

Η ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΩΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Σ.Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ
Γ. ΣΑΠΚΑΣ

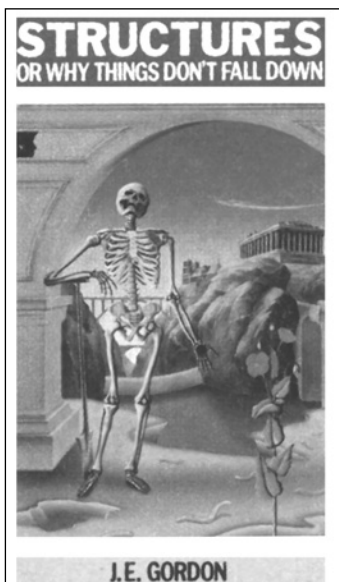
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεν είναι εύκολο να δοθεί ένας σαφής και καθολικά αποδεκτός ορισμός της έννοιας κατασκευή. Εντούτοις μπορεί, τουλάχιστον από την σκοπιά του μηχανικού, να λεχθεί ότι κατασκευή είναι μία σύνθεση επιμέρους δομικών μελών, με σκοπό την ανάληψη και τη μεταφορά τόσο εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων όσο και των φορτίων που οφείλονται στο ίδιο βάρος της κατασκευής. Για παράδειγμα, μία γέφυρα είναι μηχανική κατασκευή, δεδομένου ότι παραλαμβάνει φορτία (το ίδιο αυτών το βάρος, το βάρος των διερχόμενων οχημάτων, τα φορτία που ασκεί ο άνεμος) και τα μεταφέρει -μέσω των πυλώνων πάνω στους οποίους εδράζεται- στο έδαφος.

Υπό το πρίσμα αυτό και αν ληφθεί υπόψη ότι σκοπός της σπονδυλικής στήλης είναι (πέραν των άλλων όπως η προστασία του νωτιαίου μυελού) η στήριξη του ανθρώπινου κορμού, η ανάληψη του ίδιου αυτής βάρους και των τυχόν άλλων φορτίων που ασκούνται στον ανθρώπινο κορμό και η μεταφορά τους μέσω της πύελου και των άκρων (πυλώνων) στο έδαφος, καθίσταται σαφές ότι η σπονδυλική στήλη μπορεί να θεωρηθεί ως μία ειδική μεν, μηχανική κατασκευή δε.

Η προσέγγιση αυτή δεν είναι νεολογισμός. Στο κλασικό για τους μηχανικούς σύγγραμμά του «Structures» (Κατασκευές) ο συγγραφέας G.I. Gordon κοσμεί το εξώφυλλο (εικόνα 1) με μία σύνθεση στην οποία κυριαρχεί ο ανθρώπινος σκελετός και το αρχιτεκτονικό και τεχνικό θαύμα του Παρθενώνα της Ακροπόλεως των Αθηνών¹. Παρακάμπτοντας προς στιγμήν τυχόν ηθικολογικές και φιλοσοφικές - θρησκευτικές αντιρρήσεις, είναι σαφές ότι οι ομοιότητες των δύο κατασκευών είναι μάλλον περισσότερες από τις διαφορές τους.

Πράγματι, ένα από τα σπουδαιότερα επιτεύγματα των δημιουργών του Παρθενώνα είναι ότι σχεδιάζοντας και οικοδομώντας το ναό αυτό ως «αρθρωτή»(!) κατασκευή και όχι ως συμπαγή όγκο τύπου αιγυπτιακών Πυραμίδων, πέτυχαν να δώσουν στο μνημείο τους αναγκαίους εκείνους βαθμούς ελευθερίας μεταξύ των δομικών μελών, ώστε τα αποτελέσματα της δράσης των εξωτερικών φορτίσεων να μη συγκεντρώνονται αλλά να κατανέμονται και επομένως να μη γίνονται καταστροφικά, γεγονός που επέτρεψε στο μνημείο να αντεπεξέρχεται με επιτυχία σε σεισμικές φορτίσεις χιλιετιών. Σειρά πειραμάτων στη σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου απέδειξαν τα παραπάνω², όπως φαίνεται στην εικόνα 2. (Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι ο όρος «αρθρωτή» κατασκευή είναι μάλλον αδόκιμος, δεδομένου ότι ο Παρθενώνας αποτελείται από μεγαλίθους σε επαφή μεταξύ τους. Εντούτοις, σήμερα χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επιστημονική κοινότητα για να αποδώσει την ύπαρξη βαθμών ελευθερίας μεταξύ των δομικών μελών του μνημείου. Για τις κατασκευές του είδους αυτού έχει προταθεί και ο όρος «σπονδυλωτή»).



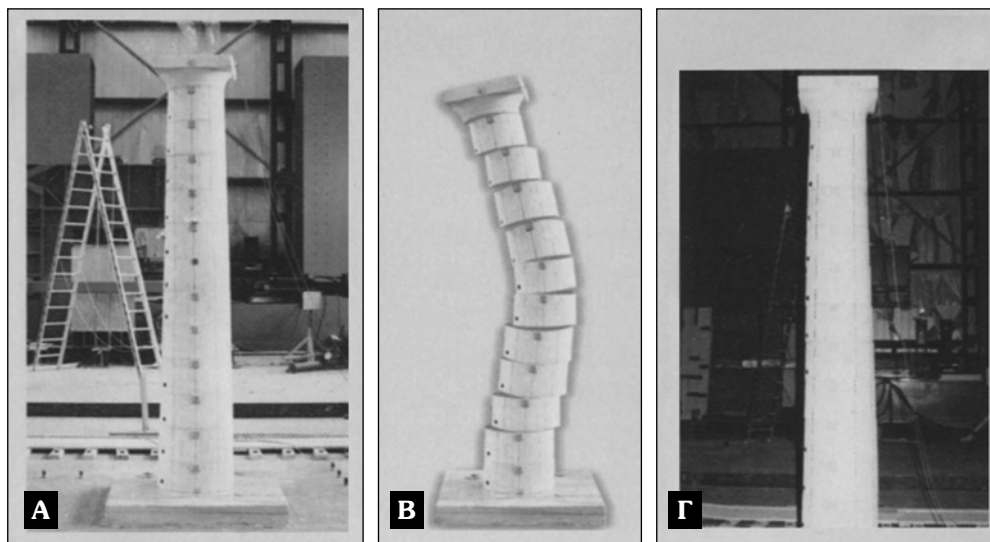
Εικόνα 1. Το εξώφυλλο του συγγράμματος του G.I. Gordon “Structures”.

Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και η σπονδυλική στήλη, η οποία πρέπει να εκπληρώνει δύο -εκ πρώτης όφως- αντικρουόμενους σκοπούς:

- Να στηρίζει σταθερά τον ανθρώπινο κορμό, αλλά και
- Να μην περιορίζει τους βαθμούς ελευθερίας κινήσεων, ώστε να διατηρείται η ευκαμψία και η ευλυγισία και να επιτρέπεται η εκτέλεση διάφορων κινήσεων (καμπικών, στρεπτικών, εκτατικών και ποικίλων συνδυασμών αυτών).

