



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ**

Διατριβή για την απονομή του ακαδημαϊκού τίτλου
της διδάκτορος του ΕΜΠ

Σύνδεση δομικών μελών
αρχαίων μνημείων
με χρήση μεταλλικών ενισχύσεων
και καταλλήλων κονιαμάτων:
Πειραματική μελέτη
με καινοτόμες τεχνικές
και αριθμητική προσομοίωση

ΕΡΜΙΟΝΗ Δ. ΠΑΣΙΟΥ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ Σ. Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΪΟΣ 2014



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: "Ηράκλειτος II". Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ

Διατριβή για την απονομή του ακαδημαϊκού τίτλου της διδάκτορος του ΕΜΠ

Σύνδεση δομικών μελών αρχαίων μνημείων
με χρήση μεταλλικών ενισχύσεων
και καταλλήλων κονιαμάτων:
Πειραματική μελέτη με καινοτόμες τεχνικές
και αριθμητική προσομοίωση

ΕΡΜΙΟΝΗ Δ. ΠΑΣΙΟΥ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ Σ. Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ
ΜΑΪΟΣ 2014



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: "Ηράκλειτος ΙΙ". Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Στον αδελφόλη μου

Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Επιβλέπων
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
Ιωάννης Μπότσης, Καθηγητής Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου Λωζάννης

Μέλη Πενταμελούς Επιτροπής Εξέτασης

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Επιβλέπων
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
Ιωάννης Μπότσης, Καθηγητής Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου Λωζάννης
Νίκος Ανδριανόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ
Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη Επταμελούς Επιτροπής Εξέτασης

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Επιβλέπων
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης
Ιωάννης Μπότσης, Καθηγητής Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου Λωζάννης
Νίκος Ανδριανόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ
Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής ΕΜΠ
Γεώργιος Παπαδόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ
Δήμος Τριάντης, Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας

Η έγκριση διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλοί αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

(Ν.5343/1932, άρθρο 202)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|-----------------------------------|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 13 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 15 |
| ABSTRACT | 17 |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΚΙΝΗΤΡΑ - ΣΤΟΧΟΙ | 19 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

