

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΡΟΩΝ

Ιστορική επισκόπηση και σύγχρονες προοπτικές

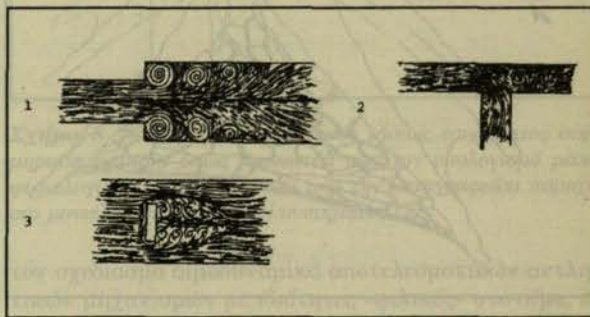
του Σ. Τσαγγάρη*

Η ροή των βιολογικών ρευστών (αίμα, ούρα, αέρας, λέμφος, σπέρμα, κλπ) υπόκειται στους βασικούς νόμους της Μηχανικής των Ρευστών. Η υλική ομοιομορφία των βιολογικών ρευστών καθώς και η αλληλεπίδραση ροής και ζωντανού οργανισμού συνιστούν ιδιαίτερο κλάδο της Μηχανικής των Ρευστών ονομαζόμενο «**Βιορρευστομηχανική**» ή «**Εμβιορρευστομηχανική**». Η Βιορρευστομηχανική αποτελεί τμήμα του ευρύτερου κλάδου της Βιο-μηχανικής ή Εμβιομηχανικής που ορίζεται κατά τον Y.C. Fung ως «**Μηχανική εφαρμοσμένη σε Βιολογία και Ιατρική**». Η Βιομηχανική συνιστά τη βάση της «**Βιοιατρικής Επιστήμης του Μηχανικού**» (Biomedical Engineering στην Αγγλική) ή όπως συχνά αποκαλείται «**Βιοιατρική Τεχνολογία**». Η Βιοιατρική Τεχνολογία είναι σήμερα σε πολλά πανεπιστήμια του κόσμου αυτοτελής κλάδος σπουδών, είτε αποτελεί μεταπτυχιακό κλάδο σπουδών και εξειδίκευσης στις επιστήμες Μηχανολόγου, Ηλεκτρολόγου και Χημικού Μηχανικού και του Ιατρού ακόμη. Η ανάγκη στελέχωσης των νοσοκομείων με εξειδικευμένους Μηχανικούς σε θέματα Βιοιατρικής Τεχνολογίας και Βιοιατρικούς Τεχνολόγους καθίσταται σήμερα επιτακτική, ενώ ισχυροποιείται ακόμη και η νομική της κατοχύρωση. Από την άλλη πλευρά η επιμόρφωση του ιατρού στο να μπορεί να αφομοιώσει και να χρησιμοποιήσει τα επιτεύγματα της Τεχνολογίας αποτελεί σήμερα αναγκαίοτητα.

Οι ρίζες της Βιορρευστομηχανικής φθάνουν στον Σταγειρίτη Αριστοτέλη (384-322 π.Χ.), ο οποίος εκτός από βασικές ανατομικές παρατηρήσεις στο κυκλοφοριακό σύστημα του ανθρώπου και των ζώων («**Μικρά Φυσικά**» και «**Ιστορία περί ζώων**») προχωρεί σε παρατηρήσεις φυσιολογικής και Αιμοδυναμικής υψής (ο όρος «**Αιμοδυναμική**» χρησιμοποιείται για την Βιορρευστομηχανική του αίματος). Παρατηρεί την παλλόμενη υφή της ροής του αίματος και την συνδέει, αν και ασαφώς, με την παλμική άντληση της καρδιάς αναφέροντας, «**Και σφύζουσιν αι φλέβες πάσαι, και άμα αλληλαιοι, δια το ηρητθήσαι εκ της καρδιάς. Κινεί δ' αεί, ώστε κακείναι αεί, και άμα αλληλαιοι, ότε κινεί**» (Μικρά Φυσικά).