Το «θαύμα» αυτό επιτυγχάνεται με την «αρθρωτή» δομή της σπονδυλικής στήλης από πολλά επιμέρους δομικά μέλη (σπονδύλους): Επτά αυχενικούς, δώδεκα θωρακικούς, πέντε οσφυϊκούς, πέντε συνοστεωμένους ιερούς και τρεις με τέσσερις συνοστεωμένους, επίσης, κοκκυγικούς. Η «αθροιστική» δράση των μικρών σχετικών μετατοπίσεων καθενός δομικού μέλους (σπονδύλου) ως προς τα αμέσως γειονικά του επιτρέπει στον ανθρώπινο κορμό αφενός να λειτουργεί ως «ελατήριο» (εικόνα 3) και αφετέρου να διατηρεί τη δυνατότητά του να στηρίζεται ως στερεό σώμα.

Σημειώνεται ότι η σπονδυλική στήλη και η λειτουργία της δεν είναι η μόνη περίπτωση στην οποία ο άνθρωπος διδάσκεται και αντιγράφει τη φύση μέσα από το ίδιο του το σώμα. Το μοντέλο της εσωτερικής δομής των οστών, τα οποία έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή χωρίς ταυτόχρονα να έχουν υπερβολικό βάρος, πράγμα που επιτυγχάνεται με την κυψελωτή - δοκιδωτή κατασκευή τους (εικόνα 4), χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα σε μία ιδιαίτερη κατηγορία μηχανικών κατασκευών που ονομάζονται «δικτυωτές» και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τεχνικούς



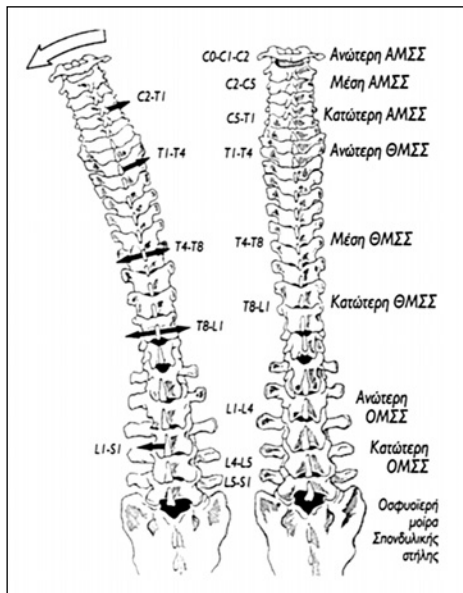
Εικόνα 2. Η λειτουργία προσομοιώματος σπονδυλωτού κίονα του Παρθενώνα υπό σεισμική φόρτιση. **Α.** Πριν τη σεισμική διέγερση. **Β.** Προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή της κίνησης κατά το σεισμό. **Γ.** Ισορροπία μετά τη σεισμική διέγερση. Τέτοιου μεγέθους μετατοπίσεις θα ήταν αδύνατον να αναληφθούν από συμπαγή κατασκευή.

και επιστημονικούς κλάδους, από την αεροναυπηγική (εικόνα 5) μέχρι και τη γεφυροποιία (εικόνα 6).

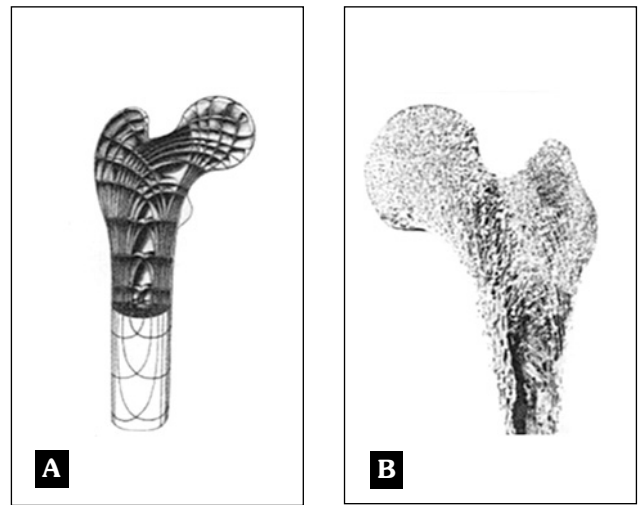
ΑΔΥΝΑΜΙΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΝΑ ΕΚΠΛΗΡΩΣΕΙ ΤΟ ΣΚΟΠΟ ΤΗΣ – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Δυστυχώς είναι δυνατόν η σπονδυλική στήλη να χάσει τη λειτουργικότητά της και να μη δύναται να εκπληρώσει το σκοπό για τον οποίο «εσχεδιάσθη». Οι πιθανές αιτίες είναι πολλές: θραύση (κάταγμα) σπονδύλου ή σπονδύλων μετά από τροχαίο ατύχημα ή πτώση, εκφυλιστικές ασθένειες των οστών, νεοπλασματικές εξεργασίες, καταστροφή στηρικτικών στοιχείων των σπονδύλων μετά από χειρουργική επέμβαση, ανελαστική συμπίεση και καταστροφή των μεσοσπονδύλιων δίσκων. Ως αποτέλεσμα ο άνθρωπος αντιμετωπίζει προβλήματα που ποικίλλουν από τους απλούς πόνους κατά τη βάδιση έως την πλήρη καθήλωση σε αναπηρική καρέκλα.

Στο σημείο αυτό αρωγός στην επιστήμη της Ιατρικής ήλθε η φαινομενικά άσχετη με το ανθρώπινο σώμα επιστήμη της Μηχανικής, με αποτέλεσμα να γεννηθεί ο επιστημονικός κλάδος της Εμβιομηχανικής. Ως Εμβιομηχανική δύναται να οριστεί η επιστήμη η οποία εφαρμόζει τις αρχές διάφορων κλάδων της Μηχανικής (Στατική, Δυναμική, Αντοχή των Υλικών, Μηχανική του Συνεχούς Μέσου, Μηχανική των Ρευστών, Ρομποτική) στο ανθρώπινο σώμα, με σκοπό την αποκατάσταση της λειτουργικότητάς του είτε με την ενίσχυση ορισμένων δομικών μελών του (όπως για παράδειγμα με μεταλλικές ενισχύσεις



Εικόνα 3. Η λειτουργία των σπονδύλων της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης υπό καμπτική φόρτιση. Το μέγεθος του βέλους κάμψης είναι αδύνατον να υλοποιηθεί από συμπαγή κατασκευή.



Εικόνα 4. Η εσωτερική πορώδης δικτυωτή δομή του οστού εξασφαλίζει αντοχή με μικρό βάρος.