| | |
|--|----|
| 1.1 Ο ΠΑΡΘΕΝΩΝΑΣ | 23 |
| 1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 23 |
| 1.1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΠΑΛΑΙΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ | 25 |
| 1.1.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ | 31 |
| 1.1.3.1 Εισαγωγή | 31 |
| 1.1.3.2 Αφαίρεση σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων - Αποξήλωση | 31 |
| 1.1.3.3 Αποκατάσταση μονολιθικότητας και συμπλήρωση των αρχιτεκτονικών μελών | 32 |
| 1.1.3.4 Επανατοποθέτηση αρχιτεκτονικών μελών και σύνδεσή τους με συνδέσμους και γόμφους | 33 |
| 1.1.3.5 Αναστήλωση διάσπαρτων μελών | 34 |
| 1.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ - ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ - ΒΛΑΒΕΣ | 35 |
| 1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ | 35 |
| 1.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΑΡΜΑΡΙΝΩΝ ΟΓΚΩΝ | 39 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.2.2.1 | Η πρώτη αριθμητική & πειραματική μελέτη για τον εφελκυσμό των συνδέσμων | 39 |
| 1.2.2.2 | Μια εναλλακτική ερμηνεία των βλαβών στην περιοχή των συνδέσμων | 44 |
| 1.2.2.3 | Σχετικές μελέτες εντός της τελευταίας δεκαετίας | 48 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (DIC) | 51 |
| 2.2 | ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (ΑΕ) | 52 |
| 2.3 | ΤΕΧΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΓΕΙΡΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PSC) | 57 |
| 2.3.1 | ΔΙΑΤΟΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ | 57 |
| 2.3.2 | ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ | 60 |
| 2.3.3 | ΕΠΠΕΔΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ | 63 |
| 2.3.4 | ΔΙΑΝΥΣΜΑ BURGERS | 63 |
| 2.3.5 | “ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ” (CLIMB) | 64 |
| 2.3.6 | “ΩΘΗΣΕΙΣ” (JOGS) | 65 |
| 2.3.7 | ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΕΞΑΡΜΩΣΕΩΝ (MOVING CHARGED DISLOCATIONS - MCD MODEL) | 65 |
| 2.3.8 | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ PSC ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ | 66 |
| 2.4 | ΜΕΛΕΤΕΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΑΝΑΦΕΡΘΕΙΣΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ | 68 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΑΥΘΕΝΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ ΚΑΙ
ΥΛΙΚΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | ΑΥΘΕΝΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ | 69 |
| 3.1.1 | ΜΑΡΜΑΡΟ ΠΕΝΤΕΛΗΣ | 69 |
| 3.1.2 | ΜΟΛΥΒΔΟΣ | 71 |
| 3.1.3 | ΑΡΧΑΙΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΙΔΗΡΟΣ | 71 |
| 3.2 | ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ | 73 |
| 3.2.1 | ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ | 73 |
| 3.2.1.1 | Μικροδομή και ανισοτροπία | 73 |
| 3.2.1.2 | Δοκιμές αμέσου εφελκυσμού | 75 |
| 3.2.1.3 | Δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης | 76 |
| 3.2.1.4 | Το πλήρες διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του μαρμάρου Διονύσου | 77 |
| 3.2.1.5 | Δοκιμές κάμψης τριών σημείων | 78 |
| 3.2.2 | ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΔΙΟΝΥΣΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ... | 79 |
| 3.2.2.1 | Δοκιμές εφελκυσμού με δοκίμια μορφής “dog-bone” | 79 |
| 3.2.2.2 | Δοκιμές κάμψης τριών σημείων | 85 |
| 3.2.2.3 | Συμπερασματικά | 91 |
| 3.2.3 | ΚΟΝΙΑΜΑ | 92 |
| 3.2.4 | ΤΙΤΑΝΙΟ | 96 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 99 |
| 4.2 | ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ - ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ | 99 |
| 4.3 | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 107 |
| 4.4 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 112 |
| 4.4.1 | ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ | 112 |
| 4.4.2 | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ, L | 115 |
| 4.4.3 | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΠΕΛΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ, B | 117 |
| 4.4.4 | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΕΝΤΟΡΜΙΑΣ, D | 118 |
| 4.4.5 | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΟΥ, RS | 119 |
| 4.5 | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 121 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | ΓΕΝΙΚΑ | 127 |
| 5.2 | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΙΔΙΟΣΥΣΚΕΥΩΝ | 128 |
| 5.3 | ΠΛΑΙΣΙΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ | 132 |
| 5.4 | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | 133 |
| 5.4.1 | ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ | 133 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 5.4.2 | ΚΥΡΙΩΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | 138 |
| 5.5 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 139 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ:
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.1 | ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ | 157 |
| 6.2 | ΣΥΝΔΕΣΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΟ VS. ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΟ | 160 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ:
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΕΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 171 |
| 7.2 | ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ | 172 |
| 7.3 | ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ | 184 |

| | | |
|--|---|-----|
| | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 203 |
| | ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ | 205 |
| | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ | 207 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 209 |

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα και πάνω από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον Δρα Σταύρο Κ. Κουρκουλή, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Δάσκαλε, είστε αυτός που με έφερε σε επαφή με το θέμα της αναστήλωσης των μνημείων πολλά χρόνια πριν, όταν ήμουν ακόμη πολύ μακριά από το να αποφασίσω με τι θέλω να ασχοληθώ επαγγελματικά. Μου δείξατε μια “διέξοδο” που δεν είχα σκεφτεί. Κι έτσι γεννήθηκε το ενδιαφέρον μου για τα μνημεία. Χρόνια αργότερα, με την όρεξη και το μεράκι να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο, χτύπησα την πόρτα του γραφείου σας και εσείς την ανοίξατε διάπλατα. Δεχθήκατε να γίνετε ο δάσκαλός μου. Σας ευχαριστώ.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης Ζαχαρία Αγιουτάντη και τον Καθηγητή του Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου της Λαζάννης Ιωάννη Μπότση. Όποτε τους χρειάστηκα ήταν δίπλα μου. Έτσι, πέρα από το επιστημονικό τους επίπεδο, είχα την ευκαιρία να τους εκτιμήσω και σαν προσωπικότητες. Είναι δύο υπέροχοι άνθρωποι. Με στήριξαν και πίστεψαν σε μένα περισσότερο απ’ όσο πίστευα εγώ στον εαυτό μου. Τους ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη τους.