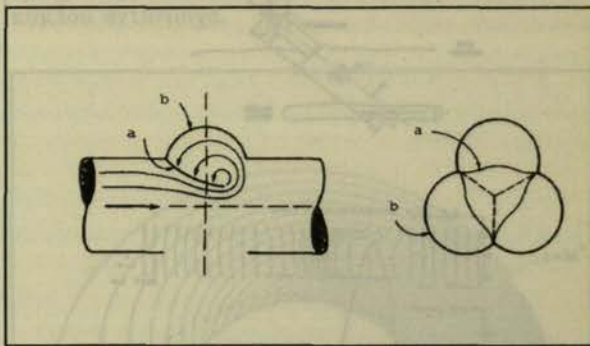
Ενώ ο κλάδος της Βιορρευστομηχανικής έλαβε την μεγάλη του ώθηση από μηχανικούς, εν τούτοις η περιοχή αυτή δεν είναι ευρέως γνωστή και ηχεί ως ένα νέο αντικείμενο. Ότι η περιοχή είναι παλαιά και ότι έχει αφ' εαυτής συμβάλει στην εξέλιξη της Ρευστομη-

χανικής καταδεικνύεται από επιλεγμένα βασικά παραδείγματα στην συνέχεια.



Σχήμα 1. Καταγραφή δινών σε βαλβίδα (3) και διακλάδωση (2) κατά Leonardo da Vinci

Ο Leonardo Da Vinci αποτελεί τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ του μεσαίωνα και της σύγχρονης εποχής. Ήταν ο πρώτος που μελέτησε την κίνηση των δινών σε κλειστούς αγωγούς και πίσω από εμποδία (σχήμα 1). Εφάρμοσε τις γνώσεις του σε ανατομικές μορφές όπως στις αορτικές βαλβίδες. Μόλις το 1969 επιβεβαιώθηκε η θεωρία του ότι η ύπαρξη της δίνης στην αορτική βαλβίδα είναι αποφασιστική στην ρύθμιση και αποτελεσματικότητα αυτής της βαλβίδας (σχήμα 2).



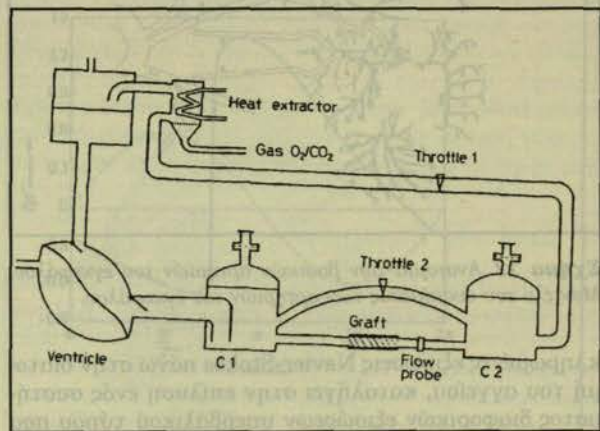
Σχήμα 2 Πιστοποίηση της υπόθεσης του Leonardo da Vinci για τον ρόλο των δινών στο κλείσιμο των αορτικών βαλβίδων (κατά Bellhouse- Talbot)

Ο Leonard Euler (1707-1783) που διέτύπωσε τους βασικούς νόμους ροής του μη συνεκτικού ρευστού, α-

(*) ο Σ. Τσαγγάρης είναι Επίκουρος Καθηγητής στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η εξέλιξη της Βιορευστομηχανικής συνδέεται επίσης με τον προσδιορισμό της υλικής συμπεριφοράς των βιολογικών ρευστών, υποπεριοχή της βιορευστομηχανικής που φέρει το όνομα Βιορεολογία. Το αίμα, που είναι κατά τον Goethe (Faust) «ιδιόμορφος χυμός», έχει και ιδιόμορφες ρεολογικές ιδιότητες. Έχει μη νευτώνιες ιδιότητες, διότι είναι γαλάκτωμα αποτελούμενο από έμμορφα συστατικά (ερυθρά, λευκά αιμοσφαίρια κ.ά.) σε ρευστό ονομαζόμενο πλάσμα. Ως εκ τούτου η ροή του έχει έκδηλα μη νευτώνιο μορφή, κυρίως στα μικρά αγγεία, και διασική μορφή στα αρτηρίδια και τριχοειδή αγγεία.