σε πολυθρυμματισμένα οστά) είτε με την ολοκληρωτική αντικατάστασή τους - όπως η πλήρης αντικατάσταση των οστών με τεχνητά προσομοιώματα (εικόνα 7) ή η αντικατάσταση των βλαμμένων βαλβίδων της καρδιάς με τεχνητά υποκατάστατα³.

Αν και η Εμβιομηχανική στη σημερινή της μορφή άρχισε να αναπτύσσεται τον εικοστό μόλις αιώνα, εντούτοις οι απαρχές της χάνονται στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά ο Predregast³ αναφέρει ότι οι Άραβες επιστήμονες στα πρώτα τους κείμενα φαίνεται να ενθουσιάζονται από την ιδέα της θεώρησης του ανθρώπινου σώματος ως μηχανικής κατασκευής. Τα σπέρματα της ιδέας αυτής χάνονται στις θεωρίες του Αριστοτέλη και μέσω του Λεονάρντο Ντα Βίντσι φθάνουν στους Γερμανούς ανατόμους του περασμένου αιώνα.

Ειδικά στην περίπτωση της σπονδυλικής στήλης, η Εμβιομηχανική λειτουργεί με βάση αρχές παράλληλες με αυτές της επιστήμης της Αναστίλωσης και Συντήρησης Μνημείων. Έννοιες όπως:

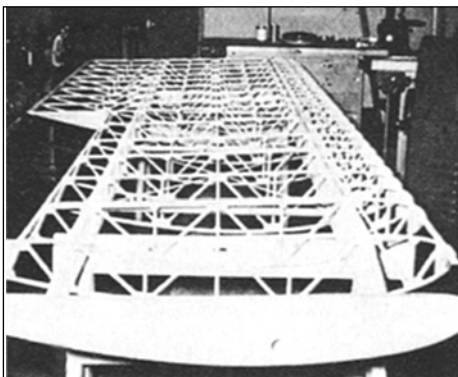
- συμβατότητα υλικών
- αποκατάσταση δομικής αρτιότητας
- σεβασμός αυθεντικών στοιχείων
- ελάχιστη δυνατή επέμβαση
- ανθεκτικότητα
- αναστρεψιμότητα

είναι κοινές στις δύο επιστήμες. Είναι δε χαρακτηριστικό και μάλλον όχι σύμπτωση ότι οι πιο πρόσφατες επιστημονικές ενδείξεις από τους δύο κλάδους υποδεικνύουν ως βέλτιστη λύση για το μεταλλικό υλικό τόσο των αναστηλώσεων που πραγματοποιούνται την περίοδο αυτή στον Παρθενώνα (εικόνα 8) όσο και των μεταλλικών εμφυτευμάτων (τεχνητοί σπόνδυλοι, ενισχυτικές πλάκες, ράβδοι συγκράτησης, μη-

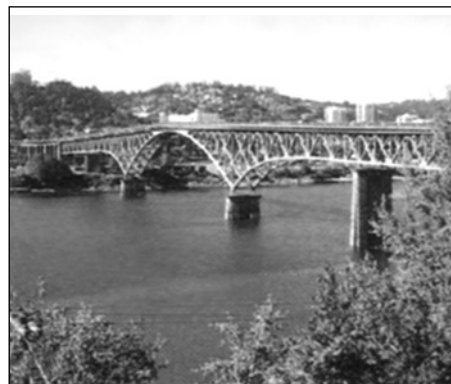
χανισμοί αγκύρωσης) στη σπονδυλική στήλη (εικόνα 9) το τιπάνιο (Ti)^{4,6}.

Τα διάφορα μηχανικά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για τη μηχανική υποστήριξη και τη σταθεροποίηση της σπονδυλικής στήλης ποικίλλουν ανάλογα με τη μοίρα της σπονδυλικής στήλης στην οποία πρόκειται να εφαρμοστούν. Περιλαμβάνουν συστήματα οπίσθιας και πρόσθιας σταθεροποίησης της ανώτερης και της κατώτερης αυχενικής μοίρας, καθώς και συστήματα πρόσθιας και οπίσθιας σταθεροποίησης της θωρακικής και της οσφυϊκής μοίρας. (Ο όρος «πρόσθια» και «οπίσθια» αναφέρεται στον τρόπο πρόσδεσης του χειρουργού στο σημείο σπονδυλοδεσίας). Πολλές πρακτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των συστημάτων μηχανικής υποστήριξης και τη συναρμογή τους με τη σπονδυλική μονάδα (σπονδυλική μονάδα χαρακτηρίζεται το σύνολο δύο γειτονικών σπονδύλων και ο μεσοσπονδύλιος δίσκος). Ως παραδείγματα αναφέρονται οι τεχνικές Gallie (σύρμα), Brooks (σύρμα και σφηνοειδές οστικό μόσχευμα), Clark (με τέσσερα σύρματα), Magerl (με βίδες), Hall και Zielke (με καλώδια και ράβδους), Harrington (με απλή ράβδο και άγκιστρο), Roy-Camille (με διαυχενικές βίδες) κ.λπ. (Σάπκας 1997). Χαρακτηριστικά συστήματα μηχανικής υποστήριξης φαίνονται στην εικόνα 10, η αναλυτική όμως περιγραφή τους εκφεύγει των ορίων του παρόντος βιβλίου. Χωρίς να επεκταθούμε περαιτέρω, σημειώνεται απλώς ότι πολύ συχνά απαιτείται και η συνδυασμένη χρήση των ανωτέρω τεχνικών με μεταλλικά κυλινδρικά εμφυτευμάτα από τιπάνιο, τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τους προσβεβλημένους σπονδύλους, ώστε να επιτευχθεί η ανακατασκευή του πρόσθιου σπινθηρικού σπονδυλικού συστήματος (εικόνα 11).

Δυστυχώς τα συστήματα μηχανικής υποστήριξης συχνά



Εικόνα 5. Το εσωτερικό πτέρυγας αεροσκάφους: αντοχή και μικρό βάρος μέσω δικτυωτής δομής.



Εικόνα 6. Μεταλλική γέφυρα δομημένη ως δικτύωμα για ελάττωση του ίδιου βάρους.



Εικόνα 7. Πλήρης αντικατάσταση του κάτω άκρου από πλαστικό και μεταλλικό προσομοίωμα.