Ένα “ευχαριστώ” στον Καθηγητή του ΤΕΙ Αθήνας Δήμο Τριάντη, στον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΕΙ Αθήνας Ηλία Σταύρακα και στον Καθηγητή Εφαρμογών του ΤΕΙ Αθήνας Γιώργο Χλούπη είναι πολύ λίγο. Η γνωριμία μαζί τους ήταν μια γνωριμία-σταθμός. Η συμβολή τους στο πειραματικό κομμάτι της διατριβής (και όχι μόνο) ήταν ανεκτίμητης αξίας. Πάντα μου πρόσφεραν το χρόνο τους και τη βοήθειά τους απλόχερα, εις βάρος πολλών φορές άλλων υποχρεώσεών τους. Ούτε μια φορά δεν διαμαρτυρήθηκαν για τις ατέλειωτες ώρες που τους “ταλαιπωρούσα”. Αρκεί ένα “ευχαριστώ” για να εκφράσει την ευγνωμοσύνη μου σ’ αυτούς τους τρεις τόσο δοτικούς ανθρώπους; Μάλλον όχι...

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω από καρδιάς την κυρία Αντιγόνη Βρούβα και την Δρα Μαριλένα Μεντζίνη, Πολιτικούς Μηχανικούς, που έχουν εργαστεί ή συνεχίζουν να εργάζονται στο αναστηλωτικό έργο του Παρθενώνα. Η πολύχρονη εμπειρία τους, την οποία δεν δίστασαν ούτε στιγμή να μοιραστούν μαζί μου, ήταν εξαιρετικά πολύτιμη για την κατανόηση σειράς θεμάτων που άπτονταν του αντικειμένου της παρούσας διατριβής.

Η πειραματική μελέτη της σύνδεσης των επιστυλίων δεν θα μπορούσε να υλοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια του κ. Ιγνάτιου Χίου, ειδικευμένου μαρμαροτεχνίτη των έργων αποκατάστασης του Παρθενώνα, που κατασκεύασε με προσοχή και μεράκι τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Επιπρόσθετα, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Φρόσω και Δημήτρη, και τον αδελφό μου, Γιάννη. Όλα τα χρόνια των σπουδών μου, από την πρώτη μέχρι και την τελευταία μέρα, στάθηκαν δίπλα μου και με υποστήριξαν ψυ-

χολογικά και οικονομικά. Με βοήθησαν και συνεχίζουν να με βοηθούν με κάθε δυνατό τρόπο να υλοποιήσω τα όνειρά μου.

Ένα “ευχαριστώ” χρωστώ και στους φίλους μου, που αν και οι περισσότεροι βρίσκονται μακριά, δεν με άφησαν στιγμή να νοιώσω μόνη μου. Ιδίως η Μαριέτα, η Τάνια, η Κατερίνα, η Ειρήνη και ο Άγγελος μπήκαν πολλές φορές στη θέση του “ψυχολόγου” και με βοήθησαν με την αγάπη τους να ξεπεράσω κάποιες δύσκολες περιόδους, που τελικά είναι αναπόφευκτες στο πλαίσιο εκπόνησης μιας διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να υπογραμμίσω ότι “η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: “*Ηράκλειτος II*”. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου”. Στο πλαίσιο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Υπατία Καραγκιοζοπούλου και τον κ. Μανώλη Τσίμα, διοικητικούς υπαλλήλους του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας του ΕΜΠ, για την άριστη καθοδήγηση όσον αφορά τις γραφειοκρατικές διαδικασίες στο πλαίσιο του προγράμματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανά χείρας διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της σύνδεσης δύο τυπικών επιστυλίων του Παρθενώνα με τη βοήθεια ενός μεταλλικού συνδέσμου μορφής ‘Γ’ και κατάλληλου υλικού πλήρωσης της εντορμίας. Οι συνδέσεις των επιστυλίων καταπονούνται σε εφελκυσμό και διάτμηση και φυσικά σε σύνθετες καταπονήσεις γι’ αυτό στην παρούσα διατριβή μελετώνται τόσο οι απλές όσο και οι σύνθετες καταπονήσεις.

