



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**Εμβιομηχανική Μελέτη και Κατασκευή Ορθοπεδικού
Τεχνητού Συνδέσμου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ ΒΑΡΛΑΚΑΣΤΑΝΗ

Επιβλέπων : Βασίλειος Κεφαλάς
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Εμβιομηχανική Μελέτη και Κατασκευή Ορθοπεδικού Τεχνητού Συνδέσμου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΒΑΣΙΛΙΚΗΣ ΒΑΡΔΑΚΑΣΤΑΝΗ

Επιβλέπων : Βασίλειος Κεφαλάς
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Κεφαλάς Βασίλειος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Κουρκουλής Σταύρος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ευταξιάπουλος Δημήτριος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΒΑΡΔΑΚΑΣΤΑΝΗ

Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα κατασκευής ενός τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου για την αντικατάσταση του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου σε περίπτωση ρήξης.

Αρχικά, καθώς το εμβιομηχανικό πρόβλημα του σκαφομνηνοειδούς διαχωρισμού λαμβάνει χώρα σε έναν ιδιαίτερα πολύπλοκο, ανατομικά και εμβιομηχανικά χώρο όπως είναι η άρθρωση του καρπού, ήταν απαραίτητη η μελέτη της ανατομίας και της κινηματικής της άρθρωσης αυτής καθώς επίσης και η εκτίμηση της συνεισφοράς του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου σε αυτήν.

Πριν εξετάσουμε αναλυτικά τις εμβιομηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου συνδέσμου προχωρήσαμε σε μια εις βάθος μελέτη τόσο του μηχανισμού κάκωσής του όσο και των διαφορετικών μεθόδων αποκατάστασης που εφαρμόζονται σήμερα για κάθε φάση του σκαφομνηνοειδούς διαχωρισμού.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού των προϋποθέσεων για τη λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανικού ανάλογου, κρίθηκε αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία πρωτογενών αποτελεσμάτων προηγούμενων πειραμάτων στον φυσιολογικό σκαφομνηνοειδή σύνδεσμο. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα ως οδηγός για την εκτίμηση της καταλληλότητας μιας σειράς υλικών.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, διερευνήθηκε και ο σχεδιασμός του εν λόγω τεχνητού συνδέσμου. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται και παρουσιάζονται διαφορετικά σχέδια όπως αυτά προέκυψαν κατά τη διάρκεια της έρευνας. Για κάθε ένα από αυτά παραθέτονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα καθώς και η διαδικασία διερεύνησης που οδήγησε στην επιλογή του καθενός

Το πειραματικό σκέλος της διπλωματικής αυτής περιλαμβάνει την μηχανική μελέτη ελαστικών με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της καταλληλότητας τους. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήσαμε μελέτη μονοαξονικού εφελκυσμού σε ελαστικά σιλικόνης, βουτυλίου και EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer (M-class rubber)) υπό διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Ο στόχος των δοκιμών ήταν να εξετάσει τη μηχανική συμπεριφορά των ελαστικών αυτών σε συνδυασμό με την επίδραση των βισκοελαστικών χαρακτηριστικών τους. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του ελαστικού EPDM πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές κυκλικής φόρτισης και εν συνεχεία μονοαξονικού εφελκυσμού με σκοπό την διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του μετά από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.

Η εργασία καταλήγει στην συναξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις τιμές των πραγματικών σκαφομνηνοειδών συνδέσμων και την παρουσίαση των συμπερασμάτων από το σύνολο της ερευνητικής διαδικασίας και του σχεδιασμού.

Abstract

This thesis forms part of a major research program whose scope is to develop a scapholunate artificial ligament. Its task was defined as to prescribe the properties of candidate materials, that could be used in the construction of such a ligament. In order to achieve this target, an effort has been made to understand the physiological aspects, both mechanical and physiological. Although it can not be claimed to have arrived to a definite conclusion, a number of points have been set that are considered to help in answering the question.

The first step has been the physiological description of the carpal structure. We arrived at the conclusion, that the movement is complex. The rarity of data does not permit us to analyze it as a simple combination of mechanical connections. An interesting part of the analysis concerns extreme loading of the carpal region. The various ways of failure of the parts of the carpal ligaments, and especially the scapholunate ligament, is examined. This is coupled with the examination of the available means of repairing a damaged ligament. The main characteristic of these repair methods is the limitation of movement and the relevant ignorance of the level of stresses that result.

A number of pioneering tests both on cadaver specimens, as well as with living persons, have provided us with a limited but precious number of measurements. In an effort to extract the maximum of information from these measurements, a further analysis has been attempted and a number of conclusions, as to the limits of carpal movements in various modes and directions, have been extracted.

Designing an artificial ligament proved a formidable task. Its main difficulty rests in the extremely limited space and resulting small dimensions that the various parts are allowed to have. A number of artificial ligament designs has been conceived, criticized and partly rejected. Two designs, though, seem to behave as wanted. The first is based on using an enhanced bellows and consists of a uniaxial connection. The second is a bi-dimensional connection like the water stops in concrete design. This last type presents a remarkable advantage as to the placement possibility, in that it is placed vertically from the above side which is much easier than the longitudinal sideways hole piercing usually followed. These designs are to be tested in the course of the major research project.

Further analyzing data from tests on true ligament material has provided us with important information as to the required material properties. Probably the most important intermediate result of this data treatment has been the conclusion that since it is not possible to describe the various movements and especially their limits, it is necessary to construct the artificial ligament with material that meets best the properties of the physiological material of the real ligament. This is

necessary in order to assure at best that the behaviour of the artificial ligament will be as close as possible to that of the real one.

Another aspect of data analyzing which is considered original is that the dispersion of values in the low stress region is high, especially compared to the values of the higher stress values that correspond to the linear elastic region before failure. Therefore, it is understood that the precise values of stiffness in the low region is not important as it varies a lot between individuals, randomly as well as related to sex, age, orientation, exercise, speed etc. On the contrary, stiffness values in the linear region are more important to comply with the real values as they behave almost identically. This difference has been explained as being related to the mechanical behavior. In particular, in the low stresses region behavior depends on the sinusoidal form and mix of collagen, which is more or less random between individuals. As straining advances, the collagens become oriented and strained and further straining depends mainly on the collagen's material properties, which are mostly common between individuals, thereof their common stiffness characteristics.

We have carried out tests on elastic butyle, elastic silicon and elastic EPDM. Restrictions as to the acceptable values have been derived based on the required loading and the limit values of dimensions of the possible artificial ligament. Following this procedure the silicon material has been ruled out. On the contrary the other two have been accepted although the EPDM proves to be able to provide the necessary maximum strength which the butyle cannot. The stiffness of the butyle and EPDM is close to the average value of the various tests and therefore may be considered acceptable as a starting point for use as ligament material. Further, cyclic loading has been attempted in order to show whether viscous behavior is a problem in long term function. Positive results have been obtained in the case of the EPDM elastic. It is suggested that further testing is necessary, with testing also in conditions involving cycling loading in human body temperature and bio-compatibility.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε την περίοδο 2011-2012 στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Μηχανικής του Ε.Μ.Π. Δρ. Βασίλειο Κεφαλά, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, μου παρείχε αμέριστα την επιστημονική του βοήθεια και την καθοδήγηση του για την αντιμετώπιση όλων των δυσκολιών.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον ιατρό Δρ. Φώτιο Νικολόπουλο για την παραχώρηση των πειραματικών αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής του καθώς επίσης και για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο του εργαστηρίου κύριο Χαράλαμπο Κολοβό για τη βοήθεια που μου προσέφερε στο πειραματικό μέρος της εργασίας και για τις πολύτιμες υποδείξεις του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Σταύρο Κουρκουλή και τον Επίκουρο Καθηγητή Δημήτριο Ευταξινόπουλο για τις γνώσεις που μου μετέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου δίνουν όλα αυτά τα χρόνια για να προχωράω μπροστά.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος

1	Εισαγωγή.....	1
2	Η άρθρωση του καρπού	3
2.1	Η Ανατομία του Καρπού	3
2.1.1	Οστεολογία.....	3
2.1.2	Σύνδεσμοι.....	7
2.2	Η Κινηματική του Καρπού	12
2.2.1	Οι κινήσεις του καρπού	12
2.2.2	Η κινηματική του καρπού.....	13
3	Ο Σκαφομηνοειδής Σύνδεσμος	17
3.1	Η Δομή του Συνδέσμου	17
3.1.1	Η ραχιαία μοίρα.....	17
3.1.2	Η παλαμιαία μοίρα.....	18
3.1.3	Η εγγύς μοίρα.....	19
3.2	Ο Ρόλος του Σκαφομηνοειδούς Συνδέσμου στην Κίνηση του Καρπού	20
3.2.1	Κατά την Περιστροφή.....	20
3.2.2	Κατά τις Υπόλοιπες Κινήσεις του Καρπού	21
3.2.3	Συνέπειες Κατά την Τομή των Συνδέσμων	25
3.2.4	Σχολιασμός επί των Κινήσεων	27
4	Ο Μηχανισμός Κάκωσης και οι Υπάρχοντες Μέθοδοι Αποκατάστασης.....	31
4.1	Καρπική Σταθερότητα και Αστάθεια.....	31
4.2	Μηχανισμός Κάκωσης.....	33
4.3	Μέθοδοι Αποκατάστασης	34
4.3.1	Γενικός Διαχωρισμός Μεθόδων.....	34
4.3.2	Προδυναμικός Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός	36
4.3.3	Δυναμικός Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός	38
4.3.4	Στατικός Ανατάξιμος Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός.....	40

4.3.5	Στατικός Μη Ανατάξιμος Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός (χωρίς αρθρίτιδα)	41
4.3.6	Δευτεροπαθής Αρθρίτιδα του Καρπού σε Σκαφομηνοειδή Διαχωρισμό	43
5	Εμβιομηχανική Ανάλυση του Σκαφομηνοειδούς Συνδέσμου.....	45
5.1	Εισαγωγικά για τους συνδέσμους	45
5.2	Εμβιομηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων	48
5.2.1	Δομικά Χαρακτηριστικά	49
5.2.2	Χαρακτηριστικά των Υλικών	51
5.3	Εμβιομηχανική ανάλυση του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου.....	55
5.3.1	Μηχανικές Ιδιότητες.....	56
6	Μοντέλο Τεχνητού Συνδέσμου	65
6.1	Λειτουργία και Ιδιότητες	65
6.2	Σχεδιασμός.....	66
6.2.1	Σχέδιο 1 ^ο	70
6.2.2	Σχέδιο 2 ^ο	73
6.2.3	Σχέδιο 3 ^ο (η λύση των bellows).....	76
6.2.4	Σχέδιο 4 ^ο	78
6.2.5	Σχέδιο 5 ^ο	80
7	Πειραματική Μελέτη Υλικών.....	83
7.1	Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης	83
7.2	Μετρούμενα Υλικά.....	86
7.3	Ελαστικό Βουτυλίου	86
7.3.1	Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα	87
7.4	Ελαστικό Σιλκόνης	92
7.4.1	Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα	92
7.5	EPDM	96
7.5.1	Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα	97
7.5.1.1	Μονοαξονικός Εφελκυσμός.....	97
7.5.1.2	Κυκλική Φόρτιση.....	102
7.5.1.3	Μονοαξονικός Εφελκυσμός μετά την επιβολή Κυκλικής φόρτισης.....	105
8	Συμπεράσματα –Μελλοντικοί Στόχοι	111
8.1	Συμπεράσματα	111

8.1.1	Διαδικασία Προσέγγισης του Προβλήματος.....	111
8.1.2	Δοκιμές Τεχνητών Υλικών και Σύγκριση με Σκαφομηνοειδή Σύνδεσμο	113
8.2	Μελλοντικοί Στόχοι.....	117
9	Βιβλιογραφία.....	119
	Παράρτημα Ι : Κολλαγόνο.....	123

1

Εισαγωγή

Με τον όρο Εμβιομηχανική μπορούμε να ορίσουμε την επιστήμη που εφαρμόζει τις αρχές των διάφορων κλάδων της Μηχανικής στον ανθρώπινο οργανισμό. Σύμφωνα με τον Y.C. Fung [1] η Εμβιομηχανική στοχεύει στην κατανόηση της μηχανικής των ζωντανών συστημάτων. Σε έναν οργανισμό, η Εμβιομηχανική μας επιτρέπει να κατανοήσουμε τη φυσιολογική λειτουργία του, να προβλέψουμε τις διαταραχές και να προτείνουμε μεθόδους τεχνητής επέμβασης με στόχο την αποκατάσταση της ορθής λειτουργίας του.

Στην ιδιαίτερη περίπτωση των συνδέσμων του καρπού, ο R.A. Berger [11] σημειώνει « Για να κατανοήσει και να αντιμετωπίσει ένας επιστήμονας τις παθήσεις του καρπού πρέπει να έχει κατανοήσει την ανατομία των οστών και των συνδέσμων στον καρπό. Μαζί μ' αυτές τις πληροφορίες, ένας επιστήμονας πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμόσει την κλασσική ανατομία στην μηχανική, ξεδιπλώνοντας τα μονοπάτια της παθομηχανικής, με σκοπό να σχεδιάσει μια θεραπεία που θα είναι ανατομικά και μηχανικά ορθή»

Με βάση τα παραπάνω, κατανοεί κανείς ότι η προσέγγιση ενός προβλήματος εμβιομηχανικής μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό απαιτεί κατανόηση τόσο της ανατομίας όσο και της ίδιας της μηχανικής του συγκεκριμένου χώρου εφαρμογής. Ειδικότερα, η εργασία αυτή αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης έρευνας που στοχεύει στην κατασκευή ενός τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου για το σκαφομηνοειδή σύνδεσμο. Έτσι, στην παρούσα διπλωματική, θα εξετάσουμε πλευρές του σχεδιασμού ενός τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου στην περίπτωση της ολικής ρήξης. Πιο συγκεκριμένα, αφού αναπτύξουμε ορισμένα απαραίτητα στοιχεία ανατομίας, θα εστιάσουμε στον προσδιορισμό των προϋποθέσεων για την κατασκευή του εμφυτεύματος. Για να καταλήξουμε εκεί, θα πρέπει πρώτα να εξετάσουμε τις προοπτικές σχεδιασμού του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου και να επεξεργαστούμε περαιτέρω τις υπάρχουσες μετρήσεις για το φυσιολογικό

σύνδεσμο. Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε στην πειραματική μελέτη υλικών με στόχο να εξετάσουμε την καταλληλότητα τους με οδηγό τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Πιο αναλυτικά, η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από επτά κυρίως κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται γενικά ανατομικά και κινηματικά στοιχεία που αφορούν στην άρθρωση του καρπού. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η δομή του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου καθώς και η συνεισφορά του συνδέσμου αυτού στη συνολική κίνηση του καρπού. Στη συνέχεια, το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο τραυματίζεται ο σκαφομηνοειδής σύνδεσμος και παρουσιάζει τις υπάρχουσες μεθόδους αποκατάστασης. Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η εμβιομηχανική ανάλυση του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου αφού προηγουμένως έχουν αναφερθεί τα γενικότερα χαρακτηριστικά των ιστών αυτών. Έτσι, στο Κεφάλαιο 6 εξετάζονται πλέον οι προδιαγραφές και οι διαφορετικοί πιθανοί τρόποι σχεδιασμού του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου. Το Κεφάλαιο 7 πραγματεύεται την πειραματική μελέτη των υλικών, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα μαζί με μια πρώτη σειρά συμπερασμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα και οι μελλοντικές επεκτάσεις που μπορεί να έχει η διπλωματική αυτή.

2

Η άρθρωση του καρπού

Ο τεχνητός ορθοπεδικός σύνδεσμος πρόκειται να τοποθετηθεί στην περιοχή του καρπού. Ως εκ τούτου στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε στοιχεία ανατομίας και κινηματικής της άρθρωσης του καρπού.

Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία ανατομίας του καρπού ως προς τα οστά και του συνδέσμους που βρίσκονται στην περιοχή της άρθρωσης.

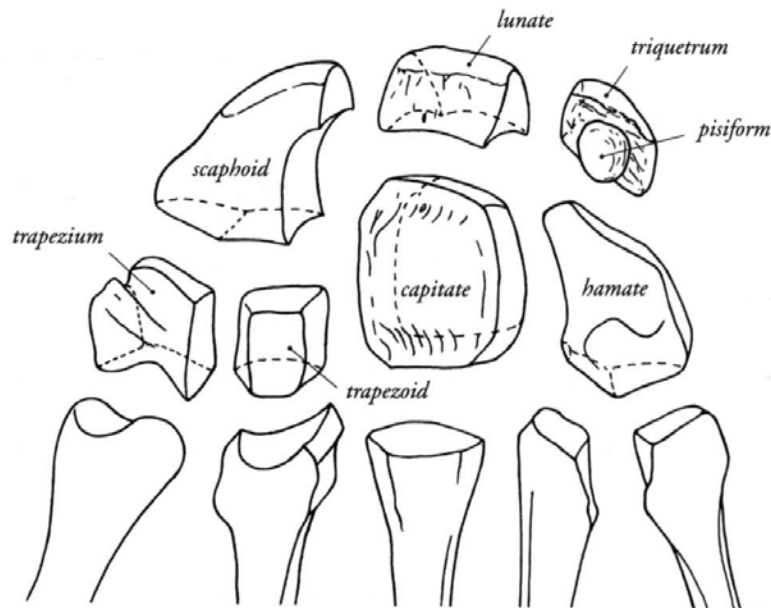
Στη συνέχεια, το δεύτερο μέρος περιγράφει τις κινήσεις που εκτελεί ο καρπός ως σύνολο, αλλά και τις επιμέρους κινήσεις που συνεπάγεται κάθε μια από αυτές για τα καρπιαία οστά.

Ο στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να αποσαφηνίσει στο βαθμό του δυνατού την υπό εξέταση περιοχή του καρπού και ιδιαίτερα τις σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των οστών.

2.1 Η Ανατομία του Καρπού

2.1.1 Οστεολογία

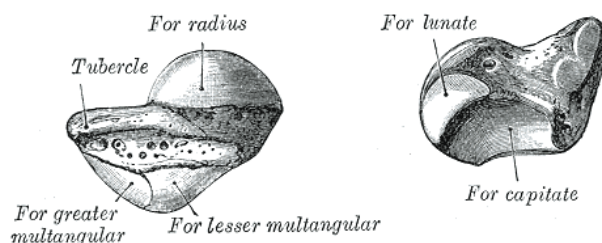
Η άρθρωση του καρπού αποτελείται από οκτώ οστά: το μηννοειδές (lunate), το πυραμοειδές (triquetrum), το σκαφοειδές (scaphoid), το πισσοειδές (pisiform), το μείζον πολύγωνο (trapezium), το αγκιστρωτό (hamate), το κεφαλωτό (capitate) και το ελάσσον πολύγωνο (trapezoid). Τέλος, στην πηγεοκαρπική άρθρωση καταλήγουν η ωλένη (ulna) και η κερκίδα (radius) ενώ περιφερικά της άρθρωσης βρίσκονται τα μετακάρπια οστά (metacarpals).



Στην Εμβιομηχανική κατατάσσουμε συνήθως τα καρπιαία οστά με δύο τρόπους:

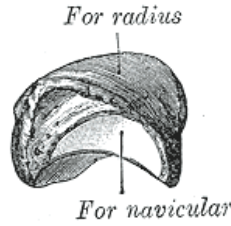
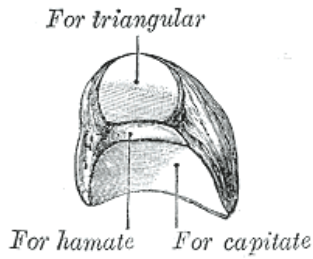
- Σε δύο στοίχους: τον περιφερικό (ή άνω) στοίχο που αποτελείται από το αγκιστρωτό, το κεφαλωτό, το μείζων και το έλασσον πολύγωνο και τον εγγύς στοίχο που αποτελείται από το μηνοειδές, το πυραμοειδές, το σκαφοειδές και το πισσοειδές.
- Σε τρεις κολώνες: την κερκιδική κολώνα που αποτελείται από το σκαφοειδές το μείζων και το έλασσον πολύγωνο, την μηνοειδή που αποτελείται από το μηνοειδές και το κεφαλωτό και την ωλένια που αποτελείται από το πυραμοειδές και το αγκιστρωτό.

Ας δούμε τώρα κάποια ανατομικά στοιχεία για το κάθε οστό του καρπού:



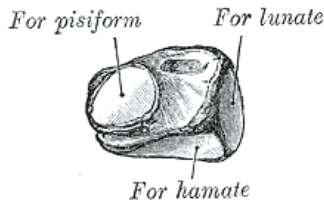
Το σκαφοειδές είναι το μεγαλύτερο από τα οστά του εγγύς στοίχου. Εμφανίζει μια κυρτή αρθρική επιφάνεια για τη συνένωση με την κερκίδα και μια επίπεδη για την συνάρθρωση με το μηνοειδές. Στο

περιφερικό άκρο του, το οστό παρουσιάζει δύο αρθρικές επιφάνειες. Η περιφερική είναι κυρτή και αρθρώνεται με το μείζων και το έλασσον πολύγωνο ενώ η εσωτερική είναι κοίλη και αρθρώνεται με το κεφαλωτό οστό.



Το μηνοειδές οφείλει την ονομασία του στο ημισελινοειδές σχήμα του. Στην εγγύς πλευρά του είναι κυρτό και αρθρώνεται με την κοίλη κερκίδα και τον αρθρικό δίσκο. Η στενή πλευρική επιφάνεια του είναι επίπεδη και ημισελινοειδής για να αρθρώνεται με το σκαφοειδές ενώ η εσωτερική πλευρά του είναι σχεδόν τετράγωνη και αρθρώνεται με το πυραμοειδές. Τέλος, η άνω πλευρά του είναι κοίλη στα σημεία που αρθρώνεται με το κεφαλωτό και το αγκιστρωτό οστό. Επειδή το μηνοειδές είναι λεπτότερο στην ραχιαία πλευρά μπορεί να παρουσιάσει παλαμιαία μετατόπιση και ραχιαία περιστροφή αν ο σκαφομηνοειδής σύνδεσμος αστοχήσει, οδηγώντας σε αστάθεια.

Το πυραμοειδές παρουσιάζει στην εγγύς πλευρά του μια κυρτή αρθρική επιφάνεια που



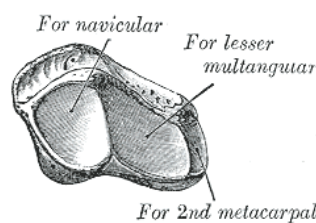
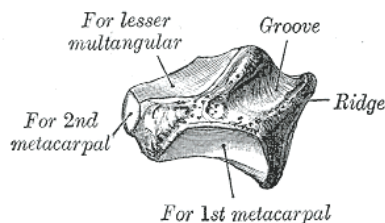
αρθρώνεται με τον αρθρικό δίσκο και τον πλάγιο ωλένιο σύνδεσμο. Η άνω πλευρά του είναι κοίλη για τη συνάρθρωση με το αγκιστρωτό οστό. Τέλος, παρουσιάζει μια απομονωμένη οβάλ πτυχή στην άνω παλαμιαία επιφάνεια του για τη συνάρθρωση με το πισσοειδές οστό.

Το πισσοειδές είναι ένα σησαμοειδές καρπικό οστό που βρίσκεται πάνω από το πυραμοειδές.



Παρά το γεγονός ότι ανατομικά το πισσοειδές ανήκει στον εγγύς στοίχο των καρπικών οστών, δε συμμετέχει στην κίνηση του καρπού, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι η αποκλειστική του λειτουργία είναι να αυξάνει το μοχλοβραχίονα της ροπής από τους καμπτήρες (carpi ulnaris) μύες καθώς ο τένοντας κινείται πάνω στο πισσοειδές.

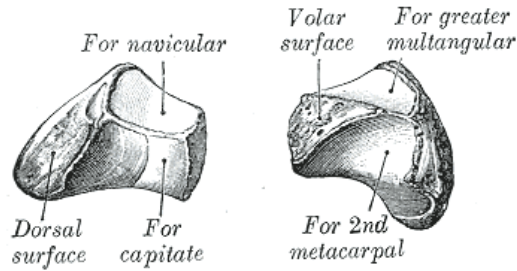
Το μείζον πολύγωνο παρουσιάζει κυρτή περιφερική πλευρά όπου συνδέεται με το πρώτο



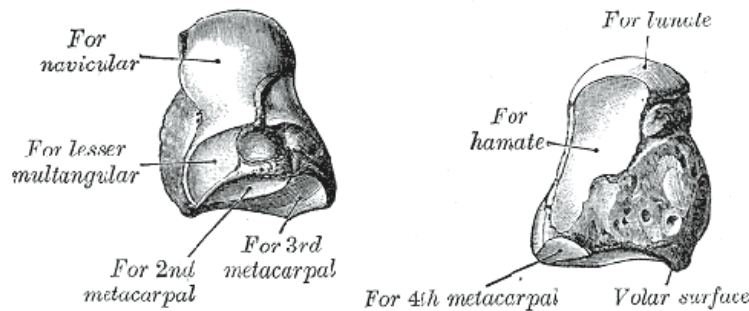
μετακάρπιο ενώ η μεγάλη εσωτερική επιφάνεια είναι κοίλη για τη συνάρθρωση με το έλασσον πολύγωνο. Η εγγύς πλευρά του μείζονος πολύγωνου είναι ελαφρώς

κοίλη και συνδυάζεται με το έλασσον πολύγωνο για να σχηματίσουν μια συνολικά κοίλη επιφάνεια για τη συνάρθρωση με την κυρτή άνω επιφάνεια του σκαφοειδούς.

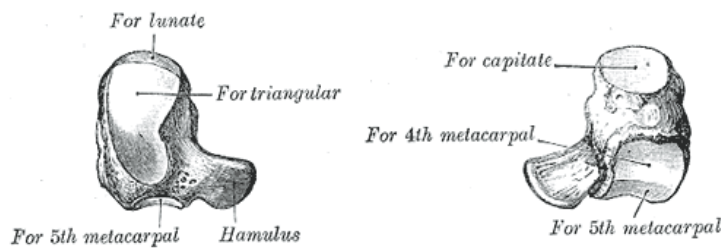
Το έλασσον πολύγωνο όπως είδαμε και πιο πάνω συνδυάζει την εγγύς επιφάνεια του με το μείζον πολύγωνο για την άρθρωση με το σκαφοειδές. Η άνω επιφάνεια είναι κυρτή και αρθρώνεται με το δεύτερο μετακάρπιο. Η εσωτερική επιφάνεια είναι κοίλη για να αρθρώνεται



με την περιφερική πλευρά του κεφαλωτού οστού ενώ η περιφερική πλευρά του ελάσσονος πολύγωνου είναι ελαφρώς κυρτή για τη συνάρθρωση με το μείζον πολύγωνο.



Το κεφαλωτό έχει κυρτή την εγγύς επιφάνειά του (κεφάλι) έτσι ώστε να ταιριάζει με τις κοίλες επιφάνειες του σκαφοειδούς και του μηννοειδούς οστού. Η περιφερική επιφάνειά του αρθρώνεται με το τρίτο μετακάρπιο και σε ένα μικρό τμήμα με το τέταρτο μετακάρπιο. Το πλευρικό σύνορο είναι κοίλο για την έσω πλευρά του δεύτερου μετακαρπίου ενώ η έσω πλευρά φέρει μια μεγάλη πτυχή για το αγκιστρωτό οστό.



πυραμοειδούς. Η πλευρική επιφάνεια αρθρώνεται με το κεφαλωτό.

Το κεφαλωτό έχει κυρτή την εγγύς επιφάνειά του (κεφάλι) έτσι ώστε να ταιριάζει με τις κοίλες επιφάνειες του σκαφοειδούς και του μηννοειδούς οστού. Η

Το αγκιστρωτό αρθρώνεται περιφερικά με το τέταρτο και το πέμπτο μετακάρπιο. Η εγγύς πλευρά του είναι κυρτή για να αρθρώνεται με την κοίλη περιφερική πλευρά του

2.1.2 Σύνδεσμοι

Τα καρπικά οστά υποστηρίζονται από ένα μεγάλο αριθμό συνδέσμων που διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το είδος τους: στους εξωγενείς και τους ενδογενείς συνδέσμους. Οι εξωγενείς σύνδεσμοι είναι ενδοθυλακικοί σύνδεσμοι που διατρέχουν τους στοίχους του καρπού και συνδέουν τα καρπικά οστά με την ωλένη, την κερκίδα ή τα μετακάρπια. Βρίσκονται είτε στην παλαμιαία είτε στην ραχιαία πλευρά του καρπού. Οι ενδογενείς σύνδεσμοι (ή μεσόστιοι) είναι ενδαρθρικοί σύνδεσμοι που συνδέουν τα οστά του ίδιου στοίχου μεταξύ τους.

Συνδεσμολογία του καρπού	
Εξωγενείς Σύνδεσμοι	
Παλαμιαίοι	Κερκιδосκαφοκεφαλωτός RScC
	Μακρός Κερκιδομηνοειδής I-RL
	Ωλενιοκεφαλωτός UC
	Βραχύς κερκιδομηνοειδής s-RL
	Ωλενιομηνοειδής UL
	Κερκιδосκαφομηνοειδής RScL
	Ωλενιοπυραμοειδής U Tr
Ραχιαίοι	Κερκιδοπυραμοειδής R Tr
Ενδογενείς σύνδεσμοι	
Εγγύς	Σκαφομηνοειδής ScL (Ραχιαία και Παλαμιαία Μοίρα)
Στοίχος	Μηνοπυραμοειδής LTr (Ραχιαία και Παλαμιαία Μοίρα)
Περιφερικός	Αγκριστροκεφαλωτός HC (Ραχιαία και Παλαμιαία Μοίρα)
	Κεφαλο-Ελλάσων Πολυγωνικός C-Td (Ραχιαία και Παλαμιαία Μοίρα)
	Μείζων-Ελλάσων Πολυγωνικός Td -Tm (Ραχιαία και Παλαμιαία Μοίρα)
Παλαμιαίοι μεσοκαρπικοί	Πυραμοαγκιστρωτός Tr-H
	Πυραμοκεφαλωτός Tr-C
	Σκαφο-Ελλάσων-Μείζων Πολυγωνικός Sc-Tm-Td
	Παλαμιαίος Σκαφοπυραμοειδής Sc-Tr
	Σκαφοκεφαλωτός Sc-C
Ραχιαίοι	Ραχιαίος μεσοκαρπικός σύνδεσμος
μεσοκαρπικοί	Ραχιαίος Σκαφοπυραμοειδής Sc-Tr

Όπως είδαμε στον παραπάνω πίνακα [6] χωρίζουμε τους συνδέσμους σε παλαμιαίους και ραχιαίους. Για λόγους ευκολίας, θα ομαδοποιήσουμε επιπρόσθετα τους εξωγενείς συνδέσμους με βάση το αν συνδέουν τα καρπικά οστά με την κερκίδα (κερκιδοκαρπικοί) ή την ωλένη (ωλενιοκαρπιαίοι).

Εξωγενείς Παλαμιαίοι Σύνδεσμοι [11]

α. Παλαμιαίοι Κερκιδοκαρπικοί Σύνδεσμοι

Υπάρχουν τέσσερις παλαμιαίοι κερκιδοκαρπικοί σύνδεσμοι καθένας από τους οποίους έχει ένα προσαρτημένο άκρο στην κερκίδα και το άλλο σε ένα ή και περισσότερα καρπικά οστά.

Ο *κερκιδο-σκαφο-κεφαλωτός* σύνδεσμος (RScC) εκφύεται από μια ζώνη στην κορυφή της στυλοειδούς απόφυσης της κερκίδας και καταλήγει στο μέσο του βοθρίου του σκαφοειδούς. Δημιουργεί σχεδόν ολόκληρο το ραχιαίο και παλαμιαίο κερκιδοκαρπικό θύλακα και προσφύεται στον περιφερικό πόλο του σκαφοειδούς. Εκεί συνδυάζεται με ίνες από τον ωλένιο-κεφαλωτό και τον σκάφο-πυραμοειδή σύνδεσμο. Μόνο 10% των ινών του προσφύονται στον παλαμιαίο φλοιό του κεφαλωτού αλλά αυτό είναι αρκετό για να περιλαμβάνεται το κεφαλωτό στην ονομασία του συνδέσμου.

Ακριβώς ωλένια από αυτόν βρίσκεται ο *μακρός κερκιδο-μηνοειδής* (LRL) σύνδεσμος. Ο σύνδεσμος αυτός ξεκινά από το παλαμιαίο όριο της κερκίδας και εκτείνεται στο υπόλοιπο τμήμα του βοθρίου του σκαφοειδούς, περνά εμπρός από τον κεντρικό πόλο του σκαφοειδούς (χωρίς κάποια πρόσφυση σε αυτό) και καταλήγει στην κερκιδική πλευρά του μηνοειδούς.

Ο *κερκιδο-σκαφο-μηνοειδής* (RSL) (σύνδεσμος του Testut) μπορεί να θεωρηθεί σαν μεσοθυλακική επέκταση και περιέχει τελικούς κλάδους του πρόσθιου μεσόστεου νεύρου και αγγεία από το κερκιδοκαρπικό τόξο.

Αμέσως δίπλα του βρίσκεται ο *βραχύς κερκιδο-μηνοειδής* (SRL) που ξεκινά από όλο το πλάτος του βοθρίου του μηνοειδούς και καταλήγει στο κερκιδικό μισό του παλαμιαίου μηνοειδούς (εικόνα 1). Το μηνοειδές λοιπόν συγκρατείται στην κερκίδα με ένα παχύ σύνδεσμο που εκτείνεται από το ωλένιο άκρο του μηνοειδούς βοθρίου έως το μέσο του βοθρίου του σκαφοειδούς. Αυτή είναι και η πιθανή εξήγηση της παραμονής του μηνοειδούς στην κερκίδα σε πλήρες περιμηνοειδές εξάρθρημα του καρπού.

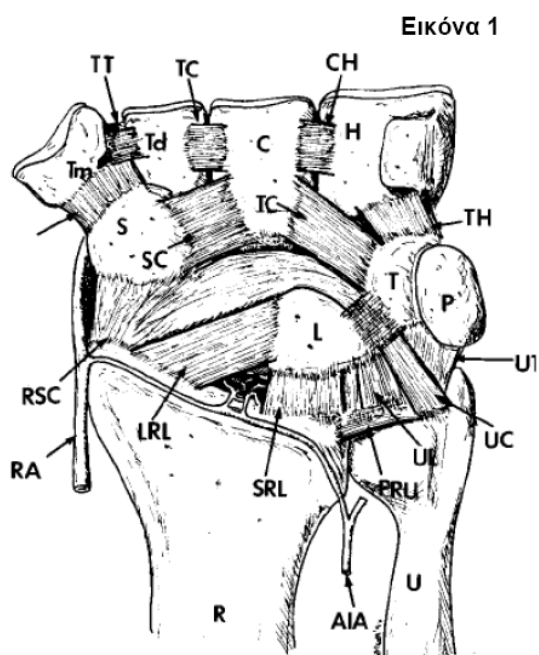
β. Παλαμιαίοι Ωλένιοκαρπιαίοι Σύνδεσμοι

Τρεις ξεχωριστοί ωλενιοκαρπιαίοι σύνδεσμοι γεφυρώνουν την περιφερική ωλένη και τον καρπό στην πρόσθια και την ωλένια πλευρά.

Ο *ωλένιο-κεφαλωτός* (UC) σύνδεσμος είναι ο μόνος που προσφύεται στην κεφαλή της ωλένης και ο πιο επιφανειακός από τους ωλενιοκαρπιαίους συνδέσμους. Περιφερικά και

κερκιδικά ενισχύει τον μεσόστεο μηνο-πυραμοειδή και τελικά συμπλέκεται με τον κερκίδο-σκάφο-κεφαλωτό σύνδεσμο. Ο ωλένιο-κεφαλωτός σύνδεσμος λειτουργεί πιθανώς ως ωλένια άγκυρα του καρπού.

Οι ωλένιο-μηνοειδής (UL) και ωλένιο-πυραμοειδής (UT) σχηματίζουν την πρόσθια και ωλένια πλευρά του ωλένιο-καρπιαίου θυλάκου. Και οι δύο ξεκινούν από τον παλαμιαίο κερκιδωλενικό σύνδεσμο δηλαδή προσφύονται εμμέσως στην ωλένη. Έτσι διευκολύνεται προφανώς η ανεξάρτητη στροφή του αντιβραχίου σε σχέση με την κίνηση του καρπού χωρίς αστάθεια στην κάτω κερκιδωλενική άρθρωση.



Παλαμιαία επιφάνεια του καρπού.

R: κερκίδα, **U:** ωλένη, **S:** σκαφοειδές, **L:** μηνοειδές, **T:** πυραμοειδές, **P:** πισοειδές, **Tm:** μείζον πολυγώνου, **Td:** ελάσσον πολυγώνου, **C:** κεφαλωτό, **H:** αγκιστρωτό, **RSC:** κερκίδο-σκαφο-κεφαλωτός σύνδεσμος, **LRL:** μακρός κερκίδο-μηνοειδής, **SRL:** βραχύς κερκίδο-μηνοειδής, **PRU:** παλαμιαίος κερκίδο-ωλένιος, **UL:** ωλένιο-μηνοειδής, **UC:** ωλένιο-κεφαλωτός, **UT:** ωλένιο-πυραμοειδής, **SC:** σκάφο-κεφαλωτός, **TC:** πυραμοειδο-κεφαλωτός, **TH:** πυραμοειδο-αγκιστρωτός, **STT:** σκαφο-μείζονος-ελάσσονος πολυγώνου, **TT:** παλαμιαίος μείζονος-ελάσσονος πολυγώνου, **TC:** παλαμιαίος μείζονος πολυγώνου-κεφαλωτού, **CH:** παλαμιαίος κεφαλωτό-αγκιστρωτός, **RA:** κερκιδική αρτηρία, **AIA:** πρόσθια μεσόστεη αρτηρία.

Ενδογενείς Παλαμιαίοι Σύνδεσμοι [11]

α. Παλαμιαίοι Μεσοκαρπικοί Σύνδεσμοι

Οι τέσσερις παλαμιαίοι ενδοκαρπικοί σύνδεσμοι ξεκινούν από το σκαφοειδές και το πυραμοειδές προς τον περιφερικό στοίχο. Δεν υπάρχει άμεση διασύνδεση του μηνοειδούς με τον περιφερικό στοίχο.

Ξεκινώντας κερκιδικά ο σκαφο-μείζονος-ελάσσονος-πολυγωνικός (STT) σύνδεσμος εξορμά από το κερκιδικό και ωλένιο χείλος του περιφερικού πόλου του σκαφοειδούς. Οι ίνες μεταξύ σκαφοειδούς και μείζονος πολυγώνου δημιουργούν μια δομή τύπου «V» με την κορυφή κεντρικά και περιφερική πρόσφυση στον παλαμιαίο και κερκιδικό φλοιό του μείζονος πολυγώνου. Η σκαφο-ελάσσονος-πολυγωνική δέσμη είναι ευθεία από τον ωλένιο φλοιό του σκαφοειδούς στην παλαμιαία επιφάνεια του ελάσσονος πολυγώνου.

Ο σκάφο-κεφαλωτός (SC) σύνδεσμος ξεκινά από τον περιφερικό πόλο του σκαφοειδούς και περνά λοξά με ωλένια φορά στην παλαμιαία επιφάνεια του σώματος του κεφαλωτού (εικόνα

1). Οι ίνες του είναι παράλληλες με τις ίνες του κερκίδο-σκαφο-κεφαλωτού συνδέσμου. Δίνεται έτσι η ψευδής εντύπωση ότι ο κερκίδο-σκαφο-κεφαλωτός καταφύεται ισχυρά στο κεφαλωτό.

Ο *πυραμοκεφαλωτός (TC)* σύνδεσμος ξεκινά από την περιφερική και κερκιδική γωνία του πυραμοειδούς προς την ωλένια πλευρά του σώματος του κεφαλωτού.

Ο *πυραμοαγκιστρωτός (TH)* σύνδεσμος ξεκινά ακριβώς δίπλα και ωλένια από τον προηγούμενο και περνά περιφερικά στο σώμα του αγκιστρωτού.

Ενδογενείς σύνδεσμοι με ραχιαία και παλαμιαία μοίρα [11]

α. Μεσόστεοι Σύνδεσμοι του Περιφερικού Στόιχου

Υπάρχουν τρία συστήματα μεσόστεων συνδέσμων που ενώνουν το μείζον, το έλασσον, το κεφαλωτό και το αγκιστρωτό. Κάθε σύνδεσμος έχει τουλάχιστον παλαμιαίο και ραχιαίο τμήμα που δημιουργούν έναν περίπου συνεχές εγκάρσιο σύνδεσμο.

Η ραχιαία και η παλαμιαία μοίρα του *Μείζονος-Ελάσσωνος Πολυγωνικού* καλύπτουν όλο το μήκος της άρθρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και με τον *Κέφαλο-Ελάσσων-Πολυγωνικό*, αλλά λόγω της κεντρικής επέκτασης του αυχένα και κεφαλής του κεφαλωτού, οι σύνδεσμοι εισέρχονται μόνο στο σώμα του. Ο *Κεφαλο-Αγκιστρωτός* σύνδεσμος ακολουθούν παρόμοια διαδρομή λόγω του σχήματος του κεφαλωτού.

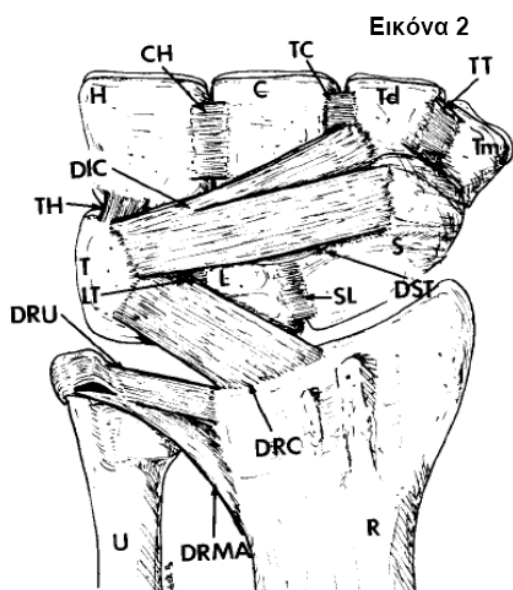
β. Μεσόστεοι Σύνδεσμοι του Εγγύ Στόιχου

Δύο είναι οι μεσόστεοι σύνδεσμοι του κεντρικού στόιχου: ο *σκαφομνηνοειδής (SL)* κι ο *μνηνοπυραμοειδής (LT)*. Οι σύνδεσμοι αυτοί καλύπτουν το παλαμιαίο, ραχιαίο και κεντρικό τμήμα των αντίστοιχων αρθρώσεων αφήνοντας το περιφερικό τους τμήμα ελεύθερο να επικοινωνεί με την μεσοκαρπική άρθρωση. Και οι δύο τους έχουν ιστολογικά στοιχεία που δικαιολογούν το χωρισμό τους σε ραχιαίο, κεντρικό και παλαμιαίο τμήμα και βρίσκονται βαθιά μέσα στην άρθρωση εντελώς χωριστοί και πλήρως καλυμμένοι από τον θύλακα. Το ραχιαίο τμήμα του σκαφομνηνοειδούς είναι το παχύτερο και αποτελεί ένα αληθή σύνδεσμο με εγκάρσιες ίνες κολλαγόνου. Το παλαμιαίο τμήμα είναι επίσης αληθής σύνδεσμος όμως είναι λεπτός με λοξό προσανατολισμό ινών παλαμιαία προς ραχιαία και από το σκαφοειδές προς το μνηνοειδές. Είναι εντελώς ανεξάρτητος από τον επιφανειακό μακρό κερκίδομνηνοειδή σύνδεσμο. Το κεντρικό του τμήμα αποτελείται από ινώδη χόνδρο χωρίς προσανατολισμό του κολλαγόνου, αγγεία ή νεύρα. Το παλαμιαίο τμήμα του μνηνοπυραμοειδούς συνδέσμου είναι το παχύτερο και συνιστά τον αληθή σύνδεσμο. Αποτελείται από εγκάρσιες ίνες που διαπλέκονται με ίνες του ωλένιο-κεφαλωτού συνδέσμου. Το ραχιαίο τμήμα επίσης είναι αληθής σύνδεσμος, όμως είναι λεπτότερο από το παλαμιαίο τμήμα με ίνες το ίδιο εγκάρσιες στην μνηνοπυραμοειδή άρθρωση και καλύπτεται από τον ραχιαίο κερκίδοκαρπικό σύνδεσμο.