αστοχούν. Αναφέρεται ότι το ποσοστό των αστοχιών είναι δυνατόν να υπερβαίνει το 20% των περιπτώσεων εντός των πέντε πρώτων ετών. Οι πλέον συχνές αστοχίες της μηχανικής υποστήριξης στην περίπτωση της σπονδυλικής στήλης σχετίζονται με τη θραύση των ράβδων στήριξης (εικόνα 12), την εξόλκευση των κοχλιών και την πλαστική παραμόρφωση των δομικών στοιχείων. Σύμφωνα με τον Predrengast⁷ η κύρια αιτία για τις αστοχίες αυτές δεν είναι η κακή εφαρμογή των μεθόδων μηχανικής υποστήριξης από τον ορθοπαιδικό χειρουργό, αλλά η έλλειψη εξαντλητικής πειραματικής μελέτης της τεχνικής, των υλικών και του πλήρους μηχανικού συστήματος σε συνθήκες ακριβούς προσομοίωσης της λειτουργίας του - πριν αυτό τεθεί σε εφαρμογή - για λόγους που σχετίζονται με τις ιδιαιτερότητες των σχετικών πειραμάτων, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Οφείλουμε εξαρχής να αποδεχθούμε ως γεγονός το

ότι ο πειραματικός έλεγχος των εφαρμογών της Εμβιομηχανικής είναι ιδιαίτερα δυσχερής και συχνά αδύνατος. Η κύρια αιτία αυτής της δυσχερείας δεν είναι μόνο η Ηθική και η Θρησκεία (που απαγορεύουν τη χρήση ανθρώπινων «δοκιμίων» -είτε πωματικών είτε «εν ζωή»- για πειραματικούς σκοπούς). Ακόμη και όταν είναι διαθέσιμα πωματικά ή «εν ζωή» δοκίμια (συχνά στα πειράματα για τη μελέτη των ιδιοτήτων της σπονδυλικής στήλης χρησιμοποιούνται ως δοκίμια οστά από βοοειδή, χοίρους ή ακόμη και σκύλους αλλά και τεχνητώς κατασκευασμένα οστά) ο πειραματιστής αντιμετωπίζει ιδιαίτερες δυσχερείες, οι οποίες σχετίζονται με:

- Τη διαμόρφωση των δοκιμίων και τη συντήρησή τους, ώστε να μην αλλοιώνονται οι βιολογικές και μηχανικές τους ιδιότητες.
- Τη σχεδίαση και την κατασκευή κατάλληλων διατάξεων προσαρμογής και στήριξης των δοκιμίων στις μηχανές επιβολής των φορτίσεων.
- Την πραγματοποίηση των μετρήσεων που αφορούν τις αναπτυσσόμενες μηχανικές τάσεις και τις δημιουργούμενες παραμορφώσεις.
- Τη συσχέτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τον ανθρώπινο οργανισμό, δεδομένου ότι παρά τις ομοιότητες τόσο το μέγεθος όσο και η δομή των σπονδύλων των βοοειδών, των χοίρων κ.λπ. δεν ταυτίζονται πλήρως με τις αντίστοιχες του ανθρώπινου σκελετού.
- Την προσομοίωση, μέσω ενός συστήματος μηχανικά αναπαραγόμενων μηχανικών φορτίων, του περίπλοκου συστήματος φορτίσεων που δέχεται η ανθρώπινη σπονδυλική στήλη.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναλύσουμε συνοπτικά το είδος των μηχανικών φορτίσεων που δέχεται η ανθρώπινη σπονδυλική στήλη. Καταρχήν, υπάρχουν οι λεγόμενες αξονικές φορτίσεις, οι οποίες οφείλονται σε δυνάμεις και δύνανται να είναι είτε θλιπτικές (συμπιεστικές), όταν τείνουν να ελαπώσουν το αρχικό μήκος του στοιχείου πάνω στο οποίο δρουν (εικόνα 13Α), είτε εφελκυστικές (διατατικές), όταν τείνουν να μεγαλώσουν το μήκος του στοιχείου που καταπονούν (εικόνα 13Β). Οι φορτίσεις



Εικόνα 8. Χρήση ράβδων τιτανίου για τη συγκόλληση θραυσμένου σπονδύλου (από τις εν εξελίξει εργασίες αναστήλωσης στον Παρθενώνα). Διακρίνεται καθαρά το αυθεντικό υλικό και το συμπλήρωμα από νέο υλικό.



Εικόνα 9. Χρήση διαμνηκών ράβδων τιτανίου για τη συγκράτηση της σπονδυλικής μονάδας με βίδες και εγκάρσιες στηρίξεις.

αυτές προέρχονται τόσο από το ίδιο το βάρος του ανθρώπινου σώματος (θλιπτικές) όσο και από διάφορες εργασίες ή κινήσεις που εκτελεί ο άνθρωπος (εφελκυστικές).

Στη συνέχεια, υπάρχουν οι καμπικές καταπονήσεις, πλάγιες ή ορθές (εικόνα 13Γ), οι οποίες οφείλονται σε ροπές (όπως αποδεικνύεται στην Αντοχή των Υλικών οι καταπονήσεις αυτές δεν είναι παρά ένας συνδυασμός θλιπτικών και εφελκυστικών φορτίσεων) και αναπτύσσονται όταν ο άνθρωπος εκτελεί κινήσεις που παραμορφώνουν το σώμα εκτός του κατακόρυφου άξονά του, όπως για παράδειγμα η επίκυψη (πρόσθια ή και πλάγια).

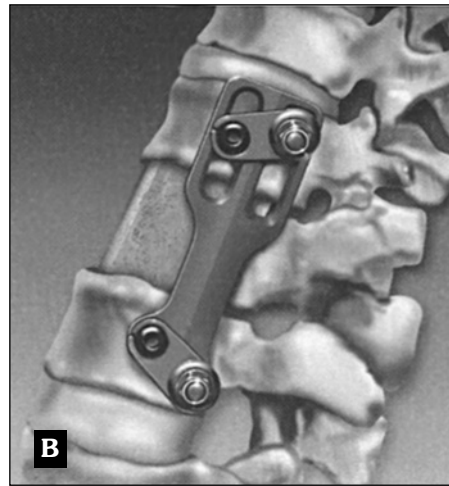
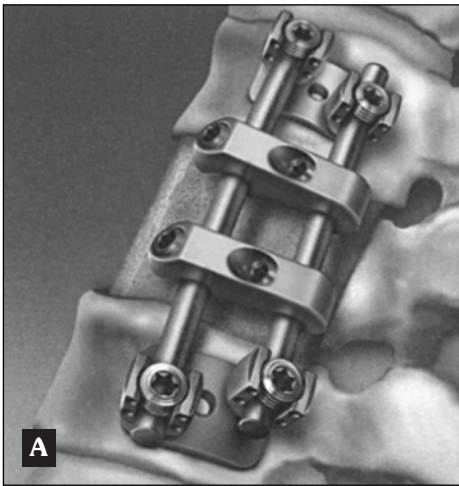
Τέλος, υπάρχουν οι στρεπτικές - διαμνηκές καταπονήσεις (εικόνες 13Δ,Ε), οφειλόμενες είτε σε ροπές είτε σε δυνάμεις που αναπτύσσονται όταν εκτελούνται περιστροφικές κινήσεις. Είναι οι πλέον επικίνδυνες από τη σκοπιά της Μηχανικής, διότι η αντοχή των υλικών σε διάτμηση είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την αντοχή τους σε αξονικά φορτία⁸.