Όσο κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει την ευκολία που προσφέρουν οι αριθμητικές μελέτες, άλλο τόσο κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει την ανάγκη υλοποίησης δοκιμών βάσει των αποτελεσμάτων των οποίων θα γίνει επικύρωση των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Όσον αφορά στο πειραματικό μέρος της μελέτης, το κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη μελέτη από παλαιότερες είναι η χρήση νέων πειραματικών τεχνικών που “αφουγκράζονται” το εσωτερικό των δοκιμίων και δίνουν σημαντικότερες πληροφορίες για τις εσωτερικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Κινούμενοι στο πνεύμα της συνδυασμένης αντιμετώπισης του προβλήματος, η σύνδεση μελετήθηκε πειραματικά (όπου ήταν αναγκαίο) και αριθμητικά.

Αρχικά αξιοποιήθηκε η προϋπάρχουσα και μοναδική σχετική πειραματική μελέτη της σύνδεσης δύο επιστυλίων που υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό από τον Δρα Ζάμπα. Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης απετέλεσαν τη βάση για την κατασκευή του αριθμητικού προσομοιώματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παραμετρική ανάλυση που ακολούθησε με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης σειράς γεωμετρικών παραμέτρων του συνδέσμου στη μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης. Η προϋπάρχουσα αριθμητική μελέτη του Δρα Ζάμπα χρησιμοποιήθηκε για συγκριτικούς λόγους.

Προσδιορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τιτανίου (υλικό συνδέσμου) μέσω δοκιμών αμέσου εφελκυσμού και του κονιάματος (υλικό πλήρωσης της εντορμίας) μέσω δοκιμών αμέσου εφελκυσμού, αντιδιαμετρικής θλίψης και μονοαξονικής θλίψης.

Επιπρόσθετα, αφού όπως προαναφέρθηκε οι νέες πειραματικές τεχνικές αποτελούν το κύριο εργαλείο των δοκιμών που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, αποφασίστηκε αρχικά να χρησιμοποιηθούν σε απλές σχετικά δοκιμές ώστε να μπορέσουν να βαθμονομηθούν και να ερμηνευτούν οι καταγραφές τους. Έτσι, το πρώτο μέρος της πειραματικής μελέτης αφορά στο μάρμαρο Διονύσου, στο μάρμαρο δηλαδή που χρησιμοποιείται σήμερα στα έργα αναστήλωσης του Παρθενώνα. Υλοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια μορφής “dogbone” με δύο συμμετρικές εγκοπές υπό άμεσο εφελκυσμό και δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια με μία εγκοπή στο μέσο του μήκους τους. Τα πρώτα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά και

συνηγόρησαν στην περαιτέρω χρήση των τεχνικών αυτών στο κυρίως πειραματικό πρωτόκολλο.

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων που αφορούν στη σύνδεση των επιστυλίων με σύνδεσμο μορφής “I” υπό διάτμηση, πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής σχετικές δοκιμές. Οι πειραματικές τεχνικές πρόσφεραν σημαντικές πληροφορίες από το εσωτερικό των δοκιμών και βοήθησαν στην κατανόηση της μηχανικής απόκρισης στη σύνδεση. Επιπρόσθετα, μέσω των δοκιμών αυτών σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια νέα πειραματική διάταξη εκτέλεσης πειραμάτων καθαρής ή “σχεδόν” καθαρής διάτμησης για τέτοιου είδους δοκίμια.

Το κατάλληλα τροποποιημένο ως προς τις γεωμετρικές διαστάσεις αριθμητικό προσομοίωμα επικυρώθηκε βάσει των πειραμάτων που μόλις αναφέρθηκαν. Η αριθμητική ανάλυση που ακολούθησε εστιάστηκε στην ύπαρξη του ανακουφιστικού κενού και στην ποσοτικοποίηση της θετικής επίδρασής του στις τάσεις που αναπτύσσονται κυρίως στο μάρμαρο. Τέλος, προσδιορίστηκε αριθμητικά το τασικό πεδίο λόγω σύνθετης καταπόνησης τόσο στην περίπτωση της σύνδεσης δύο γραμμικών όσο και δύο γωνιακών επιστυλίων.

ABSTRACT

The present PhD thesis deals with a typical connection of two epistyles of the Parthenon Temple by means of an “I” shaped connector and suitable filling mortar. The connections are subjected to tensile, shear and mixed loading modes.

