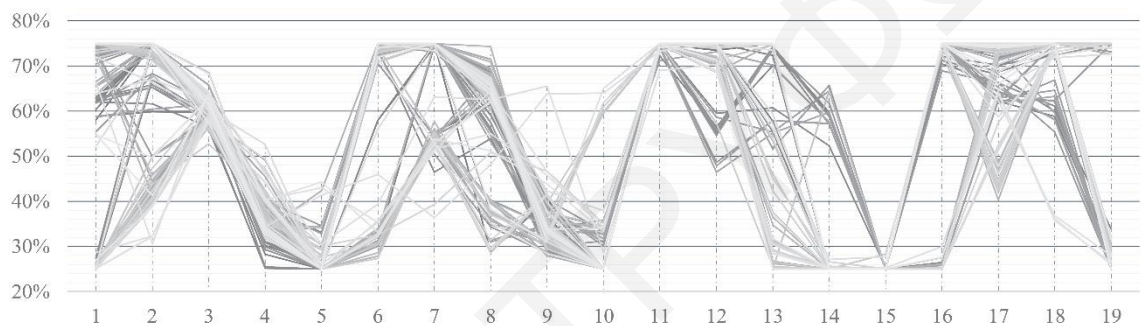
Πίνακας I.65. Αποτελέσματα από τις λύσεις που επιλέγονται για την περίπτωση Η.8*.

*Α. Η ακραία λύση με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Β. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη σχεδιαστική απόδοση, Γ. Η λύση που επιλέγεται με την καλύτερη στατική συμπεριφορά, Δ. Η ακραία λύση με την καλύτερη στατική συμπεριφορά.

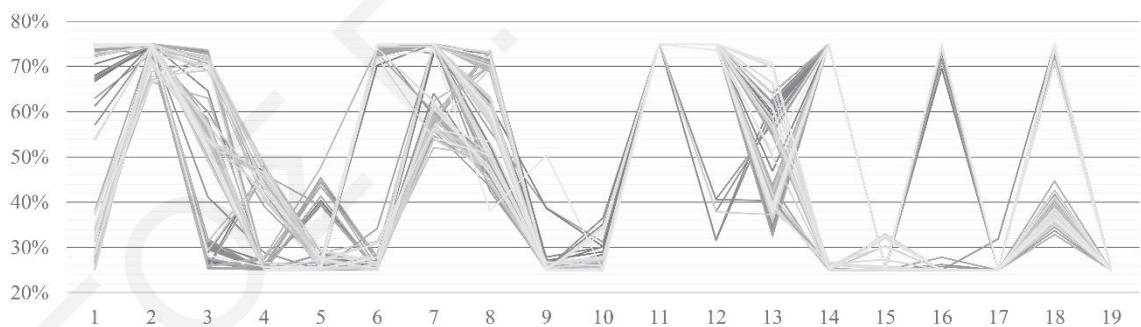
10.3_ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ ΙΙΙ



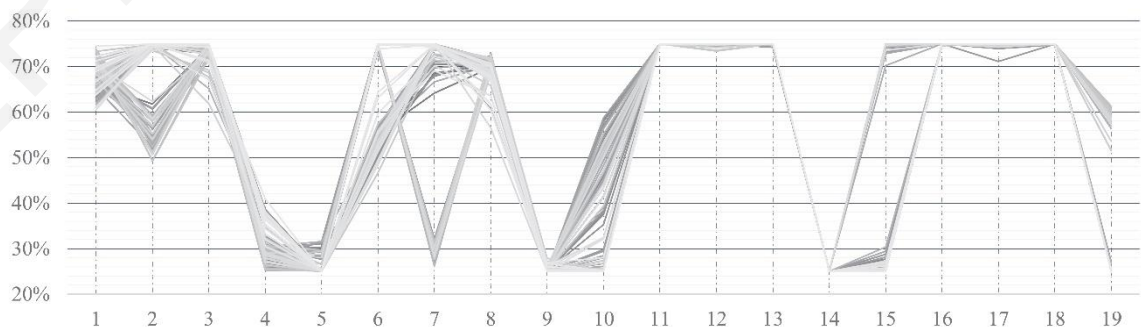
Εικόνα Ι.1. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση Α.8.



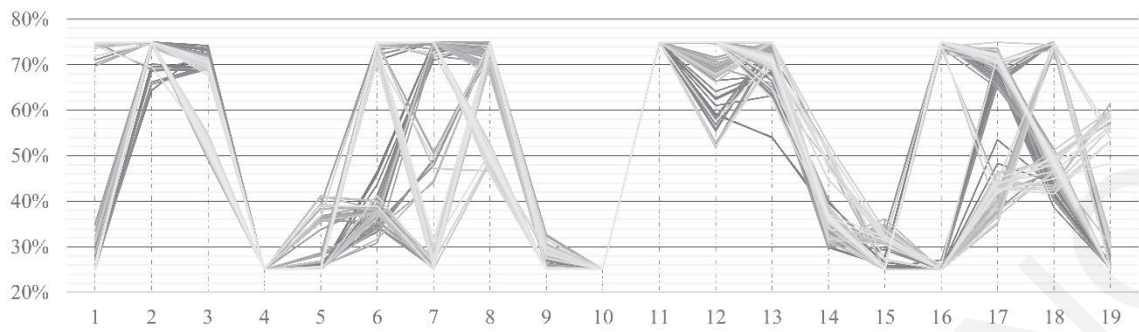
Εικόνα Ι.2. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση Β.8.