Το σύνολο των παραπάνω φορτίσεων είναι δυνατόν να δρα ταυτόχρονα στη σπονδυλική στήλη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 14, σύμφωνα με το πρότυπο ISO-2631⁹, οπότε εύκολα γίνεται αντιληπτό και στο μη ειδικό πειραματιστή ότι είναι ανέφικτη η ακριβής προσομοίωση τόσο περίπλοκων φορτίσεων με τη βοήθεια εργαστηριακών μηχανών, οι οποίες συνήθως ασκούν είτε μόνο

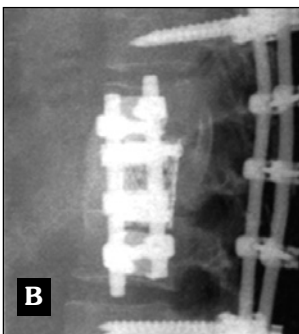
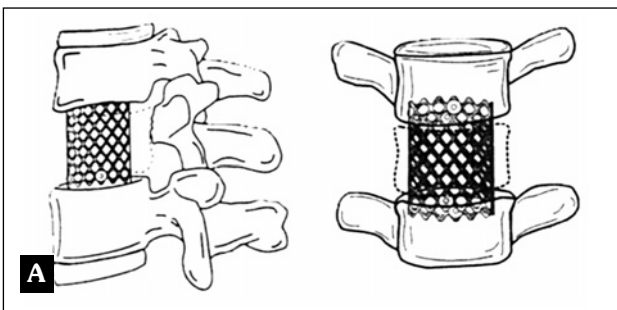
αξονικές είτε αξονικές και στρεπτικές φορτίσεις.

Το επόμενο πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο πειραματιστής συνδέεται όχι με το είδος της φόρτισης, αλλά με τον τρόπο με τον οποίο αυτή ασκείται: Είναι γνωστό από την πειραματική αντοχή των υλικών ότι τα υλικά και οι κατασκευές ανταποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με το αν το εξωτερικό φορτίο επιβάλλεται σταδιακά και με αργό ρυθμό (στατικές φορτίσεις), με γρήγορο ρυθμό ή ακόμη και ακαριαία (δυναμικές ή κρουστικές καταπονήσεις). Ένα συγκεκριμένο φορτίο μπορεί να είναι ανεκτό και να μην προκαλεί βλάβες σε μια κατασκευή ενός πολιτικού μηχανικού (πολυκατοικία, γέφυρα, φράγμα), ενώ μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές βλάβες όταν επιβάλλεται δυναμικά, όπως στην περίπτωση της σεισμικής καταπόνησης. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στη σπονδυλική στήλη όταν τα φορτία επιβάλλονται δυναμικά, όπως στις προσκρούσεις μετά από πτώση.

Το φαινόμενο της εξάρτησης της συμπεριφοράς ενός υλικού από την ταχύτητα επιβολής των φορτίσεων παρουσιάζεται στην εικόνα 15, όπου έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που συσχετίζουν το εξωτερικό φορτίο με τις δημιουργούμενες μέχρι την αστοχία παραμορφώσεις σε συνάρτηση με την ταχύτητα επιβολής του φορτίου, για δοκίμια από πεντελικό μάρμαρο, το υλικό με το οποίο έχει κατασκευασθεί ο Παρθενώνας. Στην περίπτωση της κρουστικής φόρτισης (μαύρη καμπύλη) οι παραμορφώσεις είναι υπερτετραπλάσιες σε σχέση με τις αντίστοιχες της στατικής φόρτισης (κόκκινη καμπύλη). Τα σχετικά πειράματα έγιναν από τον καθηγητή Α. Ροζάκη στο Californian Institute of Technology των ΗΠΑ, στο πλαίσιο κοινής ερευνητικής εργασίας με το Ε.Μ. Πολυτεχνείο, με αντικείμενο την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του πεντελικού μαρμάρου¹⁰. Αν και δεν υπάρχουν αντίστοιχα πειράματα για τα οστά της σπονδυλικής στήλης, αναμένεται μια παρεμφερής (τουλάχιστον ποιοτικά) συμπεριφορά, αν ληφθούν υπόψη οι ομοιότητες μεταξύ των οστών και του πεντελικού μαρμάρου ως προς την ψαθυρότητα και την ανισοτροπία.



Εικόνα 10. Χαρακτηριστικά συστήματα μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης με πλάγιες διαμήκεις ράβδους και βίδες (Α) και πλάκα τεσσάρων σημείων στήριξης και βίδες (Β).



Εικόνα 11.

Α. Κυλινδρικά εμφυτεύματα από τιτάνιο γεμισμένα με σπογγώδες οστό ή polymethylmethacrylate χρησιμοποιούνται για την κάλυψη οστικού κενού. **Β, Γ.** Μερική υποκατάσταση σπονδυλικού σώματος με κύλινδρο τιτανίου.

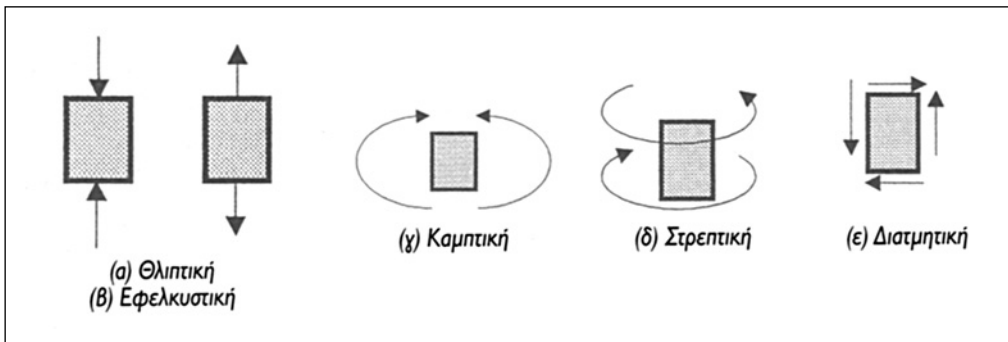
Ολοκληρώνοντας την αναφορά σχετικά με τα προβλήματα της πειραματικής μελέτης, επιβάλλεται να αναφερθούμε και στο πρόβλημα της κόπωσης των υλικών. Καταρχήν διευκρινίζεται ότι η έννοια «κόπωση», όπως αυτή χρησιμοποιείται στην Αντοχή των Υλικών, δεν ταυτίζεται με την αντίστοιχη έννοια της καθομιλουμένης. Στην Αντοχή ένα υλικό υφίσταται κόπωση, όταν δρουν πάνω σε αυτό φορτία σχετικά μικρού μεγέθους (σε σύγκριση με



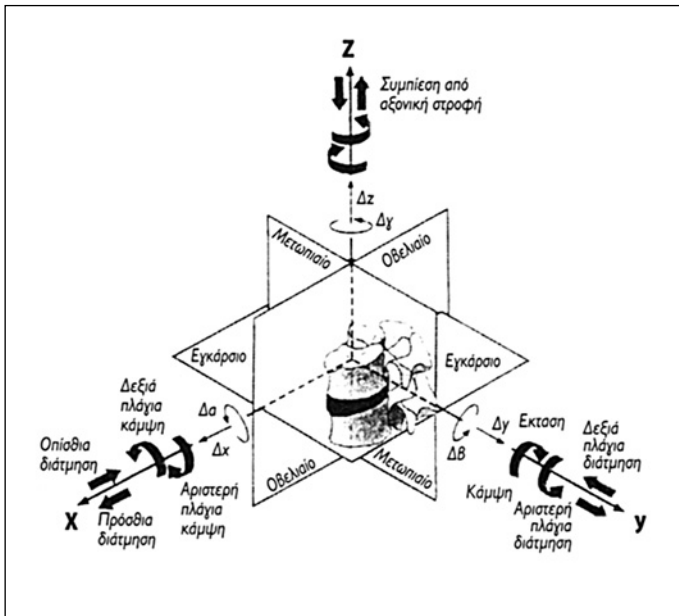
Εικόνα 12. Αστοχία συστήματος σπονδυλοδεσίας λόγω «κόπωσης».