It is beyond any doubt that numerical studies constitute a useful and flexible tool in the hands of engineers working in restoration projects. On the other hand it is also beyond any doubt that numerical models should be properly validated based on data obtained from experimental studies. The main characteristic of the present experimental study compared to previous ones is the use of innovative experimental techniques which pump data from the interior of the specimens. The problem is studied both experimentally and numerically.

A previous experimental study concerning the tensile behaviour of connections was carried out by Dr Zambas. The respective force - elongation curves was used for the construction and the validation of the numerical model of the present study. The numerical model was used for a parametric numerical analysis in order to investigate the influence of some geometric parameters of the connector on the mechanical response of the connection. The results were compared with the respective ones of a previous numerical study.

The mechanical characteristics of titanium (the connector’s material) were determined by means of a series of tensile tests while mortar (the filling material) was studied by carrying out a number of tensile-, compressive- and Brazilian-tests.

Since the innovative experimental techniques are the main “tool” in the present experimental study, it was decided for them to be calibrated by means of elementary tests, i.e. during a number of tensile and three-point bending tests in specimens made of Dionysos marble. The results were encouraging and therefore the same techniques were used in the main experimental protocol.

Since there was lack of knowledge concerning the shear behaviour of the connection, the experimental study of the problem was inevitable. The experimental techniques provided interesting data which helped to understand the shear response of the connection. In addition, a new experimental set-up for the realization of a pure or an “almost pure” shear test was designed and constructed.

The properly modified numerical model was validated based on the aforementioned experiments. The numerical analysis followed was focused on the relieving space and the quantification of its positive effect on the stress field developed especially in marble blocks. Finally, the stress field was also determined when two linear or two corner epistyles were subjected to mixed loading.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΚΙΝΗΤΡΑ - ΣΤΟΧΟΙ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

“Η αναστήλωση ενός ναού ή γενικά ενός μνημείου είναι μια διαδικασία τόσο επιθυμητή όσο θα ήταν και η εύρεση των χαμένων κομματιών ενός σπουδαίου κειμένου που σώθηκε σε αποσπάσματα. Όπως τα κομμάτια και οι σκόρπιες λέξεις αποκτούν μέσα σε ένα κείμενο πρόσθετη σημασία και νόημα και όπως περισσότερες όψεις του κειμένου καθίστανται αντιληπτές όταν βρίσκονται χαμένα κομμάτια του, συμβαίνει ακριβώς το ίδιο με το μνημείο και τους λίθους του.” έχει γράψει ο Καθηγητής Μ. Κορρές [1].

Η αποκατάσταση και αναστήλωση των μνημείων είναι μια ιδιαίτερη και σύνθετη διαδικασία και οι εργασίες που εκτελούνται πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένες αρχές. Το πρώτο κείμενο στο οποίο ζητήθηκε ο σεβασμός των ιστορικών τεκμηρίων ανήκει στον Ιταλό αρχιτέκτονα Camillo Boito το 1883. Ακολουθούν η “Χάρτα των Αθηνών” και η ιταλική “Carta del Restauro” το 1931. Το 1964 συντάχθηκε ένα συνοπτικό κείμενο, η “Χάρτα της Βενετίας”, που περιλαμβάνει το δεοντολογικό πλαίσιο των αναστηλώσεων και θεωρείται ότι εκφράζει την τρέχουσα αντίληψη σχετικά με τις αποκαταστάσεις των μνημείων. Η σημερινή αντίληψη για τις αποκαταστάσεις και τις αναστηλώσεις των μνημείων στον Ευρωπαϊκό χώρο συνίσταται στην αποδοχή των αρχών αυτών που εφαρμόζονται όμως με κάποια ελαστικότητα και με γνώμονα την ιδιαίτερη προσωπικότητα του κάθε μνημείου [2].

Στην περίπτωση των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών, τα αναστηλωτικά έργα υλοποιούνται βάσει των αρχών της “Χάρτας της Βενετίας”. Από το 1975 επικεφαλής των αναστηλωτικών έργων είναι η “Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως” (ΕΣΜΑ) με αρμοδιότητες “τον προγραμματισμό, την κατεύθυνση και την εποπτεία” των έργων ενώ το 2000 συστήνεται η “Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως” (ΥΣΜΑ) με σκοπό την επιτάχυνση των έργων και τη σύντομη ολοκλήρωσή τους. Συγκεκριμένα, το έργο αποκατάστασης του Παρθενώνα άρχισε το 1983 με την εγκατάσταση του εργοταξίου ενώ είχε προηγηθεί η καταβίβαση των τριών εναπομεινάντων αγαλμάτων του δυτικού αετώματος το 1977, η μεταφορά τους στο Μουσείο και η αντικατάστασή τους με αντίγραφα [3,4].