Το κεντρικό του τμήμα είναι ινοχόνδρινο χωρίς προσανατολισμό, αγγεία και νεύρα. Ραχιαία των περιφερικών ορίων του σκαφοειδούς, μηνοειδούς και πυραμοειδούς υπάρχει σκαφοπυραμοειδής σύνδεσμος. Αυτός ουσιαστικά είναι μια επέκταση του σκαφομηνοειδούς και μηνοπυραμοειδούς συνδέσμου και φέρεται σαν χείλος στη ραχιαία πλευρά της μεσοκαρπικής άρθρωσης.

Ραχιαίοι Εξωγενείς και Ενδογενείς Σύνδεσμοι [11]

Ο ραχιαίος θύλακας του καρπού ενισχύεται όπως θα δούμε και παρακάτω από δύο συνδέσμους, έναν εξωγενή και έναν ενδογενή, που ενώνουν την πηγεοκαρπική και τις ενδοκαρπικές αρθρώσεις. Στα σημεία που δεν ενισχύεται ο ραχιαίος θύλακος είναι εξαιρετικά ελαστικός. Ο ραχιαίος κερκιδοκαρπικός (DRC) σύνδεσμος ξεκινά στο ραχιαίο όριο της περιφερικής κερκίδας και από τη σιγμοειδή εντομή έως το φύμα του Lister. Κατευθύνεται περιφερικά και ωλένια με λοξή διαδρομή προς τους ραχιαίους φλοιούς του μηνοειδούς και του πυραμοειδούς. Ο ραχιαίος ενδοκαρπικός σύνδεσμος (DIC) ξεκινά από το ραχιαίο φύμα του πυραμοειδούς και κατευθύνεται κερκιδικά με δύο δέσμες. Η κεντρική δέσμη καταλήγει στη ραχιαία ακρολοφία και στη κερκιδική πλευρά του περιφερικού πόλου του σκαφοειδούς ενώ η περιφερική δέσμη προσφύεται στο ραχιαίο φλοιό του ελάσσονος πολυγώνου. Ο DRC και ο DIC αλλάζουν τον σχετικό τους προσανατολισμό κατά την κάμψη και έκταση του καρπού έτσι ώστε η γωνία μεταξύ τους και του πυραμοειδούς να είναι οξεία σε έκταση και σχεδόν ορθογώνια σε κάμψη του καρπού. Με αυτό τον τρόπο το σκαφοειδές σταθεροποιείται έμμεσα στην κερκίδα (σε αντίθεση με ένα σύστημα άμεσης σύνδεσης) και έτσι διατηρείται η κινητικότητά του χωρίς περιορισμούς.



Ραχιαία επιφάνεια του καρπού.

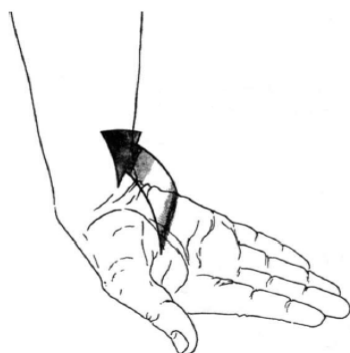
R: κερκίδα, **U:** ωλένη, **S:** σκαφοειδές, **L:** μηνοειδές, **T:** πυραμοειδές, **P:** πισοειδές, **Tm:** μείζον πολύγωνο, **Td:** ελάσσον πολύγωνο, **C:** κεφαλωτό, **H:** αγκιστρωτό, **DRMA:** ραχιαίος τοξοειδής μετάφυσης κερκίδας, **DRC:** ραχιαίος κερκιδοκαρπικός, **DIC:** ραχιαίος ενδοκαρπικός, **SL:** ραχιαίος σκαφομηνοειδής, **LT:** ραχιαίος μηνοπυραμοειδής, **TH:** ραχιαίος πυραμοειδο-αγκιστρωτός, **TT:** ραχιαίος μείζονο-ελάσσονο πολυγωνικός, **TC:** ραχιαίος ελάσσονος πολυγώνου κεφαλωτού, **CH:** ραχιαίος κεφαλωτό-αγκιστρωτός σύνδεσμος.

2.2 Η Κινηματική του Καρπού

2.2.1 Οι κινήσεις του καρπού

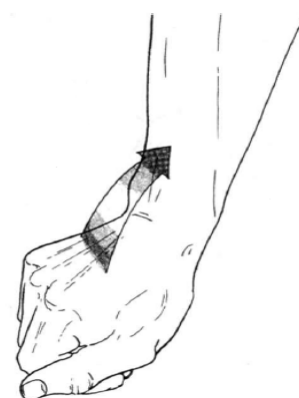
Το άκρο χέρι αποτελεί ένα από τα πιο ευέλικτα μέρη του σώματος. Στην καθημερινή ζωή γινόμαστε μάρτυρες της πολυπλοκότητας και της αξίας των κινήσεων του χεριού για τον άνθρωπο. Ένας βασικός παράγοντας που εξυπηρετεί στην κίνηση του χεριού είναι η κίνηση του καρπού. Ο καρπός εκτελεί τέσσερις βασικές κινήσεις: κάμψη, έκταση, απαγωγή και προσαγωγή. Κάθε άλλη κίνηση του καρπού αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω κινήσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι κινήσεις της κάμψης και έκτασης του καρπού έχουν περίπου το ίδιο εύρος κίνησης αν και εκτελούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. [24]

Χαρακτηριστικά:



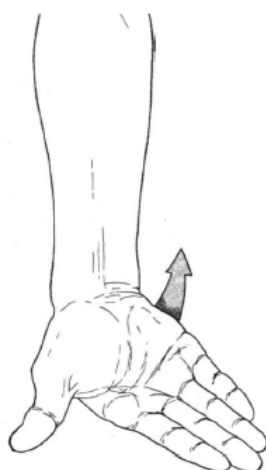
Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, κατά την κάμψη του καρπού, η παλάμη κινείται πιο κοντά στην πρόσθια επιφάνεια του αντιβραχίου.

Αντίθετα, κατά την έκταση (δεξιά εικόνα), η ραχιαία επιφάνεια του χεριού κινείται προς την οπίσθια επιφάνεια του αντιβραχίου.



Στην περίπτωση της απαγωγής και της προσαγωγής δεν ισχύει το ίδιο πράγμα. Το εύρος της κίνησης για την προσαγωγή είναι μεγαλύτερο από εκείνο της απαγωγής.

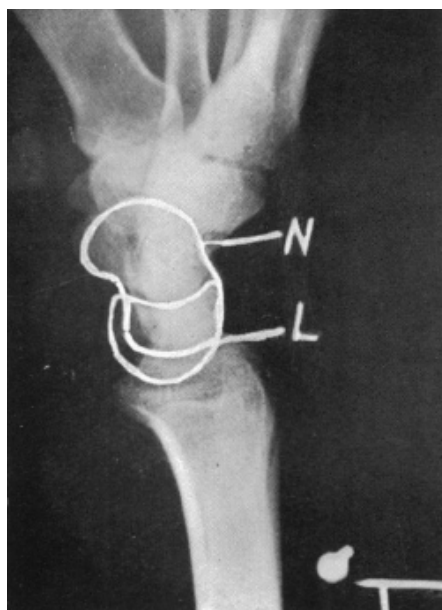
Στην απαγωγή (ή κερκιδική απόκλιση), η γωνία που σχηματίζεται από το εσωτερικό πλευρικό σύνορο του χεριού και το αντιβράχιο μειώνεται, με άλλα λόγια, ο αντίχειρας κινείται πιο κοντά προς την κερκίδα όπως φαίνεται στην εικόνα δεξιά.



Ενώ τέλος στην προσαγωγή (ή απόκλιση προς την ωλένη), η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του εξωτερικού πλευρικού συνόρου και του αντιβράχιου μειώνεται, δηλαδή, το μικρό δάχτυλο του χεριού προσεγγίζει την ωλένη όπως φαίνεται στην αριστερή εικόνα.

2.2.2 Η κινηματική του καρπού

Τα τέσσερα είδη κινήσεων του καρπού που περιγράψαμε παραπάνω προκύπτουν από τις μετατοπίσεις αλλά και τις περιστροφές των καρπικών οστών σε συνδυασμό με τους συνδέσμους. Αρχικά θα παρουσιάσουμε την θέση των καρπικών οστών σε κατάσταση ηρεμίας (normal resting) και στη συνέχεια θα επισημάνουμε τις μετατοπίσεις των οστών κατά την προσαγωγή, την απαγωγή, την κάμψη, την έκταση και την εξαναγκασμένη έκταση. [13]



Σε κατάσταση ηρεμίας, η άνω (περιφερική) επιφάνεια του μηννοειδούς, που βρίσκεται απέναντι από το πυραμοειδές, βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τα οστά του αντιβράχιου ενώ το σκαφοειδές βρίσκεται με το διαμήκη άξονα του στραμμένο κατά 30° σε σχέση με το στεφανιαίο επίπεδο του αντιβράχιου, όπως φαίνεται στην δίπλα εικόνα (όπου N-σκαφοειδές, L-μηννοειδές). Η θέση του σκαφοειδούς είναι τέτοια έτσι ώστε το πρόσθιο τμήμα του άνω άκρου του να βρίσκεται ακριβώς μπροστά από το «κεφάλι» του κεφαλωτού οστού. Το μικρό και το μεγάλο πολύγωνο βρίσκονται πάνω στο άνω κεντρικό τμήμα του

σκαφοειδούς. Τέλος, το κεφαλωτό και το αγκιστρωτό οστό είναι ευθυγραμμισμένα με τα μετακάρπια οστά με το κεφαλωτό να κλίνει ραχιαία σε σχέση με το μηνοειδές και το αγκιστρωτό να έχει τον άξονα του παράλληλο προς το κεφαλωτό.

Είναι χαρακτηριστικό ότι ακόμη και σε κατάσταση ηρεμίας η θέση των οστών του περιφερικού στίχου μπορεί να τροποποιηθεί με τις κινήσεις του αντίχειρα. Σε περίπτωση έκτασης του αντίχειρα, το μείζων πολύγωνο κινείται προς την κερκίδα προς το ελάσσων πολύγωνο ενώ σε κάμψη του αντίχειρα το μείζων πολύγωνο περιστρέφεται γύρω από το πάνω άκρο του σκαφοειδούς. Αντίστοιχα, στην απαγωγή (κερκιδική απόκλιση) του αντίχειρα, η μικρή κίνηση του μείζονος πολυγώνου προσαυξάνεται κατά 10° λόγω της παλαμιαίας κάμψης του σκαφοειδούς.



Η ωλένια απόκλιση (προσαγωγή) είναι ουσιαστικά μια κίνηση ολίσθησης του περιφερικού στίχου των καρπικών οστών πάνω στις κερκιδικές επιφάνειες των ραχιαίων συνδέσμων. Το κέντρο αυτής της κίνησης εντοπίζεται στο μέσο του κεφαλωτού οστού και η τροχιά της κίνησης ακολουθεί το τόξο που σχηματίζεται από τις εγγύς επιφάνειες του εγγύς καρπικού στίχου. Η γωνία αυτής της κίνησης είναι περίπου 26° αν και σε πλήρη ωλένια απόκλιση το κεφαλωτό μπορεί να σχηματίσει μέχρι και 32° γωνία με το αντιβράχιο. Η διαφορά των 6° προκύπτει από την κίνηση των καρπιαίων

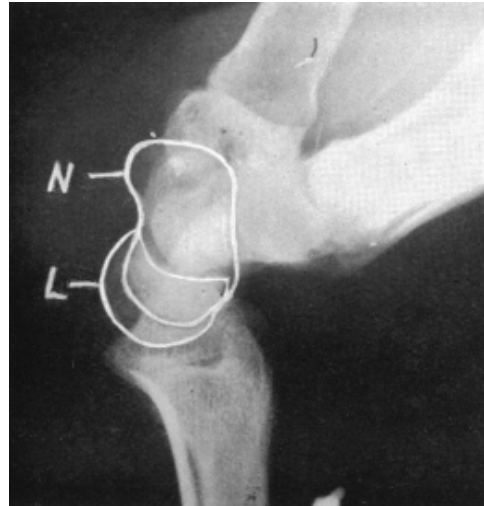
οστών του περιφερικού στίχου. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το αγκιστρωτό είναι στενά συνδεδεμένο με το κεφαλωτό εκτελεί παράλληλη κίνηση με αυτό με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή με το μηνοειδές. Ουσιαστικά δηλαδή, το αγκιστρωτό παίζει το ρόλο της σφήνας μεταξύ των δύο οστών και δεδομένου ότι το μηνοειδές έχει «ξαπλώσει» πάνω στην ωλένια πλευρά της κερκίδας το αγκιστρωτό σπρώχνει το σκαφοειδές με αποτέλεσμα την μετατόπιση του κατά 5mm αυξάνοντας έτσι τη μετατόπιση του κεφαλωτού.

Η κερκιδική απόκλιση (απαγωγή) είναι εξολοκλήρου αποτέλεσμα της κίνησης του περιφερικού στίχου προς την κερκίδα. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας της κίνησης εντοπίζεται προσθοπίσθια του κέντρου της κεφαλής του κεφαλωτού οστού. Καθώς το αγκιστρωτό απομακρύνεται περιφερικά από το μηννοειδές επιτρέπει την περεταίρω προσέγγιση του κεφαλωτού από το πυραμοειδές. Ταυτόχρονα, τα δύο πολύγωνα μετακινούνται κατά 3-5 mm προς την κερκίδα πάνω στην εξωτερική πλευρά του σκαφοειδούς οστού. Το σκαφοειδές παρουσιάζει μια ελαφρά παλαμιαία στροφή του διαμήκη άξονα του προς την παλάμη με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με την κίνηση του αγκιστρωτού, να υπάρξει συνολική μετακίνηση κατά 8mm των καρπιαίων οστών. Η συνολική γωνία μεταξύ του 3ου μετακαρπίου και του αντιβράχιου είναι περίπου 22°.



Η κάμψη του καρπού προκύπτει ως συνδυασμός της κίνησης του κερκιδοκαρπικού και μεσοκαρπικού συνδέσμου. Το μηννοειδές και το πυραμοειδές κάμπτονται κατά 30°, έτσι ώστε η εξωτερική επιφάνεια του μηννοειδούς να έχει άνω παλαμιαία διεύθυνση. Το σκαφοειδές κινείται ακόμα πιο έντονα παλαμιαία πάνω στο μηννοειδές έτσι ώστε η περιφερική πτυχή της εγγύς πλευράς του να λειτουργήσει ως υποδοχή του σφαιρικού τμήματος του κεφαλωτού οστού. Το ίδιο το κεφαλωτό μαζί με το αγκιστρωτό και το ελάσσωον πολύγωνα κάμπτονται κατά 50° με αποτέλεσμα τα δύο πολύγωνα να βρεθούν απέναντι από την περιφερική πτυχή του σκαφοειδούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάμψη είναι στο μεγαλύτερο μέρος της κίνησης της μεσοκαρπικής άρθρωσης και όχι της κερκιδοκαρπικής με αποτέλεσμα να επηρεάζεται πολύ πιο έντονα από τραυματισμούς της άρθρωσης αυτής.

Τέλος, η έκταση είναι επίσης μια σύνθετη κίνηση. Στην κερκιδοκαρπική άρθρωση, το μηνοειδές και το πυραμοειδές μετακινούνται κατά 28° μέχρις ότου βρεθούν αντικριστά. Το σκαφοειδές κινείται πάλι πάνω στο πυραμοειδές μέχρι να ευθυγραμμιστεί ο διαμήκης άξονας του με αυτόν του αντιβράχιου, όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Το όριο στην κίνηση του σκαφοειδούς ορίζεται από τη διάταξη που σχηματίζουν ο κερκιδοκαρπικός σύνδεσμος και η σύνδεση του τένοντα με τον καμπτήρα μυ. Ο περιφερικός



στίχος των οστών στρέφεται κατά 16° εγκάρσια με βάση τον άξονα που περνά από το κέντρο του κεφαλιού του κεφαλωτού οστού. Η παλαμιαία επιφάνεια για την υποδοχή του κεφαλωτού σχηματίζεται από τον σύνδεσμο που ενώνει το πυραμοειδές και το αγκιστρωτό και την περιφερική πλευρά της κεκλιμένου μηνοειδούς οστού. Όταν η κίνηση αυτή ολοκληρωθεί, το πιο ακραίο σημείο του καρπού είναι το capitellum του σκαφοειδούς μαζί με το άγκιστρο του αγκιστρωτού. Είναι χαρακτηριστικό λοιπόν ότι πέφτοντας από το ύψος του σώματος με τέτοιο τρόπο ώστε να επέλθει αναγκαστική περαιτέρω έκταση σε ένα ήδη εκτεταμένο χέρι, το φορτίο περνά απευθείας στο σκαφοειδές οστό. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον τρόπο τραυματισμού του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου, όπως θα δούμε παρακάτω.

3

Ο Σκαφομηνοειδής Σύνδεσμος

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλύσουμε τη δομή και τη λειτουργία του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου. Αρχικά, θα παραθέσουμε ορισμένα ανατομικά στοιχεία για τις τρεις μοίρες του συνδέσμου ενώ στη συνέχεια θα αναλύσουμε το ρόλο που επιτελεί ο σύνδεσμος αυτός στην κίνηση του καρπού. Τέλος, θα επιχειρήσουμε ορισμένα συμπεράσματα με στόχο να προσδιορίσουμε τις απαιτήσεις για το τεχνητό ορθοπεδικό ανάλογο.

3.1 Η Δομή του Συνδέσμου

Ο σύνδεσμος απαρτίζεται από τρεις μοίρες που διαχωρίζονται με βάση ιστολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά. Η ραχιαία και η παλαμιαία μοίρα συντίθενται ιστολογικά από αληθείς ενδοθυλακικούς συνδέσμους ενώ η εγγύς μοίρα αποτελείται από ινοχόνδρινο ιστό συνδυσασμένο με μικρό αριθμό ινών κολλαγόνου. [12]

3.1.1 Η ραχιαία μοίρα

Η ραχιαία μοίρα του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου βρίσκεται μεταξύ του περιφερικού ραχιαίου άκρου του μηνοειδούς και του ωλένιου ραχιαίου άκρου του εγγύς πόλου του σκαφοειδούς. Έχει πάχος κατά μέσο όρο 3mm και πλάτος 5mm κοντά στον εγγύς πόλο. Σε εγκάρσια διατομή, το σχήμα της είναι τραπεζοειδές λόγω της προοδευτικής μείωσης του μήκους των ινών από τη ραχιαία στην παλαμιαία επιφάνεια.

Η ραχιαία περιοχή της μοίρας είναι συνδεδεμένη με το θύλακα του ραχιαίου κερκιδοκαρπικού συνδέσμου, μια σύνδεση που καλύπτει ουσιαστικά το μισό με τρία τέταρτα του συνδέσμου. Περιφερικά, η ραχιαία μοίρα συγχωνεύεται με τον ραχιαίο

σκαφοπυραμοειδή σύνδεσμο και συχνά εμφανίζεται ως τμήμα του ραχιαίου μεσοκαρπικού συνδέσμου.

Αντίθετα, το κεντρικό τμήμα της συνενώνεται με την εγγύς μοίρα του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου. Η μετάβαση χαρακτηρίζεται κυρίως σαν αλλαγή στη δομή του ιστού: από την καθορισμένη διάταξη των τεταμένων εγκάρσια προσανατολισμένων ινών κολλαγόνου της ραχιαίας μοίρας στην ελαστική και συχνά χαλαρή συνοχή των ινών της εγγύς μοίρας.

Ιστολογικά Χαρακτηριστικά

Η ραχιαία μοίρα του SLI συνδέσμου απαρτίζεται από δέσμες κολλαγόνου που περιβάλλονται από χαλαρό συνδετικό ιστό. Ο ιστός αυτός περιέχει φλεβίδια, αρτηρίδια και νευρικές ίνες.

Η εξωτερική επιφάνεια της ραχιαίας περιοχής αποτελείται από ίνες κολλαγόνου διατεταγμένες σε επίπεδα, με προσανατολισμό που κυμαίνεται από εφαπτόμενο ως και κάθετο στο κύριο σώμα του συνδέσμου. Τα επίπεδα που βρίσκονται εφαπτόμενα στις ίνες του κυρίως συνδέσμου συγχωνεύονται περιφερειακά με τις ίνες του σκαφοπυραμοειδούς συνδέσμου.

3.1.2 Η παλαμιαία μοίρα

Η παλαμιαία μοίρα του συνδέσμου είναι μια αρκετά λεπτή περιοχή του συνδέσμου (συχνά μικρότερη σε πάχος από 1mm) που καταδύεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής σύνδεσης του σκαφομνηνοειδούς και του κερκιδοσκαφομνηνοειδούς συνδέσμου. Η μοίρα αυτή είναι διακριτή με γυμνό μάτι και χαρακτηρίζεται από ίνες κολλαγόνου με πλάγιο προσανατολισμό, από εγγύς και ωλένια προς περιφερικά και κερκιδικά.

Οι ίνες της παλαμιαίας περιοχής καταλήγουν στην κερκιδική επιφάνεια του μνηνοειδούς οστού κατά μήκος μιας γραμμής, ακριβώς ραχιαία της σύνδεσης του μακρού κερκιδομνηνοειδούς συνδέσμου και παλαμιαία του αρθρικού χόνδρου που βρίσκεται απέναντι από το σκαφοειδές.

Περιφερειακά, είναι πιθανό να υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ της παλαμιαίας μοίρας και του κερκιδοσκαφοκεφαλωτού συνδέσμου καθώς ο τελευταίος περνά γύρω από το παλαμιαίο άκρο του μνηνοειδούς. Συχνά, η ραχιαία επιφάνεια της παλαμιαίας μοίρας του συνδέσμου «κρύβεται» πίσω από μια περιφερική επέκταση του κερκιδο-σκαφο-μνηνοειδούς (RSL) συνδέσμου. Η επέκταση αυτή ουσιαστικά είναι ένα λεπτό υμένιο από ίνες κολλαγόνου που αποκλίνουν από τον κυρίως κερκιδο-σκαφο-μνηνοειδή σύνδεσμο και καταλήγουν στην παλαμιαία επιφάνεια του εγγύς πόλου του σκαφοειδούς και στην παλαμιαία επιφάνεια του μνηνοειδούς οστού, ακριβώς ραχιαία του ακραίου περιφερικού σημείου σύνδεσης του βραχύ κερκιδομνηνοειδούς συνδέσμου. Το πρόβλημα που προκύπτει λοιπόν είναι ότι δεν μπορούμε

να παρατηρήσουμε την παλαμιαία μοίρα στο σύνολο της διατηρώντας άθικτο τον κερκιδοσκαφομνηοειδή σύνδεσμο.

Ιστολογικά Χαρακτηριστικά

Όπως και στην περίπτωση της ραχιαίας μοίρας, η παλαμιαία μοίρα αποτελείται από ίνες κολλαγόνου οργανωμένες σε δέσμες με εξωθυλακικούς χώρους μέσα στους οποίους βρίσκονται νευρικές ίνες και αιμοφόρα αγγεία. Ο χαλαρός αυτός συνδετικός ιστός είναι εκείνος που διαχωρίζει την παλαμιαία από την εγγύς μοίρα και τον μακρύ κερκιδομνηοειδή σύνδεσμο.

3.1.3 Η εγγύς μοίρα

Η εγγύς μοίρα, σε αντίθεση με τη ραχιαία, παρουσιάζει μια εύπλαστη συνοχή και υψηλό ποσοστό ανισοτροπίας. Εδώ, εμφανίζονται συχνότερα φαινόμενα υποβάθμισης του ιστού, ιδιαίτερα προς το κέντρο της μοίρας. Είναι χαρακτηριστικό ότι όταν ο σκαφομνηοειδής σύνδεσμος παρουσιάζει ρήξη, η τομή είναι πιθανότερο να γίνει προς το σημείο σύνδεσης με το σκαφοειδές, αφήνοντας το σημείο σύνδεσης με το μνηοειδές άθικτο.

Παλαμιαία, η εγγύς περιοχή συγχωνεύεται με το κερκιδοσκαφομνηοειδή σύνδεσμο, ο οποίος παρακάμπει την εγγύς περιοχή του SLI συνδέσμου με κάθετα κατευθυνόμενες επιφανειακές ίνες. Σε δείγματα με σχετικά πυκνές εγγύς περιοχές, η εγγύς περιοχή προεξέχει συχνά στο σκαφομνηοειδή χώρο. Η διατομή της προεξοχής έχει σφηνοειδές σχήμα, με την κορυφή της σφήνας να εισχωρεί στον σκαφομνηοειδή χώρο, όπως ο μηνίσκος στο γόνατο. Σε αυτά τα δείγματα, είναι πιθανό να παρουσιάζεται ένα κοίλωμα παραλληλίζοντας τα σημεία σύνδεσης της μεμβρανώδους περιοχής του SLI συνδέσμου μεταξύ του αρθρικού χόνδρου των αντιμέτωπων επιφανειών του σκαφοειδούς και του μνηοειδούς και το σύνδεσμο.

Οι περιοχές σύνδεσης της μοίρας στα οστά εναρμονίζονται πλήρως με τον αρθρικό χόνδρο καθιστώντας δύσκολη την εύρεση της διαχωριστικής γραμμής μεταξύ των δύο χωρίς τη μετατόπιση των οστών.

Ιστολογικά Χαρακτηριστικά

Το βασικό ιστολογικό χαρακτηριστικό της εγγύς περιοχής είναι η παρουσία του χόνδρου. Ο χόνδρος είναι εμφανής σε όλο το μήκος της μοίρας και ιδιαίτερα κοντά στις περιοχές σύνδεσης του συνδέσμου στο σκαφοειδές και το μνηοειδές. Η επιφάνεια και το κέντρο της εγγύς περιοχής αποτελούνται από διαμήκεις ίνες κολλαγόνου. Η δομή αυτή διατρέχει όλη τη μοίρα και φτάνει μέχρι την παλαμιαία περιοχή σύνδεσης του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου με το κερκιδοσκαφομνηοειδή. Σ' αυτό το σημείο, ο χόνδρος αντικαθίσταται από χαλαρό

συνδετικό ιστό. Αυτή η ζώνη συγχώνευσης ενισχύεται από ένα στρώμα αρθρικών κυττάρων (synovocytes) και ουσιαστικά αποτελεί ένα μείγμα διαμηκών ινών κολλαγόνου και χόνδρου. Καθώς κινούμαστε προς τη ραχιαία πλευρά αυτό το στρώμα αρθρικών κυττάρων χάνεται. Η μεσοκαρπική επιφάνεια αυτής της περιοχής χαρακτηρίζεται από χαλαρό συνδετικό ιστό με μία επένδυση από ένα στρώμα αρθρικών κυττάρων. Τέλος, ο κερκιδοκαρπικός σύνδεσμος αποτελεί το διαχωριστικό μεταξύ της παλαμιαίας και της εγγύς μοίρας του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου καθώς διαχωρίζει την κερκιδοκαρπική επιφάνεια της εγγύς μοίρας από την μεσοκαρπική επιφάνεια της παλαμιαίας μοίρας του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου.

3.2 Ο Ρόλος του Σκαφομηνοειδούς Συνδέσμου στην Κίνηση του Καρπού

Η κινηματική του καρπού έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνών. Παρόλα αυτά για να κατανοήσει κανείς το ρόλο που παίζει ο σκαφομηνοειδής σύνδεσμος στην κίνηση του καρπού θα πρέπει να μελετήσει εις βάθος πολλές από αυτές. Παρακάτω θα εξετάσουμε τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των δύο οστών, σκαφοειδούς και μηνοειδούς, σε μια προσπάθεια προσέγγισης της λύσης.

3.2.1 Κατά την Περιστροφή

Μια από τις πιο χαρακτηριστικές μελέτες της περιστροφής του καρπού πραγματοποιήθηκε από τον Cyriax [3],[4]. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ αρχικά (Cyriax, 1917) θεωρούσε ότι δεν αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης καθώς πρόκειται για παθητική κίνηση και όχι για ενεργητική αργότερα ανακαλεί καταλήγοντας ότι η κίνηση αυτή υπάρχει και μπορεί να διαπιστωθεί με απλή χειραψία και περιστροφή, εφόσον ο πήχης του χεριού είναι σταθεροποιημένος. Με αυτή ακριβώς τη δοκιμή διαπίστωσε ότι η οριακή περιστροφή του καρπού κυμαίνεται από 45° έως 60°.

Το πείραμα του Cyriax παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από εμβιομηχανική άποψη καθώς πραγματοποίησε μια σειρά μετρήσεων τόσο σε νεκρά όσο και ζωντανά χέρια διαπιστώνοντας ότι η περιστροφική κίνηση σε ένα ποσοστό της μπορεί να είναι συνοδευτική μιας ενεργητικής κίνησης του πήχη.

Για να αποδείξει τον ισχυρισμό του στερέωσε τα νεκρά χέρια σε δύο συνεχόμενες πλάκες που απείχαν 3,8 cm και στη συνέχεια περιέστρεψε περί τον οριζόντιο άξονα την πλάκα στην οποία στερεώθηκε ο πήχης. Στη συνέχεια στερεώνοντας βελόνες σε καθένα από τα καρπιαία οστά μέτρησε την περιστροφή του καθενός από αυτά όταν η σχετική περιστροφή των δύο

πλακών έφτανε στο όριο από πλευράς φυσιολογίας του χεριού προς την μία και την άλλη κατεύθυνση περιστροφής.

Τα αποτελέσματα που αναφέρει και τα αντίστοιχα σχόλιά του είναι σημαντικά ακόμη και σήμερα. Αρχικά, σημειώνει ότι το μέγεθος της συνολικής περιστροφής του καρπού παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ νεκρών και ζωντανών χεριών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των νεκρών χεριών στα κομμένα χέρια η τιμή κυμαίνεται από 18° έως 29° από την κατακόρυφο με μέση τιμή τις 24,5° ενώ στα συνδεδεμένα νεκρά χέρια από 11° έως 29° με μέση τιμή 19°. Τέλος, στα ζωντανά χέρια, με τη μέθοδο της χειραψίας, η τιμή φτάνει κοντά στις 45°, πολύ πάνω από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.

Σε ότι αφορά στα επιμέρους οστά, οι σχετικές περιστροφές τους αντιστοιχούν σε διαφορετικά ποσοστά της συνολικής ως εξής:

Σκαφοειδές	54,55%	Μείζον Πολύγωνο	88.9%
Μηνοειδές	55,50%	Ελάσσον Πολύγωνο	89.8%
Πυραμοειδές	72,00%	Κεφαλωτό	87.5%
Πισσοειδές	72,00%	Αγκιστρωτό	92.2%

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως ο ίδιος εκτιμούσε ότι η διαφορά περίπου 10% για τα 4 τελευταία οστά από τη συνολική περιστροφή (100%) οφείλεται στη σχετική περιστροφή τους ως προς τα μετακάρπια οστά.

Τέλος, σε ότι αφορά στη σημαντική διαφορά μεταξύ της δυνατότητας συνολικής περιστροφής νεκρών και ζωντανών χεριών, αυτή σε μεγάλο βαθμό οφείλεται σε κινήσεις σχετικής ολίσθησης που γίνονται στα δύο άκρα (κεφαλή και βάση) των μετακαρπίων, οι οποίες δεν μπορούν να εμποδιστούν στην περίπτωση της δοκιμής χειραψίας που εφαρμόστηκε στα ζωντανά χέρια. Για το λόγο αυτό ελευθέρωσε τις βάσεις των μετακαρπίων και στις νέες δοκιμές παρατήρησε ότι η περιστροφή του καρπού σχεδόν διπλασιάστηκε. Από την αύξηση αυτή επηρεάστηκαν σημαντικά (έως και 80%) το πυραμοειδές, το πισσοειδές και το αγκιστρωτό αλλά πολύ λιγότερο τα υπόλοιπα οστά (περίπου 5%).

Από σχετικές ακτινογραφίες διαπίστωσε ότι σε καμιά περίπτωση δεν ήταν δυνατόν να ακινητοποιηθούν πλήρως η κερκίδα και η ωλένη. Σε ότι αφορά στα καρπιαία οστά, μεγαλύτερη μεταβολή θέσης παρουσίασαν το σκαφοειδές και το πισσοειδές.

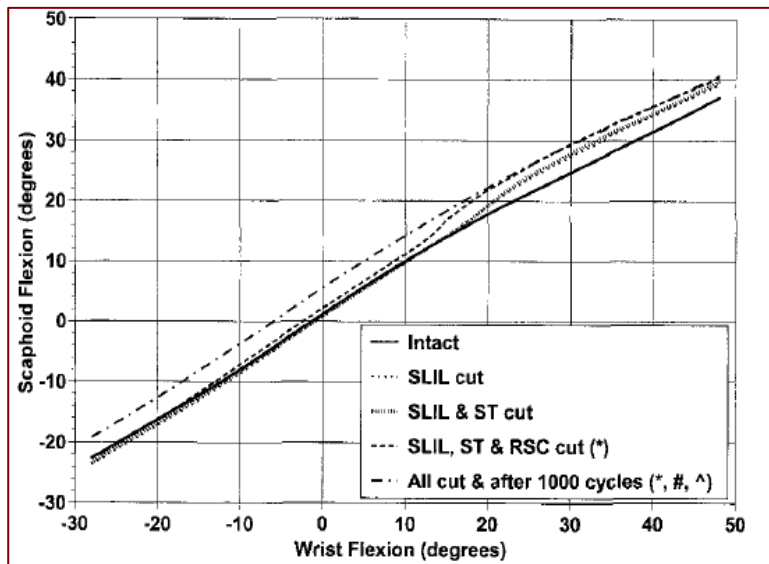
3.2.2 Κατά τις Υπόλοιπες Κινήσεις του Καρπού

Μια άλλη μελέτη το 2002, αρκετά χρόνια μετά από αυτή του Cygias, πραγματοποιήθηκε από τον Short και τους συνεργάτες του [5] με σκοπό να προσδιορίσει το ρόλο που επιτελεί ο σκαφομηνοειδής σύνδεσμος κατά τις υπόλοιπες κινήσεις του καρπού (πλην της περιστροφής)

καθώς επίσης και την επίδραση που έχει η τομή κάθε συνδέσμου στην περιοχή του σκαφοειδούς και του μηνοειδούς στη συνολική κίνηση.

Κάμψη – Έκταση του Καρπού

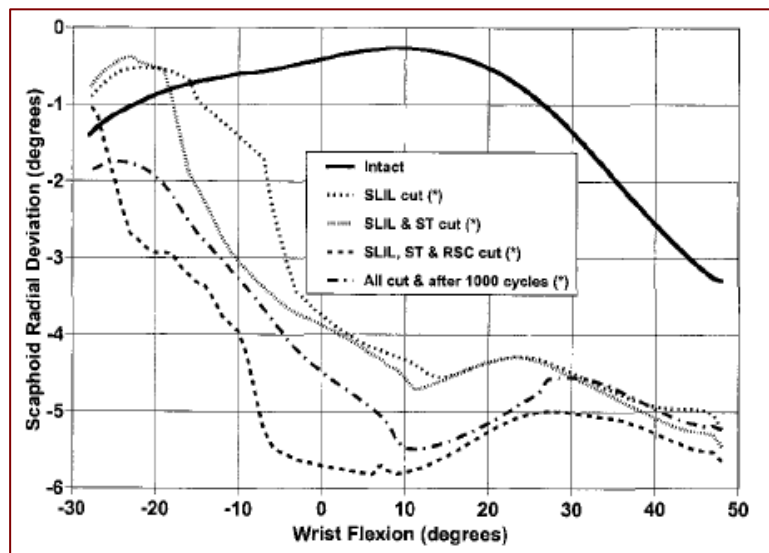
Όσον αφορά στο σκαφοειδές οστό, στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης του καρπού όταν βρίσκεται σε κάμψη και έκταση αντίστοιχα.



Ο Short σημειώνει ότι από το πρώτο διάγραμμα φαίνεται ότι σε καρπιαία κάμψη $+40^\circ$, το σκαφοειδές κλίνει $+31,5^\circ$ ενώ από το δεύτερο ότι σε καρπιαία έκταση -20° , το σκαφοειδές ακολουθεί με $-16,2^\circ$.

Κατά τις κινήσεις αυτές περιορισμένη ήταν η απόκλιση του

σκαφοειδούς, δηλαδή η περιστροφή του έγινε πρακτικά στο επίπεδο της κίνησης του καρπού.

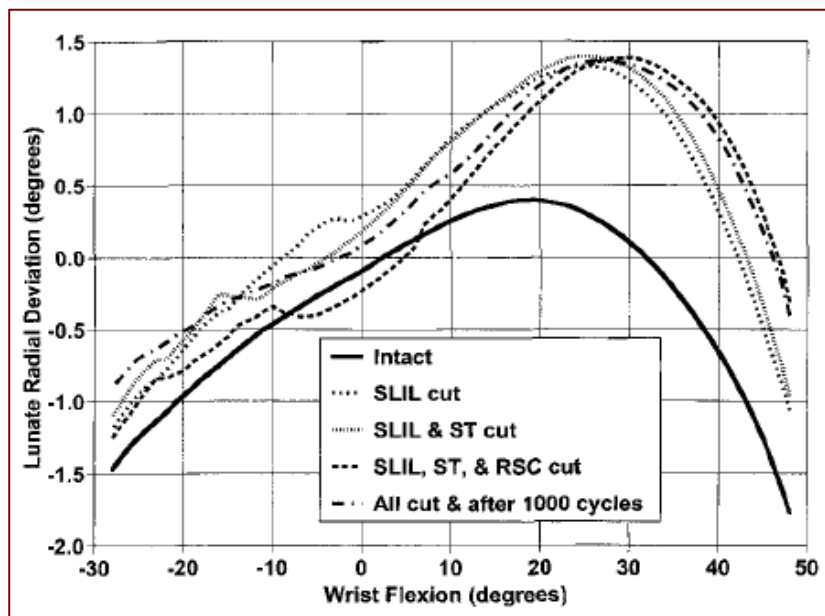
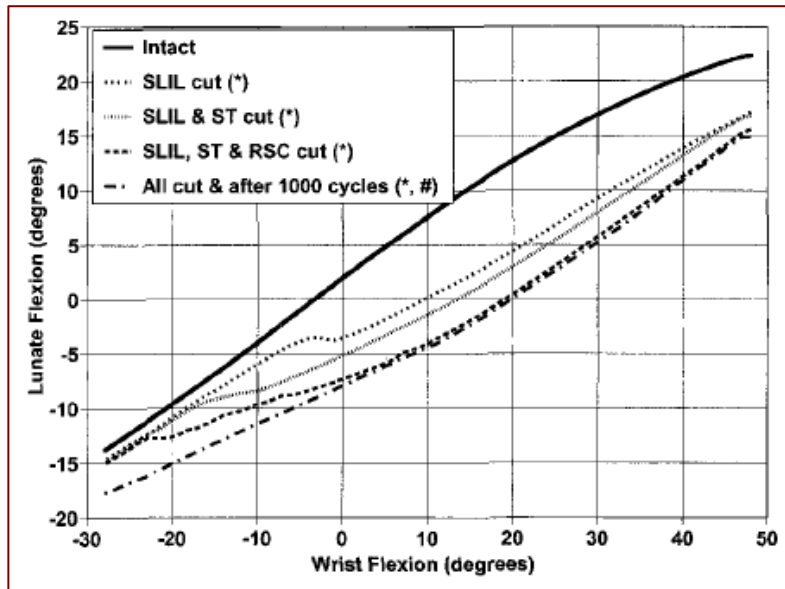


Πράγματι από το διπλανό διάγραμμα φαίνεται ότι κατά την καρπιαία κάμψη $+40^\circ$, το σκαφοειδές οστό παρουσίασε προσαγωγή (δηλαδή ωλένια απόκλιση) $-2,5^\circ$. Στο σύνολο της κάμψης και έκτασης του καρπού, ο πρητισμός (στροφή προς το εσωτερικό) και ο

υπτιασμός (στροφή προς τα έξω) του σκαφοειδούς ήταν ελάχιστα.

Αντίστοιχα, το μηννοειδές οστό εμφανίζει και αυτό γραμμική απόκριση, αλλά υπολείπεται των μετακινήσεων του καρπού περισσότερο απ' ό,τι το σκαφοειδές. Αντίστοιχα με παραπάνω, τα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν τη συμπεριφορά του μηννοειδούς όταν ο καρπός υφίσταται κάμψη και έκταση αντίστοιχα.

Χαρακτηριστικά, φαίνεται ότι σε καρπιαία κάμψη $+40^\circ$ το μηννοειδές κλίνει $+20,4^\circ$ ενώ σε καρπιαία έκταση -20° το μηννοειδές ακολουθεί με $-9,6^\circ$.



Κατά τις κινήσεις αυτές ελάχιστη ήταν τόσο η απόκλιση όσο και η στροφή του μηννοειδούς.

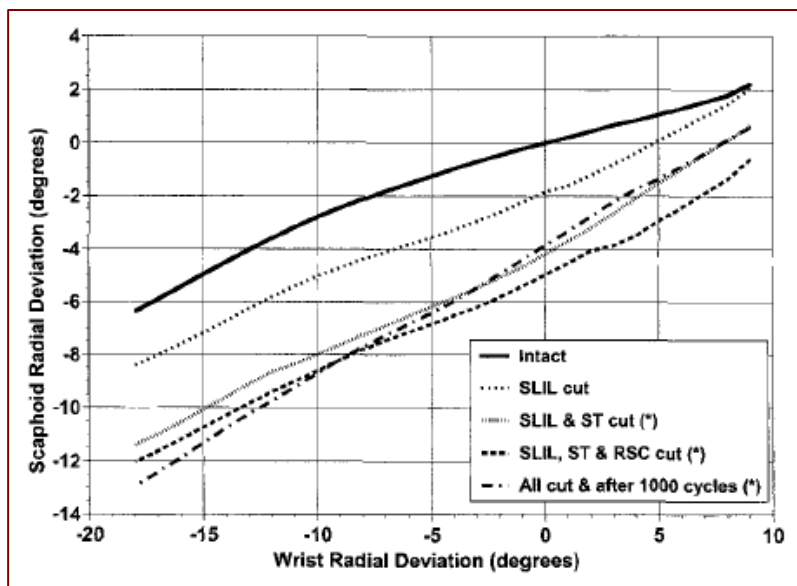
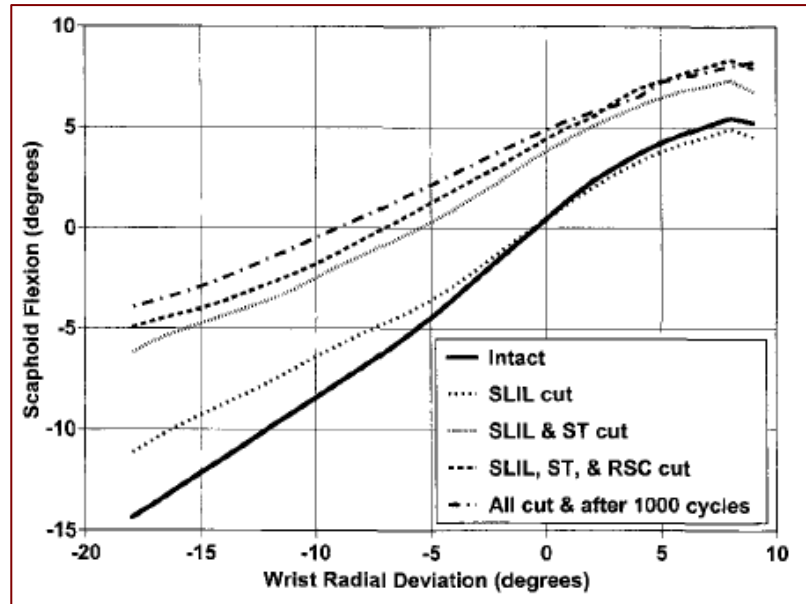
Πράγματι από τα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι κατά την καρπιαία κάμψη $+40^\circ$, το μηννοειδές οστό παρουσίασε μικρή έως αμελητέα προσαγωγή (δηλαδή

ωλένια απόκλιση) ίση με $-0,7^\circ$.

Προσαγωγή – Απαγωγή

Στα παρακάτω διαγράμματα, φαίνεται η συμπεριφορά του σκαφοειδούς κατά την καρπιαία απαγωγή, δηλαδή την απόκλιση προς την κερκίδα, και την καρπιαία προσαγωγή, δηλαδή την απόκλιση προς την ωλένη.