αυτά που προκαλούν αστοχία), των οποίων η επιβολή είναι επαναλαμβανόμενη στο χρόνο. Τυπικό παράδειγμα απλών κοπωτικών φορτίσεων φαίνεται στην εικόνα 16, στο οποίο η μεν κόκκινη καμπύλη συμβολίζει την αντιστρεφόμενη φόρτιση (συνεχής εναλλαγή εφελκυσμού και θλίψης), η δε πράσινη την επαναλαμβανόμενη φόρτιση (συνεχής εναλλαγή - φορτίσεων αποφορτίσεων).

Είναι δύσκολο να εξηγηθεί θεωρητικά, αλλά είναι διαπιστωμένο πειραματικά, ότι μετά από έναν ορισμένο αριθμό εναλλαγών φόρτισης η κατασκευή αστοχεί αιφνιδιαστικά παρά το γεγονός ότι τα φορτία είναι πολύ μικρότερα από αυτά που θα κατέστρεφαν την κατασκευή αν ασκούσαν μία και μοναδική φορά. Μοιάζει δηλαδή τα υλικά να «κουράζονται». Χαρακτηριστική περίπτωση αστοχιών από κόπωση εμφανίζεται στα πτερύγια των αεροσκαφών λόγω των φορτίσεων από την μικρού εύρους αλλά επαναλαμβανόμενη ταλάντωση των πτερυγίων κατά την πτήση, αλλά και στα πλοία λόγω των συνεχώς επαναλαμβανόμενων ταλαντώσεων από τον κυματισμό κατά την πλεύση (εικόνα 17). Αντίστοιχη κόπωση εμφανίζεται και στα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των τεχνικών της μηχανικής υποστήριξης της



Εικόνα 13. Είδη φορτίσεων στη σπονδυλική στήλη: **Α.** Ολιπτική. **Β.** Εφελκυστική. **Γ.** Καμπτική. **Δ.** Στρεπτική. **Ε.** Διατμητική.



Εικόνα 14. Είδη φορτίσεων στη σπονδυλική στήλη κατά ISO-2631.

σπονδυλικής στήλης (εικόνα 12), αλλά και στα ίδια τα οστά, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια της εργασίας, της βάδισης και της άθλησης ασκούνται σχετικά μικρά αλλά επαναλαμβανόμενα φορτία.

Δυστυχώς, τα σχετικά πειράματα κόπωσης είναι υπερβολικά χρονοβόρα, δεδομένου ότι ο αριθμός των εναλλαγών φόρτισης που δέχεται μια μηχανική κατασκευή μπορεί να φθάσει και τα 100 εκατομμύρια, με αποτέλεσμα οι συνηθισμένες μηχανές και οι πειραματικές διατάξεις να χρειάζεται να λειτουργούν αρκετούς μήνες ή και χρόνια συνεχώς ώστε να εξαχθούν ασφαλή πειραματικά δεδομένα. Αν συνυπολογίσουμε και την πολυπλοκότητα των φορτίων κόπωσης τα οποία δέχεται μια κατασκευή στην πράξη (και τα οποία πολύ απέχουν από τις απλές ημιτονοειδείς φορτίσεις της εικόνας 16), αντιλαμβανόμαστε την αιτία για την έλλειψη πειραματικών δεδομένων σχετικών με τη συμπεριφορά των τεχνικών της σπονδυλοδεσίας και γενικά της μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης υπό συνθήκες κόπωσης, καθώς και τον αυ-

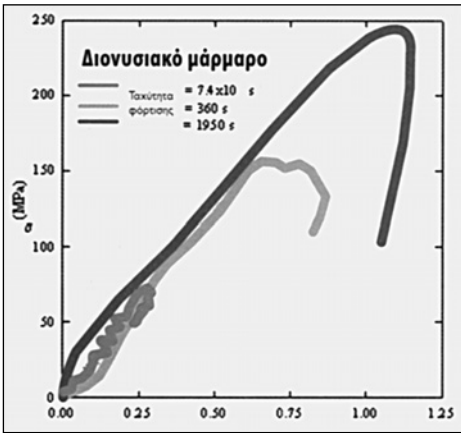
ξημένο αριθμό αστοχιών που καταγράφονται στα ιατρικά χρονικά.

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ

Στην Ελλάδα οι τεχνικές μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης εφαρμόζονται από την ορθοπαιδική κοινότητα με την ίδια επιτυχία που εφαρμόζονται και στις πλέον προηγμένες χώρες του κόσμου. Οι επιστήμονες αντιμετωπίζουν φυσικά αντίστοιχα προβλήματα. Η ανάπτυξη όμως της Εμβιομηχανικής στη χώρα μας δεν είναι ανάλογη. Σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες δυσκολίες της πειραματικής μελέτης των τεχνικών σπονδυλοδεσίας και μηχανικής υποστήριξης βρισκόμαστε μπροστά σε ένα σημαντικό ερευνητικό κενό και σε μια έλλειψη αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων.

Στην κατεύθυνση αυτή άρχισε πρόσφατα να αναπτύσσεται μια ερευνητική συνεργασία μεταξύ του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και της Α' Ορθοπαιδικής Κλινικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών, με την εκπόνηση διδακτορικών διατριβών από ειδικευμένους ορθοπαιδικούς σε θέματα που άπτονται της μηχανικής συμπεριφοράς των συστημάτων σπονδυλοδεσίας και της μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης. Όμως, το κόστος των σχετικών πειραμάτων είναι πολύ υψηλό και εμφανίστηκε η ανάγκη χρηματοδότησης από εξωκαθημαϊκές πηγές. Σε πρώτη φάση υποβλήθηκε ερευνητική πρόταση στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος Ανταγωνιστικότητας (ΕΠΑΝ) της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας. Η πρόταση εγκρίθηκε και θα χρηματοδοτηθεί μια μεγάλη και φιλόδοξη σειρά πειραμάτων Εμβιομηχανικής σε συνεργασία με την εταιρεία εισαγωγής και εμπορίας ιατρικών ειδών Medipro και την εταιρεία μηχανολογικών κατασκευών Atlantik.