ΚΙΝΗΤΡΑ

Τα μνημεία της Ακρόπολης είναι δομημένα με λαξευτούς λίθους που συνδέονται μεταξύ τους με συνδετήρια στοιχεία (σύνδεσμοι μορφής “Γ” και γόμφοι) που τοποθετούνται σε εγκοπές των συνδεομένων λίθων, τις εντορμίες. Ο χώρος μεταξύ του συνδετηρίου στοιχείου και της εντορμίας πληρούται με κατάλληλο συνδετικό υλικό. Οι σύνδεσμοι μορφής “Γ” χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μαρμάρινων όγκων της ίδιας στρώσης ενώ οι γόμφοι συνδέουν μάρμαρα που βρίσκονται σε διαδοχικές στρώσεις. Γενικά, ο όρος “σύνδεση” περιλαμβάνει το συνδετήριο στοιχείο και την περιοχή του μαρμάρου στην οποία αγκυρώνεται [5,6].

Οι σύνδεσμοι μορφής “Γ” αναφέρονται στη “Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος” [5] ως οριζόντιες εφελκυστικές συνδέσεις που αναπτύσσουν ωστόσο σημαντική διατμητική λειτουργία. Η διατμητική τους καταπόνηση, ως δευτερεύουσα, επισημαίνεται επίσης στη “Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος, Τόμος 3β” [6] δεδομένου ότι παρεμποδίζουν και τη σχετική οριζόντια μετακίνηση των συνδεομένων μαρμάρων. Στη “Μελέτη Δομικής Αποκαταστάσεως Ορθοστατών Βορείου Τοίχου Σηκού Παρθενώνος, Τόμος 1” [7] τίθεται εκ νέου ο προβληματισμός της αντοχής των εντορμιών με βάση την παρατήρηση της συστηματικής συγκέντρωσης των βλαβών των μαρμάρινων μελών στις περιοχές των συνδετηρίων στοιχείων. Στη μελέτη αυτή έχει πραγματοποιηθεί και ερμηνεία των αστοχιών στις περιοχές των συνδέσμων με βάση τους πιθανούς τρόπους παραμόρφωσής τους εξαιτίας των αντίστοιχων σχετικών μετακινήσεων των μελών μεταξύ τους. Συνοπτικά, εισάγεται η υπόθεση ότι η συγκέντρωση των αστοχιών στις περιοχές των συνδετηρίων στοιχείων οφείλεται στην ύπαρξη των συνδέσμων και των γόμφων σε συνδυασμό με την έντονη μηχανική καταπόνηση στην οποία υποβλήθηκαν, συμπεριλαμβανομένης της επιρροής των υπερκειμένων στρώσεων. Η ανάγκη για πρόσθετη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των συνδετηρίων στοιχείων με την περιοχή της εντορμίας επισημαίνεται και στη “Διερεύνηση Συνδεσμολογίας Επιστυλίων Βόρειας Κιονοστοιχίας Παρθενώνα” [8]. Επιπρόσθετα, η παρατήρηση των παραμορφώσεων στο μνημείο δείχνει ότι η καθαρή διάτμηση είναι μια υφιστάμενη καταπόνηση (ολισθήσεις μελών σε σχέση με τα παρακείμενά τους).

Βάσει των ανωτέρω αποφασίστηκε να μελετηθεί στην παρούσα διατριβή πειραματικά και αριθμητικά η απόκριση της σύνδεσης των επιστυλίων του Ναού (με ένα συνδετήριο στοιχείο μορφής “Γ”) σε εφελκυσμό, διάτμηση και συνδυασμένες φορτίσεις.