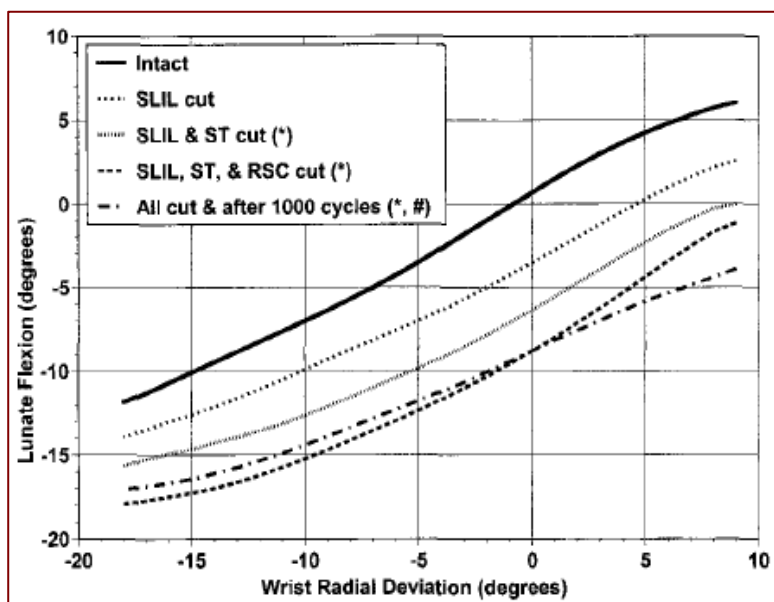
Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι κατά την καρπιαία απαγωγή κατά 9° , το σκαφοειδές έκλινε προς την παλάμη κατά $5,5^\circ$. Επίσης, κατά την καρπιαία προσαγωγή -18° έκλινε ραχιαία κατά $-14,5^\circ$.



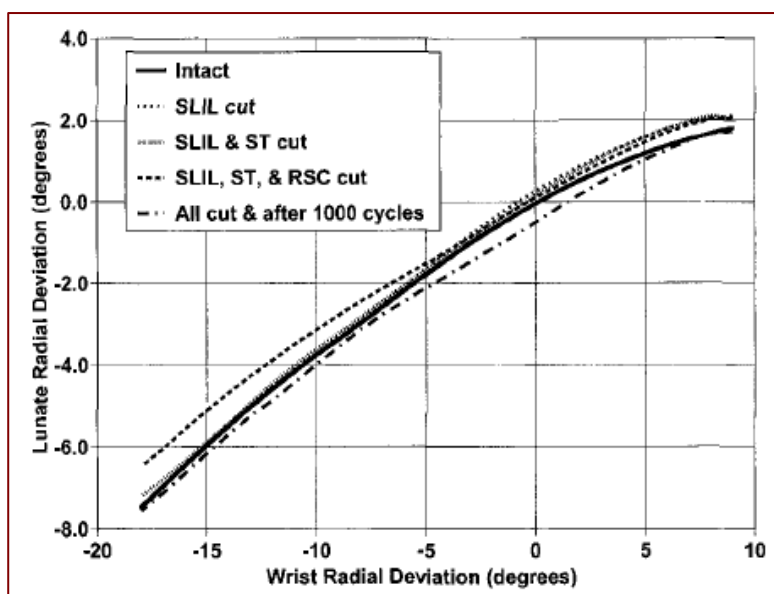
Όσον αφορά την απαγωγή και την προσαγωγή του σκαφοειδούς κατά τις εν λόγω κινήσεις από το κάτω διάγραμμα φαίνεται ότι κατά την καρπιαία κατά 9° το σκαφοειδές έκλινε προς την κερκίδα κατά $2,2^\circ$ ενώ κατά την προσαγωγή κατά -18°

το σκαφοειδές έκλινε προς την ωλένη κατά $-6,4^\circ$.

Όσον αφορά στο μηννοειδές, τα παρακάτω διαγράμματα περιγράφουν τη συμπεριφορά του μηννοειδούς κατά την απαγωγή και την προσαγωγή του καρπού.



Από το πρώτο διάγραμμα φαίνεται ότι κατά την απαγωγή (δηλαδή απόκλιση προς την κερκίδα) του καρπού κατά 5° το μηννοειδές πρήνισε (έκλινε προς τα κάτω, γύρισε μπρούμυτα) 4,1°, ενώ κατά την προσαγωγή (δηλαδή απόκλιση προς την ωλένη) -15° υπτίασε (έκλινε προς τα πάνω) κατά -10,1°.



Όσον αφορά την απαγωγή και την προσαγωγή του μηννοειδούς κατά τις εν λόγω κινήσεις από το κάτω διάγραμμα έχουμε ότι κατά την απαγωγή του καρπού κατά 5° το μηννοειδές έκλινε προς την κερκίδα κατά 1,0° ενώ κατά την προσαγωγή κατά -15° έκλινε προς την ωλένη κατά -6,0°

3.2.3 Συνέπειες Κατά την Τομή των Συνδέσμων

Για να κατανοήσει κανείς την λειτουργία των επιμέρους συνδέσμων του καρπού πρέπει να εξετάσει τις μεταβολές που προκαλεί η ρήξη του καθενός στην κίνηση του καρπού. Στη μελέτη του Short, μετά από τη διαδοχική τομή των συνδέσμων παρατηρήθηκαν μεταβολές στις ακραίες τιμές των μετατοπίσεων αλλά όχι στη μετατόπιση ως μέγεθος. Επίσης, οι

αποκλίσεις που παρουσιάζονταν δεν ήταν πάντα στατιστικά σημαντικές. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια των δοκιμών, σύμφωνα με τους ερευνητές, επέτρεπε να θεωρηθούν μεταβολές 1-2° ως στατιστικά σημαντικές.

Παρόλα αυτά η τομή του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου (SLIL) έδωσε στατιστικά σημαντικές μεταβολές που γενικά ενισχύονταν κατά την τομή και των υπόλοιπων συνδέσμων.

Από τα σχετικά διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν μερικά χρήσιμα γενικά συμπεράσματα για την επίδραση της τομής τους σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου στην κίνηση τα οποία θα φανούν χρήσιμα στον καθορισμό απαιτήσεων και ορίων του τεχνητού συνδέσμου.

Συνοπτικά, σύμφωνα με τα στοιχεία των διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

1. Κατά την κάμψη και έκταση του καρπού με την τομή του σκαφομνηνοειδούς:

- αυξάνει η κάμψη και μειώνεται η έκταση του σκαφοειδούς κατά $\sim +5^\circ$ σχεδόν ομοιόμορφα
- μειώνεται περίπου γραμμικά η κάμψη του μνηνοειδούς από $\sim -2^\circ$ έως $\sim -7^\circ$ αλλά είναι σκόπιμο να θεωρηθεί μια αντιπροσωπευτική μέση κλίση γραμμικής μεταβολής η οποία θα έδινε περίπου -11° λόγω μιας μεγαλύτερης μείωσης που μετρήθηκε περί την κεντρική περιοχή
- αυξάνει η απόκλιση του σκαφοειδούς από μηδενική διαφορά ($\sim 0^\circ$) στην ακραία τιμή της έως $\sim -2^\circ$ στην κάμψη περνώντας από ένα μέγιστο $\sim -5^\circ$ στην κεντρική περιοχή
- παραμένει πρακτικά αμετάβλητη η απόκλιση του μνηνοειδούς σε όλη τη φάση της έκτασης αυξάνοντας κατά $\sim +1^\circ$ (μέγιστο) στο μέσον της κάμψης και $\sim +0,5^\circ$ στην ακραία τιμή της

2. Κατά την απαγωγή και προσαγωγή του καρπού:

- αυξάνει γραμμικά η κάμψη του σκαφοειδούς από $\sim +10$ (μείωση έκτασης) έως $\sim +2,5^\circ$
- ελαφρά γραμμική έως ομοιόμορφη μείωση της κάμψης του μνηνοειδούς από $\sim -6,5^\circ$ (αύξηση έκτασης) έως $\sim -10^\circ$
- μειώνεται γραμμικά η απόκλιση του σκαφοειδούς από $\sim -6^\circ$ σε $\sim -3^\circ$
- παραμένει πρακτικά αμετάβλητη έως οριακά αύξηση $\sim +1^\circ$ η απόκλιση του μνηνοειδούς

Τέλος, μια πολύ χρήσιμη επισήμανση του Short ήταν ότι η απόσταση μεταξύ σκαφοειδούς και μηνοειδούς αυξάνει με την τομή των συνδέσμων και το πλήθος των κινήσεων. Χαρακτηριστικά στη μελέτη καταγράφεται ότι:

Ελάχιστη απόσταση μεταξύ σκαφοειδούς και μηνοειδούς σε mm (τυπική απόκλιση)				
Θέση καρπού	Άθικτος	Με τομή του SLIL	Με τομή των SLIL, ST,RSC	Με τομή των SLIL, ST,RSC +1000 κύκλοι κινήσεων
Max κάμψη (50°)	1,6 (0,8)	2,2 (0,8)	3,0 (1,7)	4,4 (3,8)
Max προσαγωγή (20°)	1,2 (0,6)	2,2 (2,6)	6,1 (4,5)	4,8 (4,3)

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι με βάση τις τυπικές αποκλίσεις που δίνονται, η διασπορά των μετρήσεων είναι σημαντική και ακόμη και στις καλύτερες περιπτώσεις ο συντελεστής μεταβλητότητας παραμένει σε υψηλές τιμές

$$CV = \frac{SD}{m} = \frac{0,8}{1,6} = 50\%$$

Θεωρώντας κανονικά κατανομημένες τις μετρήσεις, η ελάχιστη απόσταση στον άθικτο καρπό μπορεί να έχει μέση τιμή ίση με εκείνη που μετρήθηκε μετά την τομή του συνδέσμου SLIL, με πιθανότητα ~23%.

Η ασάφεια αυτή αυξάνει για τα επόμενα βήματα π.χ. η πιθανότητα μια ελάχιστη απόσταση 2,08mm να προκύψει σε καρπό με κομμένους και τους τρεις συνδέσμους είναι ίση με εκείνη του να προκύψει σε άθικτο καρπό (0,27).

Σε ότι αφορά στις μετρήσεις με προσαγωγή τα αποτελέσματα είναι πολύ ασαφή και δεν προσφέρονται για συμπεράσματα, όπως φαίνεται από τις μεγάλες τυπικές αποκλίσεις και συντελεστές μεταβλητότητας, π.χ.

$$CV = \frac{SD}{m} = \frac{2,6}{2,2} = 118\%$$

3.2.4 Σχολιασμός επί των Κινήσεων

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που απορρέει από τα παραπάνω στοιχεία είναι ότι τα δύο οστά στο οποία προσφύεται ο σκαφομηνοειδής σύνδεσμος αντιδρούν με παρόμοιο τρόπο στις κινήσεις του καρπού.

Επίσης από την αύξηση της ελευθερίας κινήσεων που παρατηρήθηκε μετά την τομή των συνδέσμων συμπεραίνεται ότι οι σύνδεσμοι, και ιδιαίτερα ο σκαφομνηοειδής, αναλαμβάνουν το σύνολο ή το μεγαλύτερο φορτίο για τον περιορισμό της κίνησης

Παρόλα αυτά, τα μεγέθη των μετατοπίσεων των δύο οστών είναι διαφορετικά με αποτέλεσμα στην περίπτωση συνδέσμων μεγάλης ακαμψίας (π.χ. μεταλλικές ίνες) να προκαλείται πόνος κατά την κίνηση λόγω τριβής ή και αστοχιών των ινών

Συνοπτικά, σύμφωνα με τα πορίσματα των δύο παραπάνω μελετών, συντάχθηκε ο παρακάτω πίνακας σχετικά με τις κινήσεις των δύο οστών:

Κινήσεις σκαφοειδούς & μνηοειδούς για χαρακτηριστικές κινήσεις του καρπού					
κίνηση/μέλος	περιστροφή (rotation)	κάμψη (flexion)	έκταση (extention)	απαγωγή (abduction)	προσαγωγή (adduction)
Καρπός	100,00%	40,0°	-20,0°	9,0°	-18,0°
Σκαφοειδής	54,55%	31,5°	-16,2°	2,2°	-6,4°
Μνηοειδής	55,50%	20,4°	-9,6°	1,8°(*)	-7,5°(*)
προκαλούμενη συνοδευτική κίνηση:	δεν αναφέρεται αν διαπιστώθηκε	προσαγωγή (adduction)	προσαγωγή (adduction)	πρηνισμός (pronation)	υπτιασμός (supination)
Σκαφοειδής		-2,5°	-0,9°(*)	5,5°	-14,5°
Μνηοειδής		-0,7°	-1,0°(*)	6,5°(*)	-11,8°(*)
(*) τιμές που μετρήθηκαν από τα διαγράμματα Short κ.ά.(2002)					

Για διευκόλυνση στη σαφήνεια των μεγεθών στη συνέχεια γίνονται δεκτοί οι παρακάτω ορισμοί:

- Τ: γωνία περιστροφής περί τον άξονα του πήχη,
- Θ: γωνία κάμψης ή έκτασης στο επίπεδο της καθέτου στην παλάμη και του πήχη (στην τυπική θέση είναι κατακόρυφο) από την οριζόντιο,
- Φ: γωνία απόκλισης στο επίπεδο της παλάμης (στην τυπική θέση είναι οριζόντιο) από τον πήχη

Από τον προηγούμενο πίνακα μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με τη συμπεριφορά και της απαιτήσεις της σύνδεσης των δύο οστών. Παρατηρείται:

- η διαφορική περιστροφή των δύο οστών ως προς τον άξονα του πήχη είναι πολύ μικρή και σύμφωνα με τις μετρήσεις του Cyriax, περιορίζεται σε $\Delta T \approx -0,5^\circ$
- η μέγιστη τιμή της διαφορικής περιστροφής όπως προκλήθηκε δευτερογενώς στις δοκιμές προσαγωγής - απαγωγής, έδωσε, σε απόλυτες τιμές, ελαφρά μεγαλύτερες διαφορές -1° έως $-2,7^\circ$
- οι διαφορές σε κάμψη και έκταση δεν είναι σταθερές, ωστόσο η διαφορά σε ποσοστό της κάμψης του καρπού είναι περίπου ίδια ($\approx 28-33\%$) και μάλιστα συγκλίνουν περισσότερο στις ίδιες γωνίες (π.χ. για $\Theta = \pm 20^\circ \Rightarrow |\Delta\Theta| \approx 5,5^\circ$ έως $6,6^\circ$)
- η μέγιστη διαφορική κάμψη είναι $+11,1^\circ$ που είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε έκταση $-6,6^\circ$
- η μέγιστη διαφορική απόκλιση κινείται μέσα στα όρια $-1,8^\circ \leq \Delta\Phi \leq 1,1^\circ$ ή με κάποια απλούστευση $|\Delta\Phi| \leq 1,8^\circ$

Με βάση και τις διαφορές τόσο μεταξύ των διαφόρων μεθόδων μέτρησης όσο και μεταξύ των διαφορετικής φύσης αντικειμένων (ζωντανά-νεκρά κλπ.) κρίνεται ότι σε αυτή τη φάση της προσέγγισης του προβλήματος θα πρέπει να ελεγχθεί η επάρκεια συνδέσμου με «παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά» που όμως να επιτρέπει σαν τάξη μεγέθους τις σχετικές μετακινήσεις που αναφέρθηκαν. Δεδομένου ότι πρόκειται για σύνδεσμο, μόνο μεταξύ των δύο αυτών οστών, προκύπτει ότι, εφόσον το ένα από τα δύο οστά εξακολουθεί να δρα και αντιδρά μέσω φυσιολογικών υγιών συνδέσμων με τα υπόλοιπα μέρη, δεν θα περιορίζεται περισσότερο η κίνηση.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της ελευθερίας κινήσεων που παρατηρήθηκε με την κοπή των συνδέσμων (και ιδιαίτερα του SLIL), σημαίνει ότι δεν αναμένεται να υπάρξει κίνδυνος μεταφοράς επιπλέον φορτίου σε άλλους υγιείς συνδέσμους, λόγω αποδοχής μεγαλύτερης ελευθερίας και συνεπώς ελαφρά μεγαλύτερων ακραίων μετατοπίσεων. Όμως το περιθώριο δεν είναι σαφές και συνεπώς θα πρέπει διατηρηθούν συντηρητικές τιμές κοντά σε εκείνες του άθικτου καρπού.

Με βάση αυτήν την προσέγγιση κρίνεται κινηματικά επαρκής ο σύνδεσμος εφόσον εξασφαλίζει τα εξής περιθώρια κίνησης: $|\Delta T| \leq 3^\circ$, $|\Delta\Theta| \leq 12^\circ$, $|\Delta\Phi| \leq 2^\circ$

Παράλληλα θα πρέπει να αφήνει διάκενο 1,6mm που είναι η μέση τιμή των μετρήσεων σε άθικτο καρπό, αν και αυτή η τιμή δεν μπορεί να επιβληθεί αυστηρά λόγω των φυσιολογικών διαφορών που παρατηρούνται. Ωστόσο διάκενο μεγαλύτερο από 2,5mm δεν θεωρείται πιθανό να αντιστοιχεί σε άθικτο καρπό (πιθανότητα 0,13).

4

Ο Μηχανισμός Κάκωσης και οι Υπάρχοντες Μέθοδοι Αποκατάστασης

Στα πλαίσια του βέλτιστου σχεδιασμού του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου έχει ιδιαίτερη αξία να εξετάσουμε το μηχανισμό με τον οποίο πραγματοποιείται η ρήξη του συνδέσμου. Επιπρόσθετα, θα προχωρήσουμε και σε μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων αποκατάστασης όπως αυτές χρησιμοποιούνται σήμερα.

4.1 Καρπική Σταθερότητα και Αστάθεια

Γενικά, η άρθρωση του καρπού θεωρείται εμβιομηχανικά σταθερή όταν:

1. Δεν υπάρχουν απότομες και αφύσικες μεταβολές στην ευθυγράμμιση των οστών του καρπού κατά την κίνηση του.
2. Ο καρπός είναι ικανός να φέρει φυσιολογικά φορτία χωρίς να ενδίδει ή να υφίσταται κάκωση.

Η καρπιαία αστάθεια ορίζεται ως η κάκωση του καρπού, κατά την οποία υπάρχει απώλεια της φυσιολογικής ευθυγράμμισης των οστών του καρπού που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της φυσιολογικής κινηματικής του καρπού.

Κοινές Καταστάσεις Αστάθειας στον Καρπό

Τρεις είναι οι γενικοί τύποι της αστάθειας του καρπού:

- η διαχωριστική αστάθεια (Carpal Instability Dissosiative: CID): είναι αποτέλεσμα ρήξης αυτόχθονος μεσόστεου συνδέσμου εντός του περιφερικού ή πιο συχνά του κεντρικού στοίχου.
- η μη διαχωριστική αστάθεια (Carpal Instability Non Dissosiative: CIND): οφείλεται σε ρήξη ετερόχθονος θυλακικού συνδέσμου, προϋποθέτει ανέπαφους μεσόστεους συνδέσμους εντός των στοίχων και οδηγεί σε πηγεοκαρπική ή μεσοκαρπική αστάθεια.
- η συνδυασμένη αστάθεια (Carpal Instability Combined: CIC): οφείλεται σε ρήξη αυτόχθονος και ετερόχθονος συνδέσμου και οδηγεί σε αστάθεια της πηγεοκαρπικής και της μεσοκαρπικής.

Η περίπτωση του σκαφομνηνοειδούς διαχωρισμού

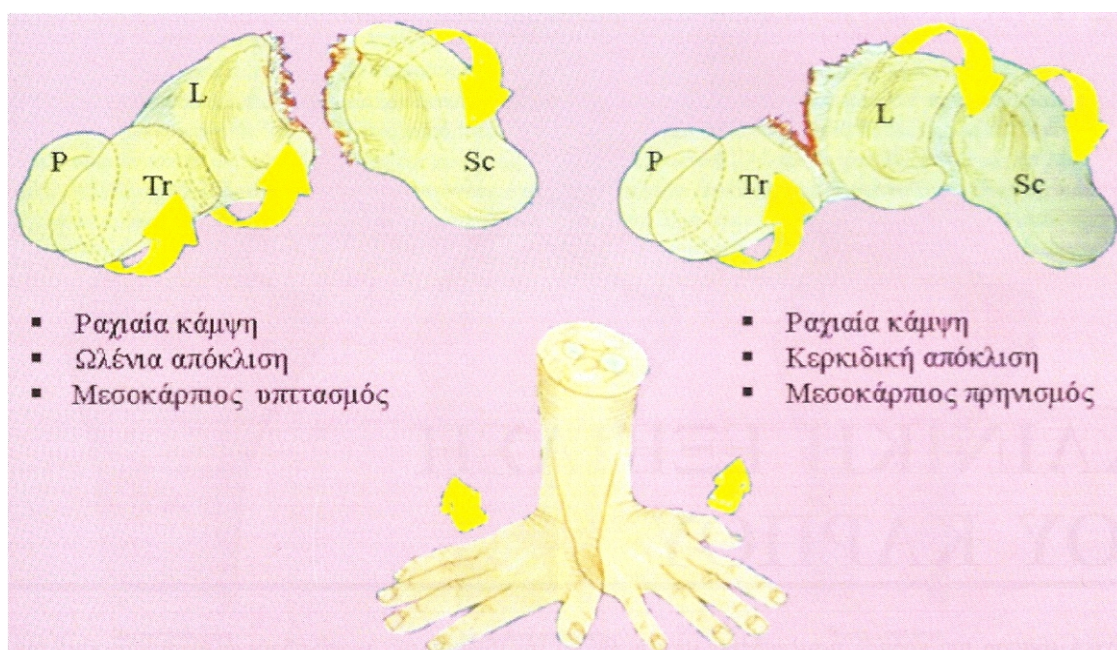
Στον σκάφο-μνηνοειδικό διαχωρισμό η έκταση του μνηνοειδούς και η κάμψη του σκαφοειδούς αυξάνουν την σκαφομνηνοειδική γωνία. Αυτό συνδυάζεται με αυξημένη γωνία κάμψης του κεφαλωτού με το μνηνοειδές, το οποίο εκτείνεται και βλέπει ραχιαία. Συχνά με τη θέση αυτή συνδυάζεται η ραχιαία μετατόπιση όλου του κεντρικού στοίχου.

Ο κεντρικός πόλος του σκαφοειδούς μετακινείται ραχιαία κοντά στο χείλος της κερκίδας (Linscheid, Dobyys et al. 1972; Ruby, An et al. 1987; Short, Werner et al. 1995). Επίσης ραχιαία μετακινείται και το κεφαλωτό. Έτσι η επιφάνεια επαφής κεφαλωτού-μνηνοειδούς μετακινείται και αυτή ραχιαία με αποτέλεσμα να επιτείνεται η έκταση του μνηνοειδούς. Λόγω της ρήξης του σκαφομνηνοειδικού συνδέσμου, η τάση που ασκείται από το φυσιολογικό μνηνοφυραμοειδές σύμπλεγμα το οδηγεί σε ωλένια απόκλιση σε σχέση με το πυραμοειδο-κεφαλωτό σύμπλεγμα. Το αποτέλεσμα είναι η απεικόνιση εκτεταμένου σκαφομνηνοειδικού διαστήματος. Επιπρόσθετα η τάση που ασκείται από αυτό το συνδυασμό κινήσεων στον πυραμοειδο-κεφαλωτό σύνδεσμο αυξάνει τη συνιστώσα έκτασης του μνηνοειδούς (Linscheid and Dobyys 2002).

4.2 Μηχανισμός Κάκωσης

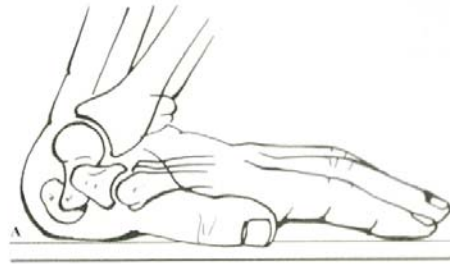
Στις περισσότερες περιπτώσεις η κάκωση του σκαφομυνοειδούς συνδέσμου προκαλείται από την πτώση από το ύψος του ανθρωπίνου σώματος. [6] Το είδος της κάκωσης που θα υποστεί τελικά ο καρπός εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως είναι:

- Η ηλικία του ατόμου
- Το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης
- Ο χρόνος άσκησης του φορτίου

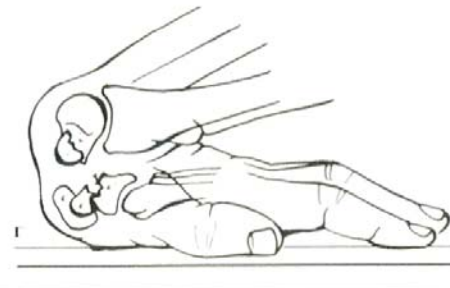


Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα ο καθοριστικός παράγοντας κατά την πτώση είναι η θέση του άκρου χεριού σε σχέση με το αντιβράχιο. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ατυχημάτων:

- Στην 1^η περίπτωση, το χέρι βρίσκεται σε ραχιαία έκταση και ωλένια απόκλιση σε σχέση με το αντιβράχιο. Έτσι, η δύναμη εφαρμόζεται στη βάση του υποθέναρος, δηλαδή στο ωλένιο χείλος του αντιβράχιο. Το φορτίο μεταφέρεται από το ωλένιο στο κερκιδικό χείλος και έχουμε ρήξη του σκαφομυνοειδούς συνδέσμου.
- Στη 2^η περίπτωση, το χέρι βρίσκεται σε ραχιαία έκταση και κερκιδική απόκλιση σε σχέση με το αντιβράχιο. Η δύναμη ασκείται στο θέναρ, δηλαδή στο κερκιδικό χείλος του αντιβράχιο, ή σε όλη την παλάμη. Εδώ, το φορτίο μεταφέρεται από το θέναρ στο κερκιδικό μέρος του καρπού και έχουμε ρήξη του μνηοπυραμοειδούς συνδέσμου.



Αξίζει να σημειωθεί ότι στην 1η περίπτωση, αν κατά το ατύχημα η ωλένια απόκλιση συνδυάζεται με ραχιαία έκταση μεγαλύτερη των 95° , όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, το αποτέλεσμα θα είναι κάταγμα του σκαφοειδούς οστού και όχι ρήξη του συνδέσμου.



4.3 Μέθοδοι Αποκατάστασης

4.3.1 Γενικός Διαχωρισμός Μεθόδων

Η θεραπεία του σκαφομηνοειδούς διαχωρισμού είναι δύσκολη και σπάνια απολύτως ικανοποιητική. [6] Ένας από τους βασικούς λόγους αυτής της δυσκολίας είναι ότι δεν είναι πάντα έγκαιρα προβλέψιμη. Ένας άλλος παράγοντας είναι ότι αυτός ο σύνδεσμος υφίσταται σημαντική συστολή και τάση με αποτέλεσμα ακόμη και οι επιτυχείς αποκαταστάσεις να έχουν μικρή διάρκεια ζωής λόγω φθοράς.

Όταν η αρχική βλάβη είναι μερική ρήξη του συνδέσμου, η ακτινογραφία του καρπού είναι συχνά φυσιολογική γιατί η βλάβη δεν απεικονίζεται. Ακόμη κι όταν η διάγνωση γίνει έγκαιρα τα υπολείμματα του συνδέσμου είναι βραχέα και η αποκατάστασή τους είναι δύσκολη.

Συνήθως όμως ο σκαφομηνοειδής διαχωρισμός ανακαλύπτεται όταν η ρήξη φαίνεται στην απλή ακτινογραφία. Αυτό συμβαίνει όταν η προοδευτική αστάθεια έχει καταστρέψει τους δευτερογενείς σταθεροποιητές και ιδιαίτερα τις παλαμιαίες συνδέσεις του σκαφοειδούς με τον περιφερικό στοίχο. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα σύνθετο και πολυεπίπεδο πρόβλημα συνδεσμικής βλάβης καθώς τα συνδεσμικά υπολείμματα αδυνατούν να σταθεροποιήσουν την άρθρωση.

Επιπλέον αν έχει περάσει σημαντικό χρονικό διάστημα από τον αρχικό τραυματισμό, μπορεί να εμφανιστεί δευτεροπαθής εκφυλιστική αρθρίτιδα λόγω της δυσλειτουργίας του καρπού κάνοντας ακόμη πιο δύσκολο το έργο της αποκατάστασης.

Όπως παρατηρούμε ανάλογα με την κάκωση του καρπού τη στιγμή της διάγνωσης ο σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός χωρίζεται σε στάδια. Κάθε στάδιο έχει τις δικές του μεθόδους αποκατάστασης.

Τα στάδια του σκαφομνηνοειδούς διαχωρισμού είναι τα παρακάτω:

- i. Προδυναμικός (ή λανθάνων) σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός : ένας σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός θεωρείται προδυναμικός ή λανθάνων όταν η ρήξη του συνδέσμου δεν είναι πλήρης, με φυσιολογικές ακτινολογικές εικόνες σε όλες τις κινήσεις και στις κινήσεις υπό τάση. Το συχνότερο σενάριο είναι η ρήξη της παλαμιαίας και της εγγύς μοίρας αλλά όχι της ραχιαίας. Σε περιπτώσεις όπου ο ραχιαίος σύνδεσμος έχει υποστεί πρώτος ρήξη ο παλαμιαίος διατηρεί κάποια σταθερότητα στην άρθρωση.
- ii. Δυναμικός σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός: χαρακτηρίζεται από πλήρη ρήξη όλων των μοιρών του συνδέσμου και τη διατήρηση των δευτερευόντων σταθεροποιητών. Εξορισμού η καρπική αστάθεια στο δυναμικό διαχωρισμό εκδηλώνεται μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες φόρτισης (π.χ. κλειστή γροθιά, φόρτιση σε ωλένια απόκλιση)
- iii. Στατικός ανατάξιμος σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός: ένας σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός θεωρείται στατικός ανατάξιμος όταν (α) η ρήξη του συνδέσμου δεν έχει ολοκληρωθεί στην οξεία φάση, τα υπολείμματα του συνδέσμου έχουν εκφυλιστεί σε ένα συρρικνωμένο, ακανόνιστο ινώδες κολόβωμα, αποκλείοντας την άμεση αποκατάσταση, (β) οι δευτερεύοντες σταθεροποιητές έχουν ραγεί και υπάρχει μόνιμος κακός ευθιασμός, (γ) το καρπικό υπεξάρθρωμα είναι ακόμα ανατάξιμο και (δ) δεν έχει εκδηλωθεί εκφυλισμός του χόνδρου.
- iv. Στατικός μη ανατάξιμος σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός (χωρίς αρθρίτιδα): Η χρόνια καταστροφή ή η ανεπάρκεια των κυρίων και δευτερευόντων σταθεροποιητών του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου οδηγεί στο σχηματισμό ίνωσης μέσα στα κενά διαστήματα μεταξύ του σκαφοειδούς και των γειτονικών οστών. Με το χρόνο, οι υπεξάρθρωμένες αρθρικές επιφάνειες τείνουν να εκφυλιστούν, καθιστώντας τον ευθιασμό του καρπού μη ανατάξιμο. Εάν παρόλα αυτά, δεν υπάρχει σημαντικός εκφυλισμός του χόνδρου τότε ο σκαφομνηνοειδής διαχωρισμός καλείται στατικός μη ανατάξιμος.
- v. Δευτεροπαθής αρθρίτιδα του καρπού σε σκαφομνηνοειδή διαχωρισμό (slac wrist): Παρατεταμένοι σκαφομνηνοειδείς διαχωρισμοί εκφυλίζουν προοδευτικά τους

παρακείμενους χόνδρους των αρθρώσεων με έναν ιδιαίτερο μηχανισμό οστεαρθρίτιδας που λέγεται «slac». Σύμφωνα με τους Watson και Ryu, η φθορά του χόνδρου αρχίζει μεταξύ του άκρου της στυλοειδούς απόφυσης της κερκίδας και του περιφερικού τμήματος του σκαφοειδούς και προχωρά προς το εγγύς άκρο μέχρι αν καταλάβει ολόκληρη την κερκιδοσκαφοειδή άρθρωση. Σε προχωρημένα στάδια μπορεί να προσβληθεί και η μεσοκαρπική άρθρωση, αρχίζοντας συνήθως από το μηνοκεφαλωτό διάστημα.

4.3.2 Προδυναμικός Σκαφομνηοειδής Διαχωρισμός

Αν το πρόβλημα διαγνωστεί στην οξεία φάση, όπου είναι καλύτερη η θεραπευτική ικανότητα των ρηγμένων συνδέσμων, συνιστάται η διαθερμική ή αρθροσκοπικά καθοδηγούμενη ήλωση με βελόνες Kirschner.[6] Για χρόνια προδυναμική αστάθεια έχουν προταθεί τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, (1) η ιδιοδετική επανεκπαίδευση του κερκιδικού καμπτήρα του καρπού, (2) η αρθροσκοπική απομάκρυνση των ρηγμένων συνδεσμικών άκρων, (3) η ηλεκτροθερμική συνδεσμική συρρίκνωση.

- Διαθερμική καθήλωση του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου με βελόνες Kirschner

Η μέθοδος αυτή έχει εξαιρετικά αποτελέσματα για τις οξείες (<1 εβδομάδα) μερικές ρήξεις του συνδέσμου, χωρίς καρπική αστάθεια. Η ανάταξη των μετατοπισμένων οστών διευκολύνεται τοποθετώντας δύο βελόνες Kirschner διαθερμικά στις ραχιαίες επιφάνειες του σκαφοειδούς και του μνηοειδούς που θα λειτουργήσουν ως μοχλοί. Εάν δεν παρεμβάλλονται μαλακά μόρια, η έλξη της βελόνας εγγύς και ωλενίως για το σκαφοειδές και περιφερικά και κερκιδικά για το μνηοειδές μπορεί να ανατάξει τη μικρή μετατόπιση. Στη συνέχεια γίνεται μικρή τομή στη στυλοειδή της κερκίδας και με αμβλεία παρασκευή τοποθετείται εργαλείο προστασίας μαλακών ιστών μαλακών ιστών άμεσα πάνω στο σκαφοειδές, για να αποφευχθεί ο τραυματισμός των ραχιαίων αισθητικών κλάδων του κερκιδικού νεύρου. Δύο ή περισσότερες βελόνες Kirschner 1.2mm εισάγονται κατά μήκος της σκαφομνηοειδούς άρθρωσης για να συγκρατούν τα δύο οστά κατά την αποκατάσταση του συνδέσμου. Για να διασφαλίσουν μεγαλύτερη σταθερότητα ορισμένοι επιστήμονες προτείνουν επιπλέον την καθήλωση της σκαφομνηοειδούς άρθρωσης με μια επιπλέον βελόνα. Ο καρπός ακινητοποιείται κάτω από τον αγκώνα με ένα νάρθηκα και το σύστημα των βελόνων αξιολογείται κάθε δύο εβδομάδες. Οι βελόνες συνήθως παραμένουν για 8-10 εβδομάδες αρχικά. Μόλις αρχίσει η κίνηση, οι βελόνες παραμένουν για 4 εβδομάδες προστατευμένες με ένα αφαιρούμενο νάρθηκα.

- Αρθροσκοπικά καθοδηγούμενη καθήλωση της σκαφομνηοειδούς άρθρωσης με βελόνες Kirschner

Στη μέθοδο αυτή, ο στόχος είναι να εισέλθει η βελόνα στο μνηοειδές μέσω του σκαφοειδούς. Έτσι, όταν εισέρχεται στο σκαφοειδές η βελόνα φαίνεται να «κοιτάει» προς τα κάτω, προς το κερκιδικό βοθρίο. Σε μια εναλλακτική τεχνική πιθανώς ευκολότερη, ο καρπός μπορεί να βγει από την έλξη και κάτω από ακτινοσκοπική καθοδήγηση ο χειρουργός να εισάγει τη βελόνα στο σκαφοειδές στοχεύοντας στο μνηοειδές. Μια σμίλη μπορεί να εισαχθεί μέσω του κερκιδικού μεσοκαρπικού διαστήματος για να ελέγχει την παλαμιαία κάμψη του σκαφοειδούς. Ενίοτε, εισάγονται Kirschner ως μοχλοί για να ελέγχουν την στροφή ιδιαίτερα όταν υπάρχει χάσμα μεταξύ σκαφοειδούς και μνηοειδούς. Στη συνέχεια ο χειρουργός προχωρά τη βελόνα κατά μήκος του σκαφομνηοειδούς διαστήματος στοχεύοντας στο μνηοειδές, αφού το διάστημα έχει αναταχθεί υπό άμεση όραση κατά μήκος το μετακάρπιο διαστήματος. Τέλος εισάγονται επιπλέον βελόνες Kirschner (συνήθως 3-4) για τον έλεγχο της στροφής.

- Επανεκπαίδευση της καρπικής ιδιοδετικότητας

Επειδή ο κερκιδικός καμπτήρας χρησιμοποιεί το σκαφοειδές βοθρίο ως «μεντεσέ» προς τη περιφερική πρόσφυση στη βάση του 2^{ου} μετακαρπίου, μπορεί να δράσει σαν ένας «δυναμικός» σταθεροποιητής του σκαφοειδούς. Η σύσπαση του προκαλεί μια στιγμιαία έκταση στο ασταθές σκαφοειδές, υπό την προϋπόθεση ότι ο κερκιδосκαφοειδής θύλακας και ο ραχιαίος σκαφομνηοειδής σύνδεσμος είναι ανέπαφοι. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειώσουμε ότι σε περίπτωση ρήξης του ραχιαίου σκαφομνηοειδούς συνδέσμου, η σύσπαση του μυός προκαλεί ραχιαία μετατόπιση του σκαφοειδούς με υπεξάρθρωμα του εγγύς πόλου και άρα η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται.

- Αρθροσκοπικός καθαρισμός

Η μέθοδος του αρθροσκοπικού καθαρισμού των συνδεσμικών υπολειμμάτων στις χρόνιες ρήξεις βασίζεται στην υπόθεση ότι η δυσλειτουργία δεν οφείλεται στην ίδια την αστάθεια αλλά στον ερεθισμό της άρθρωσης από τα συνδεσμικά υπολείμματα. Με τη βοήθεια ενός αρθροσκοπίου και ενός ξυραφιού αποκολλώνται και απομακρύνονται τα τμήματα του ασταθή ιστού.

- Ηλεκτροθερμική συρρίκνωση

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι σε προκαταρκτικό στάδιο. Η μέθοδος βασίζεται στη θεωρία σύμφωνα με την οποία η θέρμανση του κολλαγόνου προκαλεί και

συρρίκνωση του. Στη συνέχεια αναπτύσσονται ινοβλάστες μέσα στο συρρικνωμένο ιστό. Πιο συγκεκριμένα, μετά τον καθαρισμό των υπολειμμάτων, χρησιμοποιείται μια ηλεκτροθερμική σμίλη για να τα συρρικνώσει. Είναι σημαντικό η σμίλη να κινείται συνεχώς για να μην αυξάνεται η θερμότητα σε ένα σημείο. Επίσης, ο αρθρικός θύλακας δεν πρέπει να θερμανθεί ολόκληρος αλλά πρέπει να αφήνουμε ταινίες φυσιολογικού ιστού για να βοηθήσουν στην αγγείωση και την ίαση των υπολοίπων περιοχών. Μια πιθανή επιπλοκή της μεθόδου είναι τα εγκαύματα καθώς ο καρπός είναι μια μικρή άρθρωση και το αρθρικό υγρό μπορεί να θερμανθεί πολύ γρήγορα. Για να αποφευχθεί αυτό η θερμοκρασία της σμίλης ελέγχεται συνεχώς έτσι ώστε να μην ξεπεράσει τους 68° C.

4.3.3 Δυναμικός Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός

Στο δυναμικό διαχωρισμό, υπάρχουν περιπτώσεις που έχουν πολλές πιθανότητες ίασης των συνδέσμων, χωρίς απόσπαση και καλή αιμάτωση των συνδεσμικών κολοβωμάτων, συνίσταται η άμεση αποκατάσταση της ραχιαίας μοίρας του συνδέσμου. Αυτό πρέπει να συνδυαστεί με διαθερμική ήλωση της άρθρωσης. [6]

Ένα αρκετά συνηθισμένο φαινόμενο είναι να μην παρουσιάζεται συνδεσμική ρήξη αλλά απόσπαση από το ένα άκρο του συνδεσμικού συμπλέγματος (συνήθως του σκαφοειδούς) μαζί με ένα τμήμα του οστού (όχι πάντα). Σε αυτή την περίπτωση, η αποκατάσταση επιτυγχάνεται και είναι μεγαλύτερης διάρκειας από ότι στην περίπτωση συνδεσμικών βλαβών.

Δυστυχώς, όταν οι σύνδεσμοι ρήγνυνται στο μέσο τους τείνουν να εκφυλίζονται σε λιγότερο από 2 εβδομάδες μετά από τις οποίες οι πιθανότητες για επιτυχή αποκατάσταση ελαττώνονται σημαντικά. Αν ο ραχιαίος σύνδεσμος δε μπορεί να αποκατασταθεί μια εναλλακτική λύση είναι να αναδημιουργήσουμε το σύνδεσμο, χρησιμοποιώντας είτε ιστό από παρακείμενους συνδέσμους, είτε ένα αυτομόσχευμα από οστό και σύνδεσμο. Μια άλλη μέθοδος, που είναι και ευρέως χρησιμοποιούμενη από τους χειρουργούς, είναι η «ραχιαία RS θυλακόδεση». Μόνο κάτω από εξαιρετικές περιπτώσεις είναι αποδεκτή η κλειστή ανάταξη και η ακινητοποίηση με νάρθηκα σε αυτές τις περιπτώσεις.

- Ανοιχτή ανάταξη, εσωτερική καθήλωση και αποκατάσταση του ραχιαίου σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου

Η άμεση συνδεσμική αποκατάσταση συνίσταται μόνο όταν η ρήξη του ραχιαίου σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου έχει διαγνωστεί πρόσφατα. Όταν οι δευτερεύοντες σταθεροποιητές του σκαφοειδούς είναι ανέπαφοι και δε υπάρχει καταστροφή του χόνδρου. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα: (1)εξασφάλιση της ανάταξης του υπεξαρθρήματος, (2)διάγνωση και θεραπεία κάθε σχετικής οστεοχονδρικής βλάβης και (3)άμεση αποκατάσταση των ρηγμένων συνδέσμων. Τα μειονεκτήματα, που εξηγούν και τις περισσότερες αποτυχίες είναι οι ισχυρές δυνάμεις που μεταφέρονται από το κεφαλωτό και τείνουν να καταστρέψουν την αποκατάσταση, το φτωχό δυναμικό ίασης μιας συνήθως μη αγγειούμενης περιοχής και η παρατεταμένη ακινητοποίηση που απαιτείται μετά το χειρουργείο. Συχνά σε έγκαιρη επέμβαση υπάρχει επαρκής συνδεσμικός ιστός για μια καλή αποκατάσταση. Αν ο σύνδεσμος δεν έχει σχιστεί αλλά έχει αποσπαστεί (συχνά με μικρό οστεοχόνδρινο τεμάχιο), η αποκατάσταση είναι πιο αποτελεσματική και συνίσταται στην επανακαθήλωση του συνδέσμου στο ραχιαίο άκρο του σκαφοειδούς ή του μνηνοειδούς χρησιμοποιώντας ενδοοστικά ράμματα, όπως περιγράφουν οι Linscheid και Lavernia (...), ή με άγκυρες. Η αποκατάσταση προστατεύεται με ακινητοποίηση τόσο της σκαφομνηνοειδούς όσο και της κερκιδοκεφαλωτής άρθρωσης με βελόνες Kirschner. Σε πολλές περιπτώσεις γίνεται και ραχιαία θυλακόδεση. Οι βελόνες παραμένουν για μια περίοδο 8-10 εβδομάδων και με προστασία σε έναν αφαιρούμενο νάρθηκα για άλλες 4 εβδομάδες.

- Ραχιαία κερκιδοσκαφοειδής θυλακόδεση

Είτε ως ξεχωριστή τεχνική στη δυναμική σκαφομνηνοειδή αστάθεια, είτε για την προστασία της άμεσης αποκατάστασης του ραχιαίου σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου, η ραχιαία θυλακόδεση είναι σήμερα μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές στη θεραπεία της καρπικής αστάθειας. Διαδόθηκε από τον Blatt και συνίσταται στο δέσιμο του ραχιαίου θύλακα μεταξύ της κερκίδας και του σκαφοειδούς, ώστε να προστατεύσει το τελευταίο από υπερβολική στροφή κατά την κάμψη.

- Αποκατάσταση του ραχιαίου σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου με μαλακά μόρια

Πρόσφατες δημοσιεύσεις αναφέρουν αποδεκτά αποτελέσματα στη θεραπεία της δυναμικής σκαφομνηνοειδούς αστάθειας αντικαθιστώντας το ραχιαίο σκαφομνηνοειδή, που δε μπορεί να αποκατασταθεί είτε με μια λωρίδα από το ραχιαίο ενδοκαρπικό σύνδεσμο, είτε το ραχιαίο κερκιδοπυραμοειδή σύνδεσμο. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν πυκνό συνδετικό ιστό με πρόσφυση στο πυραμοειδές. Αυτή η

πρόσφυση παραμένει ανέπαφη ενώ το άλλο άκρο εισάγεται στενά στη ραχιο-ωλένια γωνία του εγγύς σκαφοειδούς. Χρησιμοποιούνται άγκιστρα για να διευκολυνθεί η ενσωμάτωση του συνδέσμου στους ραχιαίους και τους περιφερικούς φλοιούς του σκαφοειδούς και του μηνοειδούς. Και οι δύο τεχνικές φαίνονται πολύ ενδιαφέρουσες λόγω της απλότητας τους και της χαμηλής νοσηρότητας. Τα αποτελέσματα είναι προς το παρόν πολύ ικανοποιητικά. Όμως αυτές οι τεχνικές θεωρούνται ακόμα πειραματικές μέχρι να υπάρξουν μεγαλύτερη κλινική έρευνα και μακροπρόθεσμα αποτελέσματα.