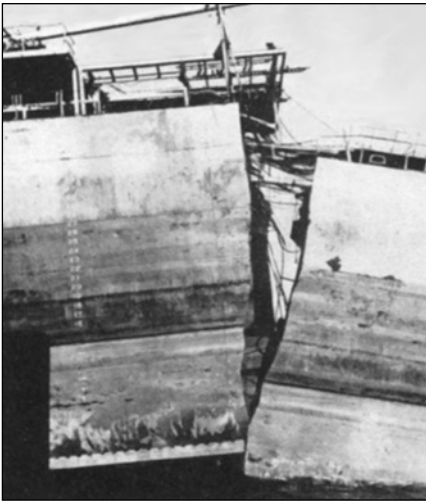
Οι στόχοι της πειραματικής αυτής μελέτης και της συνεργασίας των φορέων θα είναι η εξαντλητική μελέτη της



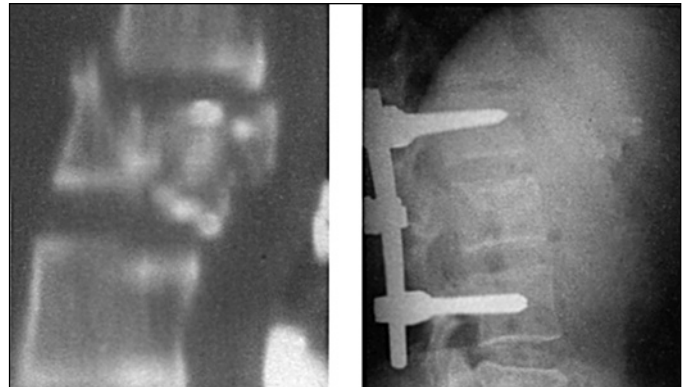
Εικόνα 15. Η επίδραση της ταχύτητας φόρτισης στη σχέση εξωτερικού φορτίου και δημιουργούμενων παραμορφώσεων σε δοκίμιο πεντελικού μαρμάρου.



Εικόνα 16. Οι απλούστερες δυνατές φορτίσεις σε κόπωση.



Εικόνα 17. Αιφνιδιαστική αστοχία ελλιμενισμένου (!) πλοίου από κόπωση.



Εικόνα 18. Πρακτική εφαρμογή της τεχνικής της οπίσθιας σπονδυλοδεσίας σε ασθενή με συντριπτική θραύση (συντριπτικό κάταγμα) οσφυϊκού σπονδύλου.

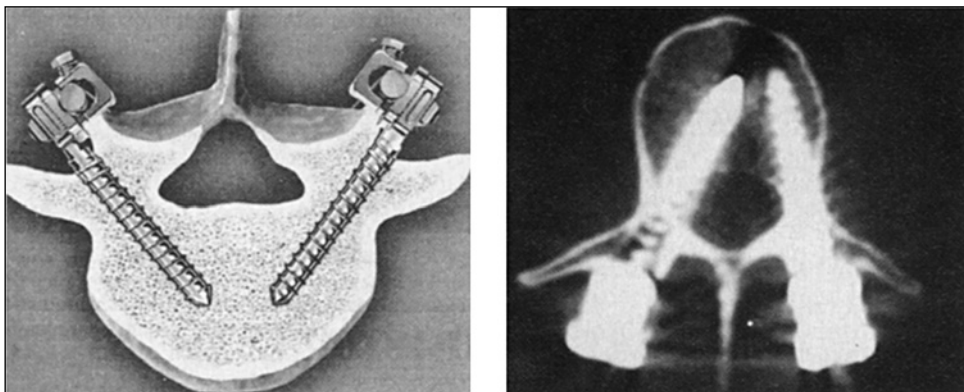
μηχανικής συμπεριφοράς διάφορων τεχνικών μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης, με έμφαση στις λεγόμενες τεχνικές της οπίσθιας σπονδυλοδεσίας (εικόνες 18, 19) και η εξαγωγή συμπερασμάτων που θα αφορούν:

- Τον προσδιορισμό των αιτίων της αστοχίας των συστημάτων μηχανικής υποστήριξης της σπονδυλικής στήλης.
- Τη διερεύνηση εναλλακτικών τεχνικών σπονδυλοδεσίας και τον έλεγχο των πιθανών βελτιώσεων των υπάρχουσών τεχνικών που θα ελαττώσουν το ποσοστό των αστοχιών και θα απαλλάξουν τον πάσχοντα από την ανάγκη μιας νέας χειρουργικής επέμβασης.
- Τη μελέτη των προβλημάτων συναρμογής ανόμοιων από μηχανική σκοπιά υλικών που πρέπει να «συνεργαστούν» στη σπονδυλοδεσία, δηλαδή του τιτανίου και των οστών.
- Την επίδραση συνδυασμένων φορτίσεων (καμπτικών και στρεπτικών) στη σπονδυλοδεσία υπό συνθήκες κοπωτικής φόρτισης. Σημειώνεται ότι σχετικά πειραματικά δεδομένα δεν υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία.

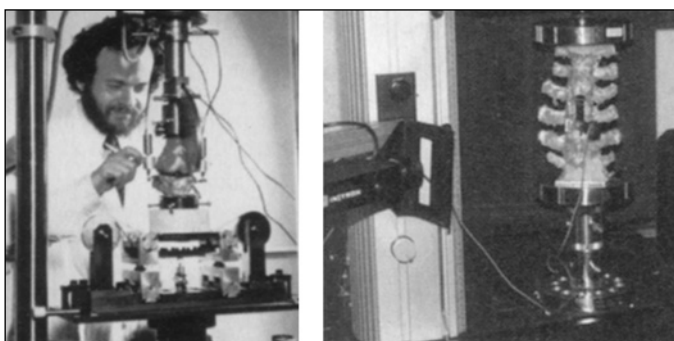
Για την επίτευξη των ανωτέρω έχει σχεδιαστεί μια σειρά πειραμάτων τα οποία περιλαμβάνουν:

- Στοιχειώδη πειράματα εφελκυσμού, θλίψης, στρέψης για τον προσδιορισμό των καταστατικών σχέσεων (δηλαδή των σχέσεων μεταξύ φορτίων και παραμορφώσεων) και των μηχανικών σταθερών τόσο των υλικών σπονδυλοδεσίας όσο και των σπονδύλων.
- Πειράματα στατικών φορτίσεων τόσο αξονικών όσο και συνδυασμένων στρεπτοκαμπτικών των σπονδυλοδεμένων μονάδων.
- Πειράματα κόπωσης υπό αξονικές φορτίσεις των σπονδυλοδεμένων μονάδων.
- Πειράματα κόπωσης των σπονδυλοδεμένων μονάδων υπό συνδυασμένες στρεπτικές και καμπτικές φορτίσεις.