Ας σημειωθεί ότι η ανάγκη για την πειραματική κυρίως μελέτη της σύνδεσης υπό καθαρή διάτμηση δηλώνεται σαφώς στην “Πρόταση Νέας Πειραματικής Διερεύνησης για τη Δομική Αποκατάσταση των Μελών του Παρθενώνα” [9] και κρίνεται απαραίτητη διότι:

- Δεν υπάρχει κανένα προηγούμενο ολοκληρωμένο πειραματικό έργο.
- Υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι σε αρκετές περιπτώσεις η διατμητική δράση των συνδέσμων μπορεί να προκαλέσει αστοχία του μαρμάρου στην πε-

ριοχή της εντορμίας (νέας ή/και αρχαίας), γεγονός που αντίκειται στις βασικές αναστηλωτικές αρχές.

- Η αποσαφήνιση της διατμητικής δράσης των συνδετηρίων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή του τρόπου διαστασιολόγησής τους, καθώς φαίνεται ότι η φέρουσα ικανότητα της εντορμίας του συνδέσμου, καταπονούμενη από το συνδετήριο στοιχείο διατμητικά μπορεί να είναι κρισιμότερη από τη φέρουσα ικανότητα αυτής όταν εφελκύεται ο σύνδεσμος.

ΣΤΟΧΟΙ

Οι επιμέρους στόχοι της μελέτης παρουσιάζονται μέσω των ερωτημάτων στα οποία καλείται να δώσει απαντήσεις η παρούσα μελέτη και συνοψίζονται στα κάτωθι:

1. Υπάρχει συσχέτιση των νέων πειραματικών τεχνικών με τις παραδοσιακές μεθόδους αλλά και μεταξύ τους;
2. Μπορούν οι νέες πειραματικές τεχνικές να αντιληφθούν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των δοκιμίων και κατ' επέκταση να λειτουργήσουν ως προάγγελοι αστοχιών;
3. Πως μπορεί να υλοποιηθεί ένα πείραμα καθαρής διάτμησης στην περίπτωση της σύνδεσης δύο επιστυλίων;
4. Πόσο θετικά επηρεάζεται η συμπεριφορά της σύνδεσης από το ανακουφιστικό κενό;
5. Αξίζει τελικά να χρησιμοποιείται στις μελέτες ένα σύνθετο αριθμητικό προσομοίωμα;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Ο ΠΑΡΘΕΝΩΝΑΣ

1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο μέγας ναός (Εικ. 1.1, 1.2) δομήθηκε σε απίστευτα σύντομο χρόνο. Ο Παρθενώνας άρχισε να κτίζεται το 447 π.Χ. Το 438, έτος μεγάλων Παναθηναίων, ο “Νεώς ο μέγας” αφιερώθηκε στην Αθηνά ενώ η δημιουργία των γλυπτών ολοκληρώθηκε το 432 π.Χ. Αρχιτέκτονες αναφέρονται ο Ικτίνος και ο Καλλικράτης, ενώ κύριος πρωταγωνιστής του γλυπτικού έργου υπήρξε ο Φειδίας [5].

Ως κτήριο, ο Παρθενώνας ακολουθεί ένα ναϊκό τύπο άγνωστο στην υπόλοιπη Ελλάδα: οκτάστυλος περίπτερος δωρικός ναός με εξάστυλο αμφιπρόστυλο σηκό, αποτελούμενο από τον κυρίως ναό και ένα οπίσθιο διαμέρισμα [3]. Οι μέγιστες διαστάσεις του ναού είναι (ΜxΠxΥ): 72.32x33.69x19.80 m. Οι 46 εξωτερικοί κίονες έχουν διάμετρο ~1.91 m και ύψος ~10.43 m. Αποτελούνται έκαστος από 11 σπονδύλους βάρους 5-10 t, και ένα κιονόκρανο πλάτους ~2.00 - ~2.09 m και βάρους 8-9 t. Το επιστύλιο είναι μονόλιθο κατά το ύψος (~1.35 m) και τρίλιθο κατά το πάχος (~1.80 m). Οι κίονες στο εσωτερικό του κυρίως ναού ήταν δωρικοί με 16 ραβδώσεις σχηματίζοντας δίτονη κιονοστοιχία (αποτελούμενη, δηλαδή, από δύο επάλληλες κιονοστοιχίες) ύψους 13.5 m, η οποία είχε κάτοψη μορφής Π με 23 κίονες σε κάθε στάθμη.



Εικ. 1.1: Ο Παρθενώνας από τα βορειοδυτικά. Φωτ.: Σ. Μαυρομμάτης [3].



Εικ. 1.2: Η δυτική πρόσοψη του Παρθενώνα. Φωτ.: Σ. Μαυρομμάτης [3].