- Μοσχεύματα B-L-B (οστό-σύνδεσμος-οστό)

Βασιζόμενοι στην αποδεδειγμένη επιτυχία της αντικατάστασης των συνδέσμων του γόνατος με μοσχεύματα «B-L-B», μερικοί ερευνητές δοκίμασαν να αντικαταστήσουν *in vitro* το ραχιαίο σκαφομηνοειδή σύνδεσμο με αλλομοσχεύματα. Θεωρητικά τοποθετώντας έναν ιστό με παρόμοια ελαστικότητα και αντοχή με το αρχικό, υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες για ένα αποτελεσματικότερο σύνδεσμο. Μερικά πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν είναι: (1)επειδή το εγγύς σκαφοειδές είναι μια φτωχά αιματούμενη περιοχή, η ενσωμάτωση του μοσχεύματος δεν επιτυγχάνεται εύκολα, (2)μετά από μακρά περίοδο ακινητοποίησης, οι μηχανικές ιδιότητες του μοσχεύματος χάνονται, με αποτέλεσμα να παθαίνει ρήξη όταν ασκηθεί πάνω του φορτίο και (3)μόνη η αποκατάσταση του ραχιαίου σκαφομηνοειδούς συνδέσμου δε διορθώνει την παλαμιαία- περιφερική συνδεσμική ανεπάρκεια, που υπάρχει εξορισμού στη στατική σκαφομηνοειδής αστάθεια.

4.3.4 Στατικός Ανατάξιμος Σκαφομηνοειδής Διαχωρισμός

Σε σπάνιες περιπτώσεις, αν ο σύνδεσμος έχει αποσπαστεί πλήρως από το σκαφοειδές ή το μηνοειδές, μερικοί γιατροί συνιστούν την αποκατάσταση του συνδέσμου με την προϋπόθεση ότι θα ενισχυθεί με μια ραχιαία θυλακόδεση, για να αναπληρωθεί έτσι η απώλεια δευτερευόντων σταθεροποιητών. Κάποιοι άλλοι ισχυρίζονται ότι η αποκατάσταση αυτή συνδέεται με ένα μη αποδεκτό ποσοστό εξασθένησης και ρήξης. Παρόλα αυτά, σε αυτούς τους ασθενείς προτείνονται δύο διαφορετικές στρατηγικές αποκατάστασης: η τενοντιαία αποκατάσταση και η τεχνική RASL.

- Τενοντιαία αποκατάσταση

Ο Dobyns με τους συνεργάτες του από το 1975 εισηγήθηκαν τη χρήση τενόντιων μοσχευμάτων για την αποκατάσταση του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου. Η αρχική ιδέα ήταν να περάσουν ένα κομμάτι τένοντα μέσα από οπές στο σκαφοειδές και το μηνοειδές για να παρέχουν άμεση σταθερότητα τυλίγοντας το μόσχευμα γύρω από την άρθρωση. Δυστυχώς, η μέθοδος αυτή βασιζόταν σε δημιουργία μεγάλων οπών σε

αγγειοβριθείς περιοχές με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται κατάγματα και /ή αρθρική εκφύλιση. Τα φτωχά αποτελέσματα της μεθόδου οδήγησαν στην προσωρινή εγκατάλειψή της. Τη δεκαετία του '80, η μερική αρθρόδεση έγινε δημοφιλής ως μια εναλλακτική λύση με εξαιρετικά βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα. Τη δεκαετία του '90, ωστόσο, η μερική αρθρόδεση της μεσοκαρπικής φάνηκε ότι δεν ήταν τόσο καλή μέθοδος όσο είχε αρχικά θεωρηθεί και άρχισαν να αναζητούνται νέες τεχνικές με τη χρήση τενόντιων μόσχευμάτων. Από τότε έχουν περιγραφεί διάφορες επιλογές.

- Τεχνική RASL Συνδυασμένη –Ανάταξη της SL άρθρωσης

Βασιζόμενοι στην παρατήρηση ότι οι αποτυχημένες αρθροδέσεις του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου είχαν καλύτερη κλινική εξέλιξη από τις επιτυχημένες ο Herbert και οι συνεργάτες του πρότειναν μια νέα προσέγγιση της στατικής αστάθειας του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην ανοιχτή ανάταξη, την αποκατάσταση των κατεστραμμένων συνδέσμων και την καθήλωση της άρθρωσης με έναν κοχλία Herbert για τουλάχιστον 12 μήνες. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη αρκετής ενδοκαρπικής ίνωσης που θα επιτρέπει πλήρη φόρτιση των δύο οστών χωρίς να ραγούν ή να εξarthρωθούν.

4.3.5 Στατικός Μη Ανατάξιμος Σκαφομνηνοειδής Διαχωρισμός (χωρίς αρθρίτιδα)

Η πιο συχνά προτεινόμενη θεραπεία για το στατικό μη ανατάξιμο σκαφομνηνοειδή διαχωρισμό είναι η μερική αρθρόδεση. Πρόκειται για την αρθρόδεση μόνο του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου και όχι ολόκληρου του καρπού. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές περιγράφονται παρακάτω:

- Σκαφοπολυγωνική αρθρόδεση (STT)

Ο στόχος της μεθόδου είναι να ευθυγραμμίσουμε τον εγγύ πόλο του σκαφοειδούς σε σχέση με το σκαφοειδές βοθρίο έτσι ώστε να αποκατασταθεί η κερκιδοσκαφοειδής σχέση και να ελαττωθεί η πιθανότητα εκφυλιστικών αλλοιώσεων αργότερα. Είναι σημαντικό οι εξωτερικές διαστάσεις και η ευθυγράμμιση του τελικού μπλοκ να είναι ίδιες με αυτές του φυσιολογικού καρπού. Αυτό σημαίνει ότι μετά την απομάκρυνση του αρθρικού χόνδρου και του υποκείμενου οστού, το χάσμα που απομένει πρέπει να κλείσει με μόσχευμα σπογγώδους οστού και τα οστά να μην συμπιεστούν μεταξύ τους.

- Σκαφομνηνοειδής αρθρόδεση

Αποτελεί τη λιγότερο αξιόπιστη μέθοδο αποκατάσταση του σκαφομνηνοειδούς διαχωρισμού. Οι μικρές αρθρικές επιφάνειες σε συνδυασμό με τις ισχυρές δυνάμεις που τείνουν να διαχωρίσουν τα δύο οστά καθιστούν δύσκολη την επιτυχία της

μεθόδου. Επιπλέον, μετά από αυτή την παρέμβαση η αμοιβαία μετατόπιση των δύο οστών δεν είναι πλέον δυνατή. Αυτό οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις από τη θέση της αρθρόδεσης και την προδιαθέτει για νέο κάταγμα.

- Σκαφοκεφαλωτή αρθρόδεση

Περιγράφηκε για πρώτη φορά το 1946 από το Sutor για τις ψευδαρθρώσεις του σκαφοειδούς. Θεωρητικά έχει η τεχνική αυτή παρόμοιες συνέπειες με την STT αρθρόδεση είναι παρόμοιες συνέπειες με την σκαφοπολυγωνική αρθρόδεση. Η κινηματική και η κινητική καρπική συμπεριφορά και με τους δύο τύπους αρθρόδεσης είναι παρόμοια προκαλώντας ανώμαλη μεταφορά φορτίου και σημαντική απώλεια της κίνησης της μεσοκαρπικής ιδιαίτερα στην κερκιδική και ωλένια απόκλιση.

- Σκαφομηνοκεφαλωτή αρθρόδεση

Προσθέτοντας και το μηνοειδές στην αρθρόδεση, ελέγχουμε καλύτερα την κακή ευθυγράμμιση κεφαλωτού και σκαφοειδούς. Αυτό όμως έχει ως συνέπεια την ελάττωση της κίνησης του καρπού κατά 50%.

- Κερκιδосκαφομηνοειδής αρθρόδεση με περιφερική σκαφοειδεκτομή

Οι περισσότερες καθημερινές δραστηριότητες περιλαμβάνουν κίνηση κατά μήκος του λεγόμενου «dart throwing» (από έκταση με κερκιδική απόκλιση προς κάμψη με ωλένια απόκλιση). Τέτοια κίνηση συμβαίνει κυρίως στη μεσοκαρπική άρθρωση. Συνεπώς, αν η κακή ευθυγράμμιση του σκαφοειδούς και του μηνοειδούς απαιτεί αρθρόδεση και η μεσοκαρπική παραμένει ανεπηρέαστη, είναι λογικό να κάνουμε αρθρόδεση της κερκιδοκεφαλωτής και όχι της μεσοκαρπικής. Αν, εκτός από τη διάσταση, υπάρχουν και άλλες ανωμαλίες της κερκιδοκεφαλωτής αλλά η μεσοκαρπική είναι φυσιολογική, η επέμβαση που προτιμάται είναι η κερκιδοσκαφομηνοειδής αρθρόδεση. Η αρθρόδεση της κερκιδοκεφαλωτής εξαλείφει τον πόνο που προκαλείται από την τοπική θυλακίτιδα, ενώ σταθεροποιεί τα εγγύς στοιχεία της μεσοκαρπικής. Κατά την κερκιδοσκαφομηνοειδή αρθρόδεση ωστόσο η σκαφοπολυγωνική άρθρωση μπορεί να δώσει συμπτώματα εκφυλισμού με το χρόνο σε συνέπεια της αδυναμίας του σκαφοειδούς να καμφθεί κατά την κάμψη του καρπού, δημιουργώντας μια τοπική προστριβή. Για να αποφευχθεί μια τέτοια επιπλοκή και να αυξηθεί η κίνηση, προτείνεται η εκτομή του περιφερικού τριτημορίου του σκαφοειδούς. Με αυτή την τροποποιημένη τεχνική, η μεσοκαρπική σφαιροειδής άρθρωση ελευθερώνεται από την πλάγια συγκράτηση και επιτρέπει περισσότερο από το 50% της συνολικής κίνησης του καρπού.

4.3.6 Δευτεροπαθής Αρθρίτιδα του Καρπού σε Σκαφομηνοειδή Διαχωρισμό

Στις περιπτώσεις αυτές οι θεραπείες για τα μαλακά μέρη δεν ανακουφίζουν από τον πόνο. Έτσι, παρακάτω παραθέτουμε μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται με τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει κάθε μια.

- Αρθροσκόπηση

Η αρθροσκόπηση του καρπού παίζει περιορισμένο θεραπευτικό ρόλο σε ασθενείς με SLAC. Μπορεί, βέβαια, να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί ο βαθμός και η έκταση του αρθρικού εκφυλισμού ώστε να καθοριστεί η καλύτερη θεραπευτική παρέμβαση.

- Κερκιδική στυλοειδεκτομή: η κερκιδική στυλοειδεκτομή

Είναι από τις παλιότερες παρεμβάσεις που έγιναν για την ανακούφιση του πόνου του καρπού που οφείλεται σε προστριβή μεταξύ του άκρου του στυλοειδούς της κερκίδας και του κακώς τοποθετημένου άνω πόλου του σκαφοειδούς. Πρέπει να σημειώσουμε ότι αφαιρώντας την οστεοφυτική στυλοειδή, δεν αποκαθιστούμε την κακή ευθυγράμμιση του σκαφοειδούς και η υποτροπή είναι πιθανή. Ένα πλεονέκτημα της αρθροσκοπικής κερκιδικής στυλοειδεκτομής είναι η ακριβής εκτίμηση της εκφύλισης του αρθρικού χόνδρου και της ποσότητας του οστού που θα αφαιρεθεί.

- Αρθροπλαστική αντικατάστασης του σκαφοειδούς

Στην περίπτωση αυτή έχουμε αντικατάσταση του σκαφοειδούς με εμφύτευμα σιλικόνης ή μετάλλου. Η τεχνική αυτή σπάνια αναφέρεται αφού έχουν αναφερθεί πολλές μακροπρόθεσμες επιπλοκές όπως είναι η καταστροφική θυλακίτιδα. Επιπλέον είναι δύσκολο να διατηρηθεί το εμφύτευμα επαρκώς ευθυγραμμισμένο σε έναν καρπό όπου η απώλεια των περισκαφοειδικών συνδέσμων οδηγεί αναπόφευκτα σε μεσοκαρπική αστάθεια.

- Επέμβαση SLAC

Πρόκειται για μια ιδιαίτερα δημοφιλή μέθοδο που διαδόθηκε από τους Watson και Ballet και είναι γνωστή ως αρθρόδεση 4 γωνιών. Ωστόσο, για την επιτυχία της επέμβασης είναι απαραίτητη προϋπόθεση ένας καλός αρθρικός χόνδρος. Μια συχνή επιπλοκή της μεθόδου είναι η ραχιαία προστριβή μεταξύ του ραχιαίου άκρου της κερκίδας και του κεφαλωτού.

- Καρπεκτομή του εγγύς στοίχου

Η καρπεκτομή του εγγύς στοίχου είναι μια αμφίβολη θεραπευτική παρέμβαση που περιλαμβάνει την αφαίρεση του σκαφοειδούς, του μηννοειδούς και του κεφαλωτού καθώς και τη δημιουργία μιας νεοάρθρωσης (ψευδάρθρωσης με σχισμή) μεταξύ του κεφαλωτού και του μηννοειδούς βοθρίου της κερκίδας. Είναι μια εναλλακτική λύση

που προτάθηκε από τον Luccetti και τους συνεργάτες του και φαίνεται να έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως η έγκαιρη κινητοποίηση και η διατήρηση των εκτατικών στοιχείων. Σε πολλές περιπτώσεις, η μέθοδος έχει αποδειχθεί εντυπωσιακά αποτελεσματική στην ανακούφιση του πόνου και στην αποκατάσταση της λειτουργικότητας της κίνησης του καρπού και της δύναμης σύγκλισης με υψηλό ποσοστό ικανοποίησης των ασθενών.

- Ολική αρθροπλαστική καρπού

Η ολική αντικατάσταση της άρθρωσης του καρπού αποτελεί μια καλή επιλογή για κάποιον που δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις από τον καρπό.

Στάδιο ΣΜ αστάθειας

	1	2	3	4	5	6
	Προδυναμική	Δυναμική		Στατική ανατάξιμη	Στατική μη ανατάξιμη	SLAC wrist
Μερική ρήξη ΣΜ ?	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Αποκαταστάσιμος ραχιαίος ΣΜ ?	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Δευτερεύοντες σύνδεσμοι άθικτοι ?	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Ανατάξιμη κακή ευθυγράμμιση ?	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
Χόνδρος φυσιολογικός ?	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι

Αρθροσκοπικός ή ανοικτός καθαρισμός + βελόνες Κ	Τενοντοδέσεις
Συρραφή ± καψουλίδωση	Περιορισμένες αρθροδέσεις ή τενοντοδέσεις
B-L-B ή Τενοντοδέσεις	Εγγύς καρπεκτομή ή εκτομή Σ + αρθρόδεση 4 γυνιών

5

Εμβιομηχανική Ανάλυση του Σκαφομνηνοειδούς Συνδέσμου

Στο παρόν κεφάλαιο θα προχωρήσουμε στην εμβιομηχανική μελέτη του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου. Αρχικά, θα εξετάσουμε συνοπτικά τις εμβιομηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν οι σύνδεσμοι συνολικότερα και στη συνέχεια θα εξετάσουμε συγκεκριμένα το σκαφομνηνοειδή σύνδεσμο.

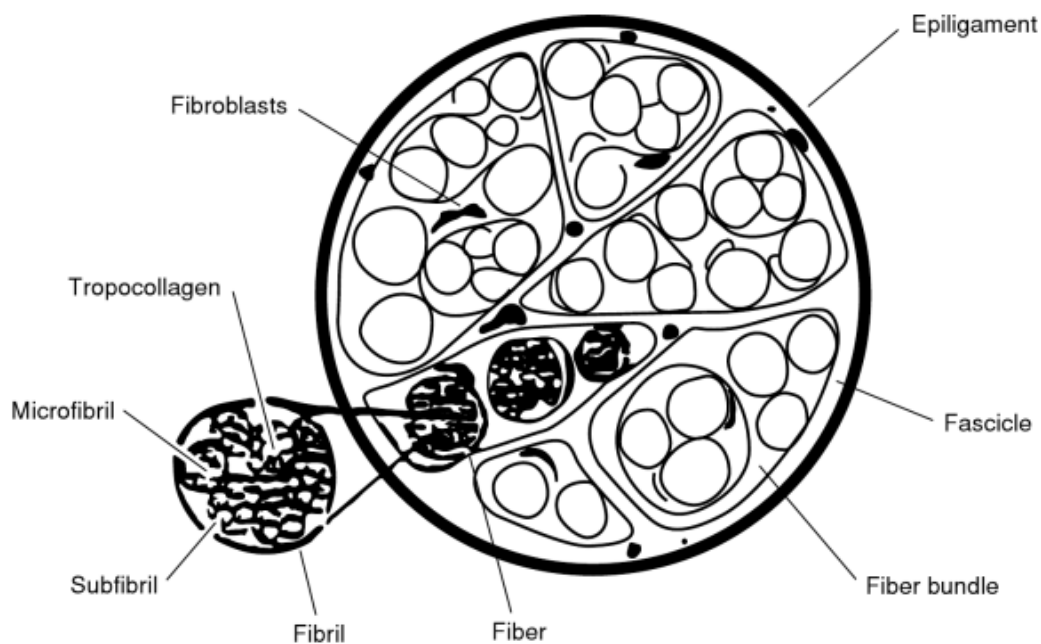
Στα πλαίσια αυτής της μελέτης επεξεργαστήκαμε πρωτογενή αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του ιατρού Φώτη Νικολόπουλου το 2004.

Επειδή το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην εμβιομηχανική συμπεριφορά του σκαφομνηνοειδούς δεν επεκταθήκαμε σε ζητήματα ανατομίας των συνδέσμων γενικότερα. Παρόλα αυτά, λόγω της βαρύνουσας σημασίας που παρουσιάζει το κολλαγόνο στη μηχανική συμπεριφορά των συνδέσμων, ειδικά αυτό, εξετάζεται στο σχετικό παράρτημα (Παράρτημα Ι) στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

5.1 Εισαγωγικά για τους συνδέσμους

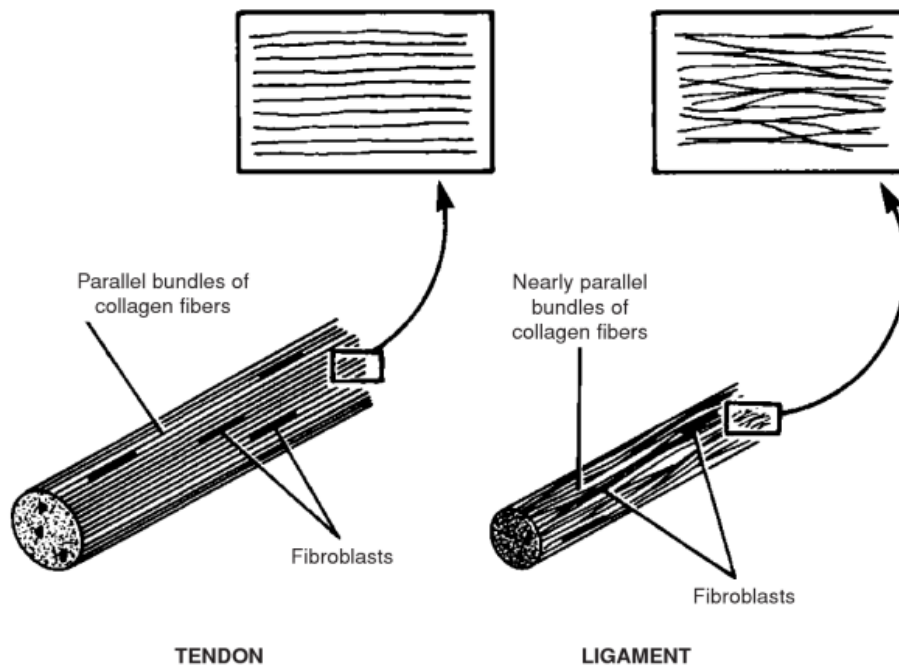
Όταν αναφερόμαστε στους συνδέσμους, πρέπει να γνωρίζουμε ότι με τον όρο σύνδεσμος ονομάζουμε τα τμήματα του μαλακού ιστού που αποφύονται από ένα οστό και καταλήγουν σε ένα άλλο διατρέχοντας μια άρθρωση. [2] Έτσι, ο κύριος ρόλος των συνδέσμων είναι η διατήρηση της μηχανικής σταθερότητας των αρθρώσεων καθώς και η καθοδήγηση των κινήσεων έτσι ώστε να αποφεύγονται υπερβολικές κινήσεις.

Τα δομικά συστατικά των συνδέσμων είναι τα ίδια με τους τένοντες, δηλαδή το κολλαγόνο (βασικά τύπου I και λίγο τύπου III), ίνες ελαστικής και πρωτεογλυκάνες. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση των συνδέσμων οι ίνες ελαστικής βρίσκονται μόνο στην περιοχή των αιμοφόρων αγγείων και έτσι ο ιστός συνίσταται σε συντριπτική πλειοψηφία από κολλαγόνο. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις όπως ορισμένοι σύνδεσμοι στη σπονδυλική στήλη που αποτελούνται κυρίως από ελασίνη.



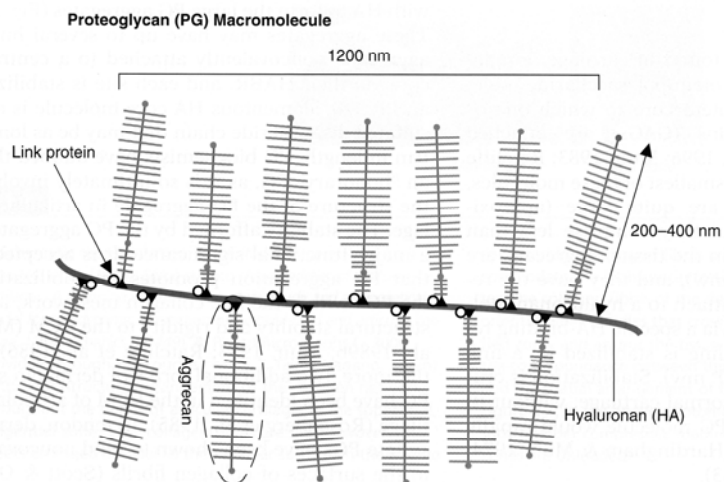
Στο κυρίως τμήμα των συνδέσμων, το κολλαγόνο σχηματίζει ίνες οι οποίες αθροίζονται σε δέσμες. Τα ινίδια κολλαγόνου έχουν κατά κύριο λόγο προσανατολισμό παράλληλο προς τον διαμήκη άξονα του συνδέσμου με σκοπό να αυξάνουν την αντοχή του συνδέσμου σε εφελκυστικά φορτία. Παρόλα αυτά υπάρχουν ινίδια κολλαγόνου με προσανατολισμό διαφορετικό από τον κύριο με αποτέλεσμα ο σύνδεσμος να φέρει φορτία και σε άλλες κατευθύνσεις εκτός από την κύρια.

Καθώς προσεγγίζουμε το σημείο πρόσδεσης του συνδέσμου στο οστό η μορφολογία του συνδέσμου αλλάζει. Ο ιστός γίνεται σκληρότερος με σκοπό να αποτρέπει το διαχωρισμό του συνδέσμου από το οστό κοντά στην επιφάνεια σύνδεσης. Ουσιαστικά, προσεγγίζοντας το οστό τα κύτταρα των ιών σταδιακά αντικαθίστανται από οστεοκύτταρα ενώ τα ινίδια κολλαγόνου παραμένουν συνεχή μέσα στην ασβεστοποιημένη περιοχή που σχηματίζεται.

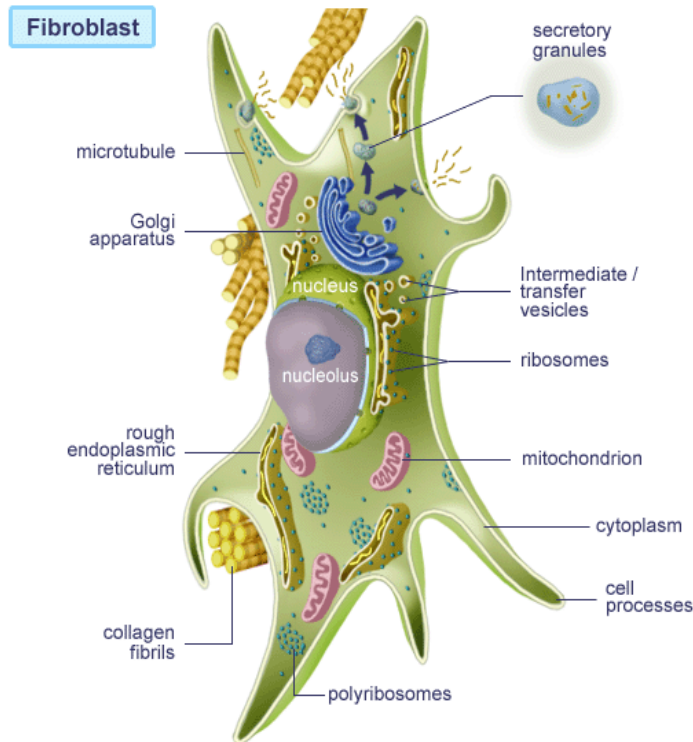


Η ελαστίνη είναι μια ουσία πιο μαλακή από το κολλαγόνο που παρουσιάζει μεγαλύτερες δυνατότητες παραμόρφωσης. Ο ρόλος της στον σύνδεσμο είναι να δρα σαν «λάστιχο» επαναφέροντας το σύνδεσμο στο αρχικό του μήκος όταν αφαιρεθεί ένα φορτίο. Ανάλογα με το ρόλο και τη θέση του στο σώμα κάθε σύνδεσμος παρουσιάζει διαφορετικά ποσοστά αναλογίας κολλαγόνου και ελαστίνης με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται κατά πολύ οι μηχανικές τους ιδιότητες.

Τέλος, οι πρωτεογλυκάνες ρυθμίζουν την κυκλοφορία του νερού στον ιστό. Ο ρόλος των πρωτεογλυκάνων είναι ιδιαίτερα σημαντικός αν υπολογίσουμε ότι περίπου τα 2/3 του βάρους ενός συνδέσμου αποτελούνται από νερό. Το νερό στους συνδέσμους λειτουργεί ως λίπανση και μεταφέρει θρεπτικές ουσίες στα κύτταρα στο εσωτερικό του. Επιπλέον, οι αντιδράσεις του νερού με τις πρωτεογλυκάνες επηρεάζουν την βισκοελαστική συμπεριφορά του συνδέσμου όπως θα δούμε παρακάτω.



Τα κύτταρα των συνδέσμων, οι ινοβλάστες, παρουσιάζουν ποικιλία σχήματος και μεγέθους. Η πυκνότητα των κυττάρων μέσα στον ιστό δεν είναι σταθερή παρόλο που γενικά οι



ινοβλάστες παρουσιάζουν μια αραιή κατανομή και προσανατολισμό παράλληλο προς τον διαμήκη άξονα του συνδέσμου.

Ο βασικός ρόλος των ινοβλαστών είναι η παρακολούθηση του περιβάλλοντος ιστού και μετά από ορισμένα ερεθίσματα η παραγωγή πρωτεϊνών που είναι απαραίτητες για τη διατήρηση και την επιδιόρθωση του συνδετικού ιστού.

5.2 Εμβιομηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων

Για να εξετάσουμε τις εμβιομηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων πρέπει να ξεκινήσουμε με την διαπίστωση ότι η εμβιομηχανική συμπεριφορά των συνδέσμων οφείλεται τόσο στη δομή τους όσο και στις ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται. [2] Έτσι οι εμβιομηχανικές ιδιότητες προσδιορίζονται από τα δομικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά των υλικών.

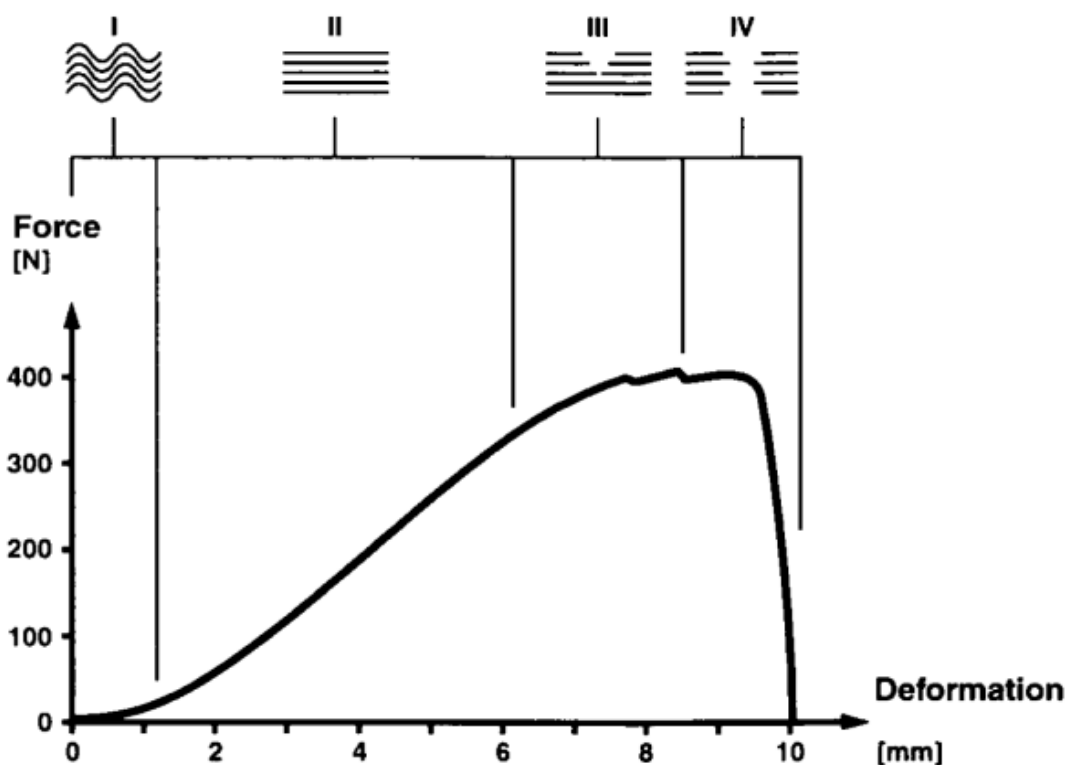
Τα δομικά χαρακτηριστικά γενικά αναφέρονται στις μηχανικές ιδιότητες του ιστού που δεν εξαρτώνται μόνο από τα υλικά κατασκευής του ιστού αλλά και στο σχήμα και το μέγεθος του ιστού. Περιγράφονται από τις σχέσεις δύναμης- παραμόρφωσης, την ακαμψία, το μέγιστο φορτίο, το φορτίο θραύσης και τη μέγιστη επιμήκυνση. Στην ειδική περίπτωση των συνδέσμων, τα δομικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται από τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος «οστό-σύνδεσμος-οστό» υπό φόρτιση. Έτσι, δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες και τη γεωμετρία του συνδέσμου αλλά επηρεάζονται και από τις μηχανικές ιδιότητες της σύνδεσης του με το οστό.

Στον αντίποδα, τα χαρακτηριστικά των υλικών περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται ο ιστός χωρίς να λαμβάνονται υπόψη το σχήμα και η γενικότερη γεωμετρία του. Στην περίπτωση των ιστών, τα χαρακτηριστικά των υλικών

προκύπτουν από τις εμβιομηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών του ιστού (π.χ. κολλαγόνο, ελαστίνη, πρωτεογλυκάνες) τη μικροσκοπική δομή τους και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Περιγράφονται από τη σχέση τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης, που εκφράζεται συνήθως μέσω παραμέτρων όπως το μέτρο ελαστικότητας, η μέγιστη τάση και η μέγιστη παραμόρφωση.

5.2.1 Δομικά Χαρακτηριστικά

Για να προσδιορίσουμε τα δομικά χαρακτηριστικά του συνδέσμου πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η κύρια λειτουργία του στον οργανισμό είναι η μεταφορά εφελκυστικών φορτίων. [2] Έτσι, στα πειράματα που πραγματοποιούμε τοποθετούμε συστήματα «οστό-σύνδεσμος-οστό» και τα μελετάμε σε εφελκυσμό. Μετρώντας το εφαρμοζόμενο φορτίο στο σύνδεσμο καθώς και την παραμόρφωση καταλήγουμε στο χαρακτηριστικό διάγραμμα γνωστό ως διάγραμμα φορτίου- παραμόρφωσης (ή ορθότερα μετατόπισης) όπως φαίνεται παρακάτω.



Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να ξεχωρίσουμε τέσσερις περιοχές με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

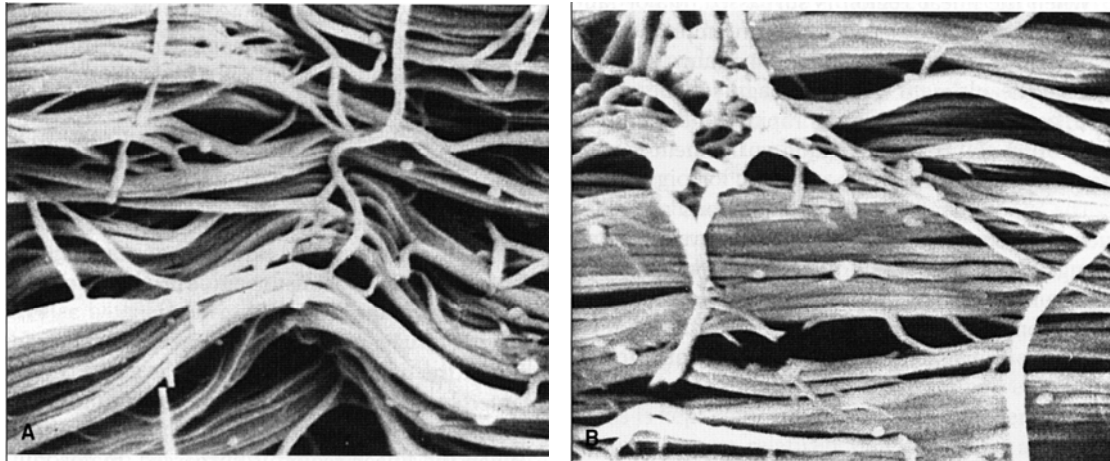
Αρχικά, η περιοχή I είναι περιοχή μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας (toe region) όπου ο ιστός επιμηκώνεται χωρίς την εφαρμογή μεγάλων φορτίσεων. Η επιμήκυνση πιστεύεται ότι προκύπτει λόγω αναδιάταξης και μεταβολής της κυματοειδούς μορφής των χαλαρών ιών κολλαγόνου. Ουσιαστικά, ο ιστός επιμηκώνεται εύκολα και οι ίνες κολλαγόνου σταδιακά ευθυγραμμίζονται ή και ολισθαίνουν μεταξύ τους.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σχεδόν γραμμική περιοχή (περιοχή II) όπου οι ίνες έχουν πλέον ευθυγραμμιστεί και η ακαμψία του ιστού έχει αυξηθεί και σχετικά γρήγορα σταθεροποιηθεί.

Την γραμμική περιοχή διαδέχεται η μη γραμμική περιοχή (περιοχή III) στην οποία η καμπύλη παρουσιάζει μεταβολές, συχνά μη ομαλές, με συνεχείς μειώσεις της κλίσης που πιθανότατα οφείλονται σε διαδοχικές αστοχίες κάποιων ινών κολλαγόνου του ιστού.

Με περαιτέρω αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου επέρχεται η ρήξη του συνδέσμου (περιοχή IV) που μπορεί να είναι ολική, όπως στο σχήμα, ή μερική, σε περίπτωση όπου υπάρχει σημαντική διαφορά στις ιδιότητες μεταξύ κάποιων ινών.

Είναι χαρακτηριστικό ότι στο πρώτο στάδιο της φόρτισης ο σύνδεσμος επιμηκύνεται χωρίς να προβάλλει σημαντική αντίσταση. Καθώς όμως το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται ο σύνδεσμος γίνεται πιο άκαμπτος παρουσιάζοντας μεγαλύτερη αντίσταση στην παραμόρφωση. Αυτή ακριβώς η ιδιόμορφη συμπεριφορά του συνδέσμου είναι που τον προστατεύει από μεγάλες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των οστών.



Η μη γραμμική σχέση φορτίου-παραμόρφωσης μπορεί να γίνει πιο κατανοητή αν εξετάσουμε τη δομή των μαλακών ιστών και ιδιαίτερα του κολλαγόνου που αποτελεί και το βασικό δομικό συστατικό τους. Όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες ενός συνδέσμου, το κολλαγόνο όταν δεν είναι φορτισμένο βρίσκεται σε «κυματοειδή μορφή» (εικόνα A). Έτσι, ο ιστός επιμηκύνεται εύκολα καθώς το κολλαγόνο σταδιακά ευθυγραμμίζεται (εικόνα B). Καθώς η επιμήκυνση αυξάνεται οι ίνες του κολλαγόνου ευθυγραμμίζονται εντελώς και πλέον αυξάνεται και σταθεροποιείται η αντίσταση του ιστού στην παραμόρφωση.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την σχέση φορτίου- παραμόρφωσης είναι η κατεύθυνση των ινών κολλαγόνου. Σ' ένα σύνδεσμο παρόλο που ένα μεγάλο τμήμα των ινών του κολλαγόνου έχουν διεύθυνση παράλληλη προς των διαμήκη άξονα του συνδέσμου, υπάρχει και ένας σημαντικός αριθμός από ίνες που παρουσιάζουν ποικίλες αποκλίσεις στις διευθύνσεις τους. Έτσι, η αρχική περιοχή μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας (toe region)

είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση ενός τένοντα αφού είναι απαραίτητη μια σχετική ανακατάταξη των ινών μέχρι να επιτευχθεί η πλήρης ευθυγράμμιση.

Αν εξετάσει κανείς τις βασικές λειτουργίες του συνδέσμου μπορεί να κατανοήσει τη λειτουργικότητα της δομής του κολλαγόνου στους ιστούς αυτούς . Για παράδειγμα, ένας σύνδεσμος γενικά φέρει μεγάλα εφελκυστικά φορτία κατά μήκος του άξονα του αλλά πρέπει να είναι ικανός να φέρει φορτία και σε διευθύνσεις άλλες από την αξονική. Έτσι, η ποικιλία στις διευθύνσεις του κολλαγόνου προσδίδει στιβαρότητα στο σύνδεσμο και του επιτρέπει να ανθίσταται σε αυτά τα φορτία. Επιπρόσθετα, ένας σύνδεσμος πρέπει να ανέχεται με σχετική ευκολία μικρές παραμορφώσεις, έτσι ώστε να επιτρέπει την κίνηση της άρθρωσης. Αυτή η δυνατότητα παρέχεται από την ευθυγράμμιση των ινών κολλαγόνου.

Τέλος, σημειώνεται ότι, κάθε σύνδεσμος ανάλογα με τη λειτουργία την οποία εκτελεί στο ανθρώπινο σώμα συνίσταται και από διαφορετικά ποσοστά κολλαγόνου και ελαστίνης. Έτσι, αλλάζουν σημαντικά οι μηχανικές τους ιδιότητες όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

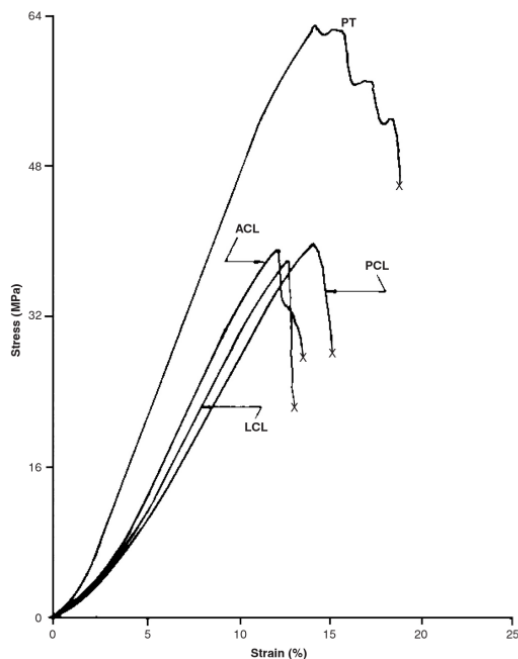
Είδος Συνδέσμων	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Πειράματα
ωχρός σύνδεσμος (ligamentum flavum) νεαρού ατόμου	98	Nachemson
ωχρός σύνδεσμος (ligamentum flavum) ηλικιωμένου ατόμου	20	Nachemson
Χιαστός Σύνδεσμος	345	Butler

5.2.2 Χαρακτηριστικά των Υλικών

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών των μαλακών ζωντανών ιστών, τα οποία ενδιαφέρουν, προκύπτουν από την σχέση τάσης-παραμόρφωσης.[2] Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι πιο δύσκολο να μετρηθούν από ότι π.χ. τα χαρακτηριστικά της δομής για τους εξής λόγους:

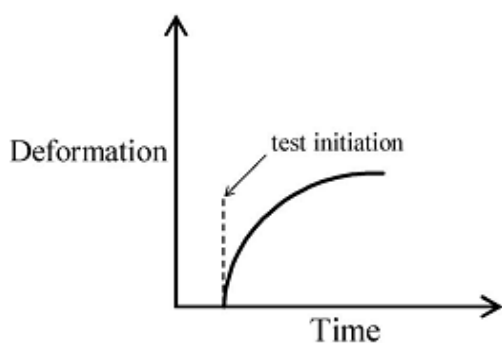
- είναι δύσκολο να πακτωθεί ο ιστός χωρίς να τραυματιστεί
- η μέτρηση της ακριβούς διατομής του μαλακού ιστού παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες
- η παραμόρφωση πρέπει να μετριέται με όσο το δυνατόν μικρότερη επαφή του συστήματος μέτρησης με τον ιστό
- τα χαρακτηριστικά των υλικών επηρεάζονται και μεταβάλλονται από εξωτερικούς παράγοντες όπως: η προέλευση του ιστού, ο τρόπος αποθήκευσης του, η προετοιμασία του για το πείραμα κλπ.

Παρά τα παραπάνω προβλήματα όμως, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει παρουσιαστεί μεγάλη πρόοδος στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών. Πιο συγκεκριμένα, στις επόμενες παραγράφους θα προσεγγίσουμε τη συμπεριφορά των συνδέσμων σε εφελκυσμό με έμφαση στα χαρακτηριστικά βισκο-ελαστικότητας που εμφανίζονται.



Η συμπεριφορά του συνδέσμου σε εφελκυσμό είναι καταρχήν μη γραμμική όπως φαίνεται στο διπλανό διάγραμμα (καμπύλες ACL=Anterior Cruciate Ligament, PCL=Posterior Cruciate Ligament, LCL=Lateral Collateral Ligament ενός ανθρώπινου γόνατου). Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η γραμμική περιοχή μετά την αρχική περιοχή μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας (toe region) θεωρείται ότι αναπαριστά την αντίσταση του ίδιου του κολλαγόνου αφού έχουν ευθυγραμμιστεί οι ίνες στην προηγούμενη περιοχή. Με βάση αυτήν τη

θεώρηση εξηγείται το ότι, γενικά, η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του κολλαγόνου είναι γραμμική και εμφανίζει κλίση παρόμοια με εκείνη των μαλακών ιστών και η συμπεριφορά των ιστών υπό τέτοιες φορτίσεις μπορεί να περιγραφεί με βάση το μέτρο ελαστικότητας E. Ωστόσο, δεν αποκλείεται το μη γραμμικό σκέλος της καμπύλης να προκύπτει μετά από σύνθετες αντιδράσεις σε μοριακό επίπεδο, μεταξύ των διάφορων συστατικών του ιστού, αλλά το ζήτημα αυτό αποτελεί αντικείμενο μελέτης μέχρι και σήμερα.



Όταν ένας μαλακός ιστός υποβάλλεται σε σταθερό φορτίο, παρατηρείται το φαινόμενο το μήκος του να μεταβάλλεται μέχρι να σταθεροποιηθεί τελικά σε μια τιμή ισορροπίας, εφόσον το φορτίο δεν είναι αρκετά υψηλό ώστε να προκαλεί διαδοχικές αστοχίες των ινών. Η παραπάνω διαδικασία, που

περιγράφεται από το διπλανό διάγραμμα παραμόρφωσης - χρόνου, ονομάζεται ερπυσμός και είναι αποτέλεσμα των βισκοελαστικών ιδιοτήτων του ιστού.