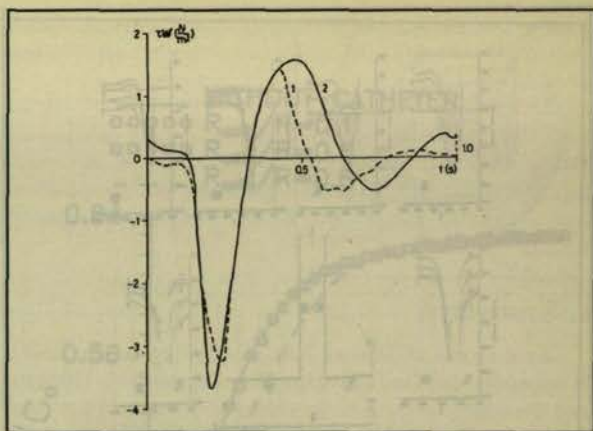
Η ροή λόγω της μη μόνιμης μορφής της είναι συνδεδεμένη και αλληλεπιδρά με την κίνηση του τοιχώματος του αγγείου. Είναι επομένως η ροή στα αγγεία συνάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του τοιχώματος του αγγείου. Ο προσδιορισμός των ιδιόμορφων μηχανικών ιδιοτήτων και των υλικών εξισώσεων του τοιχώματος του αγγείου που είναι «σύνθετο υλικό» έχει λάβει μεγάλη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία.



Σχήμα 7 Πειραματική διάταξη εξομοίωσης του κυκλοφοριακού συστήματος για την δοκιμασία αρτηριακών υποκατάστατων.

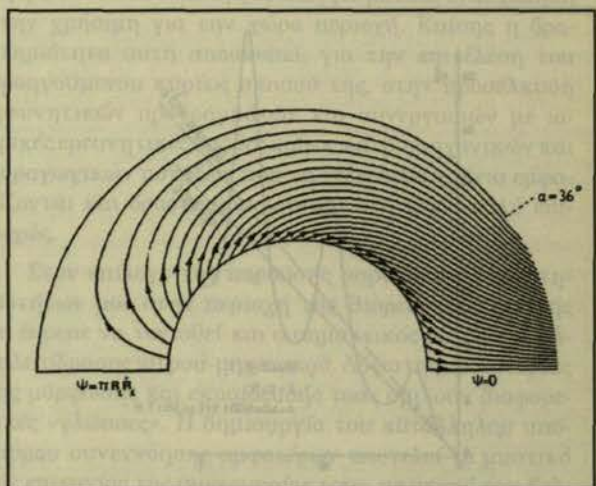
Η μελέτη, ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και κατασκευή βιοιατρικών συσκευών και τεχνητών οργάνων οφείλουν την εξέλιξη τους σε μεγάλο μέρος στην Βιορευστομηχανική, και φυσικά η Βιορευστομηχανική απεπύχθη από αυτή την αλληλεπίδραση. Εδώ θα πρέπει ιδιαίτερα να αναφερθεί το παράδειγμα της κατασκευής αρτηριακών υποκατάστατων (α.υ.). Τα α.υ. χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στην αγγειοχειρουργική για την αντικατάσταση αρτηριοσκληρωμένων αρτηριών. (π.χ. dacron). Ιδιαίτερη σημασία για τη διάρκεια ζωής τους παίζει η τεχνική της επίστρωσης των α.υ. με στρώμα κυττάρων που αυξάνει την βιοσυμβατότητα. Η βελτιστοποίηση της τεχνικής γίνεται με δοκιμασία του α.υ. σε ομοίωμα της αιματικής ροής, χρησιμοποιώντας θεωρητικές μεθόδους για την εκτίμηση των διατμητικών τάσεων που είναι υπεύθυνες για την καταστροφή του τεχνητού ενδοθηλίου (σχήματα 7 και 8).

Η υποβοήθηση του κυκλοφοριακού συστήματος ή ακόμη και η πλήρης υποκατάσταση της καρδιάς απαιτεί

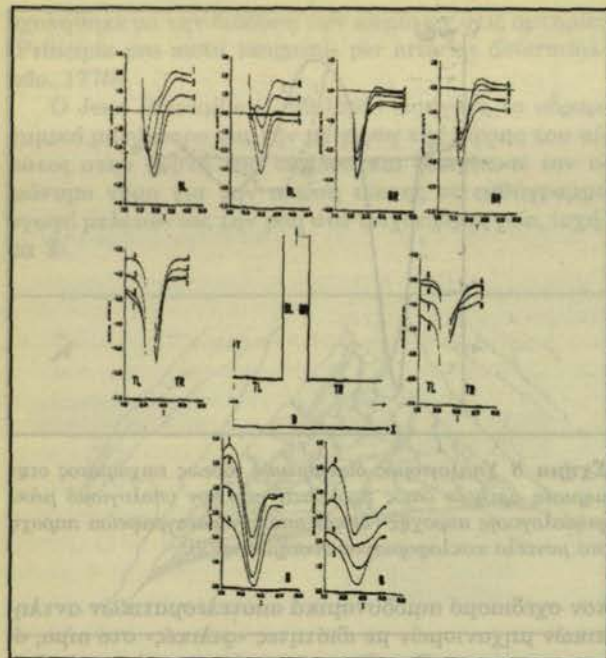


Σχήμα 8 Υπολογισμός διατμητικής τάσεως τοιχώματος στην μηριαία αρτηρία όπως προκύπτει από τον υπολογισμό μέσω φυσιολογικής παροχής (1) και από την καταγραφείσα παροχή στο μοντέλο κυκλοφοριακού συστήματος (2).