Τα πειράματα θα υλοποιηθούν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του ΕΜΠ με τη βοήθεια σύγχρονων μηχανών κόπωσης, μιας σειράς κλασικών μηχανών επιβολής στατικών φορτίων όπως και ειδικών ιδιοκατασκευών, που θα σχεδιαστούν αποκλειστικά και μόνο για την επίτευξη της ορθής στερέωσης και



Εικόνα 19. Η τοποθέτηση των κοχλιών στο σπόνδυλο: η απόσταση του κοχλία από το ωτιαίο μυελό δεν υπερβαίνει τα 2 χιλιοστά(!).



Εικόνα 20. Ανάλυση σπονδυλικών μονάδων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

της στήριξης των δοκιμών στις αρπάγες των μηχανών φορτίσεως.

Πριν την πραγματοποίηση των πειραμάτων θα προηγηθεί συστηματική θεωρητική μελέτη του προβλήματος με την προσεγγιστική αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων¹¹, με βάση την οποία το σώμα που μελετάται αναλύεται σε πάρα πολλά μικρότερα σώματα στοιχειωδών διαστάσεων, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 20. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν οι κλειστές (αναλυτικές) λύσεις δεν μπορούν να βρεθούν λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, οπότε αναγκάζομαστε να καταφεύγουμε στις αριθμητικές μεθόδους με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι μέθοδοι αυτές είναι μεν προσεγγιστικές, δίνουν όμως τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της λύσης του προβλήματος. Με τη διαδικασία αυτή θα προσομοιωθούν οι φορτίσεις στον υπολογιστή, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα στοιχεία που θα επιτρέψουν στη συνέχεια την πειραματική υλοποίηση των φορτίσεων.

Εξάλλου, θα προηγηθεί συστηματική εμβιομηχανική μελέτη της βόειας σπονδυλικής μονάδας, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα για να καθοριστούν οι διαφορές στις φορτίσεις που δέχεται αυτή σε σχέση με την αντί-

στοιχη ανθρώπινη (λόγω της όρθιας στάσης του ανθρώπου), ώστε να καθοριστούν τα πραγματικά φορτία κόπωσης που θα πρέπει να επιβάλλονται στη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, για να είναι τα αποτελέσματα άμεσα εφαρμόσιμα στην περίπτωση του ανθρώπινου σώματος.

Εκτιμάται ότι η επιτυχής ολοκλήρωση του προγράμματος:

- Θα παράσχει στην ορθοπαιδική κοινότητα αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα που θα βοηθήσουν στην ελάττωση των αστοχιών και στην ανακούφιση των πασχόντων.
- Θα δημιουργήσει μια βάση δεδομένων που θα λειτουργήσει ως πυρήνας γύρω από τον οποίο θα δομηθεί μια ηλεκτρονική βιβλιοθήκη πληροφοριών σχετικών με τις μηχανικές και τις εμβιομηχανικές ιδιότητες των υλικών σπονδυλοδεσίας αλλά και των οστών της σπονδυλικής στήλης.
- Θα βοηθήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη της Εμβιομηχανικής επιστήμης στην Ελλάδα.
- Θα επιτρέψει στις συνεργαζόμενες εταιρείες να δημιουργήσουν την τεχνογνωσία, ώστε να κινηθούν προς την κατεύθυνση της εγχώριας παραγωγής υλικών σπονδυλοδεσίας με τη μορφή μικρομεσαίων επιχειρήσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την αποφυγή δαπάνης συναλλαγμάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι αν και φαίνεται παράδοξη η συνεργασία μεταξύ θεραπόντων της Μηχανικής (οι οποίοι μελετούν μηχανικές κατασκευές που ποικίλλουν από αεροσκάφη μέχρι γέφυρες, φράγματα και αρχαίους ναούς) και θεραπόντων της ορθοπαιδικής (οι οποίοι μελετούν τη «θαυμάσια» και μοναδική, αλλά παρόλα αυτά μηχανική, κατασκευή της σπονδυλικής στήλης του ανθρώπινου σώματος), είναι κάτι παραπάνω από αναγκαία. Η σπονδυλική στήλη ως κατασκευή έχει ορισμένα όρια φόρτισης (όπως και τα υλικά που την αποτελούν), η υπέρβαση των οποίων οδηγεί σε αστοχίες (βλάβες). Η

γνώση των ορίων αυτών, που αποκτάται μόνο πειραματικά, είναι εκ των ων ουκ άνευ για τον σχηματισμό της ολοκληρωμένης εικόνας της λειτουργίας της σπονδυλικής στήλης και των τρόπων που αυτή θα υποστηριχθεί μηχανικά σε περίπτωση δυσλειτουργίας.

Η πειραματική εμβιομηχανική μελέτη του προβλήματος μοιάζει να είναι η οδός που θα επιτρέψει τη βαθύτερη κατανόηση των λεπτομερειών της μηχανικής υποστήριξης του ανθρώπινου σκελετού και των αιτίων της αστοχίας των τεχνικών σπονδυλοδεσίας και μηχανικής υποστήριξης, δίνοντας ώθηση στην ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνικών επ' ωφελεία τελικώς του πάσχοντος ανθρώπου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Gordon GI. Structures. Penguin Books. London, England 1991.
2. Papastamatiou D, Psycharis I, Mouzakis H, Papantonopoulos K, Zambas C, Karydis P. Monuments under seismic action. Environment Program 1996.
3. Predrengast J. An analysis of theories in biomechanics. Engineering Transactions 2001; 49:117-134.
4. Skoulikidis Th, Vassiliou P. Corrosion and conservation of building materials of monuments: The Acropolis case. Corrosion Reviews 1999; 17:295.
5. Σάπκας Γ. Στο: «Κακώσεις Θωρακικής-Οσφυϊκής μοίρας Σπονδυλικής Στήλης». Καυκάς. Αθήνα 1999:177.
6. Σάπκας Γ. Στο: «Θέματα Εμβιομηχανικής της Σπονδυλικής Στήλης». Καυκάς. Αθήνα 1997:111.
7. Predrengast J. Biomechanical Techniques for Pre-clinical Testing of Prostheses and Implants. AMAS 2001:9.
8. Πρασιανάκης Ι, Κουρκουλής Σ. Πειραματική Αντοχή Υλικών. Συμμετρία. Αθήνα 1999.
9. Μποσκαΐνος Π, Μαγνήσαλης Ε, Καραχάλιος Θ. Στο: «Εμβιομηχανική των εμφυτευμάτων της Σπονδυλικής Στήλης». Καυκάς. Αθήνα 2001:187.
10. Βαρδουλάκης Ι, Κουρκουλής Σ, Εξαδάκτυλος Γ, Ροζάκης Α. Στο: «Ο δομικός λίθος στα μνημεία». ΙΓΜΕ. Αθήνα 2002:188.
11. Τσαμασφύρος Γ, Θεοτόκογλου ΕΕ. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ι. Παπαπασωτηρίου. Αθήνα 2000.