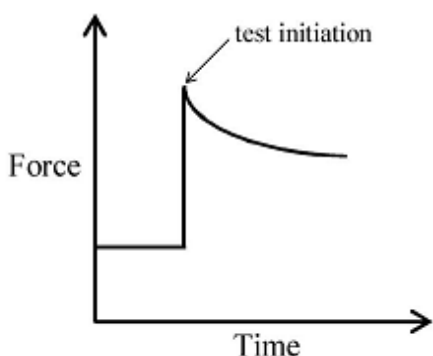
Σε ένα ιδανικό πείραμα το μέτρο ελαστικότητα πρέπει να αρχίσει να μετράται όταν ο ιστός έχει φτάσει στο μήκος ισορροπίας. Συνεπώς, το μέτρο ελαστικότητας σε θέση ισορροπίας εκφράζει την «ημι-στατική» συμπεριφορά του ιστού και εξαρτάται από τα εγγενή χαρακτηριστικά των δομικών συστατικών του (κυρίως του κολλαγόνου).

Όπως φάνηκε και στην προηγούμενη παράγραφο η βισκο-ελαστικότητα είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των μαλακών ιστών καθώς οι χρονοεξαρτώμενες ιδιότητες του ιστού πρέπει να μελετηθούν με τη βοήθεια βισκο-ελαστικών παραμέτρων. Έτσι, η βισκο-ελαστικότητα των ιστών συνοψίζεται σε τρεις ευρείες κατηγορίες αντιδράσεων:

- Χρονοεξαρτώμενες αποκρίσεις
- Υστέρηση
- Αποκρίσεις εξαρτώμενες από το ιστορικό φόρτισης

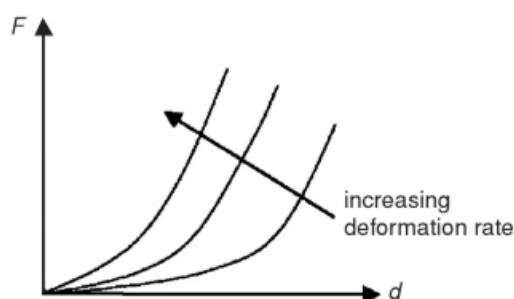
Χρονοεξαρτώμενες αποκρίσεις

Εδώ ανήκουν μεταξύ άλλων ο ερπυσμός (creeping), που αναφέρθηκε παραπάνω καθώς και η χαλάρωση (relaxation).

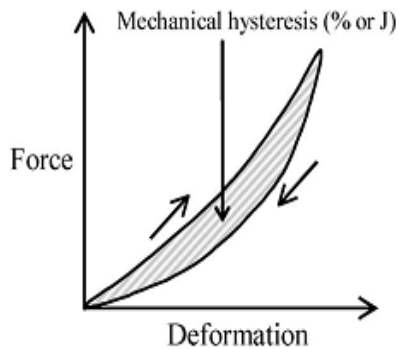


Όπως φαίνεται στο διπλανό διάγραμμα δύναμης – χρόνου, κατά την χαλάρωση, όταν ιστός φορτίζεται με σταθερή παραμόρφωση, παρατηρείται μείωση του φορτίου στον ιστό με την πάροδο του χρόνου η οποία αρχικά είναι ταχεία αλλά καταλήγει να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή ισορροπίας.

Οι μηχανικές τους ιδιότητες διαφοροποιούνται ανάλογα με το ρυθμό της φόρτισης. Όταν δείγματα μαλακών ιστών υποβάλλονται σε αυξανόμενους ρυθμούς παραμόρφωσης, το γραμμικό κομμάτι της καμπύλης τάσης-ανοιγμένης παραμόρφωσης αποκτά μεγαλύτερη κλίση παρουσιάζοντας μεγαλύτερη στιβαρότητα (ακαμψία) του ιστού στους υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης.



Υστέρηση

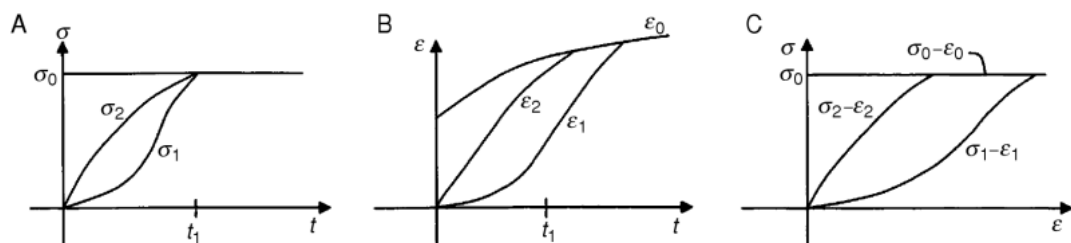


Κατά τη διάρκεια εφαρμογής κυκλικής φόρτισης σε δείγματα συνδέσμων, παρατηρείται ότι μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου φόρτισης η καμπύλη τάσης-ανοιγμένης παραμόρφωσης μετατοπίζεται στα δεξιά κατά μήκος του άξονα παραμόρφωσης αποκαλύπτοντας ότι στη διάρκεια ενός κύκλου μέρος της ενέργειας που δαπανήθηκε

δεν ανακτάται και αντιστοιχεί στον λεγόμενο βρόγχο υστέρησης.

Αποκρίσεις εξαρτώμενες από το ιστορικό φόρτισης

Αν ένας ιστός υποβληθεί σε πολλούς διαφορετικούς τρόπους φόρτισης με σκοπό να φτάσει σε μια συγκεκριμένη τάση (τρεις διαδρομές τάσεων 0,1,2 στο διάγραμμα Α) στο ίδιο χρονικό διάστημα, η αντίστοιχη παραμόρφωση θα είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση (διάγραμμα Β). Με άλλα λόγια, η παραμόρφωση ενός ιστού εξαρτάται όχι μόνο από την φόρτιση που δέχεται ο ιστός στη συγκεκριμένη φάση, αλλά και από το «ιστορικό» ή αλλιώς τη «διαδρομή» της φόρτισης έως τη συγκεκριμένη τάση (διάγραμμα Γ).



Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κυκλικών φορτίσεων σε ένα σύνδεσμο. Μετά από κάθε κύκλο φόρτισης, η καμπύλη τάσης-ανοιγμένης παραμόρφωσης μετατοπίζεται στα δεξιά κατά μήκος του άξονα παραμόρφωσης, αποκαλύπτοντας την παρουσία μιας μη ελαστικής (πλαστικής) συνιστώσας. Το ποσό της μόνιμης παραμόρφωσης είναι προοδευτικά μεγαλύτερο μετά από κάθε κύκλο φόρτισης. Με περαιτέρω κύκλους φορτίσεων, το δοκίμιο δείχνει επιπλέον μια αύξηση στην ελαστική ακαμψία ως αποτέλεσμα της πλαστικής παραμόρφωσης. Μικροαστοχία μπορεί να συμβεί εσωτερικά αν η φόρτιση επιβληθεί σε μια ήδη κατεστραμμένη δομή όπου η ακαμψία έχει μειωθεί.

5.3 Εμβιομηχανική ανάλυση του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου

Ο σκαφομνηνοειδής σύνδεσμος έχει, όπως είπαμε, περίπλοκη μορφολογία καθώς αποτελείται, ανατομικά, από τρεις διαφορετικές μοίρες. Αυτές οι μοίρες ενώνουν το σκαφοειδές και το μνηνοειδές με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπουν τη σχετική κίνηση των οστών αυτών στο χώρο.

Αν εξετάσει κανείς καθεμιά από τις τρεις μοίρες ξεχωριστά παρατηρεί ότι οι περιοχές πρόσφυσης κάθε μοίρας στα δύο οστά είναι αρκετά πολύπλοκη. Η κατάσταση περιπλέκεται περισσότερο λόγω του σχήματος που έχουν τα δύο οστά στο χώρο. [6]

Για να μελετήσουμε τις εμβιομηχανικές ιδιότητες του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου υπάρχουν δύο δυνατά πειράματα ελκυσμού:

- A) Να εφαρμοστεί μονοαξονική φόρτιση και στις τρεις μοίρες σαν ένα συνολικό σύστημα συνδέσμων, συλλαμβάνοντας απευθείας τα οστά με αρπάγες
- B) Να διαχωρίσουμε τις τρεις μοίρες και να εξετάσουμε καθεμιά ξεχωριστά σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Παρόλο που ο δεύτερος τρόπος μέτρησης δίνει μια καλή συνολική εκτίμηση του ποσοστού συμμετοχής κάθε μοίρας στη συνολική αντοχή του συνδέσμου, ωστόσο υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα που δίνονται στη σχετική βιβλιογραφία.

Τα βασικότερα προβλήματα που προκύπτουν κατά την τεχνική αυτή είναι τα εξής:

- Υπάρχει δυσκολία στην απομόνωση των μοιρών: τα όρια μεταξύ των μοιρών δεν είναι ευδιάκριτα καθώς αυτές διαπλέκονται μεταξύ τους
- Το μεγάλο ποσοστό ασυμμετρίας των καταφυτικών ινών κάνει δύσκολη την επιλογή αξόνων φόρτισης: καθεμιά από τις μοίρες πρέπει να φορτίζεται ευθυγραμμισμένη και χωρίς να έχει περιστραφεί κάποιο τμήμα της όμως καθώς οι ίνες της έχουν διαφορετικό μήκος και προσανατολισμό αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

Καταρχήν, για το σχεδιασμό του τεχνητού συνδέσμου έχει μεγαλύτερη αξία ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του συνδέσμου συνολικά, ώστε να τεθούν περιορισμοί και αρχές για τον τρόπο σχεδιασμού του. Παρόλα αυτά όπως θα δούμε και παρακάτω παρουσιάζεται μεγάλη ανομοιογένεια στα αποτελέσματα και της πρώτης μεθόδου.

Αυτό οφείλεται σε μια σειρά από πιθανούς λόγους. Καταρχάς, οι δέσμες των ινών είναι ανόμοιες σε μήκος καθώς προσφύονται σε τμήματα των οστών με διαφορετική μορφολογία. Επιπρόσθετα, η ανωμαλία των επιφανειών των οστών ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εφαρμογή των οστών στην αρπάγη. Μπορεί να προκληθεί συστροφή ή και κάμψη κάποιων ινών καθώς και μετατόπιση της αρπάγης. Όταν οι αρπάγες δεν είναι

κάθετες μεταξύ τους αλλάζει και ο άξονας εφελκυσμού με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω σφάλματα που υπεισέρχονται στις εν λόγω μετρήσεις, θα εξετάσουμε τα πρωτογενή αποτελέσματα των παρακάτω πειραμάτων εφελκυσμού του σκαφομνηνοειδούς που πραγματοποιήθηκαν το 2004 στο εργαστήριο του Κτηρίου Αντοχής Υλικών στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής (Νικολόπουλος, 2009) [6].

5.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Από το σύνολο των δειγμάτων που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής θα εστιάσουμε στα 7 δείγματα σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου για τα οποία θα επεξεργαστούμε τα πρωτογενή στοιχεία με στόχο να εξάγουμε συμπεράσματα για τη λειτουργία του τεχνητού συνδέσμου που θέλουμε να κατασκευάσουμε.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η συμπεριφορά ενός συνδέσμου εξαρτάται από την ηλικία και το φύλο του ατόμου από το οποίο προέρχεται. Έτσι στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι εν λόγω πληροφορίες.

Πληροφορίες προέλευσης για τα δείγματα		
Αριθμός Δείγματος	Ηλικία (χρόνια)	Φύλο
ko5	76	Θήλυ
ko6	78	Άρρεν
ko40	88	Θήλυ
ko41	63	Θήλυ
ko51	55	Άρρεν
ko52	75	Άρρεν
ko53	78	Άρρεν

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τον πίνακα με τις διαστάσεις των συνδέσμων. Θεωρήθηκε ότι η διατομή είναι κατά προσέγγιση ορθογώνια με αποτέλεσμα να προκύψουν τα εξής:

Κωδικός Δείγματος	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Μέση διατομή (mm ²)	Μήκος (mm)
ko5	15	1,5	22,50	5,20
ko6	16,5	1,5	24,75	5,00
ko40	15,5	1,5	23,25	5,50
ko41	21,5	1,5	32,25	5,50
ko51	14,2	1,5	21,30	4,30
ko52	16,1	1,5	24,15	5,60
ko53	14	1,5	21,00	4,80

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με εφελκυστική μηχανική τύπου Instron 1121 με 1000N Load Cell. Η μηχανή ήταν εφοδιασμένη με πνευματικές αρπάγες, με πεπιεσμένο αέρα ελεγχόμενης πίεσης που κυμαινόταν από 2,7 MPa έως 3,4 MPa ώστε να εφαρμόζεται ομοιόμορφη και ομαλή πίεση στα οστικά άκρα των δοκιμίων έτσι ώστε να μην συνθλιβούν. Η ταχύτητα μετατόπισης στα πειράματα ήταν 5 mm/min.

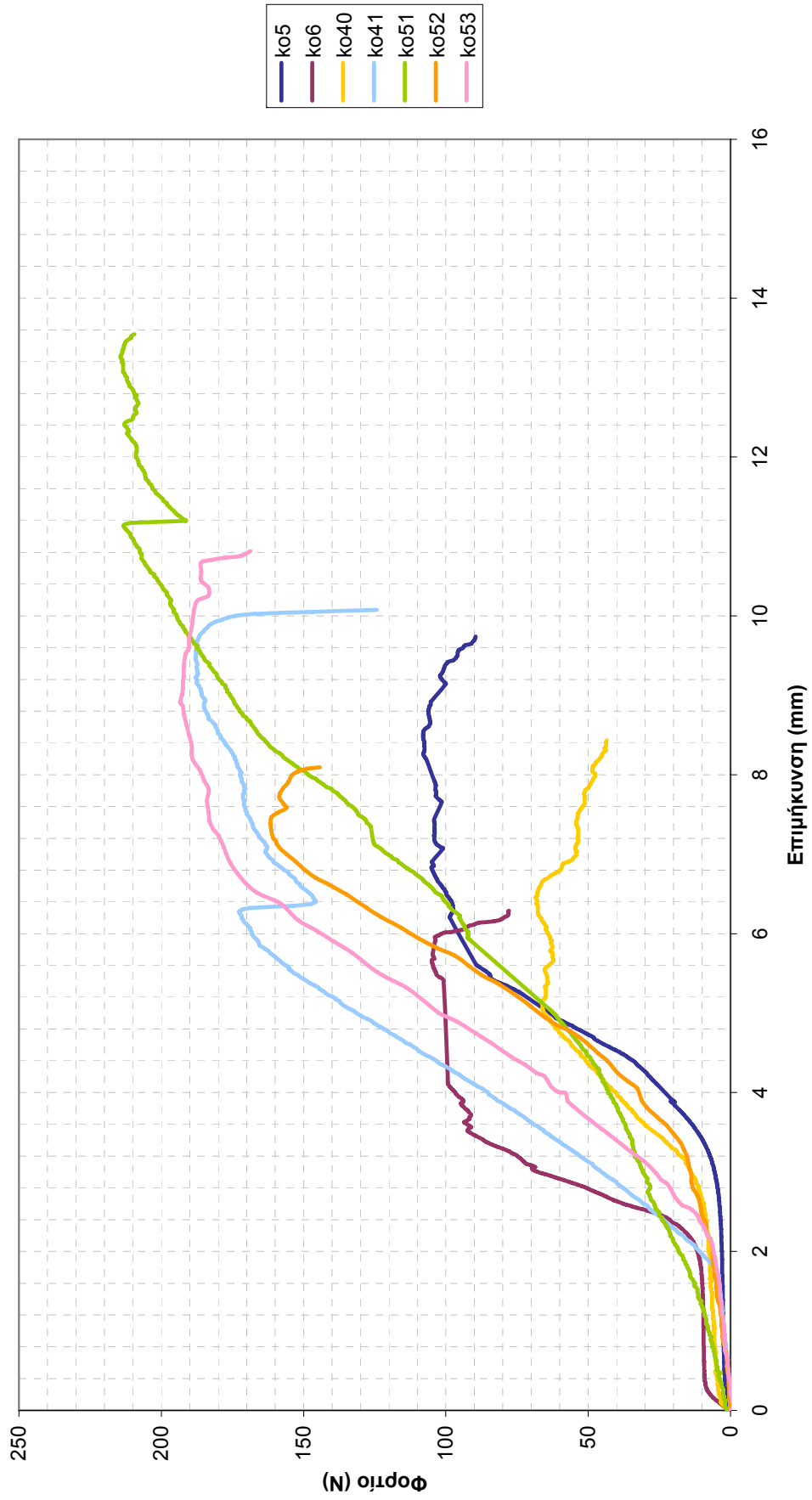
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται το μέγιστο φορτίο καθενός από τους συνδέσμους μαζί με την αντίστοιχη επιμήκυνση που παρουσίασε για το φορτίο αυτό:

Κωδικός Δείγματος	Μέγιστο Φορτίο (N)	Μέγιστη Επιμήκυνση (mm)
ko5	105	8,3
ko6	107	7,1
ko40	68	3,9
ko41	187	7,6
ko51	210	7,5
ko52	161	6,7
ko53	193	6,3
Μέση τιμή	147	6,8
Τυπική απόκλιση	54	1,4

Είναι προφανές από τον παραπάνω πίνακα ότι υπάρχουν σχετικές αποκλίσεις στις τιμές των μέγιστων φορτίων για κάθε σύνδεσμο. Επειδή δε μπορούμε να γνωρίζουμε τους λόγους αυτής της ανομοιομορφίας δε μπορούμε να θεωρήσουμε κάποιες από τις τιμές αυτές ως ακραίες και να τις αγνοήσουμε. Επίσης με βάση τη συνολική εικόνα των δεδομένων, όπως θα δούμε παρακάτω, δεν παρουσιάζεται κάποια ανωμαλία. Συνεπώς θα θεωρήσουμε ότι αυτές οι αποκλίσεις είναι μέσα στα πλαίσια της πραγματικής (φυσικής) ανομοιομορφίας των συνδέσμων.

Στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας φαίνονται αναλυτικά οι κατανομές φορτίου-επιμήκυνσης για κάθε δείγμα όπως αυτές προέκυψαν από τα πειράματα. Παρατηρούνται χαρακτηριστικές σημαντικές αποκλίσεις σε κάθε σύνδεσμο, πράγμα που είναι αναμενόμενο όπως εξηγήσαμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου.

Φορτίο - Επιμήκυνση

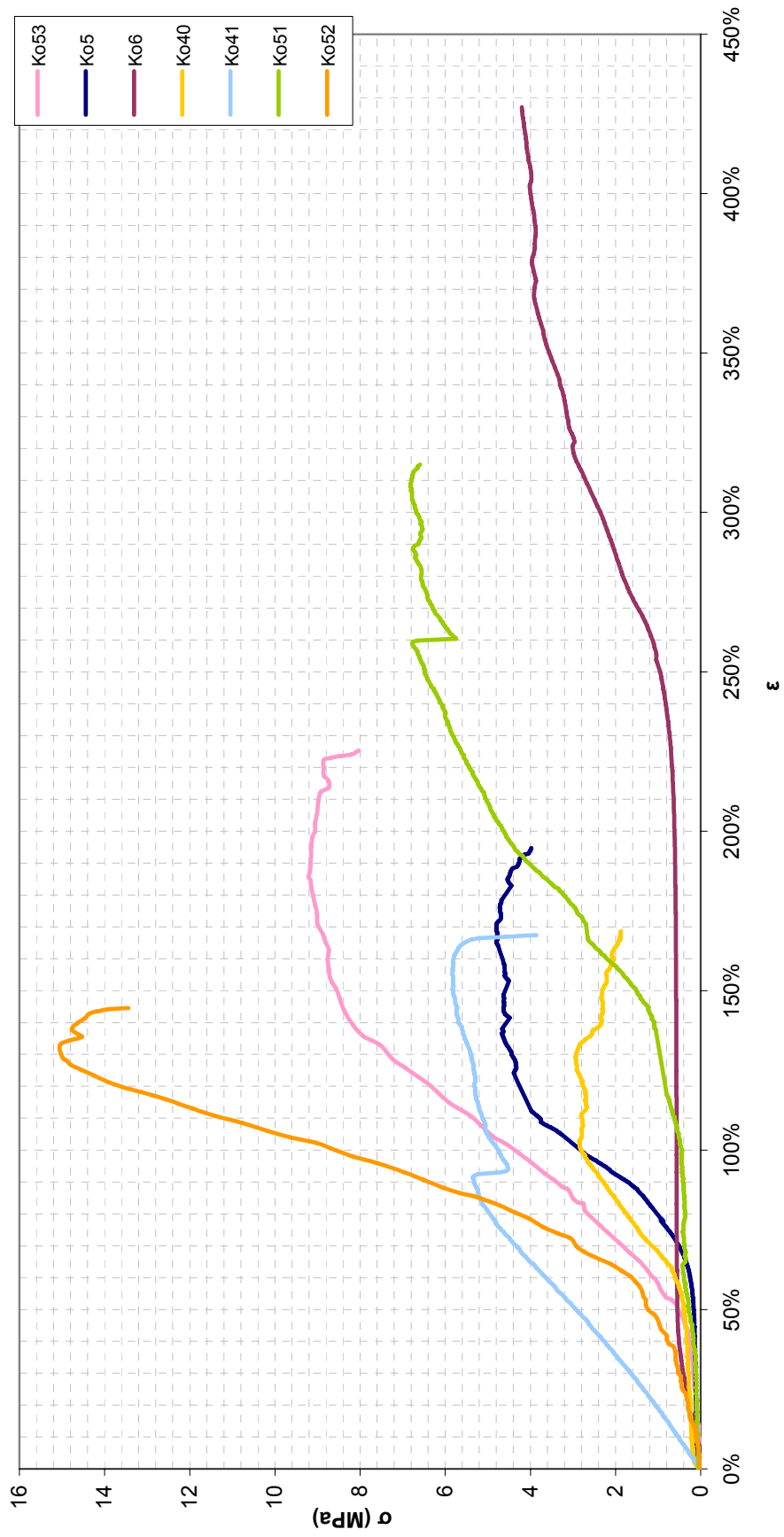


Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι στην καθημερινή λειτουργία του ο σύνδεσμος γενικά περιορίζεται σε μικρές παραμορφώσεις. Έτσι εκτός από το μέσο επιβατηγό μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζουμε στην καμπύλη εισάγουμε και ένα δεύτερο το οποίο αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης στις μικρές παραμορφώσεις. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα αυτά τα μεγέθη για κάθε δείγμα:

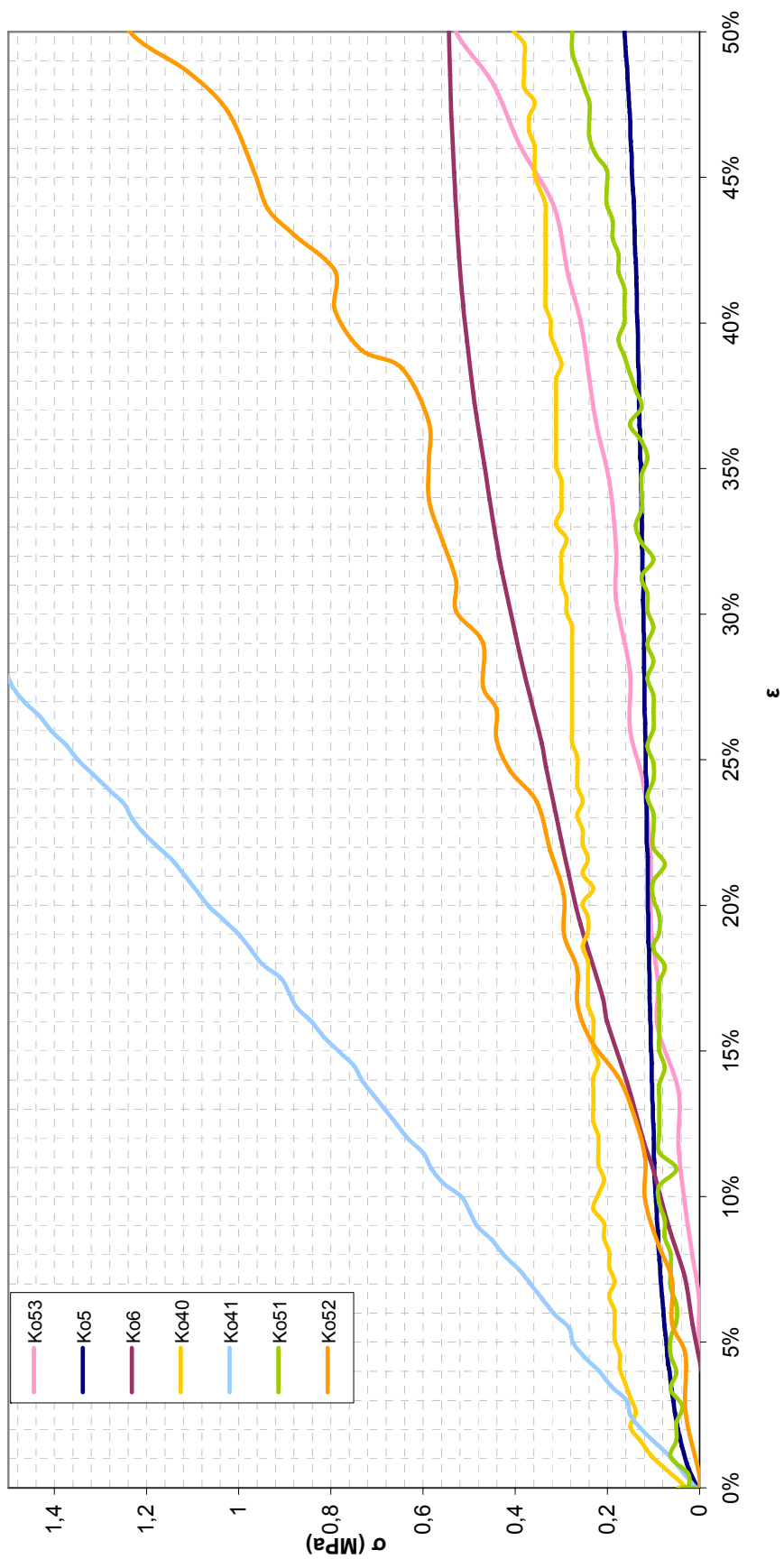
Κωδικός Δείγματος	Μέση Διατομή (mm ²)	Αρχικό Μήκος (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (μικρές παραμορφώσεις) (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (Επιβατηγό) (MPa)
ko5	22,50	5,20	0,72	12,53
ko6	24,75	5,00	1,56	18,06
ko40	23,25	5,50	1,28	10,31
ko41	32,25	5,50	0,16	19,62
ko51	21,30	4,30	1,12	18,23
ko52	24,15	5,60	0,39	21,09
ko53	21,00	4,80	0,54	20,68
Μέση Τιμή Μεγέθους			0,82	17,22
Τυπική απόκλιση			0,51	4,17

Για να γίνει πιο κατανοητός ο παραπάνω πίνακας στην επόμενη σελίδα παραθέτουμε το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων όπως προκύπτει από τις μετρήσεις και ξεχωριστά το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για την χαμηλή περιοχή των δειγμάτων.

Τάση - Παραμόρφωση



Τάση - Παραμόρφωση στη χαμηλή περιοχή



Μπορούν να γίνουν τα παρακάτω σχόλια:

1. Παρατηρείται αυξημένη διασπορά των τάσεων αστοχίας των διαφόρων συνδέσμων.
2. Δεδομένου ότι πρόκειται για λόγους τιμών, συστήνεται να χρησιμοποιηθούν οι αρμονικοί μέσοι των μέτρων ελαστικότητας (0,5 και 16 MPa) αντί των μέσων όρων (0,8 και 17 MPa)
3. Η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων $\left(CV = \frac{\sigma}{m} = \frac{0,51}{0,82} = 62\% \right)$ σε σχέση με το μέσο επιβατηγό $\left(CV = \frac{\sigma}{m} = \frac{4,17}{17,22} = 24\% \right)$. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο να τεθούν ακριβή και δεσμευτικά όρια στην ακαμψία του τεχνητού συνδέσμου στην περιοχή των χαμηλών τάσεων, που αποτελούν τη συνηθισμένη περιοχή λειτουργίας του συνδέσμου. Αντίθετα, είναι σημαντικό να γίνουν σεβαστές οι τάξεις μεγέθους που προσδιορίζονται στο επιβατηγό μέτρο ελαστικότητας στη γραμμική περιοχή, που αποτελεί την περιοχή ακραίας λειτουργίας.
4. Σε σχέση με το προηγούμενο σχόλιο, πρέπει να διευκρινιστεί ότι, η παρατηρούμενη διασπορά στην περιοχή των χαμηλών τάσεων αντιστοιχεί σε πραγματικές φυσιολογικές διαφορές της αρχικής κυματοειδούς μορφής του κολλαγόνου, τόσο από το ένα άτομο στο άλλο όσο και από τον ένα σύνδεσμο στον άλλο. Όταν όμως υποστεί ο σύνδεσμος επαρκή επιμήκυνση και συνεπώς πρακτικά ευθυγραμμιστούν οι ίνες των ιστών, τότε η συμπεριφορά προσδιορίζεται από το υλικό των ιστών και όχι από την αρχική διάταξη. Δεδομένου ότι το υλικό είναι πρακτικά της ίδιας σύστασης στους διάφορους ανθρώπους, είναι επόμενο η παραμορφωσιμότητα σε αυτό το στάδιο (γραμμική περιοχή) δεν θα διαφέρει πλέον ουσιαστικά από τη μια περίπτωση στην άλλη.

6

Μοντέλο Τεχνητού

Συνδέσμου

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσουμε τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάσαμε τον τεχνητό ορθοπεδικό σύνδεσμο. Αρχικά, θα παρουσιάσουμε το είδος του συνδέσμου που θέλουμε να κατασκευάσουμε παρουσιάζοντας και ήδη υπάρχουσες ορθοπεδικές βίδες για τη συγκεκριμένη περιοχή του καρπού. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε ορισμένα από τα σχέδια που εξετάστηκαν ως «εν δυνάμει εφαρμόσιμα» κατά το σχεδιασμό του εν λόγω εμφυτεύματος.

6.1 Λειτουργία και Ιδιότητες

Με βάση και την ανάλυση που κάναμε και στα προηγούμενα κεφάλαια ο τεχνητός σύνδεσμος που θα κατασκευάσουμε πρέπει να μπορεί να προσομοιώσει όσο το δυνατόν καλύτερα τη μηχανική συμπεριφορά των τριών μοιρών του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου.

Όπως φάνηκε και παραπάνω πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερο βάρος στην σύγκλιση με το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, καθώς ο στόχος του τεχνητού συνδέσμου είναι περισσότερο να αντικαταστήσει το σύνδεσμο στις καθημερινές του λειτουργίες παρά να ανταποκριθεί σε συνθήκες ακραίας φόρτισης. Από τα σχόλια του προηγούμενου κεφαλαίου, σημειώνεται ότι, ανεξάρτητα της σημασίας, αυτή η σύγκλιση νοείται συμμόρφωση ως τάξη μεγέθους και όχι σε ακριβή και στενά όρια.

Φυσικά, η εύρεση ενός υλικού που θα αντικαθιστά πλήρως το σύνδεσμο είναι μια διαδικασία ιδιαίτερα δύσκολη καθώς δεν έχει εντοπιστεί μέχρι σήμερα κάποιο υλικό που να μπορεί να εκτελέσει τις ζητούμενες λειτουργίες. Στα επόμενα, θα προσπαθήσουμε να εξετάσουμε τη σύγκλιση κάποιων υλικών του εμπορίου με τις ζητούμενες προδιαγραφές.

Ένας άλλος λόγος που δυσχεραίνει το έργο μας είναι οι διαστάσεις. Καθώς τα δύο οστά είναι ιδιαίτερα μικρά σε μέγεθος και η μεταξύ τους απόσταση είναι κι αυτή περιορισμένη δεν υπάρχει αρκετό περιθώριο για περίτεχνες στερεώσεις και ο τεχνητός σύνδεσμος θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν λιγότερα μέρη για να διασφαλιστεί η αντοχή του.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει ο τρόπος εισαγωγής/τοποθέτησης του εμφυτεύματος. Η υπάρχουσα τεχνική εισαγωγής τέτοιου είδους μοσχευμάτων στον καρπό προϋποθέτει, αρχικά την προσπέλαση από τη ραχιαία πλευρά του καρπού και στη συνέχεια το τρύπημα του σκαφοειδούς έτσι ώστε μέσα από αυτό να συναντηθεί το μηνοειδές. Για να καταφέρει να διατηρήσει την ευθυγράμμιση του σκαφοειδούς και του μηνοειδούς ο χειρουργός είναι αναγκασμένος να διατηρήσει μια βελόνα Kirschner στο κέντρο του ανοιγμένου διάυλου. Η βελόνα αυτή λειτουργεί ως οδηγός για την εισαγωγή του εμφυτεύματος και δε μπορεί να αφαιρεθεί παρά στο τέλος της επέμβασης. Έτσι προκύπτει άλλος ένας περιορισμός για το εμφύτευμα: Θα πρέπει να διατρέχεται εσωτερικά από μια κυλινδρική οπή με διάμετρο 1mm.

Θα πρέπει λοιπόν να λάβουμε υπόψη όλους αυτούς τους περιορισμούς κατά το σχεδιασμό του εμφυτεύματος.

6.2 Σχεδιασμός

Πριν προχωρήσουμε στην παράθεση των πιθανών σχεδίων του ορθοπεδικού συνδέσμου έχει σίγουρα αξία να εξετάσουμε μερικές από τις ήδη υπάρχουσες ορθοπεδικές βίδες που χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση του σκαφοειδούς σε περίπτωση κατάγματος.



Ένα πρώτο παράδειγμα είναι ο κοχλίας Herbert. Ο κοχλίας αυτός σχεδιάστηκε από τον Timothy Herbert και βγήκε για πρώτη φορά στην παραγωγή το 1981. Σήμερα, χρησιμοποιείται ευρέως για τη σταθεροποίηση στα κατάγματα του σκαφοειδούς αλλά και άλλων οστών μικρών διαστάσεων. Το μήκος του κυμαίνεται από 10-30mm ενώ η διάμετρος του είναι διαφορετική σε κάθε άκρο του. Χαρακτηριστικά, οι κοχλίες που συνιστανται για την αποκατάσταση του σκαφοειδούς έχουν διάμετρο σπειρώματος 3,0 mm στο εμπρόσθιο τμήμα της βίδας και 3,9 mm στο οπίσθιο. Ο άξονας μεταξύ των σπειρωμάτων έχει διάμετρο 1,75 mm.

Ένας άλλος ορθοπεδικός κοχλίας που συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το σύστημα Kompressor, στην παρακάτω εικόνα. Ο κοχλίας αυτός είναι κατασκευασμένος από τιτάνιο και παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τον κοχλία Herbert. Έχει όμως και μια ουσιαστική



διαφορά: Το άνω σκέλος του είναι κινητό. Για την ακρίβεια, ο κοχλίας χωρίζεται σε δύο στέλεχη που ξεχωρίζουν από το διαφορετικό χρώμα: το άνω στέλεχος του κοχλίας (μπλε χρώμα) είναι ένας δακτύλιος με σπείρωμα εσωτερικά και εξωτερικά ενώ το κάτω στέλεχος (ροζ χρώμα) είναι μια ορθοπεδική βίδα με τον

άξονα της να παρουσιάζει επίσης σπειρώματα. Η ορθοπεδική βίδα διατρέχεται από διάλυλο 1,1 ή 0,9 mm (ανάλογα με το μέγεθος της διάταξης) για να περνάει η βελόνα Kirschner όπως είναι απαραίτητο από τη χειρουργική διαδικασία.

Χαρακτηριστικής σημασίας είναι επίσης ο τρόπος με τον οποίο βιδώνεται το συγκεκριμένο



σύστημα. Ο κοχλίας είναι εφοδιασμένος με δύο ξεχωριστές υποδοχές (μία για το μπλε και μία για το ροζ τμήμα) σε σχήμα αστεριού. Ο στόχος είναι να μπορεί να στερεώνεται χωριστά το κάθε στέλεχος και να εκτελούνται μεταβολές στη σχετική απόσταση των δύο οστών. Ο τρόπος σχεδιασμού του εργαλείου για το βίδωμα του εξωτερικού δακτυλίου είναι

αξιοπρόσεκτος: Το κατσαβίδι είναι κούφιο στο εσωτερικό για να μπορεί να βιδώνει το δακτύλιο χωρίς να εμποδίζεται από το εσωτερικό στέλεχος (ροζ).

Η βασική χρησιμότητα του συστήματος είναι για την επαναπροσέγγιση μικρών οστών τα οποία έχουν σπάσει και έχουν απομακρυνθεί μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο η βίδα μόλις στερεωθεί στο ένα θραύσμα του οστού μπορεί και βιδώνεται με τέτοιο τρόπο στο δεύτερο ώστε να τα εξαναγκάζει να προσεγγίσουν μεταξύ τους όσο χρειάζεται. Στην ακτινογραφία στα δεξιά βλέπουμε την χρήση του συγκεκριμένου κοχλίου σε κάταγμα του σκαφοειδούς οστού.



Ο κοχλίας Kompessor παράγεται σε δύο μεγέθη. Από αυτά το μικρότερο χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση καταγμάτων καρπιαίων οστών και ιδιαίτερα του σκαφοειδούς που είναι και πιο επιρρεπές σε τέτοιες κακώσεις. Οι διαστάσεις της κάθε διάταξης του κοχλίου φαίνονται παρακάτω:

	Standard	Mini
Leading Diameter	4.0mm	2.8mm
Trailing Diameter	5.0mm	3.6mm
Screw Lengths	14 - 34mm	10 - 26mm
K-Wire	1.1mm (.045")	0.9mm (.035")
Leading Drill	2.5mm	2.2mm
Trailing Drill	3.5mm	2.8mm

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των σχεδίων του συνδέσμου είναι σημαντικό να εξετάσουμε ένα πρώτο μοντέλο για το εν λόγω εμφύτευμα που κατασκευάστηκε πριν την έναρξη των πειραμάτων. Έτσι, στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το πρώτο μοντέλο τεχνητού συνδέσμου που

κατασκευάστηκε με σκοπό να λειτουργήσει ως πρότυπο στην μελέτη. Πρόκειται για μια ενιαία μεταλλική βίδα από ανοξείδωτο χάλυβα η οποία έχει μια σταυροειδή υποδοχή στο άνω άκρο της για να βιδώνει στο οστό. Οι διαστάσεις του πρωτότυπου αυτής είναι



αρκετά μεγαλύτερες από τις προηγούμενες γιατί είχε βαρύνουσα σημασία η δυνατότητα μελέτης και επεξεργασίας της. Έτσι, κρίθηκε σημαντικό να έχει σχετικά μεγαλύτερο μέγεθος από το ζητούμενο.

Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του παρακάτω σχήματος, πρόκειται για μια βίδα με



μεταλλικό σπείρωμα σαν του ελατηρίου στο κέντρο. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι λόγω του υλικού και της κατασκευής του κατά την παραμόρφωση εκδηλώνει περιορισμένου εύρους γραμμικώς ελαστικές παραμορφώσεις ενώ στη συνέχεια εκδηλώνονται πλαστικές παραμορφώσεις και αλλοιώνεται το

σχήμα του. Επίσης, κατά τις σχετικές κινήσεις των δύο οστών είδαμε πως παρουσιάζεται η ανάγκη για κάμψεις και στροφές. Το συγκεκριμένο σύστημα δεν επιτρέπει τέτοιες κινήσεις καθώς η παραμόρφωση είναι μόνιμη και δεν επιτρέπει την επαναφορά στην αρχική θέση.

Από τα παραπάνω κατανοούμε ότι πρέπει να θέσουμε κάποιους περιορισμούς στον τεχνητό σύνδεσμο όπως αυτοί προκύπτουν από τις ήδη υπάρχουσες βίδες. Παρακάτω θα παραθέσουμε πέντε διαφορετικούς δυνατούς σχεδιασμούς για τον τεχνητό σύνδεσμο, οι τέσσερις εκ των οποίων ακολουθούν την λογική που περιγράφεται παραπάνω. Η πέμπτη διάταξη αποτελεί μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος και γι αυτό το λόγο θα εξεταστεί χωριστά στο τέλος του κεφαλαίου.

6.2.1 Σχέδιο 1^ο

Η πρώτη προσέγγιση του τεχνητού συνδέσμου βασίστηκε στη λογική λειτουργίας του κοχλία Herbert. Η βασική διαφορά με τον κοχλία Herbert είναι ότι ο ρόλος του δεν είναι να στερεώσει το οστό αλλά να επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ δύο οστών. Άρα δεν έπρεπε να είναι μεταλλικός στο σύνολο του. Έτσι, ο τεχνητός σύνδεσμος χωρίστηκε σε τρία τμήματα:

- Δύο μεταλλικούς κυλίνδρους στα άκρα
- Ένα πλαστικό κυλινδρικό στέλεχος στο κέντρο

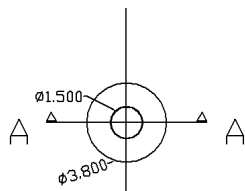
Ο στόχος της κατασκευής είναι να χρησιμοποιηθούν τα μεταλλικά άκρα ως βίδες στα οστά και το πλαστικό στο κέντρο να λειτουργήσει ως υποκατάστατο του συνδέσμου.

Όσον αφορά στις διαστάσεις, ο άνω μεταλλικός κύλινδρος που προορίζεται για το σκαφοειδές έχει μεγαλύτερη διάμετρο ($\varnothing 3,8\text{mm}$) από ότι εκείνος που θα φτάσει στο μηνοειδές ($\varnothing 3,6\text{mm}$). Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η διαφοροποίηση στις διαμέτρους των δύο κυλίνδρων μπορεί να γίνει κατανοητός με βάση τη διαδικασία εισαγωγής. Εφόσον ο τεχνητός σύνδεσμος πρέπει να εισέλθει στο μηνοειδές μέσω του σκαφοειδούς, θα πρέπει το προπορευόμενο σκέλος του να έχει διάμετρο μικρότερη από αυτό που ακολουθεί ώστε να μπορεί να περάσει χωρίς κώλυμα από την οπή.

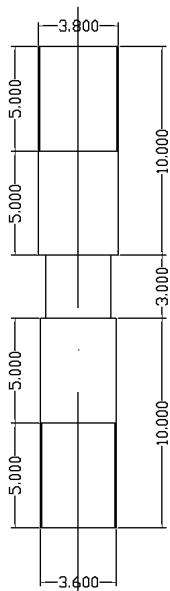
Τέλος, ολόκληρη η κατασκευή διατρέχεται από ένα κυλινδρικό διάυλο διαμέτρου 1mm έτσι ώστε να επιτρέπεται η διέλευση του οδηγού. Για την τοποθέτηση του κοχλία θα χρησιμοποιείται ένα πολυγωνικό άλεν που θα βιδώνει χωριστά το κάθε άκρο.

Το βασικό πρόβλημα κατά το σχεδιασμό ήταν ο τρόπος με τον οποίο θα στερεωθεί το πλαστικό στις μεταλλικές άκρες. Καθώς η εξωτερική διάμετρος είναι 3,8mm και η εσωτερική 1mm ο συνολικός χώρος που απομένει είναι πολύ μικρός για να επιτευχθεί η στερέωση. Επιπρόσθετα, η τεχνική στερέωσης έπρεπε να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν λιγότερα μέρη γιατί οι διαστάσεις είναι ήδη πολύ μικρές.