τον σχεδιασμό αιμοδυναμικά αποτελεσματικών αντλητικών μηχανισμών με ιδιότητες «φιλικές» στο αίμα, όπως π.χ. με αντιθρομβωτικές και αντιαιμολυτικές ιδιότητες. Η μορφή της ροής έχει βασική επίδραση στις αντιθρομβωτικές ιδιότητες και την αποτελεσματικότητα της συσκευής. Η μελέτη τέτοιων συσκευών από αιμοδυναμικής πλευράς γίνεται με σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους, που στηρίζονται στην αριθμητική επίλυση των βασικών εξισώσεων της ρευστομηχανικής (εξισώσεις Navier-Stokes μαζί με τις εξισώσεις παραμόρφωσης του αρτηριακού τοιχώματος). Στα σχήματα 9 και 10 παρουσιάζονται υπολογισμοί του πεδίου ροής του ενδοαορτικού μπαλλονιού για την εξώθηση του αίματος σε μοντέλο σφαιρικής κοιλίας της καρδιάς, και η κατανομή της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα μιας αρτηριακής διακλάδωσης σε μια φάση του καρδιακού κύκλου αντίστοιχα.

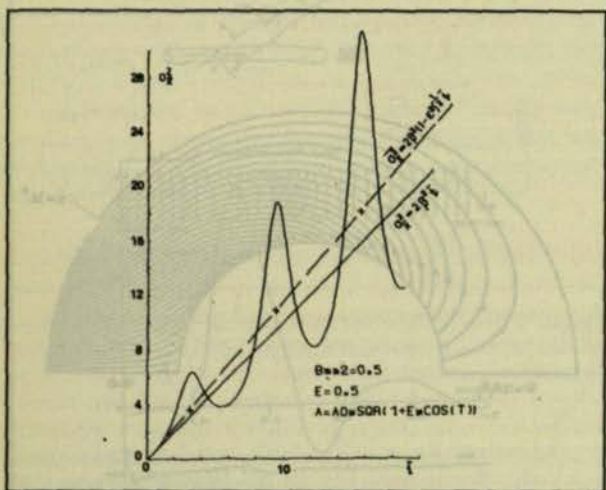


Σχήμα 9 Γραμμές ροής κατά την γραμμική διαστολή ενδοκοιλιακού μπαλλονιού σε ακίνητη κοιλία.



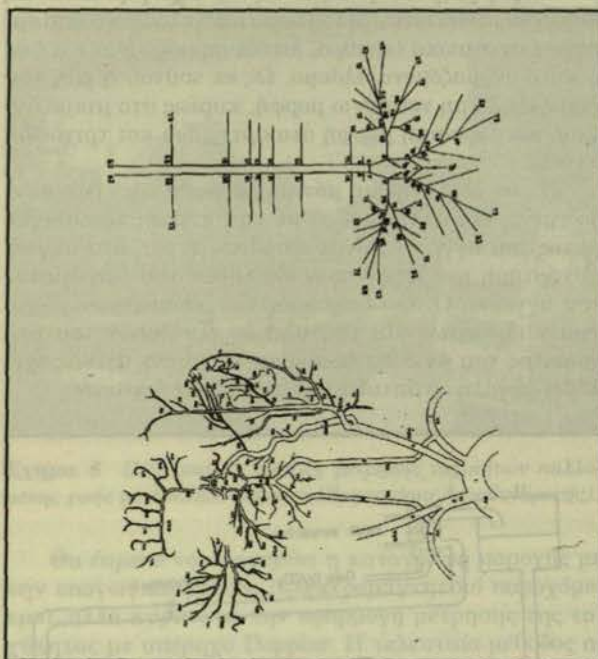
Σχήμα 10 Κατανομές αδιάστατων διατημητικών τάσεων στα τοιχώματα αρτηριακής διακλάδωσης, σε διάφορες χρονικές φάσεις του κύκλου της παλλόμενης ροής (αριθμητικά αποτελέσματα από επίλυση εξισώσεων Navier-Stokes, αριθμός Reynolds=153, αριθμός Strouhal =0.1, πλάτος παλμού πίεσης 2.582) $\varphi=45^\circ$ (1), 90° (2), 135° (3), 180° (4), 225° (5), 270° (6), 315° (7), 360° (8)