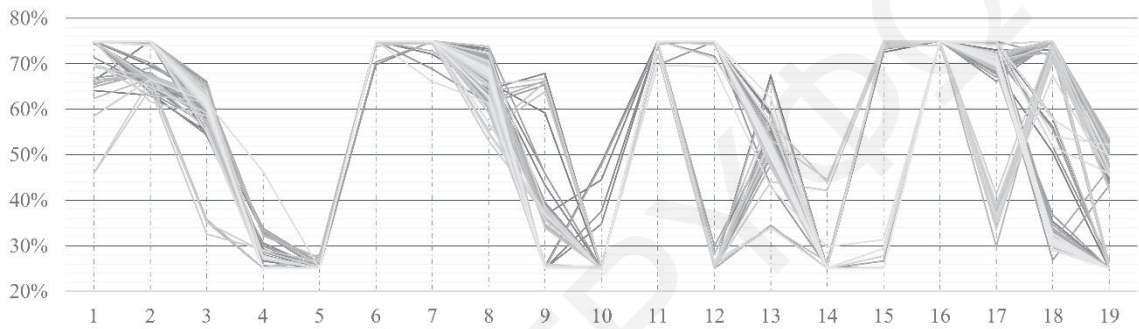
Εικόνα Ι.3. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση C.8.



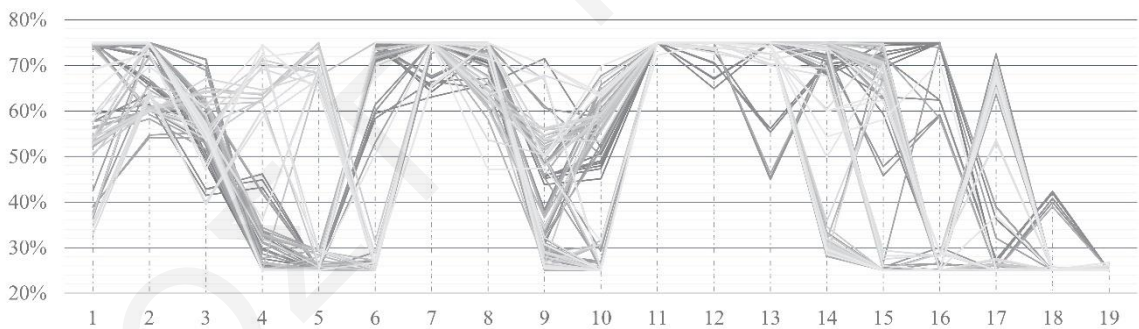
Εικόνα Ι.4. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση D.8.



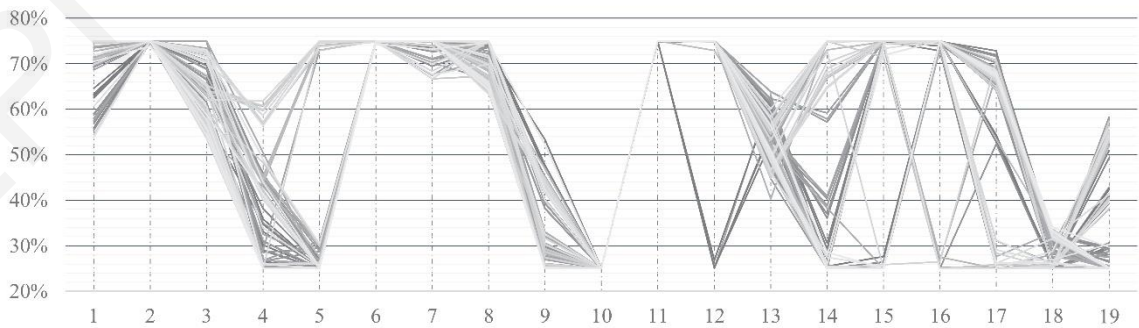
Εικόνα I.5. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση E.8.



Εικόνα I.6. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση F.8.



Εικόνα I.7. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση G.8.



Εικόνα I.8. Γραφική παράσταση ποικιλομορφίας μετακίνησης περιμετρικών κόμβων από 25 – 75% με συνεπακόλουθο την τυπολογική μεταβολή των κόμβων στην περίπτωση H.8.