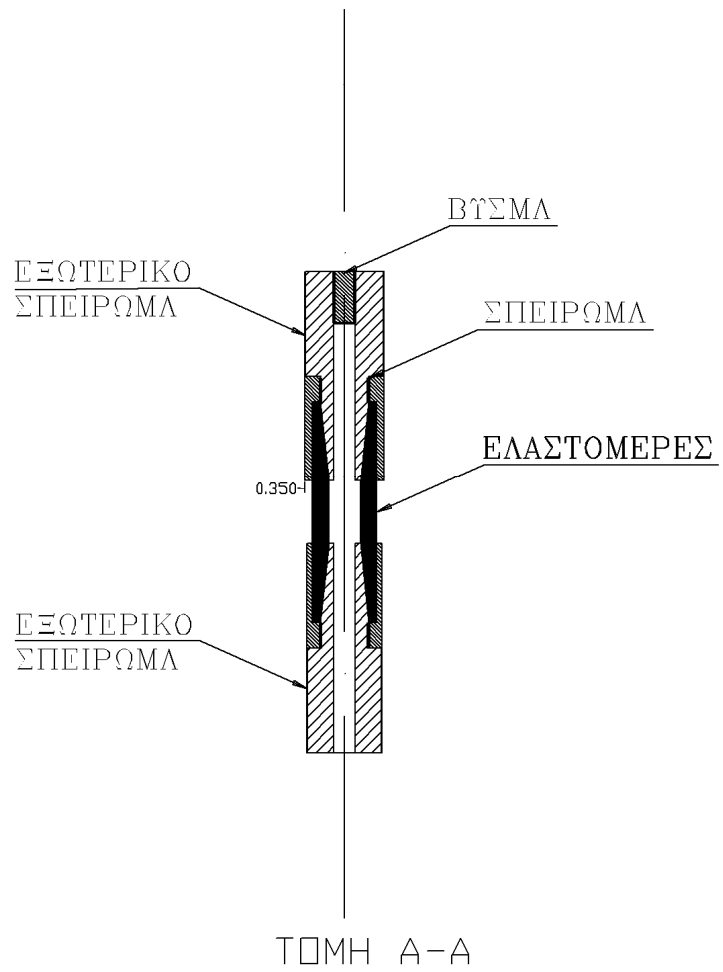
Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, σε αυτό το πρώτο σχέδιο, κινηθήκαμε προς την κατεύθυνση της σφηνοειδούς κατάληξης του μεταλλικού κοχλία, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα. Έτσι, το πλαστικό εισέρχεται στην μεταλλική βίδα και με τη βοήθεια ενός δακτυλίου στερεώνεται σε κάθε άκρο. Ένα ερώτημα που γεννάται από αυτόν τον τρόπο στερέωσης είναι ότι ακόμα κι αν θεωρήσουμε ότι το πλαστικό είναι εντελώς ασυμπίεστο η κλίσης της σφήνας είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τη δυνατότητα συγκράτησης του πλαστικού κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



ΚΑΤΟΨΗ



ΟΨΗ



ΤΟΜΗ Α-Α

ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ mm

Παρόλο που αυτή η λύση ήταν λογική παρουσιάζει μεγάλα προβλήματα:

- Αν και επιχειρήθηκε να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό των τμημάτων στα οποία χωρίζονται τα μεταλλικά τμήματα, το μέγεθος τους παραμένει προβληματικό καθιστώντας τη διάταξη δύσχρηστη.
- Η διαδικασία τοποθέτησης είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς ο χειρουργός θα πρέπει να τοποθετεί κάθε τμήμα χωριστά με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα λάθους ή ακόμη και καταστροφή της βίδας.
- Η διάταξη αυτή δεν επιτρέπει την εύκολη απομάκρυνση του συνδέσμου σε περίπτωση βλάβης.
- Η ύπαρξη μικρού πάχους περιθωρίων σε κάθε μεταλλικό άκρο μειώνει τη συνολική αντοχή της βίδας με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ανάγκη για υλικά υψηλής ποιότητας και να αυξάνει το κόστος
- Ακόμη και με χρήση τέτοιων υλικών, είναι δύσκολο να διασφαλίσει κανείς ότι ο σύνδεσμος μπορεί να αντέξει, ειδικά κάτω από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.
- Το πλαστικό είναι εμφανές, δηλαδή σε επαφή με τον οργανισμό, και συνεπώς εκτεθειμένο σε χημικές αντιδράσεις και φθορές.
- Η δυσκολία και το κόστος παραγωγής μιας τέτοιας διάταξης είναι μεγάλη καθώς απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και μηχανήματα.

6.2.2 Σχέδιο 2^ο

Σε μια προσπάθεια να αντιμετωπίσουμε τα προβλήματα του 1^{ου} σχεδίου προχωρήσαμε σε μια τροποποίηση του τεχνητού συνδέσμου. Στην παρούσα φάση εστιάσαμε σε δύο από τα προβλήματα που εκφράστηκαν παραπάνω.

Το πρώτο πρόβλημα που είχαμε να λύσουμε ήταν η απλοποίηση του τρόπου εισαγωγής και στερέωσης (βιδώματος) του εμφυτεύματος. Κρίθηκε αναγκαίο να βρεθεί ένας τρόπος ώστε η διάταξη να εισάγεται ολόκληρη στον οργανισμό, να είναι δηλαδή έτοιμη για χρήση πριν την έναρξη της επέμβασης.

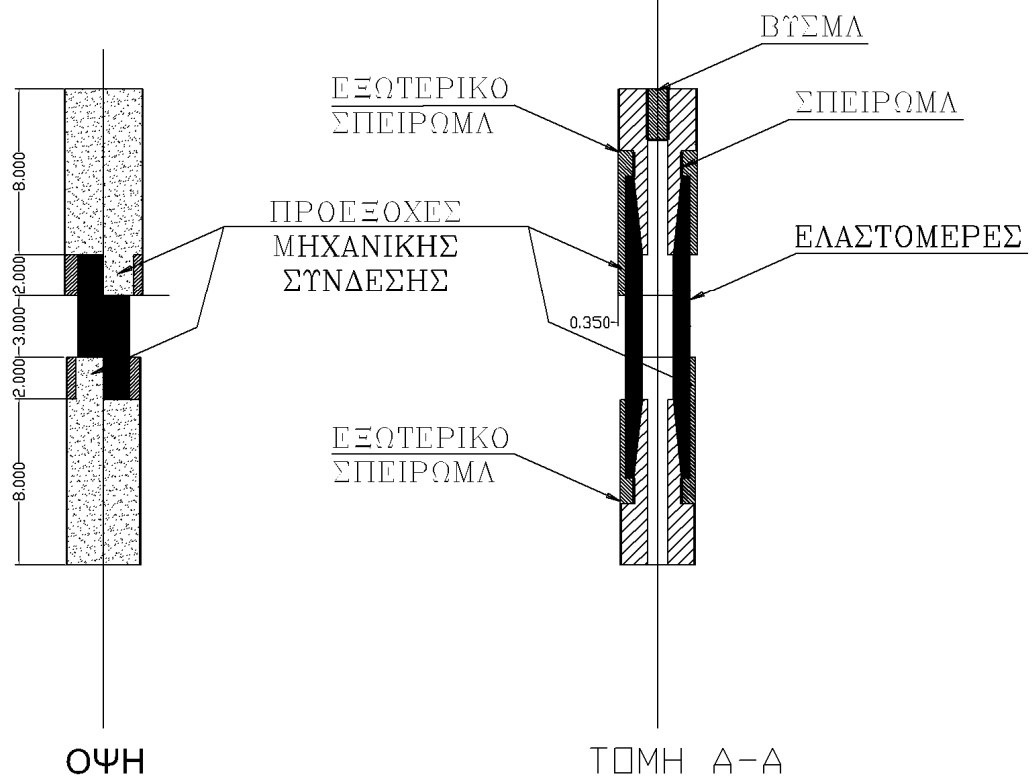
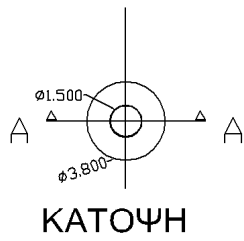
Στην κατεύθυνση αυτή, η διάταξη τροποποιήθηκε ως εξής:

1. Πλέον τα δύο μεταλλικά άκρα εισέρχονται στον οργανισμό ενωμένα όπως φαίνονται στο σχήμα. Ουσιαστικά το πλαστικό συμπιέζεται στο ενδιάμεσο έτσι ώστε τα άκρα που είναι διαμορφωμένα σε σχήμα Γ να ακουμπάνε μεταξύ τους.
2. Στα άκρα κάθε μεταλλικής εξοχής υπάρχει ένα εξόγκωμα το οποίο προσαρμόζεται στην αντίστοιχα η διαμορφωμένη οπή του άλλου άκρου και σταθεροποιεί τα δύο άκρα μαζί. Για να απελευθερωθούν αρκεί να περιστρέψουμε αριστερόστροφα το άνω προς το κάτω.

Κατά την τοποθέτηση, αρχικά βιδώνουμε (δεξιόστροφα) το μεταλλικό τμήμα στο μνηοειδές και ύστερα με αριστερόστροφη κίνηση απαγγιστρώνεται το άνω μέρος από το κάτω και βρίσκεται πλέον βιδωμένο στο σκαφοειδές. Στο τέλος της επέμβασης χρησιμοποιείται πολυμερικό τσιμέντο για να σφραγιστούν οι οπές.

Επίσης, καθώς ένας μεγάλος αριθμός προβλημάτων απορρέουν από τον τρόπο στερέωσης του πλαστικού στα μεταλλικά άκρα κρίθηκε απαραίτητος ο επανασχεδιασμός της συγκεκριμένης διάταξης. Έτσι, αντί για τη διάταξη του προηγούμενου σχεδίου εδώ το πλαστικό εισέρχεται ολόκληρο μέσα στις βίδες στο τέλος των οποίων βρίσκεται μια τάπα με σφηνοειδές εξόγκωμα το οποίο στερεώνει το πλαστικό. Σε αυτή την περίπτωση ο διάυλος που διατρέχει τη διάταξη έχει 1,5mm διάμετρο ενώ οι τάπες έχουν οπές 1mm.

Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η αντιμετώπιση του προβλήματος της εισαγωγής του τεχνητού συνδέσμου και η σημαντική μείωση των εργασιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν από την έναρξη της επέμβασης. Επίσης, η διάταξη αυτή επιτρέπει την απομάκρυνση σε περίπτωση βλάβης με σχετικά απλό τρόπο.



ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ mm

Παρόλα αυτά, αυτή η διάταξη διατηρεί κάποια από τα προβλήματα της προηγούμενης αλλά εισάγει και κάποια νέα. Χαρακτηριστικά διατηρούνται τα εξής προβλήματα:

- Η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ πιο εύχρηστη από την προηγούμενη αλλά εξακολουθεί να αποτελείται από μικρά τμήματα σε κάθε μεταλλικό άκρο με αποτέλεσμα να μειώνεται τη συνολική αντοχή της βίδας. Εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για υλικά υψηλής ποιότητας και συνεπώς αυξημένου κόστους.
- Ακόμη και με χρήση τέτοιων υλικών, είναι δύσκολο να διασφαλίσει κανείς ότι ο σύνδεσμος μπορεί να αντέξει, ειδικά κάτω από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.
- Το πλαστικό εξακολουθεί να είναι εμφανές, δηλαδή σε επαφή με τον οργανισμό, και άρα εκτεθειμένο σε χημικές αντιδράσεις και επιπλέον φθορές.
- Η δυσκολία και το κόστος παραγωγής μιας τέτοιας διάταξης είναι μεγάλη καθώς απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και μηχανήματα.

Επιπλέον εισάγεται και ένα νέο πρόβλημα:

- Η υποχρεωτική αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου προσθέτει σημαντικές δυσκολίες, καθώς μειώνεται σημαντικά ο χώρος μέσα στον οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε τη διάταξη.

6.2.3 Σχέδιο 3^ο (η λύση των bellows)

Μέχρι το 2^ο σχέδιο, η διάταξη διατηρήθηκε σταθερή όμως το βασικό πρόβλημα του πλαστικού δεν έβρισκε λύση. Έτσι, στην πορεία τέθηκε ως πρωτεύον το ζήτημα της ακαμψίας της διάταξης. Στην κατεύθυνση αυτή, καταλήξαμε ότι ο καλύτερος τρόπος για να επιτύχουμε την ακαμψία που χρειαζόμασταν θα ήταν να βρεθεί ένας τρόπος τέτοιος ώστε οι ενώσεις μεταξύ των τμημάτων να γίνονται στην κατασκευή. Έτσι η διάταξη εδώ διαφοροποιείται και εισάγεται για πρώτη φορά η ιδέα των bellows.

Τα bellows είναι μεταλλικές κατασκευές από νικέλιο, τιτάνιο ή και ανοξείδωτο χάλυβα με πτυχώσεις, όπως διπλανό σχήμα, που έχουν τη δυνατότητα να συμπιεστούν και να εκταθούν κάτω από αντίστοιχες φορτίσεις. Όταν αφαιρέσουμε το φορτίο η διάταξη επανέρχεται στην αρχική κατάσταση υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε περάσει το όριο διαρροής του υλικού.



Τα bellows χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που κατασκευάζονται με συγκολλήσεις και αυτά που διαμορφώνονται με συγκεκριμένες διαδικασίες. Εκείνα που κατασκευάζονται με συγκόλληση αν και έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή στα σημεία συγκόλλησης λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα σημεία αυτά κατά την κατασκευή. Αντίθετα με τη συγκόλληση, υπάρχουν μια σειρά διαδικασίες για τη διαμόρφωση των bellows. Στην περίπτωση μας, η πιο σημαντική είναι εκείνη της ηλεκτραπόθεσης. Με αυτή τη διαδικασία, μπορούν να παραχθούν bellows με μεγάλη ακρίβεια, με λεπτά τοιχώματα (25 μm ή λιγότερο), για να εξυπηρετήσουν απαιτητικές εφαρμογές.



Αυτή η διαδικασία δίνει τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να κατασκευάσει το τμήμα του συνδέσμου ενωμένο με τα μεταλλικά άκρα χωρίς να χρειάζονται επιπλέον στερεώσεις από πλευράς μας. Ένα άλλο πλεονέκτημα των bellows είναι ότι η ύπαρξη εσωτερικής οπής είναι αυτονόητη και έτσι δε διαφοροποιούνται οι μηχανικές ιδιότητες.

Επιπλέον, σήμερα στο εμπόριο υπάρχουν διατάξεις bellows με διαστάσεις παρόμοιες ή ακόμη και μικρότερες από τη ζητούμενη.

Τα bellows παρέχουν μεγάλη ελευθερία κινήσεων ιδιαίτερα σε περιπτώσεις στροφών καθώς δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις σχετικές κινήσεις των οστών. Με τη χρήση των bellows καταφέρνουμε να απλοποιήσουμε εντελώς τη διάταξη και να κατασκευάσουμε ένα εμφύτευμα απλό, λειτουργικό και εύχρηστο.

- Το μεγάλο μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι τα bellows δεν έχουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα θα τοποθετήσουμε τη διάταξη συμπιεσμένη κατά 3mm με αποτέλεσμα να έχουμε τη δυνατότητα να κινούμαστε ελεύθερα για επιμήκυνση έως 3mm και στη συνέχεια να έχουμε την αντίσταση της διάταξης.
- Ένα άλλο μειονέκτημα που προκύπτει από τη διάταξη αυτή είναι ότι, ενώ έχουμε τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε αρκετά καλά τις διάφορες κινήσεις του συνδέσμου καθώς και να θέσουμε ικανοποιητικά τα όρια παραμόρφωσής του, δεν μπορούμε να προσομοιώσουμε αρκετά ικανοποιητικά το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας.
- Πιο συγκεκριμένα, καθώς οι φυσιολογικές παραμορφώσεις του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου είναι μικρότερες των 3mm η παρούσα διάταξη παρέχει σχεδόν μηδενική αντίσταση σε αυτό το διάστημα επιμηκύνσεων. Έτσι, καταλήγουμε ότι παρόλο που τα bellows βελτιώνουν σημαντικά τη διάταξη δεν μπορούν να υποκαταστήσουν το σύνδεσμο χωρίς κάποιο πλαστικό.

6.2.4 Σχέδιο 4^ο

Μετά από τις επεξεργασίες των προηγούμενων σχεδίων καταλήγουμε σ' αυτό το τελικό σχέδιο που συνδυάζει τα προηγούμενα προσπαθώντας να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που τέθηκαν.

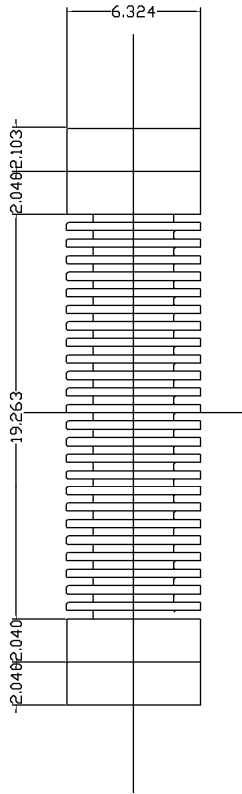
Πλέον, εξωτερικά η βίδα είναι παρόμοια με το προηγούμενο σχέδιο. Δηλαδή έχουμε δύο ενιαίες μεταλλικές απολήξεις ενωμένες με τα bellows που διατρέχονται από έναν εσωτερικό διάυλο διαμέτρου 2mm. Στο εσωτερικό του διαύλου βρίσκεται πλαστικός σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 0,9mm ο οποίος στερεώνεται στο μεταλλικό σύστημα με τις τάπες που περιγράψαμε στο Σχέδιο 2. Η στερέωση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το bellows να είναι συμπιεσμένο κατά 3mm και το λάστιχο σε φυσικό μήκος.

Με αυτό τον τρόπο το πλαστικό θα υποκαθιστά το σύνδεσμο στην φυσιολογική λειτουργία του (χαμηλό μέτρο ελαστικότητας) και το μεταλλικό bellows θα λειτουργεί ως φραγμός των ακραίων φορτίσεων.

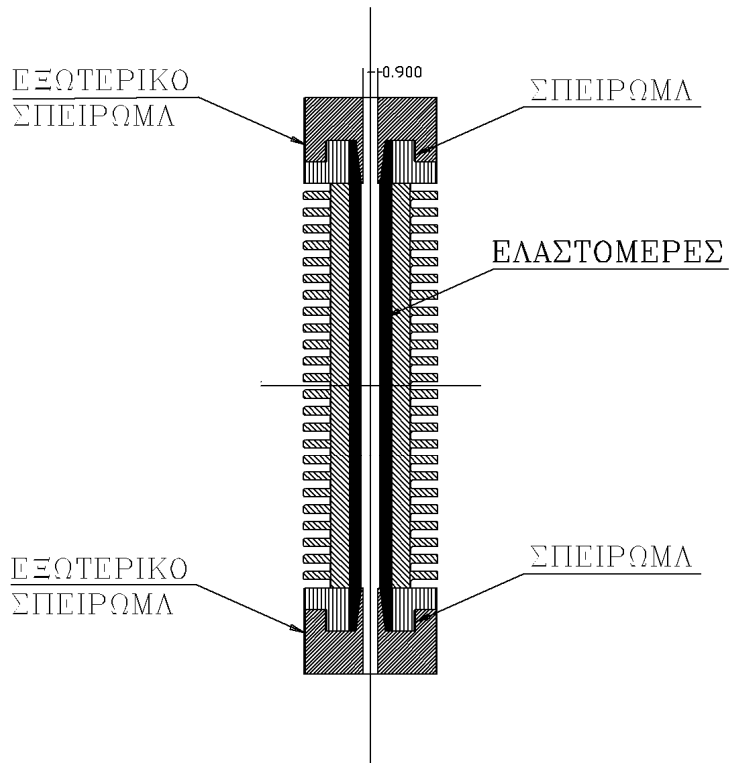
Το κύριο πλεονέκτημα της διάταξης είναι ότι προφυλάσσει το πλαστικό στο εσωτερικό της μεταλλικής διάταξης χωρίς να εμποδίζει την λειτουργία του. Επιπρόσθετα, καθώς η μεταλλική διάταξη κατασκευάζεται ενιαία παύουν τα προβλήματα αντοχής της διάταξης παρά την ύπαρξη μικρών μεταλλικών τμημάτων στα άκρα.

Ταυτόχρονα, λόγω της ιδιαίτερης κατασκευής των bellows η ύπαρξη μεγάλης εσωτερικής διαμέτρου όχι μόνο δεν συνεπάγεται προβλήματα μηχανικής αντοχής αλλά εξασφαλίζει καλύτερη στερέωση του πλαστικού στα άκρα.

Τέλος, λόγω της συμπαγούς δομής του, το μεταλλικό αυτό σύστημα είναι εύκολο στην τοποθέτηση και πιθανότατα δεν θα δημιουργεί προβλήματα στο χειρουργό και κατά την απομάκρυνση του.



ΟΨΗ



ΤΟΜΗ

ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ mm

6.2.5 Σχέδιο 5^ο

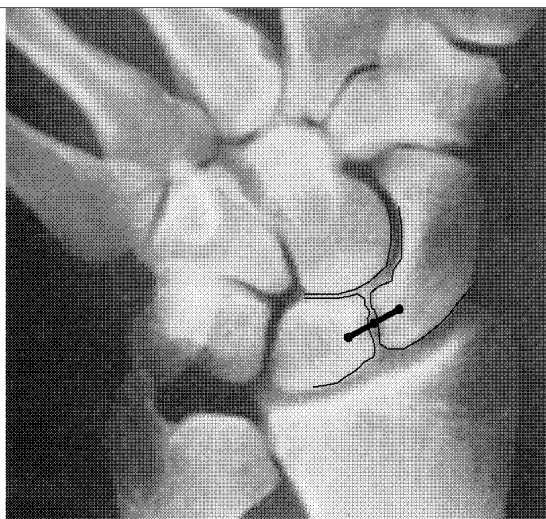
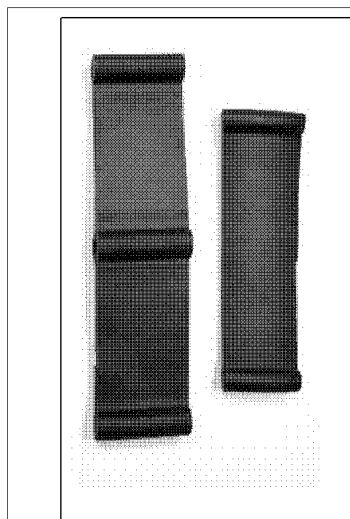
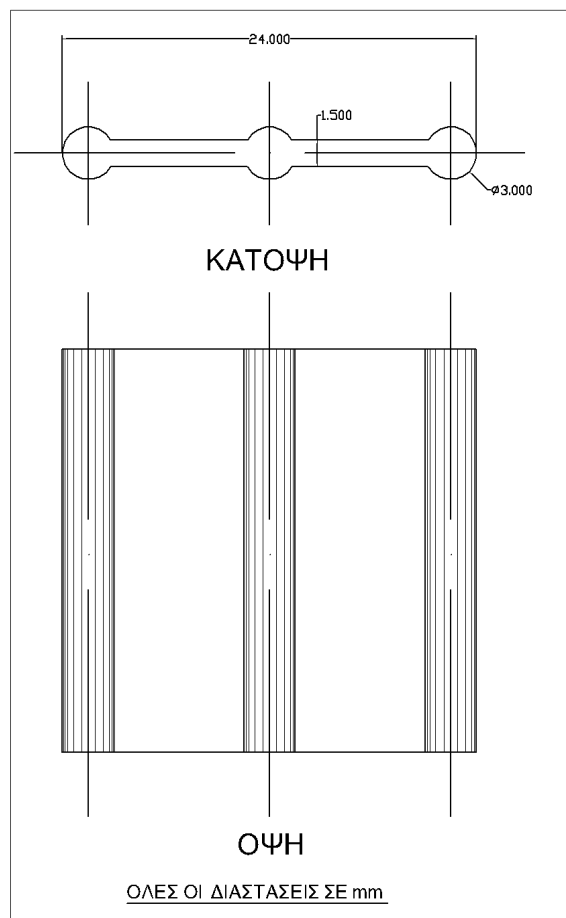
Αφού συγκεκριμενοποιήσαμε την διάταξη των προηγούμενων σχεδίων, στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια διαφορετική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος.

Μέχρι στιγμής, θεωρούσαμε ότι η πρόσβαση στο χώρο του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου πρέπει να γίνεται μέσω του σκαφοειδούς οστού. Όμως κατά την επέμβαση η πρόσβαση στον καρπό γίνεται αρχικά ραχιαία. Έτσι, αντί να πρέπει να κινηθούμε πλευρικά και να τρυπήσουμε το σκαφοειδές θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε το χώρο απευθείας από τη ραχιαία πλευρά. Με βάση αυτή την υπόθεση θα προχωρήσουμε στην παρακάτω προσέγγιση.

Εδώ, η διάταξη αποτελείται από ένα ενιαίο πλαστικό κομμάτι. Η βασική ιδέα για τον τρόπο σχεδιασμού του εν λόγω εμφυτεύματος απορρέει από τις διατμητικούς ή υδατοστεγανούς συνδέσμους όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, ο σύνδεσμος αποτελείται από δύο κυλινδρικές νευρώσεις στα άκρα ελάσματος κατασκευασμένου από το ίδιο πλαστικό. Μια κεντρική νεύρωση, αν και δεν απαιτείται, ενδέχεται να χρησιμεύει τόσο για την καθοδήγηση της τοποθέτησης, όσο και, κυρίως, για τη διατήρηση της απόστασης μεταξύ των δύο οστών κατά τη λειτουργία. Ο βασικός στόχος της κατασκευής αυτής είναι ότι με την επίπεδη μορφή του μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα τη φυσιολογική συμπεριφορά του συνδέσμου. Όπως γίνεται σαφές στην παραπάνω περιγραφή αυτή η διάταξη δεν έχει καθόλου κολλήσεις ή μικρά τμήματα και έτσι δεν διακυβεύεται η αντοχή της στα επαναλαμβανόμενα φορτία.

Σε ότι αφορά στη διαδικασία εισαγωγής του εμφυτεύματος: Αρχικά, ο χειρουργός πρέπει να κατασκευάσει τομή με τροχό με οδηγό κεντρική οπή. Στη συνέχεια, ανοίγει δύο κυλινδρικές οπές στο σκαφοειδές και στο μηνοειδές στα άκρα της τομής και τοποθετεί το εμφύτευμα ολισθαίνοντας κάθε νεύρωση στην αντίστοιχη οπή. Έτσι, ο σύνδεσμος σταθεροποιείται απευθείας στο οστό και με τη βοήθεια λίγου πολυμερικού τσιμέντου μπορεί να σταθεροποιηθεί μέχρι ο οργανισμός να προχωρήσει στον εγκλεισμό του μέσα στα οστά.

Βέβαια θα πρέπει να γίνει προσεκτική χαρτογράφηση της μεσόστιας περιοχής μεταξύ του σκαφοειδούς και του μηνοειδούς έτσι ώστε να καταφέρουμε να προσδιορίσουμε επακριβώς τον τρόπο εισαγωγής του εμφυτεύματος, δεδομένου ότι απαιτεί μεγαλύτερη τομή στα οστά από τις άλλες τεχνικές.



ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ
ΣΤΥΝΔΕΣΜΟΙ

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΤΥΝΔΕΣΗΣ ΣΧΕΔΙΟΥ 5.

Η διάταξη αυτή παρουσιάζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

- Το πλαστικό όχι μόνο είναι εκτεθειμένο στο εσωτερικό του οργανισμού με μεγάλη πιθανότητα αντίδρασης αλλά πλέον βρίσκεται εγκλεισμένο και στο εσωτερικό του οστού. Σε αυτή την περίπτωση είναι πιθανό να αντιδράσει και να προκαλέσει ακόμη και φλεγμονή. Οπότε η επιλογή του πλαστικού πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή.
- Η λειτουργία του ελάσματος απαιτεί πληροφορίες για τη συμπεριφορά του σε διάφορες φορτίσεις, προκειμένου να δράσει αποδοτικά ως υποκατάστατο του συνδέσμου.
- Γίνεται ακόμη πιο δύσκολη η αναζήτηση ενός πλαστικού που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς οι προϋποθέσεις γίνονται πολύ πιο απαιτητικές. Χαρακτηριστικά πρέπει το εν λόγω πλαστικό να υποκαθιστά και το άνω αλλά και το κάτω τμήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου.

7

Πειραματική Μελέτη

Υλικών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο του κτηρίου αντοχής υλικών στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. .

Στην αρχή του κεφαλαίου, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

Επιπλέον, συμπεριλαμβάνονται ορισμένες γενικές πληροφορίες για τα μετρούμενα υλικά καθώς και για τις εφαρμογές τους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε υλικό ξεχωριστά συμπεριλαμβάνοντας και ορισμένα πρώτα συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν από τα πειράματα.

Τα συνολικότερα συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται σε ξεχωριστό κεφάλαιο στο τέλος της διπλωματικής.

7.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Για την εκτέλεση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε μία μηχανή εφελκυσμού Instron 1121. Η Instron 1121 μπορεί να επιβάλλει εφελκυστική ή θλιπτική αξονική δύναμη έως 10 kN καθώς επίσης και εφαρμόσει κυκλική φόρτιση μεταξύ των επιθυμητών ορίων μετατόπισης. Επιπρόσθετα, η μηχανή παρέχει τη δυνατότητα εφελκυσμού των δοκιμίων με διαφορετικές ταχύτητες επιμήκυνσης. Η μέτρηση της παραμόρφωσης γινόταν είτε από ένα οπτικό μηκυσιόμετρο K-100 Fiedler Optoelektronik είτε με τη βοήθεια της ειδικής κάρτας που ενσωματώνεται στην Instron 1121 και μετράει απευθείας τη μετατόπιση. Όλες οι μετρήσεις

καταγράφονταν με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών σε ηλεκτρονικά αρχεία για τη μετέπειτα επεξεργασία τους.

Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η μηχανή με το σύστημα του υπολογιστή χωρίς τη διάταξη του οπτικού μηκυσιόμετρου, όπως χρησιμοποιήθηκε κατά τις τελευταίες δοκιμές. Στις τελευταίες σειρές πειραμάτων η μηχανή είχε εξοπλιστεί με ειδική κάρτα και λογισμικό για να αποθηκεύει τις μετρήσεις απευθείας χωρίς τη χρήση του οπτικού μηκυσιόμετρου.



Επειδή όμως όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις είχαν πραγματοποιηθεί με την πλήρη διάταξη της μηχανής, μαζί με το οπτικό μηκυσιόμετρο, κρίνεται αναγκαίο να αναπτύξουμε παρακάτω, συνοπτικά, την αρχή λειτουργίας του.

Το Οπτικό Μηκυσιόμετρο Fiedler Optoelektronik K-100, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία μαζί με τη διάταξη της μηχανής, μετρά την επιμήκυνση του δοκιμίου με ακρίβεια μικρών.



Μία δέσμη λέιζερ σαρώνει το δοκίμιο κατά μήκος πολλές φορές το δευτερόλεπτο και ανιχνεύοντας την ανακλώμενη ακτινοβολία μετράει την επιμήκυνση. Για το σκοπό αυτό πάνω στο δοκίμιο επικολλώνται ρίγες από χαρτί υψηλής ανακλαστικότητας, ικανό να παραμορφώνεται με ελάχιστη τάση ώστε να παρακολουθεί την παραμόρφωση του δοκιμίου χωρίς όμως να επηρεάζει τη μέτρηση.

Κατά την σάρωση του δοκιμίου, και με την ανίχνευση της ανακλώμενης δέσμης, το

μηκνυσιόμετρο μετρά την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ριγών. Έτσι παίρνει μία αρχική τιμή του μήκους της περιοχής μεταξύ δύο ριγών στην εκκίνηση των μετρήσεων και τη θεωρεί σαν αρχικό μήκος ή μήκος αναφοράς.

Καθώς εξελίσσεται το πείραμα, μετράει τη μεταβολή του μήκους της περιοχής αυτής μετρώντας την αύξηση (στην περίπτωση του εφελκυσμού) της απόστασης μεταξύ των ριγών. Έτσι υπολογίζεται και καταγράφεται, με τη βοήθεια κατάλληλου συνοδευτικού λογισμικού, κάθε στιγμή η σχετική επιμήκυνση. Το λογισμικό αυτό καταγράφει την τιμή του φορτίου σε διάφορες χρονικές στιγμές και καθώς εισάγονται από το χρήστη οι διαστάσεις της διατομής του δοκιμίου, πλάτος και πάχος, υπολογίζει και την τάση του δοκιμίου για διάφορες χρονικές στιγμές.

7.2 Μετρούμενα Υλικά

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εξετάσαμε τρία διαφορετικά ελαστικά του εμπορίου ως προς τη σύγκλιση με τις προδιαγραφές που θέσαμε. Τα υλικά αυτά είναι τα εξής:

- Ελαστικό Βουτυλίου
- Ελαστικό Σιλικόνης
- Ελαστικό EPDM: Ethylene Propylene Diene Monomer (M-class rubber)

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα αναφερθούμε με συντομία στο καθένα από αυτά:

Το Ελαστικό Βουτυλίου (butyl rubber) είναι ένα συνθετικό ελαστικό, ένα συμπολυμερές ισοβουτυλενίου με ισοπρένιο. Είναι αδιαπέραστο από τον αέρα και χρησιμοποιείται ευρέως ως αερο-στεγανωτικό. Επίσης, χρησιμοποιείται στην κατασκευή κόλλας, γεωργικών χημικών, ενώσεων οπτικών ινών, διαφανούς μεμβράνης, χάρτου, προϊόντων προσωπικής φροντίδας, αλλά και στην κατασκευή της τσίχλας.

Το Ελαστικό Σιλικόνης είναι ένα ελαστομερές που αποτελείται από σιλικόνη μαζί με άνθρακα, υδρογόνο και οξυγόνο. Είναι γενικά σταθερό, αδρανές και ιδιαίτερα ανθεκτικό σε ακραία περιβάλλοντα και θερμοκρασίες από $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων και της ευκολίας της κατασκευής και διαμόρφωσης, τα ελαστικά σιλικόνης χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία σε μια ποικιλία των προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των προϊόντων για το μαγείρεμα, το ψήσιμο και την αποθήκευση τροφίμων, των προϊόντων ένδυσης όπως εσώρουχα, αθλητικά ενδύματα και υποδήματα καθώς επίσης και διάφορα ιατρικά προϊόντα και εμφυτεύματα.

Τέλος, το EPDM (Αιθυλένιο Προπυλένιο Διένιο Μονομερές (M-class) καουτσούκ) είναι ένα ελαστομερές που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η περιεκτικότητα του σε αιθυλένιο είναι περίπου 45% έως 75%. Όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα του σε αιθυλένιο τόσο υψηλότερες είναι οι δυνατότητες φόρτισης του υλικού. Το ελαστικό EPDM χρησιμοποιείται σε σφραγιστικά, σωληνώσεις, ιμάντες κ.ά. Χρησιμοποιείται επίσης ως μέσο για την αδιαβροχοποίηση των συνδέσεων πολυμερικών καλωδίων σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης, σε μεμβράνες για στέγες, σε γεωμεμβράνες κ.ά. Το ελαστικό EPDM θεωρείται συμβατό με τον οργανισμό και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή βιοφαρμακευτικών συστημάτων.

7.3 Ελαστικό Βουτυλίου

Το ελαστικό Βουτυλίου είναι το πρώτο υλικό που μελετήθηκε. Η επιλογή του βασίστηκε στο γεγονός ότι αποτελεί ένα ελαστομερές με πληθώρα εφαρμογών, με αποτέλεσμα να είναι

εύκολα προσβάσιμο. Επίσης, λόγω της ευρείας χρήσης του μπορούσε να λειτουργήσει ως μελλοντικός οδηγός στη σύγκριση με άλλα ελαστομερή.

7.3.1 Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα

Υποβάλαμε το ελαστικό βουτυλίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό με τη βοήθεια της Instron 1121. Την χρονική περίοδο πραγματοποίησης αυτών των πειραμάτων η εφελκυστική μηχανή δεν ήταν εφοδιασμένη με την ειδική κάρτα για την απευθείας μέτρηση ταυτόχρονα του φορτίου και της επιμήκυνσης και έτσι ήμασταν υποχρεωμένοι να μετρήσουμε με τη βοήθεια του οπτικού μηκυσιόμετρου. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων είχαμε να αντιμετωπίσουμε δύο βασικά προβλήματα:

1. Παρά τις προσπάθειες μας δεν κατέστη δυνατόν να εφαρμόσουν ικανοποιητικά οι ειδικές μετρητικές ταινίες του οπτικού μηκυσιόμετρου πάνω στο λάστιχο. Κατά την εκτέλεση του πειράματος η μεγάλη παραμόρφωσή του προκαλούσε μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου τις οποίες οι ταινίες δεν μπορούσαν να παρακολουθήσουν, να εκδηλώνονται αποκολλήσεις, με αποτέλεσμα την αλλοίωση των μετρήσεων.
2. Στα πλαστικά υλικά, όταν τοποθετούνται στην αρπάγη της μηχανής για να στερεωθούν, προκαλείται παραμόρφωση και φθορά.

Για να αντιμετωπίσουμε το 2^ο πρόβλημα χρησιμοποιήσαμε ένα σύστημα από μεταλλικά περικόχλια στα άκρα του ελαστικού. Για να στερεώσουμε το λάστιχο στα μεταλλικά περικόχλια χρησιμοποιήσαμε πολυμερικό τσιμέντο όπως φαίνεται στη φωτογραφία.



Παρόλα αυτά, το πρώτο πρόβλημα δεν έβρισκε λύση έτσι αναγκαστήκαμε να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις χωρίς το οπτικό μηκυσιόμετρο, καταγράφοντας απευθείας τις ενδείξεις της μηχανής. Είναι σαφές, ότι ένας τέτοιος τρόπος καταγραφής των μετρήσεων όσο προσεκτικά κι αν πραγματοποιηθεί παρουσιάζει επιπλέον σφάλματα μέτρησης τα οποία οφείλουμε να συνυπολογίσουμε στο τέλος. Εν τούτοις, οι αποκλίσεις

αυτές δεν εμποδίζουν την εξαγωγή συμπερασμάτων για τον επιδιωκόμενο σκοπό, αφού η μελέτη μας αποσκοπεί στη διερεύνηση της γενικότερης μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού, προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσον ικανοποιεί τις προδιαγραφές.

Τα πειράματα σε μονοαξονικό εφελκυσμό πραγματοποιήθηκαν με τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες μετατόπισης: 0,1mm/min, 3mm/min, 5 mm/min και 10 mm/min με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού χωρίς μεταλλικά περικόχλια στερέωσης με ταχύτητες 3mm/min και 5mm/min. Στη συνέχεια τοποθετήσαμε στις αρπάγες δοκίμιο με μεταλλικά περικόχλια και πραγματοποιήσαμε ένα κύκλο φόρτισης με ταχύτητα 0,1 mm/min, χωρίς το δοκίμιο να πλησιάσει τη θραύση του, και στη συνέχεια μια δοκιμή με ταχύτητα 10 mm/min, αυτή τη φορά έως τη θραύση. Ο στόχος της πρώτης χαμηλής φόρτισης ήταν να εξαλείψει την πιθανότητα προβληματικής στερέωσης του ελαστικού στα περικόχλια, αφού λόγω της ύπαρξης του πολυμερικού τσιμέντου δεν είχαμε τη δυνατότητα οπτικής παρατήρησης.

Στη διπλανή εικόνα φαίνεται το δοκίμιο τοποθετημένο στην εφελκυστική μηχανή κατά τη

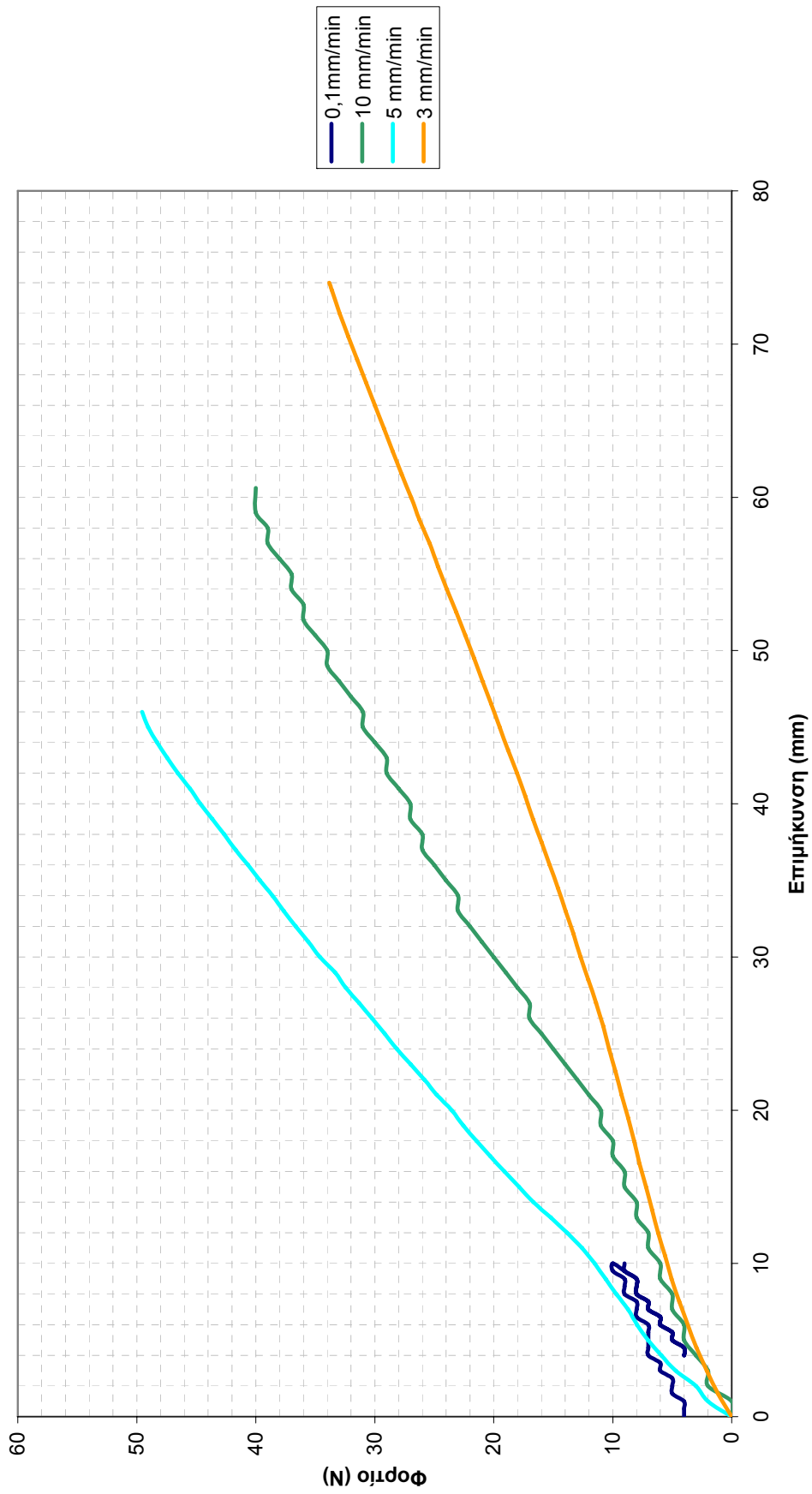


διάρκεια του πειράματος. Είναι εμφανείς οι λευκές ταινίες για τη μέτρηση με το μηκυσιόμετρο όπως επίσης μπορεί κανείς να παρατηρήσει την αποκόλληση τους από το δοκίμιο και έτσι την αναγκαστική καταγραφή των μετρήσεων χωρίς τη χρήση του laser.