Επίσης, έρευνα που γίνεται σχετικά με την εξηναγκασμένη διάχυση ουσιών κατά την έγχυσή τους στο κυκλοφοριακό σύστημα είναι αντικείμενο της βιορευστομηχανικής και επιτρέπει, με τις μεθοδολογίες που διαθέτει, τον προσδιορισμό της επαύξεσης της διάχυσης και τον προσδιορισμό και ποσοτικοποίηση των παραμέτρων που συμβάλλουν σ' αυτήν (σχήμα 11).



Σχήμα 11 Επαύξηση της διάχυσης κατά την παλλόμενη ροή σε σωλήνα με σφύζοντα τοιχώματα.

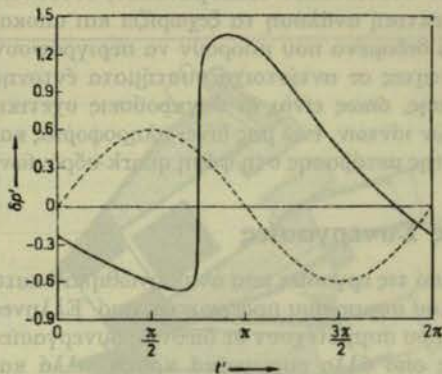
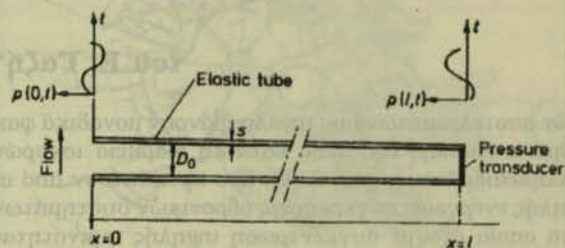
Η μελέτη και μοντελοποίηση ενός τμήματος του κυκλοφορικού συστήματος μπορεί να βοηθήσει την ιατρική διάγνωση επικουρούμενη από κάποιες μετρήσεις μηχανικών μεγεθών. Η μοντελοποίηση του εγκεφαλικού αρτηριακού συστήματος (σχήμα 12), με τις ολο-



Σχήμα 12 Ανατομία των βασικών αρτηριών του εγκεφάλου. Μοντέλο του συστήματος των αρτηριών του εγκεφάλου.

κληρωμένες εξισώσεις Navier-Stokes πάνω στην διατομή του αγγείου, καταλήγει στην επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων υπερβολικού τύπου που ολοκληρώνεται με μια εξελιγμένη υπολογιστική μεθοδολογία. Με τον τρόπο αυτό μπορεί κανείς να υπολογίσει και σφάλματα μέτρησης μη μόνιμης αρτηριακής πίεσης με καθετήρα (σχήμα 13). Αντίστοιχη μοντελοποίηση μπορεί να γίνει και για την ροή στα στεφανιαία αγγεία που αρδεύουν το μυοκάρδιο με αίμα. Τα στεφανιαία αγγεία είναι επιρρεπή στην λεγόμενη νόσο των στεφανιαίων που είναι η αρτηριοσκλήρυνση, και επομένως μπορεί να προσδιορισθεί ο ρόλος του βαθμού στένωσης των αγγείων στην μείωση της τοπικής και ολικής παροχής και αιμάτωσης.

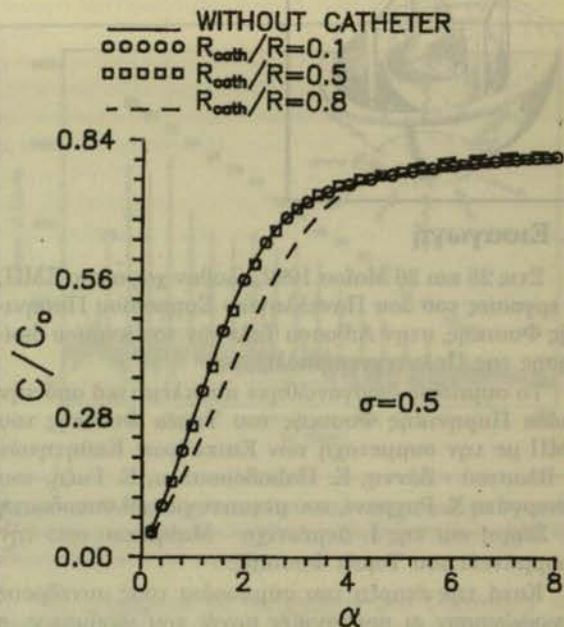
Η δημιουργία της αρτηριοπάθειας καθώς και η εξέλιξη της ασθένειας που οδηγεί στην αρτηριοσκλήρυνση και την μερική ή ολική απόφραξη του αγγείου έχει και βιορευστομηχανικές αιτίες. Οι διάφορες θεωρίες που υπάρχουν εκτιμούν ότι οι αναπτυσσόμενες διατημητικές τάσεις είναι σημαντικές για την εξέλιξη της ασθένειας, σε συνδυασμό με την διάχυση των λιπιδίων στο αρτηριακό τοίχωμα. Ως σοβαρότερη ένδειξη θεωρείται η εμφάνιση της αρτηριοπάθειας σε επιλεγμένα σημεία της αρτηριακής διακλάδωσης, όπου εμφανίζονται ακρότατα της τιμής της διατημητικής τάσεως και ζώνες ανακυκλοφορίας της ροής (σχήμα 10). Εδώ δια-



Σχήμα 13 Σφάλμα μέτρησης παλμού πίεσης μέσω ελαστικού καθετήρα. Ενίσχυση παλμού πίεσης στον μορφοτροπέα πίεσης.

φαίνεται μια από τις βασικές αποστολές της Βιορευστομηχανικής να συνεπικουρεί την βασική έρευνα που γίνεται για την διερεύνηση της εμφάνισης και των αιτιών αρτηριοσκλήρυνσης, όπως και άλλων ασθενειών.

Ως τελευταίο παράδειγμα εφαρμογής της Βιορευστομηχανικής αναφέρεται ο προσδιορισμός των λαθών που υπεισέρχονται στις μετρήσεις διαφόρων μεγεθών. Επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes μπορεί να μας οδηγήσει σε εκτίμηση του λάθους από την χρήση καθετήρα πίεσης για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διαδόσεως του αρτηριακού κύματος πίεσης, οφειλόμενο στη χρήση καθετήρα με διαστάσεις συγκρίσιμες εκείνων του αυλού του αγγείου (σχήμα 14).



Σχήμα 14 Μεταβολή της ταχύτητας μεταδόσεως κύματος (C/C_0) σε ελαστικό σωλήνα (αρτηρία) λόγω της ύπαρξης καθετήρα με σχέση διαμέτρων λ . (α : ανηγμένη συχνότητα).

Σκοπός της δραστηριότητας αυτής στα πλαίσια των σπουδών Μηχανολόγου-Μηχανικού που επικουρείται αυτή την στιγμή από ένα μέλος ΔΕΠ και μια κατ' επιλογήν παράδοση μαθήματος για δυο κύκλους (ενεργειακό και αεροναυπηγικό), είναι να δημιουργήσει κίνητρα στον σπουδαστή για επαγγελματική ενασχόληση στην χρήσιμη για την χώρα περιοχή. Επίσης η δραστηριότητα αυτή αποσκοπεί, για την επίτευξη του προηγούμενου κυρίως σκοπού της, στην προσέλκυση ερευνητικών προγραμμάτων και συνεργασιών με ιατρικές ερευνητικές ομάδες καθώς και βιομηχανικών και παραγωγικών μονάδων που τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται και δραστηριοποιούνται στη χώρα πολύ επιτυχώς.

Στον επίλογο της παρουσίας παρουσίασης δραστηριοτήτων μας στην περιοχή της Βιορευστομηχανικής θα έπρεπε να τονισθεί και ο σημαντικός ρόλος της αλληλεπίδρασης ιατρού-μηχανικού. Λόγω της προϊστορίας της μόρφωσης και εκπαίδευσής τους ομιλούν διαφορετικές «γλώσσες». Η δημιουργία του κατάλληλου υπόβαθρου συνεννόησης αμοιτέρων αποτελεί το μυστικό της επιτυχίας της συνεργασίας τους, με σκοπό την βελτίωση της υγείας με την πρόληψη, την θεραπεία αλλά και την διερεύνηση της ίδιου του οργανισμού και της φύσης μας.