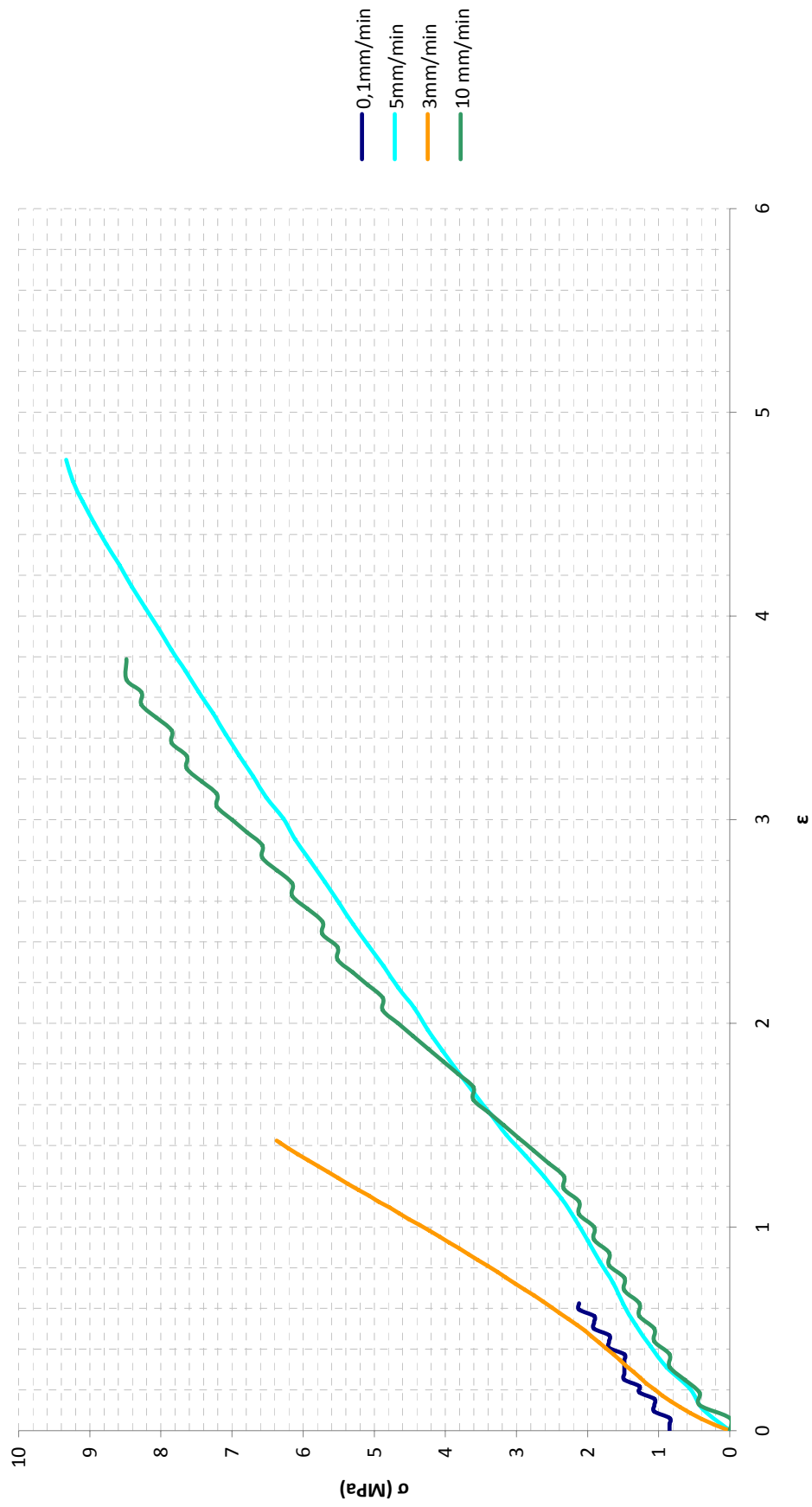
Πρέπει να σημειώσουμε ότι λόγω των διαστάσεων των μεταλλικών περικοχλίων αναγκαστήκαμε να χρησιμοποιήσουμε τις μεγαλύτερες αρπάγες της εφελκυστικής μηχανής. Αυτό, βέβαια, δεν επηρεάζει τις μετρήσεις μας ως προς την ακρίβεια τους

Στα δύο διαγράμματα των επόμενων σελίδων φαίνονται οι καμπύλες (α) φορτίου-επιμήκυνσης και (β) τάσης παραμόρφωσης για τους τέσσερις διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης :

Φορτίο - Επιμήκυνση



Τάση - Παραμόρφωση



Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε ορισμένα πρώτα συμπεράσματα που αφορούν στο ελαστικό βουτυλίου:

- Ένα σημαντικό πρακτικό ζήτημα αφορά στη στερέωση του δοκιμίου στις αρπάγες. Θα μελετήσουμε τις δύο δοκιμές με ρυθμούς παραμόρφωσης 3mm/min και 5mm/min. Ενώ οι δύο ρυθμοί παραμόρφωσης που εφαρμόστηκαν δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση εν τούτοις παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες διαφέρουν ως προς την τιμή του μέγιστου φορτίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι, κατά τη δοκιμή στην οποία εμφανίζεται το μικρότερο φορτίο θραύσης, το δοκίμιο αστόχησε κοντά στις αρπάγες, (διπλανή εικόνα). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως αποτέλεσμα της επίδρασης του ιδιαίτερου εντατικού πεδίου που προκαλείται στα άκρα λόγω της απευθείας σύσφιξης του δοκιμίου με αυτές. Για το λόγο αυτό στα επόμενα δοκίμια σχεδιάστηκε και υιοθετήθηκε η διάταξη συγκράτησης με περικόχλια που εξουδετερώνει σε μεγάλο βαθμό τη συγκέντρωση των τάσεων στα άκρα. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει ότι η απευθείας στερέωση του δοκιμίου μπορεί να προκαλέσει φθορά στο δοκίμιο και να επηρεάσει τη μέτρηση.
- Η μέγιστη τιμή του φορτίου από όλες τις δοκιμές παρουσιάζεται στη μέτρηση με ρυθμό 5mm/min και είναι 49,55N. Σημειώνεται ότι, η διατομή των δοκιμίων ήταν 5,35 mm² σε όλες τις δοκιμές.
- Σε ότι αφορά στο μέτρο ελαστικότητας παρατηρείται πρακτικά ταύτιση περίπου στην τιμή $E \approx 2$ MPa, με εξαίρεση τη δοκιμή στα 3mm/min όπου εμφανίζει διπλάσια τιμή $E \approx 4$ MPa
- Εξετάζοντας την ικανότητα παραμόρφωσης του ελαστικού παρατηρούμε (όπως ήταν αναμενόμενο σε τέτοια υλικά) ότι δύναται να εκδηλώσει μεγάλη παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, στις δοκιμές αυτές η μέση τιμή μέγιστης παραμόρφωσης ήταν περίπου 300%.



7.4 Ελαστικό Σιλικόνης

Το Ελαστικό Σιλικόνης επιλέχθηκε καθώς είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα βιοσυμβατά υλικά. Η σιλικόνη χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική και ιδιαίτερα στην κατασκευή εμφυτευμάτων καθώς δεν διασπάται στον οργανισμό και δεν παρουσιάζει προβλήματα στη χρήση.

7.4.1 Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα

Το Ελαστικό Σιλικόνης υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό με σταθερή ταχύτητα 10mm/min. Την περίοδο πραγματοποίησης των πειραμάτων η Instron ήταν πλέον εφοδιασμένη με τη σχετική κάρτα και το λογισμικό ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να συλλέγουμε τα αποτελέσματα απευθείας από την μηχανή. Σε αυτή τη δοκιμή ήταν ιδιαίτερα σημαντική η χρήση της κάρτας αφού η διαφάνεια του Ελαστικού Σιλικόνης θα αποτελούσε επιπλέον πρόβλημα κατά τη χρήση του laser.

Όπως και στην περίπτωση του Ελαστικού Βουτυλίου, έτσι και το Ελαστικό Σιλικόνης θα



παρουσίαζε πρόβλημα κατά τη στερέωση στις αρπάγες. Όμως στην περίπτωση αυτής της δοκιμής, το σχήμα της διατομής του δοκιμίου ήταν ορθογώνιο, όπως φαίνεται και στην εικόνα, και έτσι δε μπορούσαμε να εφαρμόσουμε το σύστημα στερέωσης με τα μεταλλικά περικόχλια. Τελικά, δεν κατέστη δυνατόν να βρεθεί μια αξιόπιστη και απλή

διάταξη με μεταλλικά προστατευτικά στις αρπάγες και έτσι οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας απευθείας το ελαστικό στις αρπάγες.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η στερέωση αυτή δεν ήταν χωρίς προβλήματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Χαρακτηριστικά, κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων δοκιμών εκδηλώθηκε ολίσθηση του δοκιμίου πριν από την αστοχία. Έτσι, πριν από την εκτέλεση της τρίτης δοκιμής αλλάξαμε τις κεφαλές στις αρπάγες. Οι καινούργιες κεφαλές διέθεταν αυλακώσεις αυξάνοντας έτσι την τριβή με το ελαστικό, με αποτέλεσμα να βελτιώνουν τη στερέωσή του και να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

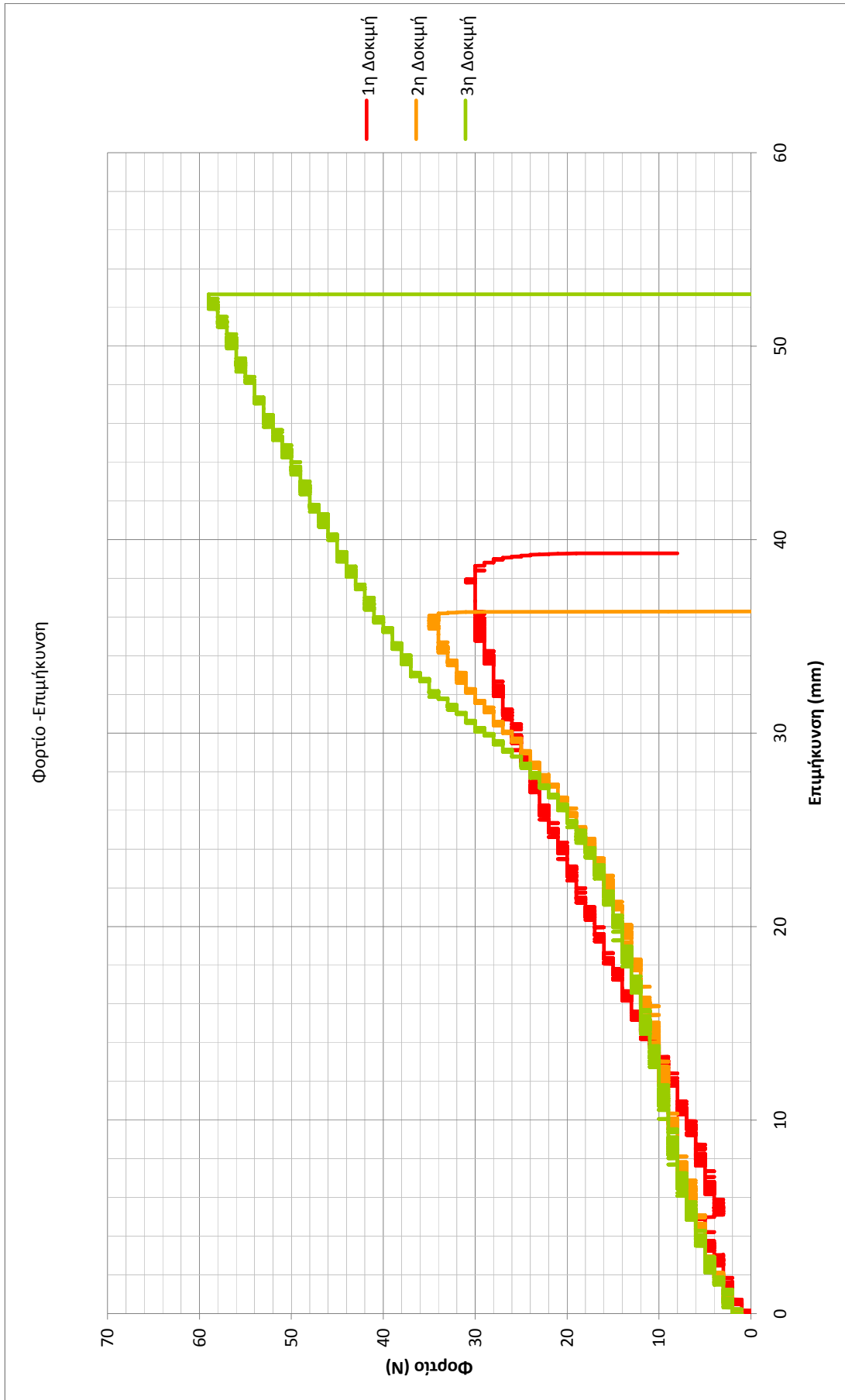
Ωστόσο, λόγω της στερέωσης της σιλικόνης απευθείας στις αρπάγες δεν ήταν δυνατόν να αποφύγουμε κάποιες παραμορφώσεις και συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα του δοκιμίου. Δεδομένου όμως ότι, οι παραμορφώσεις εκδηλώνονται από την αρχή με τη σύσφιξη, και συνεπώς ενσωματώνονται στις αρχικές συνθήκες, η δε θραύση του δοκιμίου έγινε κοντά στο

μέσον του, άρα μακριά από τις συγκεντρώσεις τάσεων που ανήκουν στις συνοριακές συνθήκες, μπορούμε να θεωρήσουμε αξιόπιστη τη δοκιμή και το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Στη διπλανή φωτογραφία φαίνεται το δοκίμιο του ελαστικού σιλικόνης κατά τη διάρκεια της τελευταίας δοκιμής. Φαίνονται οι κανονικές κεφαλές της Instron που χρησιμοποιήθηκαν, αντίθετα με το πείραμα του Ελαστικού Βουτυλίου όπου είχαμε αναγκαστεί να χρησιμοποιήσουμε τις μεγαλύτερες. Οι κεφαλές αυτές είναι εφοδιασμένες με μια σειρά διαφορετικές εσωτερικές μεταλλικές επιφάνειες επαφής με το δοκίμιο με αποτέλεσμα να παρέχονται δυνατότητες επιλογής.



Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται, τα διαγράμματα (α)φορτίου- επιμήκυνσης και (β)τάσης- παραμόρφωσης για τις τρεις δοκιμές. Οι δύο δοκιμές στις οποίες εκδηλώθηκε ολίσθηση, απεικονίζονται με κόκκινο και πορτοκαλί χρώμα.



Τάση - Παραμόρφωση



Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα:

- Στις δύο περιπτώσεις η ολίσθηση πραγματοποιήθηκε μια φορά και για παραπλήσιες τιμές φορτίου, περίπου 30-35N, οπότε η υπόλοιπη περιοχή των καμπυλών είναι αξιόπιστη
- Σε όλες τις δοκιμές (έως το σημείο όπου στις δύο πρώτες εκδηλώθηκε ολίσθηση), παρατηρείται ότι τα δοκίμια εμφανίζουν όμοια συμπεριφορά. Σε ότι αφορά στο μέτρο ελαστικότητας παρατηρείται πρακτικά ταύτιση έως την περιοχή των 2 MPa (εκδήλωση ολίσθησης στα 1 & 2) με $E \approx 0,4$ MPa και μικρή αύξηση σε $E \approx 0,6$ MPa στις μεγαλύτερες τιμές

Σε σχέση με το ελαστικό βουτυλίου παρατηρείται ότι:

- Το ελαστικό σιλικόνης παρουσίασε μεγαλύτερη τιμή για το μέγιστο φορτίο (59N) αλλά η διατομή του δοκιμίου ήταν μεγαλύτερη από αυτή του ελαστικού βουτυλίου (14mm^2). Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης, παρατηρούμε ότι το ελαστικό σιλικόνης παρουσιάζει σαφώς μικρότερη αντοχή. Για την ακρίβεια η τάση θραύσης του ελαστικού σιλικόνης αντιστοιχεί στο 44% εκείνης του βουτυλίου.
- Όσον αφορά στην ικανότητα παραμόρφωσης, το ελαστικό σιλικόνης παρουσίασε ακόμη μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση σε σχέση με του βουτυλίου, φθάνοντας περίπου 700%.

7.5 EPDM

Το ελαστικό EPDM αποτελεί το τελευταίο υλικό που μελετήσαμε και η επιλογή του έγινε μετά από εκτεταμένη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του. Όπως θα παρατηρήσουμε και παρακάτω, μετά την πρώτη σειρά πειραμάτων (δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό) το ελαστικό αυτό παρουσίασε την καλύτερη προσέγγιση στις προδιαγραφές και για το λόγο αυτό προχωρήσαμε σε άλλες δύο σειρές μετρήσεων.

7.5.1 Πειραματική Διαδικασία και Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο ελαστικό πραγματοποιήσαμε τρεις σειρές μετρήσεων. Η πρώτη σειρά μετρήσεων αφορούσε δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέχρι τη θραύση με δύο διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν κυκλικές φορτίσεις ενός δοκιμίου με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης χωρίς να φτάσουμε στη θραύση. Τέλος, το ίδιο δοκίμιο το υποβάλαμε σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέχρι τη θραύση. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής και στο τέλος τα σχετικά συμπεράσματα.

7.5.1.1 Μονοαξονικός Εφελκυσμός

Αρχικά, υποβάλαμε το ελαστικό EPDM σε μονοαξονικό εφελκυσμό με δύο διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης: 5 mm/min και 100mm/min με σκοπό να εξετάσουμε τις βισκοελαστικές ιδιότητες του υλικού. Οι μετρήσεις λήφθηκαν με τη βοήθεια της σχετικής κάρτας της μηχανής εφελκυσμού και του σχετικού λογισμικού στον υπολογιστή.

Όπως και στην περίπτωση του ελαστικού βουτυλίου έτσι και στο EPDM υπήρξε πρόβλημα κατά την εφαρμογή του στις αρπάγες της μηχανής. Η διατομή των δοκιμίων ήταν και εδώ κυκλική (πρόκειται για κυκλικό δακτύλιο) και έτσι, εφαρμόσαμε την ίδια τεχνική με το προηγούμενο πείραμα σταθεροποιώντας τα δοκίμια με τη βοήθεια μεταλλικών περικοχλίων (βλ. διπλανή εικόνα).



Αντίθετα, στο πείραμα αυτό δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε πολυμερικό τσιμέντο δεδομένου ότι το EPDM παρουσίασε ιδιαίτερη σταθερότητα με τη διαμόρφωση σε κόμπους του κάθε άκρου, καθώς αναπτύσσει ιδιαίτερα υψηλές επιφανειακές τριβές.

Επιπλέον, με τη χρήση των μεταλλικών περικοχλίων καταφέραμε να μην αντιμετωπίσουμε προβλήματα γλιστρήματος του δοκιμίου και έτσι όλες οι δοκιμές να είναι επιτυχείς.

Στη φωτογραφία φαίνεται το πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού όπως αυτό πραγματοποιήθηκε με χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια του μονοαξονικού εφελκυσμού και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρήσαμε ιδιαίτερα μεγάλες παραμορφώσεις των δοκιμίων.



Όπως φαίνεται και στην εικόνα, δεν παρουσιάστηκε ανάγκη για να χρησιμοποιηθούν οι μεγάλες κεφαλές της εφελκυστικής μηχανής και έτσι χρησιμοποιήθηκαν οι κανονικές κεφαλές.

Οι μετρήσεις μας και στις δύο περιπτώσεις είναι αξιόπιστες εφόσον, όπως φαίνεται και στην επόμενη σχετική εικόνα, η θραύση δεν πραγματοποιήθηκε σε ακραία θέση του δοκιμίου αλλά σε κεντρικό τμήμα.

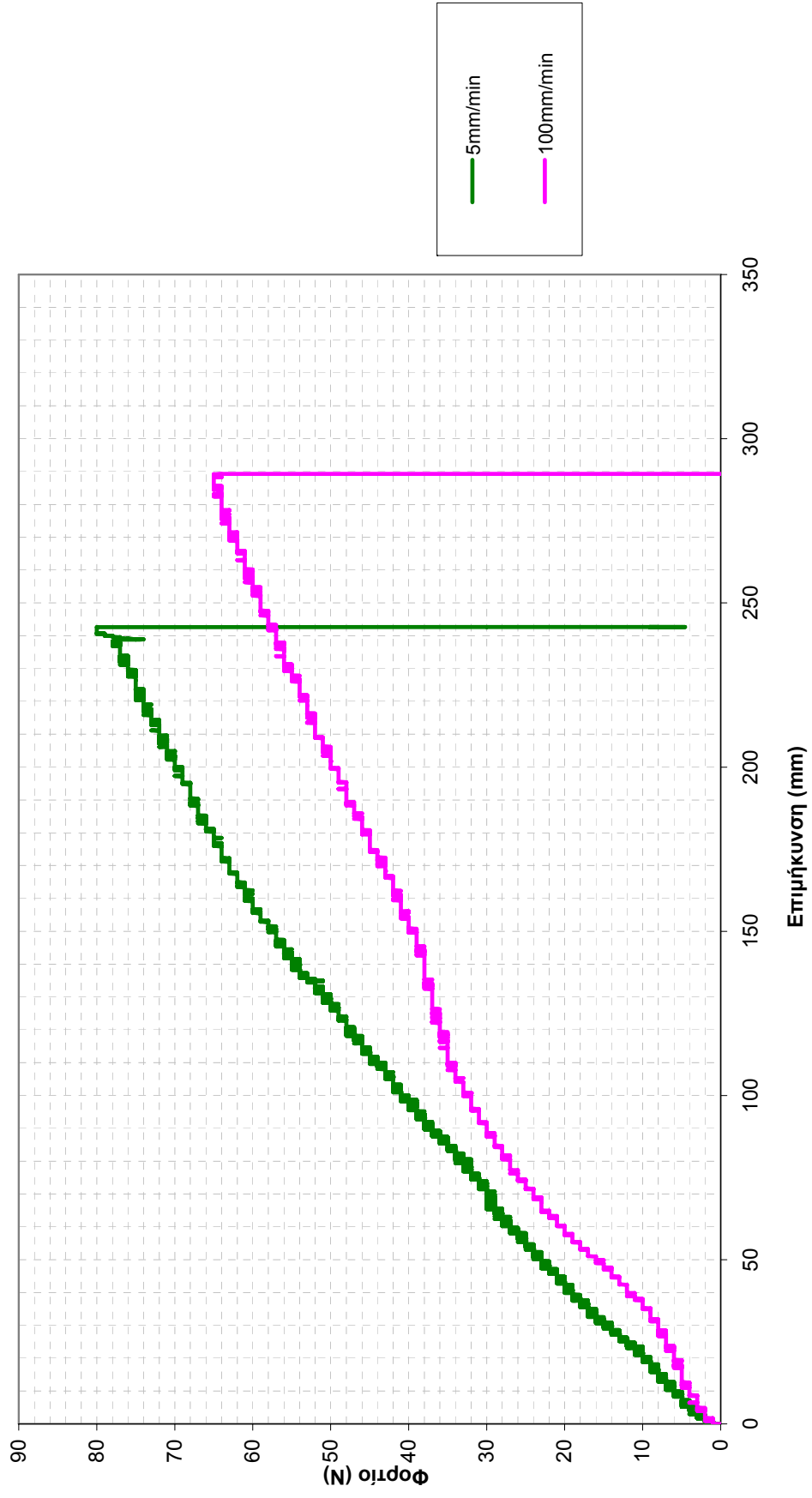
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι καμπύλες (α)φορτίου-επιμήκυνσης και (β)τάσης-παραμόρφωσης για τους δύο διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης.

Σημειώνεται ότι το μήκος του πρώτου δοκιμίου με 5mm/min είναι $l_0=44\text{mm}$, του δεύτερου με 100mm/min είναι $l_0=58\text{mm}$

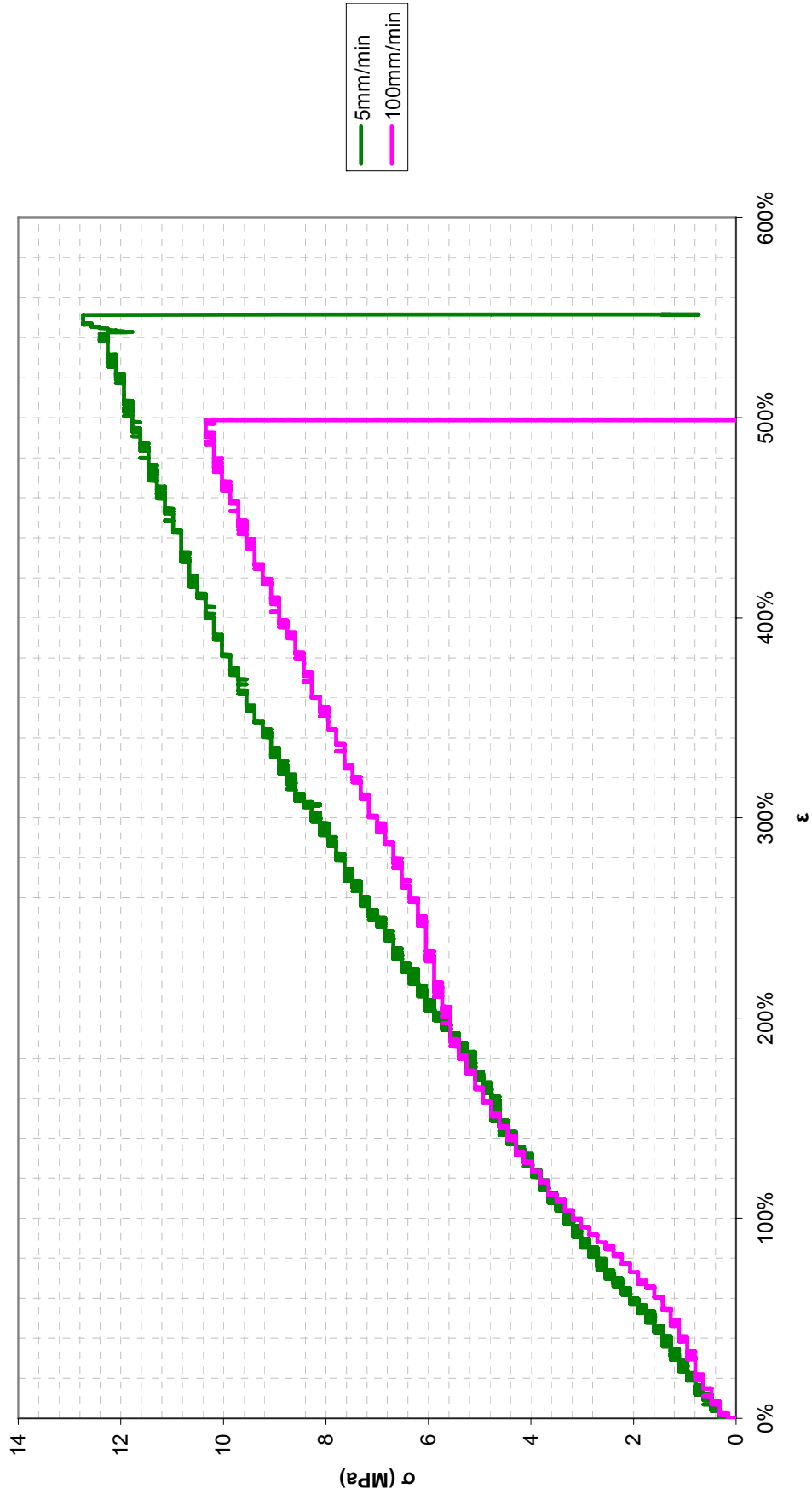
ενώ η διατομή των δοκιμίων έχει επιφάνεια $6,28\text{ mm}^2$ και στις δύο περιπτώσεις:



Φορτίο - Επιμήκυνση



Τάση - Παραμόρφωση



Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν ενδιαφέροντα πρώτα συμπεράσματα:

- Με βάση τη θεωρία θα περιμέναμε ότι ο εφελκυσμός ενός δοκιμίου με μεγαλύτερο ρυθμό παραμόρφωσης θα έπρεπε να δώσει μεγαλύτερη τιμή για το φορτίο θραύσης και μικρότερη ολική παραμόρφωση. Ωστόσο τα αποτελέσματα του πειράματος δεν συνηγορούν στην κατεύθυνση αυτή αλλά δείχνει ότι το υλικό δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από τη διαφορά στην ταχύτητα φόρτισης, αλλά παρουσιάζει παρόμοια μηχανική συμπεριφορά ανεξάρτητα του ρυθμού παραμόρφωσης που εφαρμόζεται. Μάλιστα, το πρώτο δοκίμιο με τη μικρότερη ταχύτητα δείχνει και ελαφρά μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας. Δεδομένου ότι τα δύο δοκίμια έχουν κοπεί από το ίδιο αρχικό δείγμα, έχουν και την ίδια ακριβώς διατομή. Ωστόσο δεν μπορεί να αποκλειστεί κάποια μικροατέλεια του υλικού στην περίπτωση του δεύτερου δοκιμίου η οποία να ευθύνεται για τη μικροδιαφορά.
- Το μέγιστο φορτίο για το ελαστικό EPDM είναι 80N και η παραμορφωσιμότητά του χαρακτηρίζεται από μέγιστη παραμόρφωση περίπου 500%. Το μέτρο ελαστικότητας είναι παραπλήσιο στις δύο δοκιμές και κυμαίνεται 2-2,5 MPa.

7.5.1.2 Κυκλική Φόρτιση

Στη συνέχεια του πειράματος πραγματοποιήσαμε δοκιμές κυκλικής φόρτισης σε δοκίμιο ελαστικού EPDM σε υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης (100 mm/min). Καθώς το εμφύτευμα θα υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενα φορτία κρίθηκε αναγκαίο να εξεταστεί η συμπεριφορά του ελαστικού EPDM σε κυκλικές φορτίσεις.

Επειδή η φυσιολογική επιμήκυνση του σκαφομνηστικού συνδέσμου δεν υπερβαίνει τα 3mm, δηλαδή το 60% του αρχικού μήκους, κρίθηκε ότι δεν πρέπει να υποβάλουμε το δοκίμιο σε σημαντικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά τη φόρτιση. Γι αυτό το λόγο η μέγιστη μετατόπιση των κεφαλών σε κάθε κύκλο ορίστηκε έτσι ώστε το δοκίμιο να υπόκειται σε παραμόρφωση 100% επί του αρχικού μήκους του.

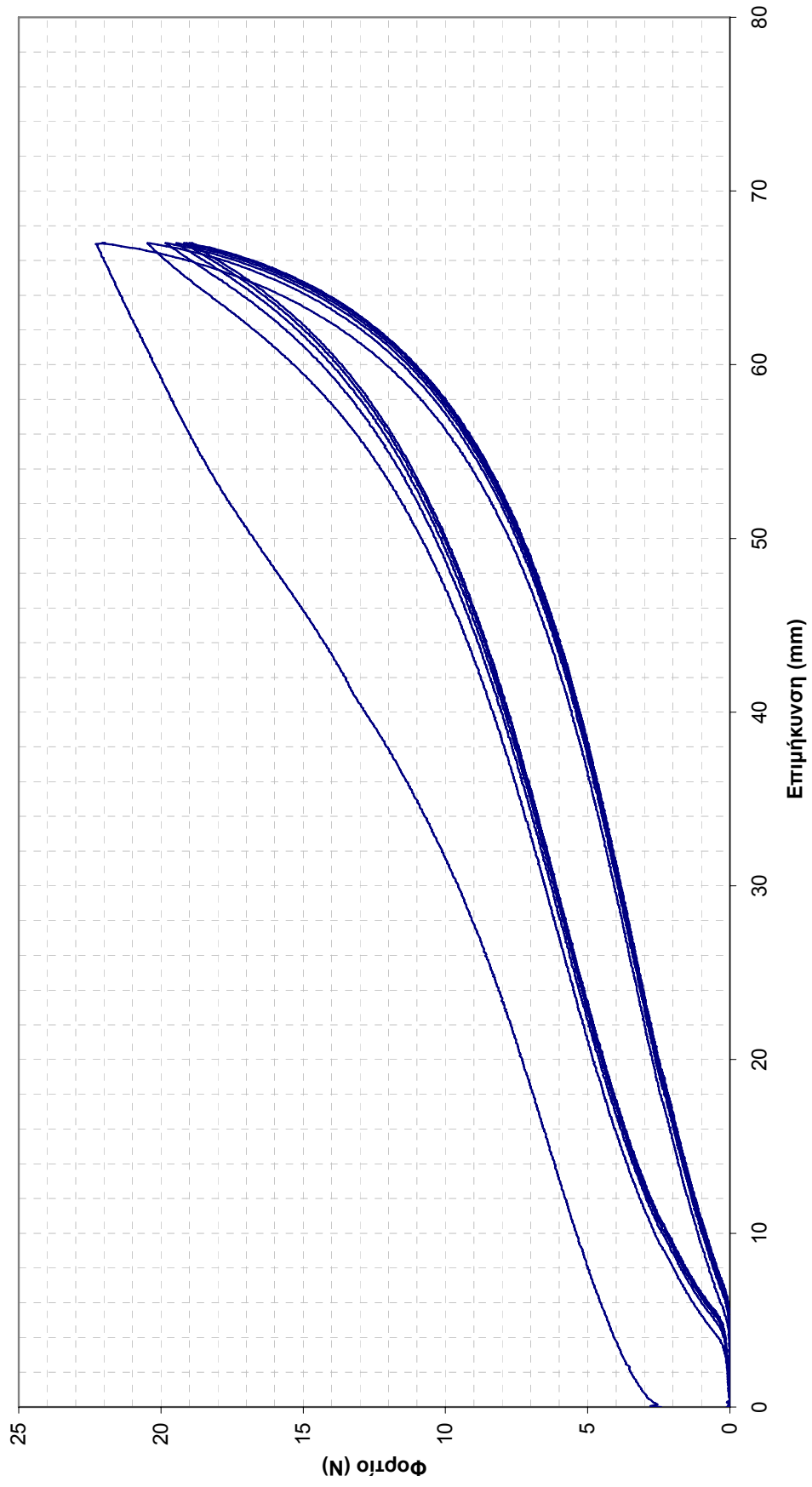


Στην παραπάνω εικόνα, δίνεται η διάταξη της πειραματικής διαδικασίας. Σημειώνουμε ότι η διαδικασία στερέωσης του δοκιμίου ήταν η ίδια, όπως στα προηγούμενα πειράματα.

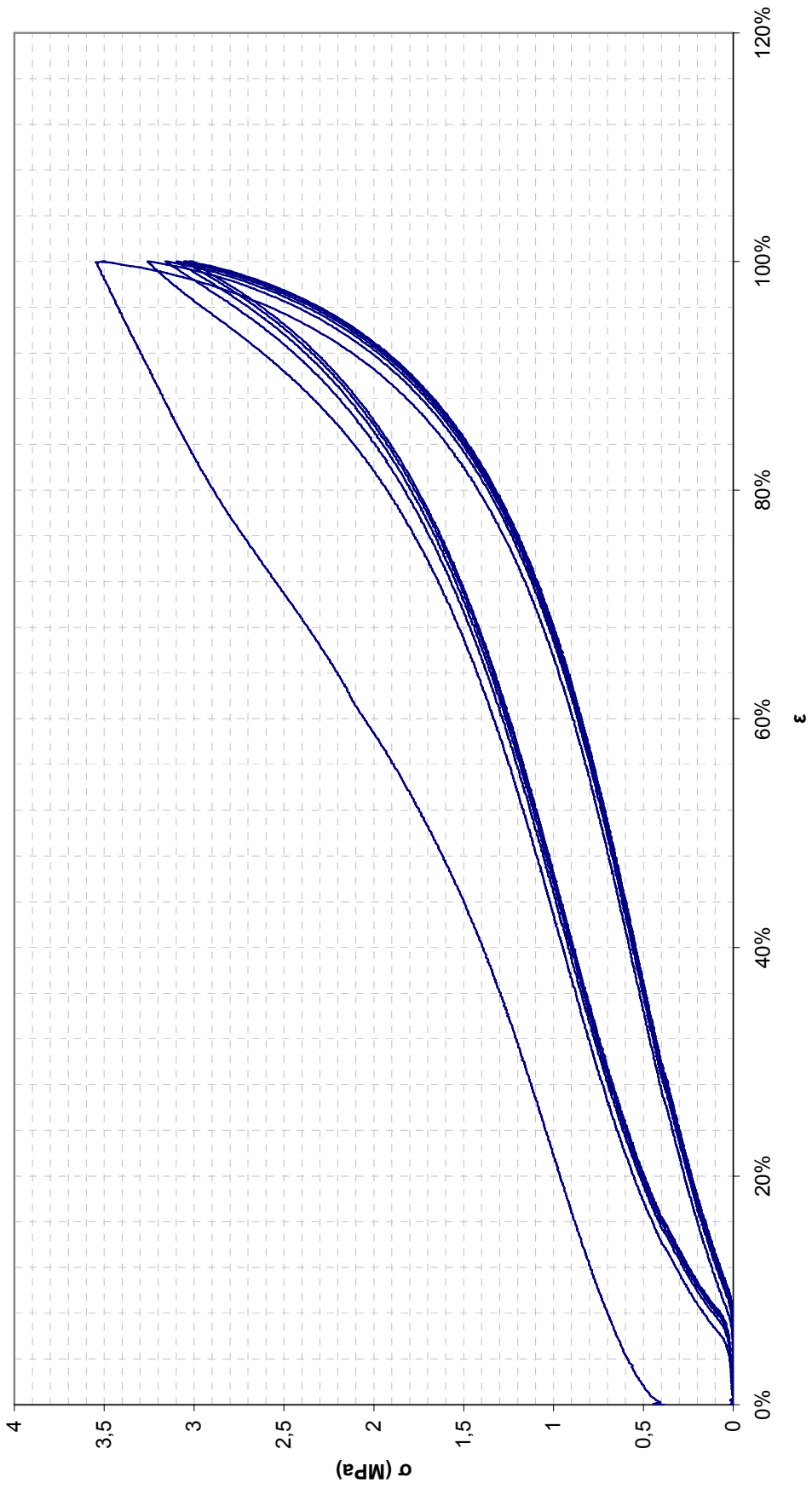
Κατά τη διάρκεια του πειράματος είχαμε τη δυνατότητα να παρατηρούμε την καμπύλη φορτίου επιμήκυνσης για κάθε κύκλο. Παρατηρήθηκε ότι ο πρώτος κύκλος παρουσίασε μεγάλη απόκλιση από τον δεύτερο, ενώ στη συνέχεια οι καμπύλες των επόμενων κύκλων φόρτισης σταδιακά πλησίαζαν μεταξύ τους και τελικά πρακτικά ταυτίστηκαν, οπότε και σταματήσαμε τη μέτρηση.

Στην επόμενη σελίδα, δίδεται το διάγραμμα φορτίου – επιμήκυνσης των δοκιμών:

Κύκλοι Φόρτισης



Τάση - Παραμόρφωση



Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται πολύ καθαρά ο σχηματισμός του βρόγχου υστέρησης και μάλιστα οι διαδρομές της τάσης ακολουθούν τον ίδιο κύκλο με εξαιρετικά σταθερές διαδρομές φόρτισης και αποφόρτισης, χωρίς εμφανή συνιστώσα πλαστικής παραμόρφωσης. Το υλικό δεν εμφανίζει φαινόμενα ούτε σκλήρυνσης ούτε μαλάκυνσης, πάντα φυσικά για το εύρος των κυκλικών φορτίσεων που εξετάσαμε.

7.5.1.3 Μονοαξονικός Εφελκυσμός μετά την επιβολή Κυκλικής φόρτισης

Μετά την ολοκλήρωση των κυκλικών φορτίσεων προχωρήσαμε σε πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού μέχρι τη θραύση. Ο στόχος της συγκεκριμένης δοκιμής ήταν να εξετάσουμε αν διαφοροποιείται η μηχανική συμπεριφορά του σκαφομηνοειδούς συνδέσμου μετά την επιβολή κυκλικών φορτίσεων. Καθώς ο τεχνητός ορθοπεδικός σύνδεσμος υποβάλλεται καθημερινά σε διαδοχικές φορτίσεις και αποφορτίσεις, ένα υλικό με μεγάλες διαφοροποιήσεις στη μηχανική του συμπεριφορά πριν και μετά την επιβολή των επαναλαμβανόμενων φορτίων θα παρουσίαζε γρήγορα φαινόμενα κόπωσης και θα ήταν ακατάλληλο.

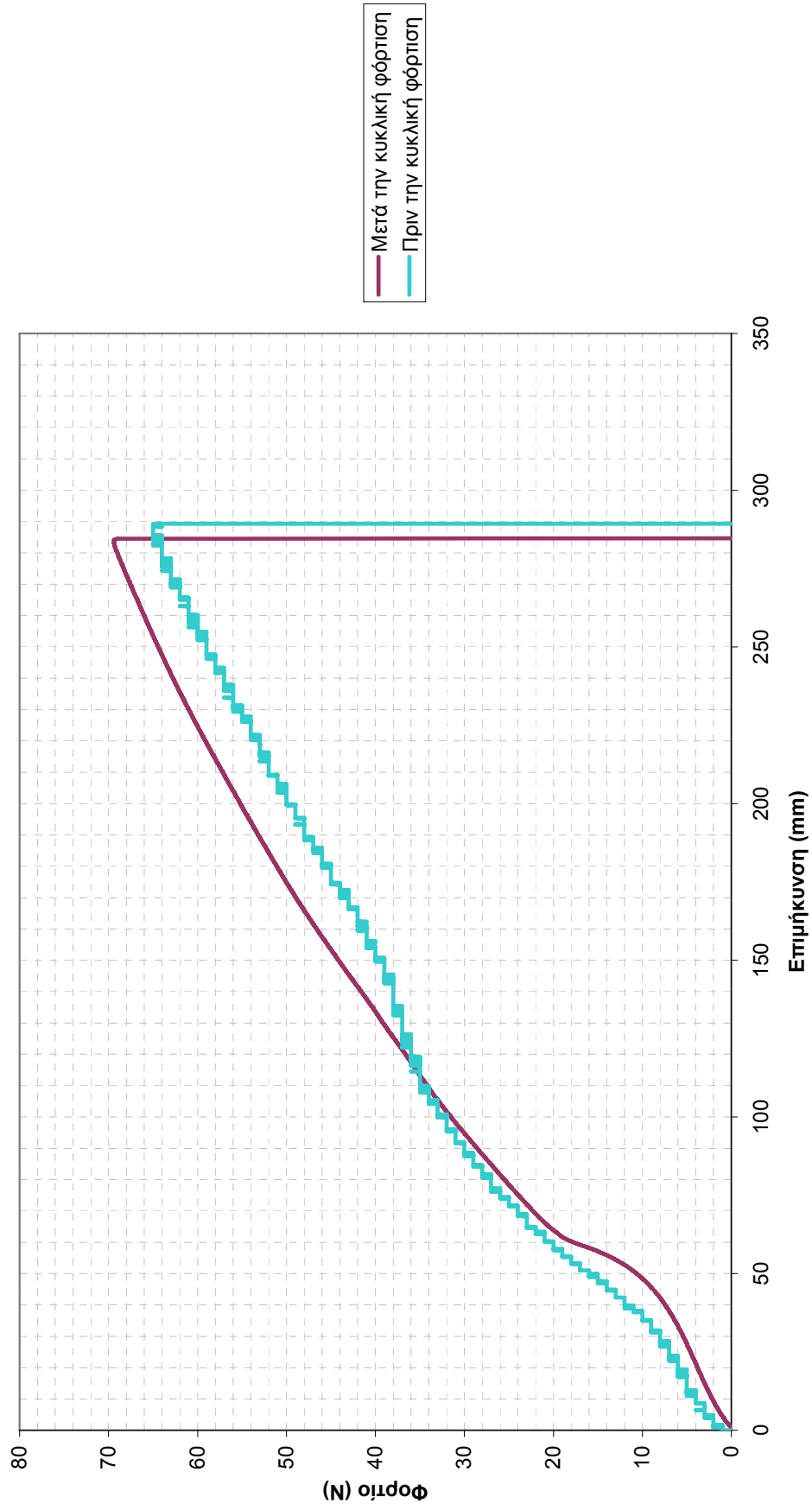
Εκτελέσαμε τη δοκιμή με ρυθμό παραμόρφωσης 100 mm/min, ίδιο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε κατά την πρώτη φάση του πειράματος, προκειμένου να μπορούμε να συγκρίνουμε τις καμπύλες πριν και μετά την επιβολή της κυκλικής φόρτισης ως προς το μέγιστο φορτίο με τη μικρότερη επίδραση τυχόν φαινομένων βισκοελαστικής συμπεριφοράς του υλικού.



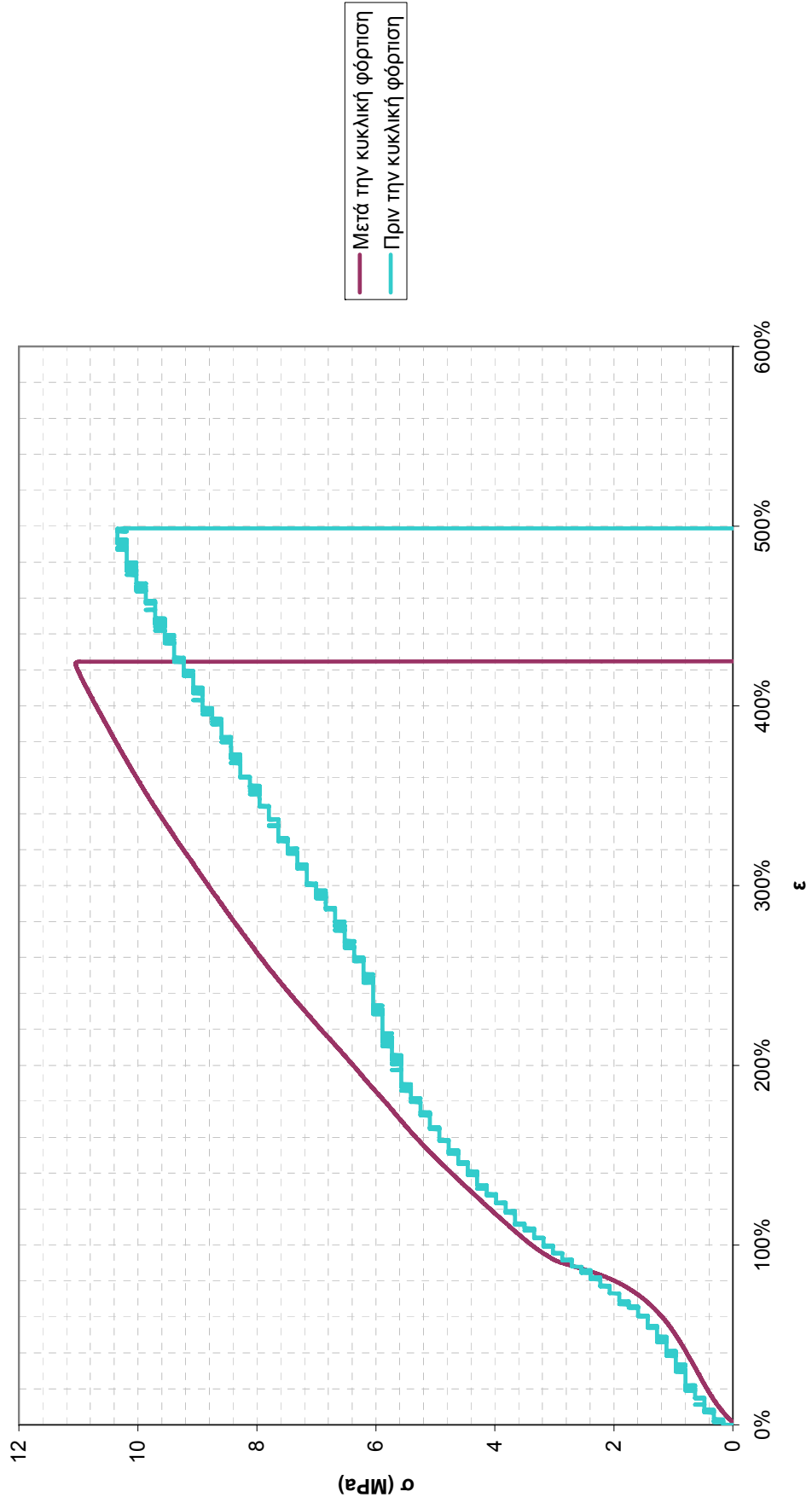
Η διάταξη και ο τρόπος στερέωσης του δοκιμίου παραμένουν ίδια και σε αυτή τη μέτρηση. Σημειώνεται, για την αποφυγή εξαγωγής λανθασμένων συμπερασμάτων ότι, τα δύο δοκίμια (αυτό που εξετάστηκε πριν την κυκλική φόρτιση με αυτό που εξετάστηκε μετά) προέρχονται από το ίδιο υλικό και έχουν την ίδια διατομή, διαφέρουν όμως ως προς το αρχικό μήκος. Συγκεκριμένα, το πρώτο είχε μήκος 58mm ενώ το δεύτερο 67mm.

Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το διάγραμμα φορτίου - επιμήκυνσης για την εν λόγω δοκιμή. Στο ίδιο διάγραμμα έχει μεταφερθεί (με γαλάζιο χρώμα) και η καμπύλη του μονοαξονικού εφελκυσμού πριν την επιβολή κυκλικών φορτίων για σύγκριση.

Φορτίο -Επιμήκυνση



Τάση - Παραμόρφωση



Από την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής ενδιαφέροντα πρώτα συμπεράσματα:

- Αρχικά, το μέγιστο φορτίο πριν και μετά την κυκλική φόρτιση δεν διαφοροποιείται σημαντικά. Χαρακτηριστικά οι τιμές ήταν αρχικά 65N και 69N μετά τη φόρτιση και συνεπώς η αντοχή δεν επηρεάζεται όντας και στις δύο περιπτώσεις περί τα 10,5 MPa (10,34MPa και 10,98MPa).
- Όσον αφορά την παραμορφωσιμότητά του, παρατηρούνται διαφορές. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο που είχε υποστεί κυκλική φόρτιση πριν τον εφελκυσμό παρουσίασε παραμόρφωση 425% ενώ το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς κυκλική φόρτιση παραμορφώθηκε 498%. Συνέπεια τούτου είναι και η προκύπτουσα διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας. Μετά τη κυκλική φόρτιση το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει στα 2,7MPa από τα 1,9MPa, δηλαδή περίπου κατά 40%. Η σκλήρυνση αυτή, γνωστή σε πολλά υλικά όταν υποστούν κυκλική φόρτιση, δεν αποτελεί πρόβλημα για το εξεταζόμενο ελαστικό EPDM. Τούτο διότι, όπως είναι εμφανές στα διαγράμματα κυκλικής φόρτισης, αυτή συμβαίνει εξ ολοκλήρου κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης και δεν χαρακτηρίζει κάποια προϊούσα (συνεχή) μεταβολή της συμπεριφοράς του υλικού.

8

Συμπεράσματα –

Μελλοντικοί Στόχοι

Σ' αυτό το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα προσπαθήσουμε να συγκεντρώσουμε τα συμπεράσματα και να θέσουμε τους μελλοντικούς στόχους ως προς τη μελέτη και την κατασκευή του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου.

Ως εκ τούτου, ιδιαίτερο βάρος θα δοθεί στην συνολική αξιολόγηση των υλικών σε σχέση με τις δυνατότητες του πραγματικού συνδέσμου καθώς και στις δυνατότητες βελτίωσης του με βάση τα υπάρχοντα σχέδια.

8.1 Συμπεράσματα

8.1.1 Διαδικασία Προσέγγισης του Προβλήματος

Προτού ξεκινήσουμε τη αξιολόγηση των υλικών, σε σχέση με τις απαιτήσεις του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου, θα παραθέσουμε κάποια συμπεράσματα ως προς τη διαδικασία προσέγγισης του προβλήματος.

Ενώ στις συνήθεις πειραματικές διερευνήσεις ο στόχος είναι η επιλογή ενός υλικού με βάση συγκεκριμένες ζητούμενες ιδιότητες, στην περίπτωση αυτή πρόκειται για ένα εύρος τιμών μηχανικών ιδιοτήτων στο οποίο πρέπει να ενταχθεί το υλικό και το οποίο εύρος χαρακτηρίζεται κατά περίπτωση από διαφορετική διασπορά. Σε τέτοιες περιπτώσεις το ζητούμενο είναι να βρεθούν υλικά τα οποία να ακολουθούν τη γενική μηχανική συμπεριφορά του υλικού και όχι σε κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να λειτουργεί κανείς με βάση τις δεδομένες τιμές, αλλά ταυτόχρονα δεν πρέπει να παραβλέπεται ότι, και στις μετρήσεις αλλά και στη βιβλιογραφία, σε πολλές τιμές που χαρακτηρίζουν την

εξεταζόμενη συμπεριφορά, οι αποκλίσεις είναι μεγάλες και η διασπορά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Ένα άλλο ζήτημα που αντιμετωπίσαμε ήταν η συνεχής αντικατάσταση και ενημέρωση των δεδομένων, η αναπροσαρμογή των στόχων στις δοκιμές και αναλύσεις δεδομένου ότι η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα ενός ερευνητικού έργου και συνεπώς δεν κινείται σε γνωστά νερά. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι διαδικασίες ή ακόμη και οι στόχοι του ίδιου του μείζονος ερευνητικού έργου αναπροσαρμόστηκαν με βάση καινούργια δεδομένα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η στροφή που πραγματοποιήθηκε στο σχεδιασμό της τεχνητής διάταξης όταν πλέον έγινε γνωστό ότι bellows είναι διαθέσιμα στις μικρές διαστάσεις που απαιτούνταν.

Το ευχάριστο χαρακτηριστικό μιας διπλωματικής εργασίας στα πλαίσια μιας εν εξελίξει έρευνας, όπως θα αναμενόταν, ήταν ότι, εκτός από τα παραπάνω, προκύπτουν και επιπλέον συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία, τα οποία επιδρούν στην ίδια τη διαδικασία του σχεδιασμού του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου.

Αρχικά, τις μεγαλύτερες δυσκολίες που συναντά κανείς, κατά την προσπάθεια σχεδιασμού ενός τεχνητού σκαφομνηοειδούς συνδέσμου, αποτελούν οι διαστάσεις. Οι ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις των καρπιαίων οστών δεν προβληματίζουν μόνο ως προς το μέγεθος του εμφυτεύματος, αλλά επίσης θέτουν αυστηρούς περιορισμούς στη δυνατότητα αναπροσαρμογής του σχεδίου έτσι ώστε να πετύχουμε τις ζητούμενες ιδιότητες. Χαρακτηριστικά, καθώς το εξωτερικό περίβλημα μιας βίδας/συνδέσμου δε μπορεί να ξεπερνά σε διάμετρο τα 5mm έχουμε πολύ μικρές δυνατότητες αύξησης της διαμέτρου του πλαστικού έτσι ώστε να αυξήσουμε το μέγιστο φορτίο. Αν συνυπολογίσει κανείς την υποχρεωτική ενσωμάτωση διαύλου για τον οδηγό στο εσωτερικό της βίδας/συνδέσμου γίνεται κατανοητό ότι τα περιθώρια ελιγμών προσαρμογής μειώνονται δραματικά.

Επιπρόσθετα, ο καρπός είναι, όπως είδαμε, μια άρθρωση με έντονη κινητικότητα κατά τη διάρκεια της ζωής του ατόμου. Με βάση την ανάλυση που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια καταλαβαίνει κανείς ότι οι σχετικές κινήσεις μεταξύ των καρπιαίων οστών είναι πολύπλοκες με αποτέλεσμα να υπάρχουν ιδιαίτερα υψηλές κινηματικές απαιτήσεις για το υλικό κατασκευής του εμφυτεύματος. Λόγω της σχετικής ασάφειας που υπάρχει σ' αυτές τις κινήσεις (π.χ. νεκρό - ζωντανό) καθώς και τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των ατόμων (γενικά αλλά και ειδικά π.χ. άνδρας - γυναίκα, νέος - ηλικιωμένος) το έργο του σχεδιασμού δυσχεραίνεται περεταίρω. Συγκεκριμένα, επειδή δεν είναι δυνατόν να ορισθεί ακριβές μοντέλο κινηματικής του συνδέσμου, δεν μπορεί και να κατασκευαστεί κάποιος ισοδύναμος αλλά διαφορετικός μηχανισμός. Συνεπώς είμαστε υποχρεωμένοι να σχεδιάσουμε ένα μηχανικό ανάλογο (εμφύτευμα) με τους μεγαλύτερους δυνατούς βαθμούς ελευθερίας (μονοαξονικός σύνδεσμος). Ταυτόχρονα, θα πρέπει να περιοριστούμε στην επιλογή υλικών

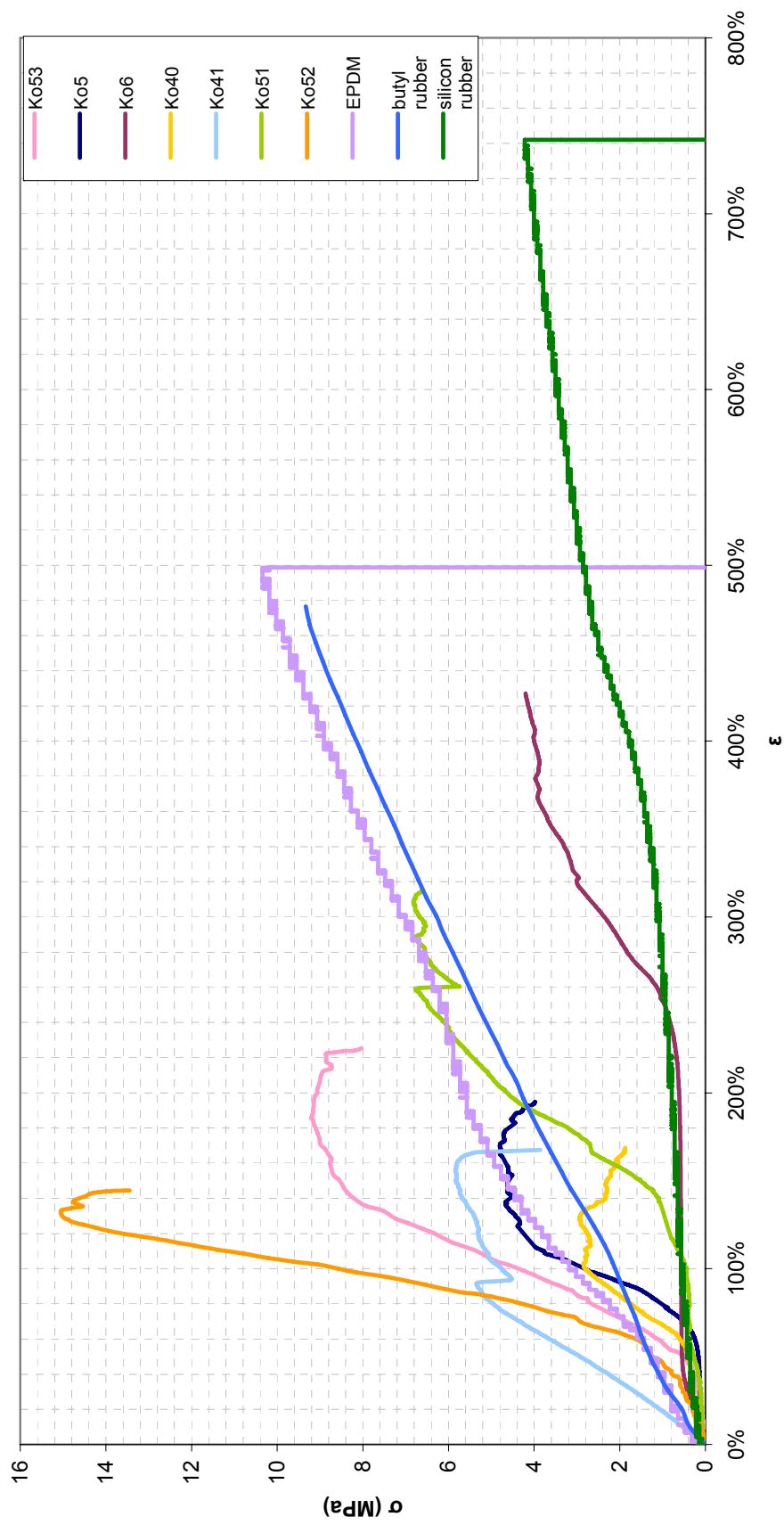
με όμοιες μηχανικές ιδιότητες με εκείνες του υλικού του φυσιολογικού συνδέσμου, έτσι ώστε ο τεχνητός σύνδεσμος να συμπεριφερθεί ανάλογα με τον φυσιολογικό, στις κινηματικές και μηχανικές καταστάσεις που θα βρεθεί και οι οποίες δεν μπορούν να προσδιοριστούν (και περιοριστούν) με ακρίβεια.

Η εφαρμογή επαναλαμβανόμενων φορτίων διαφορετικού μεγέθους σε καθημερινή βάση σε συνδυασμό με τις αυξημένες τριβές που αναπτύσσονται στην περιοχή λόγω της κίνησης των καρπιαίων οστών, δημιουργούν απαιτήσεις μελέτης σύνθετων κυκλικών φορτίσεων που δεν μπορούν να διερευνηθούν επαρκώς στα χρονικά (και όχι μόνον) πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

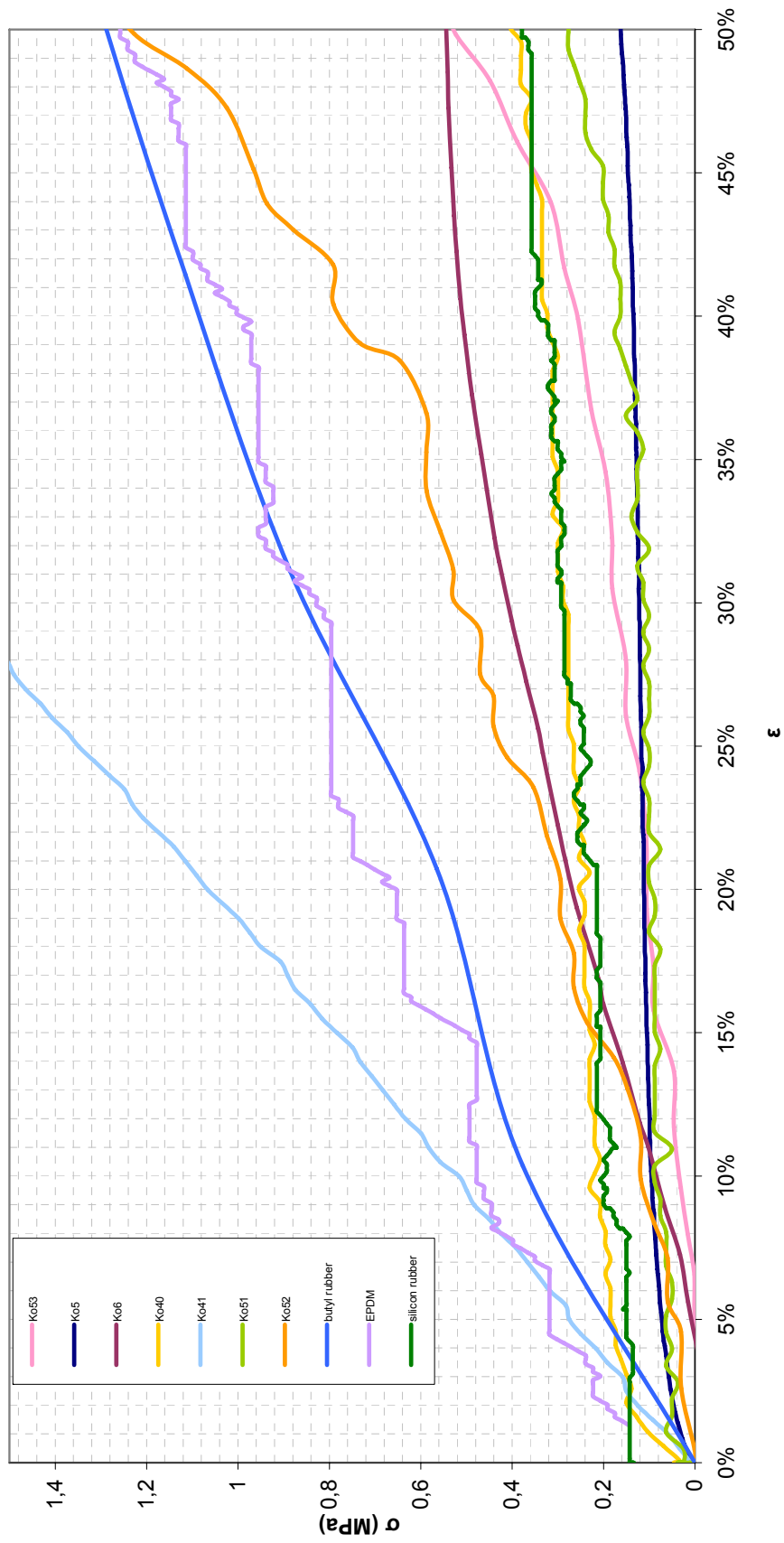
8.1.2 Δοκιμές Τεχνητών Υλικών και Σύγκριση με Σκαφομνηνοειδή Σύνδεσμο

Στη συνέχεια, θα περάσουμε στα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκριτική παρουσίαση των δικών μας πειραματικών αποτελεσμάτων για τα υλικά με εκείνα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του σκαφομνηνοειδούς συνδέσμου που πραγματοποίησαν οι Κεφαλάς & Νικολόπουλος (ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, 2009). Για το σκοπό αυτό στις επόμενες σελίδες απεικονίζονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών πρώτα (α) για ολόκληρη την καμπύλη και στη συνέχεια (β) εστιασμένο στη περιοχή χαμηλών τάσεων:

Τάση - Παραμόρφωση



Τάση - Παραμόρφωση



Από τα παραπάνω διαγράμματα, αλλά και από τα συνολικά αποτελέσματα των πειραμάτων και μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το ελαστικό σιλικόνης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυνατότητα παραμόρφωσης από όλα τα μετρημένα υλικά. Ιδιαίτερα στη χαμηλή περιοχή, το ελαστικό σιλικόνης προσεγγίζει καλύτερα απ' όλα τις τιμές των περισσότερων φυσιολογικών δειγμάτων.
- Καθώς κινούμαστε προς τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις, στην περιοχή της γραμμικής συμπεριφοράς, ενώ η ακαμψία του συνδέσμου διαφοροποιείται σημαντικά, η ακαμψία του ελαστικού σιλικόνης δεν μεταβάλλεται και η τάση παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς, στην περιοχή οριακών τάσεων του συνδέσμου δεν παρέχει επαρκείς αντιστάσεις στις παραμορφώσεις και δεν θα συμμετέχει ανάλογα στην παραλαβή φορτίου.
- Η τάση αστοχίας του ελαστικού σιλικόνης βρίσκεται στα 4,2MPa, και κάτω από 1,0MPa στην περιοχή των οριακών παραμορφώσεων των συνδέσμων, συνεπώς πολύ χαμηλά σε σχέση με τις τάσεις αστοχίας των συνδέσμων (2,5-15,0 MPa).
- Το ελαστικό βουτυλίου και το ελαστικό EPDM παρουσιάζουν παραπλήσια μηχανική συμπεριφορά στο διάγραμμα. Ειδικά στη περιοχή χαμηλών τάσεων οι καμπύλες των δύο ελαστικών πρακτικά σχεδόν ταυτίζονται.
- Τόσο το ελαστικό EPDM όσο και το ελαστικό βουτυλίου έχουν ακαμψία που κινείται περίπου στο μέσο όρο εκείνης του υλικού των συνδέσμων τόσο στην περιοχή χαμηλών τάσεων όσο και στη γραμμική. Από την άποψη αυτή δεν είναι ούτε πολύ άκαμπτα ούτε πολύ εύκαμπτα, ώστε να ενδέχεται να περιορίζουν την κινητικότητα, να μεταφέρουν τις καταπονήσεις σε άλλα τμήματα του καρπού, να επιτρέπουν φθορές λόγω τριβών κλπ.
- Το ελαστικό EPDM εμφανίζει τάση αστοχίας 10,4 MPa ελαφρά μεγαλύτερη από τη μέγιστη του ελαστικού βουτυλίου που έδωσε 9,3 MPa. Παρόλο που η διαφορά αυτή δεν είναι σημαντική το ελαστικό βουτυλίου παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις ως προς την ακαμψία και την τάση αστοχίας στις διαφορετικές μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε (πρβλ. προηγούμενο κεφάλαιο). Όμως όπως αναφέραμε και κατά την εμβιομηχανική ανάλυση του σκαφομνηοειδούς συνδέσμου ενώ στη χαμηλή περιοχή δεν προβληματίζει η διασπορά αυτή εφόσον και τα ίδια τα δείγματα παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, εν τούτοις στο άνω σκέλος της καμπύλης (γραμμική περιοχή) οι μεγάλες αποκλίσεις δυσκολεύουν την κατασκευή εμφυτευμάτων με σταθερά χαρακτηριστικά σε συνθήκες έντονης φόρτισης.
- Το ελαστικό EPDM παρουσιάζει μέγιστο φορτίο ~80N ενώ η μέγιστη τιμή που μετρήθηκε στο ελαστικό βουτυλίου είναι ~50N. Όμως, το ζητούμενο μέγιστο φορτίο

είναι περίπου στα 150N. Δεδομένου ότι ο περιορισμός από τις διαστάσεις της διάταξης ορίζει μέγιστη εξωτερική διάμετρο ~4mm (με εσωτερική 0,9mm), η συνολική διατομή πλαστικού δε μπορεί να ξεπερνά τα 12mm². Έτσι, συνεχίζοντας με όρους απόλυτου φορτίου, με δεδομένο ότι η διατομές των δοκιμίων για το βουτύλιο ήταν 5,3 mm² και για το EPDM 6,2 mm², προκύπτει ότι το EPDM μπορεί να δώσει φορτίο μεγαλύτερο από 150N (ενώ το βουτύλιο ~110N) και να υπερκαλύψει τη μέση τιμή μέγιστου φορτίου όπως την ορίσαμε παραπάνω.

Σαν γενικό πρακτικό συμπέρασμα από τα παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί ότι το ελαστικό EPDM ικανοποιεί καλύτερα τις προϋποθέσεις για να λειτουργήσει ως υποκατάστατο του συνδέσμου.

8.2 Μελλοντικοί Στόχοι

Από την εμπειρία της εργασίας αυτής μπορούν να τεθούν κάποιοι στόχοι έρευνας από πλευράς μηχανικής των υλικών κατασκευής του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου.

Κατ' αρχήν, παρόλο που το ελαστικό EPDM με βάση τις μετρήσεις μας φαίνεται να πληροί τις βασικές μηχανικές προϋποθέσεις για να τοποθετηθεί ως υποκατάστατο στον οργανισμό, ωστόσο θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μια σειρά δοκιμές για να αποκλειστούν πιθανές επιπλοκές:

- Εκτέλεση πειραμάτων με μεγάλης διάρκειας κυκλικές φορτίσεις σε θερμοκρασίες ανθρώπινου σώματος. Παρόλο που το ελαστικό EPDM αντέχει σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από του ανθρώπινου σώματος, πρέπει να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του πριν χρησιμοποιηθεί
- Το ελαστικό EPDM δεν είναι τοξικό και μάλιστα θεωρείται βιοσυμβατό για χρήση στην ιατρική. Ωστόσο μένει να εξετασθεί αν είναι κατάλληλο ειδικά ως εμφύτευμα. Ο εγκλεισμός του υλικού αυτού στο ανθρώπινο σώμα μπορεί να προκαλεί αντιδράσεις που σε ένα βάθος χρόνου να καταστρέφουν τον τεχνητό σύνδεσμο.

Επίσης για να προχωρήσουμε στην κατασκευή του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου θα πρέπει να εξεταστούν:

- Η μηχανική συμπεριφορά των bellows έτσι ώστε να προσδιοριστεί η συμβατότητα του τρόπου λειτουργίας του τεχνητού ορθοπεδικού συνδέσμου με τον φυσιολογικό.
- Η μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της διάταξης, συμπεριλαμβάνοντας όλη τη διάταξη (στερέωση κ.λ.π.). Η πειραματική διαδικασία στο θέμα αυτό βάζει ζητήματα που δεν έχουν προφανή λύση, τόσο σύλληψης όσο και πρακτικής εκτέλεσης.

9

Βιβλιογραφία

- [1] Fung Y.C. (1993) *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*. Springer
- [2] Ethier C.R. & Simmons C.A. (2007) *Introductory Biomechanics: From cells to living organisms*. Cambridge University Press
- [3] Cyriax E.F. (1917) Some New Facts in the Anatomy of certain Movements. *J Anat.* Jul;51(Pt 4):396-9.
- [4] Cyriax E.F. (1926) On the Rotary Movements of the Wrist. *J Anat.* Jan;60(Pt 2): 199–201.
- [5] Short W.H., Werner F.W., Green J.K. & Masaoka S. (2002) Biomechanical Evaluation of Ligamentous Stabilizers of the Scaphoid and Lunate. *J. Hand. Surg.* 2002; 27A:991-1002. American Society for Surgery of the Hand.
- [6] Νικολόπουλος Φ. Β. (2009), Πειραματική Μελέτη των Εμβιομηχανικών Ιδιοτήτων των Καρπιαίων Συνδέσμων και Υποκατάσταση του Σκαφομηνοειδούς Συνδέσμου με Αυτόλογο Συνδεσμικό Μόσχευμα . Διδακτορική Διατριβή, Ε.Κ.Π.Α.
- [7] Κουρκουλής Σ. Κ., Διαλέξεις για το μάθημα «Εισαγωγή στην Εμβιομηχανική». Ε.Μ.Π.
- [8] Mayfield J.K, Johnson R.P. & Kilcoyne R.F. (1976) The Ligaments of the Human Wrist and their Functional Significance. *Anat. Rec.*,186:417-428
- [9] Lee S. K., Park J., Baskies M., Forman R., Yildirim G., Walker P. (2010) Differential Strain of the Axially Loaded Scapholunate Interosseus Ligament. *J Hand Surg* 2010; 35A:245-251.

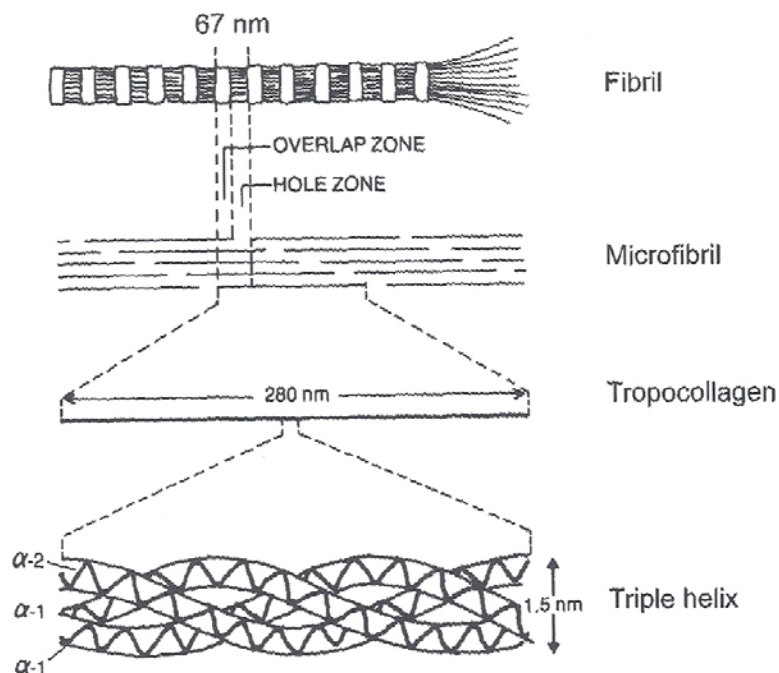
- [10] Ritt M.J.P.F., Stuart P.R, Berglund L.J., Berger R.A., Linscheid R.L., Cooney W.P.& An K-N (1996) Rotational laxity and stiffness of the radiocarpal joint. *Clinical Biomechanics* Vol.11 No.4 pp.227-232
- [11] Berger R.A. (2001) The anatomy of the Ligaments of the Wrist and Distal Radioulnar Joints. *Clinical Orthopaedics and Related Research* Number 383, pp.32-40
- [12] Berger R.A. (1996) The Gross and Histologic Anatomy of the Scapholunate Interosseous Ligament. *J Hand Surg* 1996;21A:170-178
- [13] Wright R.D.: A Detailed Study of Movement of the Wrist Joint. *J of Anatomy*, Vol. LXX, Part1
- [14] Nikolopoulos F. V., Apergis E. P., Poulilios A.D., Papagelopoulos P.J., Zoubos A. V., Kefalas V. A. (2011) Biomechanical properties of the scapholunate ligament and the importance of its portions in the capitate intrusion injury. *Clinical Biomechanics*
- [15] Nikolopoulos F., Apergis E., Kefalas V., Papagelopoulos P., Zoubos A., Soucacos P. (2010) Biomechanical Properties of Interosseous Proximal Carpal Row Ligaments. *Journal of Orth. Research*
- [16] Short W.H., Werner F.W. , Fortino M.D., Palmer A.K., Mann K.A. (1995) A Dynamic Biomechanical Study of Scapholunate Ligament Sectioning. *J Hand Surg* 1995;20A:986-999
- [17] Werner F. W., Short W. H., Fortino M. D., Palmer A.K. (1997) The Relative Contribution of Selected Carpal Bones to Global Wrist Motion During Simulated Planar and Out-of-Plane Wrist Motion (*J Hand Surg* 1997;22A:708-713.)
- [18] MacConaill M.A. The Mechanical Anatomy of the Carpuw and its Bearings on some Surgical Problems. *Journal of Anatomy* Vol75, Part2
- [19] De Lange A., Kauer J.M.G. & Huiskes (1985) Kinematic Behavior of the Human Wrist Joint: A Roentgen-Stereophotogrammetric Analysis. *Journal of Orthopaedic Research* 356-64, Raven Press, New York
- [20] Youm Y., McMurtry R.Y., Flatt A.E. & Gillespie T.E. (1978) Kinematics of the Wirst I. An Experimental Study of the Radial-Ulnar Deviation and Flexion-Extension. *The Journal of Bone and Joint Surgery* Volume 60-A, No. 4
- [21] Coe M., Spitellie P., Trumble T. E., Tencer A. E, Kiser P. (1995) The Scapholunate Allgraft: A Biomechanical Feasibility Study. *J Hand Surg* 1995;20A:590-596
- [22] Moojen T.M., Snel J.G., Ritt M.J.P.F., Kauer J.M.G., Venema H.W. , Bos K.E. (2002) Three-dimensional carpal kinematics in vivo. *Clinical Biomechanics* 17 (2002) 506–514

- [23] Wriyth T.W., Dobyys J.H., Linscheid R.L., Macksoud W. &Siegert J. (1994) Carpal Inastability Non-Dissociative. Journal of Hand Surgery (British and European Volume, 1994) 19B: 6: 763-773
- [24] Calais-Germain B. (1993) Anatomy of Movement. Eastland Press

Παράρτημα I : Κολλαγόνο

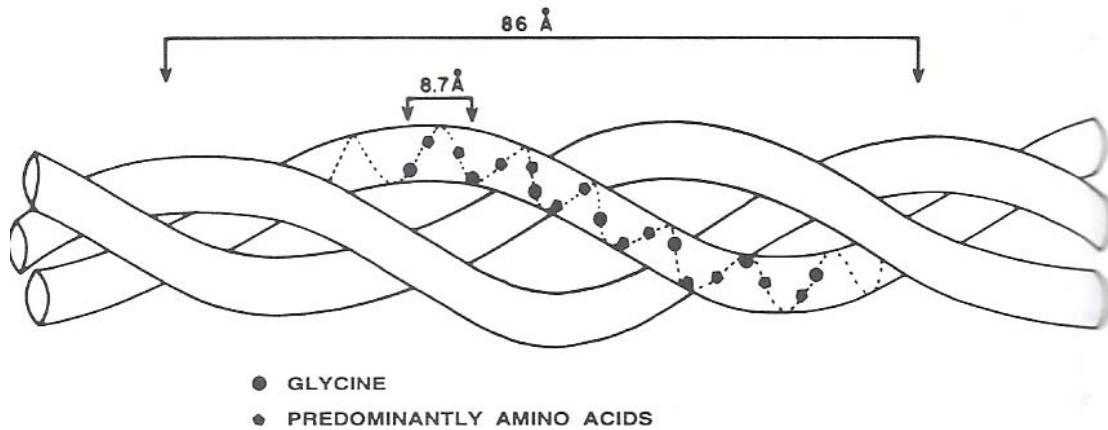
[Fung, 1993] Το κολλαγόνο είναι το βασικό δομικό συστατικό των μαλακών ιστών στα θηλαστικά προσδίδοντας τους μηχανική συνοχή και αντοχή. Στην πραγματικότητα, η χρησιμότητα του κολλαγόνου για τον ανθρώπινο οργανισμό θα μπορούσε να παρομοιαστεί με τη χρησιμότητα του χάλυβα στην ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού: ακριβώς όπως ο χάλυβας αποτελεί βασικό συστατικό του φέροντος οργανισμού στην κατασκευή κτηρίων, οχημάτων, εργαλείων κτλ έτσι και το κολλαγόνο είναι το βασικό φέρον στοιχείο στα αιμοφόρα αγγεία, το δέρμα, τους τένοντες, τα οστά κ.ά.

Όπως καταλαβαίνουμε από την προηγούμενη παράγραφο, οι μηχανικές ιδιότητες του κολλαγόνου είναι από τους θεμέλιους λίθους της εμβιομηχανικής. Βέβαια, δεν αρκεί να εστιάσει κανείς στις ιδιότητες των διάφορων τύπων του κολλαγόνου αλλά πρέπει να μελετήσει και εκείνες που του προσδίδονται με βάση τα δομικά χαρακτηριστικά του. Δηλαδή, σε κάθε επίπεδο οργάνωσης, εμφανίζονται και νέα χαρακτηριστικά των μηχανικών ιδιοτήτων του κολλαγόνου.

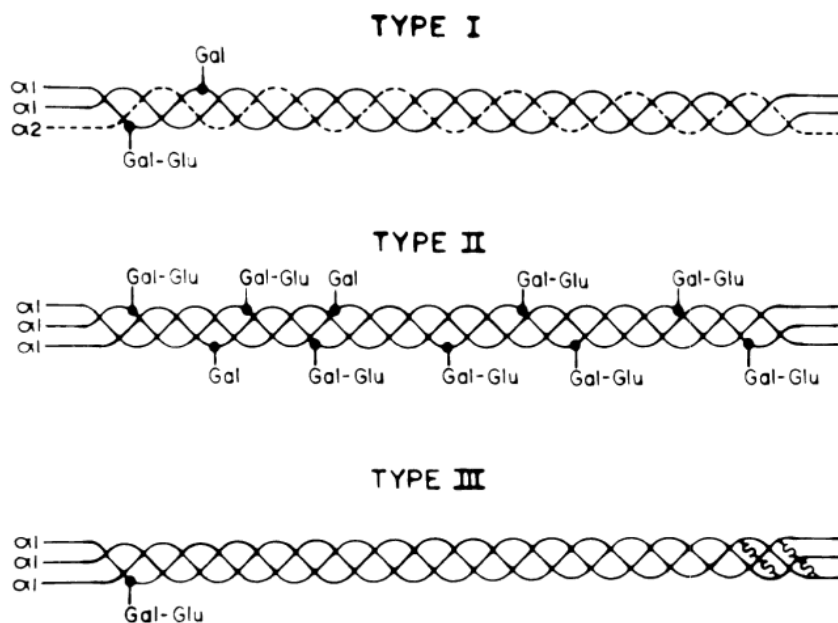


1. Το μόριο του κολλαγόνου

Το κολλαγόνο είναι ένα είδος πρωτεΐνης που αποτελείται από ευμεγέθη μόρια με μορφή τριπλής έλικας. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μόριο κολλαγόνου αποτελείται από τρεις αριστερόστροφες πολυπεπτιδικές αλυσίδες. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την οργάνωση των αμινοξέων στις αλυσίδες (α-chains) των μορίων του κολλαγόνου.

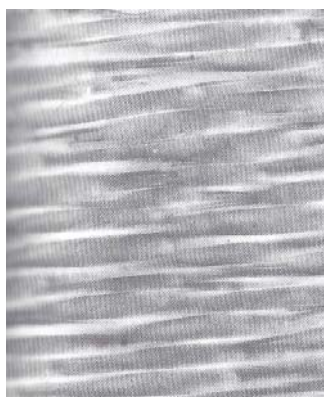


Περίπου τα δύο τρίτα του μορίου αποτελούνται από τρία αμινοξέα: τη Γλυκίνη (σε ποσοστό 33%), την Πρωλίνη (σε ποσοστό 15%) και την Υδροξυπρωλίνη (σε ποσοστό 15%). Το σχετικά μικρό μέγεθος των αμινοξέων επιτρέπει τη συμπαγή ελικοειδή δομή του μορίου του κολλαγόνου. Η έλικα που σχηματίζεται είναι δεξιόστροφη με τις αλυσίδες να περιστρέφονται με συνολικό βήμα 8,6 nm περίπου. Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δομή του κολλαγόνου τύπου I που απαντάται στους συνδέσμους και τους τένοντες. Εδώ, οι δύο από τις τρεις αλυσίδες είναι όμοιες (τύπου α1) ενώ η τρίτη διαφέρει (τύπου α2) όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. [1]



2. Τα Ινίδια Κολλαγόνου

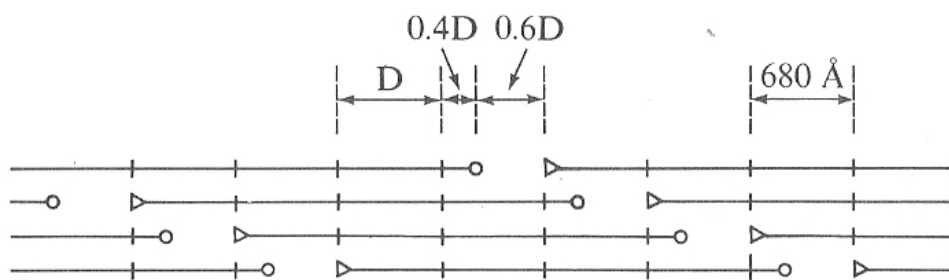
Τα ινίδια κολλαγόνου σχηματίζονται με τη συσσώρευση ικανού αριθμού τροποκολλαγόνων (μορίων κολλαγόνου).



Όπως φαίνεται στην διπλανή εικόνα, τα ινίδια κολλαγόνου παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενες ραβδώσεις.

(Στην εικόνα βλέπουμε τα σχεδόν παράλληλα ινίδια κολλαγόνου σε έναν τένοντα.)

Η προέλευση των ραβδώσεων αυτών μπορεί να γίνει πιο κατανοητή με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος όπου φαίνεται ο τρόπος οργάνωσης των ινιδίων κολλαγόνου.



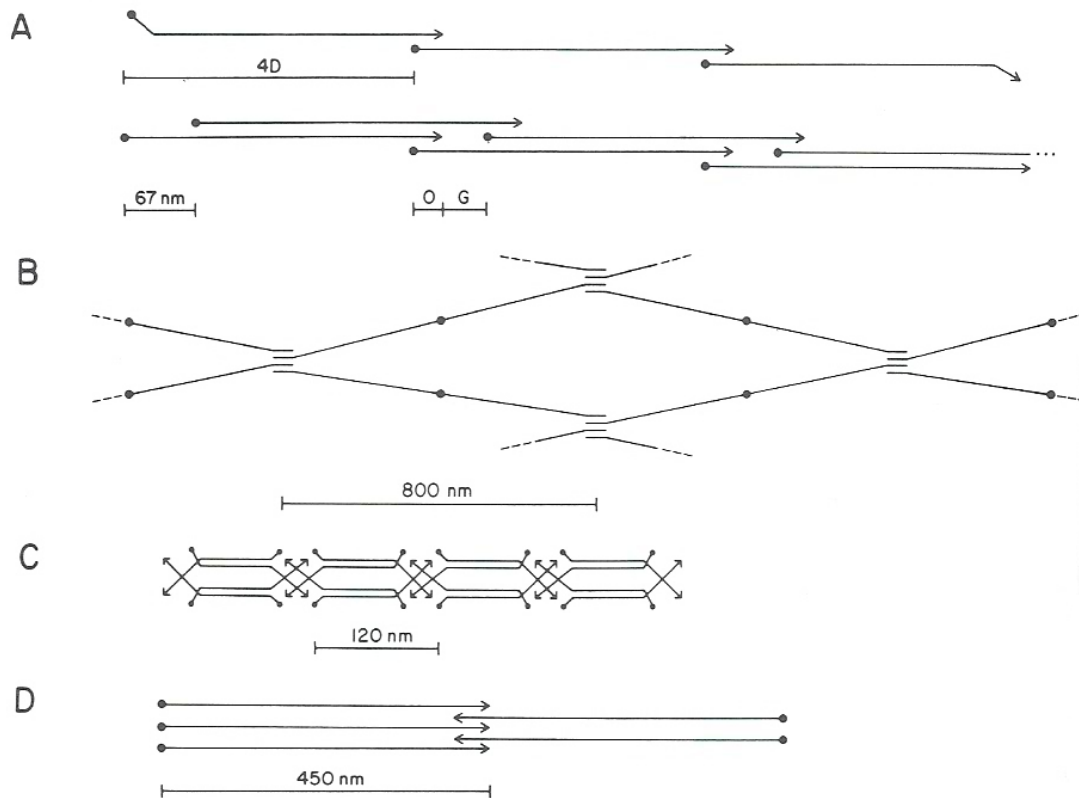
Αν θεωρήσουμε D το μήκος της ράβδωσης τότε το μήκος κάθε τροποκολλαγόνου είναι $4,4 \cdot D$ συνεπώς κάθε μόριο αποτελείται από τέσσερα τμήματα μήκους D και ένα μήκους $0,4 \cdot D$. Κάθε μόριο απέχει από το επόμενο $0,6 \cdot D$ στην παράλληλη δομή που παρουσιάζεται στο σχήμα. Η διάμετρος των ινιδίων κινείται μεταξύ 20 και 40 nm ανάλογα με το είδος του ιστού αλλά και του οργανισμού.

3. Ίνες Κολλαγόνου

Δέσμες ινιδίων σχηματίζουν τις ίνες κολλαγόνου που έχουν διάμετρο 0,2 – 12 μm και είναι, ως εκ τούτου, ορατές με το οπτικό μικροσκόπιο. Ο τρόπος οργάνωσης των ινών κολλαγόνου ποικίλει ανάλογα με το είδος του ιστού. Για παράδειγμα, στους τένοντες οι ίνες είναι σχεδόν παράλληλες και σχηματίζουν δέσμες.

Τύποι κολλαγόνου

Υπάρχουν διάφοροι τύποι του κολλαγόνου με διαφορετικές δομές που φαίνονται στο σχήμα.



Πιο συγκεκριμένα:

- η δομή (A) αντιστοιχεί στην οργάνωση των ινών στους τύπους I,II,III,V και K
- η δομή (B) αντιστοιχεί στον τύπο IV που αποτελεί βασικό συστατικό της μεμβράνης
- η δομή (C) αντιστοιχεί στον τύπο VI που συναντάται στον πλακούντα
- η δομή (D) αντιστοιχεί στον τύπο VII

Για τους συνδέσμους συγκεκριμένα ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το κολλαγόνο τύπου I. Ο τύπος αυτός σχηματίζει μεγάλες δομικές δέσμες που απαντώνται στους τένοντες, τους συνδέσμους, και άλλους ιστούς που υπόκεινται σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς έχει υψηλή ακαμψία σε εφελκυσμό (εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας $\approx 1 \text{ GPa}$) [1]