Ο Παρθενώνας είναι κατασκευασμένος με αρχιτεκτονικά μέλη που είναι τοποθετημένα αρθρωτά, το ένα δίπλα ή επάνω στο άλλο, “εν ξηρώ”, χωρίς δηλαδή συνδετικό κονίαμα [4]. Η εξαιρετική ακρίβεια στη λάξευση των επιφανειών και στη συναρμογή των λίθων αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό της δομής του, με αποτέλεσμα συχνά να δημιουργείται οπτικά η εντύπωση ότι η κατασκευή είναι συνεχής [10]. Η τέλεια επαφή των λίθων του ναού είναι ασφαλώς ό,τι περισσότερο μπορούσε να πράξει ο άνθρωπος για να προσδώσει μονολιθική συνέχεια σε μία πολύλιθη κατασκευή. Όμως, η βασική συνθήκη της επιτυχίας του σκοπού είναι φυσική: η μη παραμορφωσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης του ναού. Το έδαφος, ο βράχος λοιπόν, αποτελεί την κύρια προϋπόθεση της επιτυχίας αυτού του είδους της ανελαστικής οικοδομικής. Αμέσως μετά ακολουθεί σε σημασία η ισχυρή πρόσφυση των λίθων που οφείλεται στην τέλεια λάξευση και επαφή, σε συνδυασμό με τη μεγάλη μάζα της κατασκευής και τον επαρκή συντελεστή τριβής μεταξύ μαρμάρων ($\eta = \sim 0.40-0.55$). Παρά την ύπαρξη των δύο σπουδαίων συνθηκών της στερεότητας και της συνέχειας της κατασκευής, οι οικοδόμοι του ναού συνέδεσαν τους λίθους μεταξύ τους με σιδηρά κυρίως στοιχεία [5].

Σε αντίθεση με κτήρια άλλων πολιτισμών, μεταξύ των οποίων και τα σύγχρονα, ο Παρθενώνας, όπως πολλά κτήρια της εποχής του, δεν είναι απολύτως γραμμικός. Παρουσιάζει συστηματικές καμπυλώσεις των γραμμών του σε όψη και αποκλίσεις των κίωνων, των τοίχων και όλων των άλλων όρθιων στοιχείων των επιφανειών του από την κατακόρυφο, ενώ σε κάτοψη η μορφή του είναι κανονική και ευθειογενής. Οι αποκλίσεις αυτές και οι καμπυλώσεις ονομάζονται εκλεπτύνσεις και υπηρετούν την αισθητική λειτουργία του κτηρίου. Οι σπουδαιότερες από τις εκλεπτύνσεις είναι: 1) Η καμπύλωση όλων των οριζοντίων γραμμών και επιφανειών προς τα άνω. Αρχίζει από το θεμέλιο, περιλαμβάνει την κρηπίδα, το θριγκό, τις οροφές, τη στέγη και την κεράμωση. 2) Η κλίση των μακρών πλευρών του σηκού, καθώς και των κίωνων της περιστασης μαζί με το θριγκό τους προς τα μέσα. Οι γωνιαίοι κίονες κλίνουν κατά τη διαγώνιο (δηλαδή συμμετέχουν στην κλίση και των δύο πλευρών). Υπάρχουν επαρκείς ενδείξεις ότι οι πλευρές της δίτονης κιονοστοιχίας έκλιναν και αυτές προς τα μέσα. Τα αετώματα, οι προστάσεις, οι θυραίοι τοίχοι και ο μεσότοιχος δεν παρουσίαζαν απόκλιση από την κατακόρυφο.

Οι μεγάλοι της εποχής ανακάλυψαν τις “εκλεπτύνσεις” του ναού με μεγάλο ενθουσιασμό. Ο Viollet-le-Duc, άοκνος μελετητής των καθεδρικών ναών της Γαλλίας, θαυμαστής του ρασιοναλισμού της γοτθικής κατασκευής αλλά και λεπταίσθητος θεωρητικός της αρχιτεκτονικής γενικότερα, συμπέρανε “πως οι Έλληνες ήταν ικανοί για τα πάντα στην περιοχή της τέχνης, πως δοκίμαζαν με την αίσθηση της όρασης απολαύσεις που είμαστε πολύ άξεστοι για να μπορέσουμε ποτέ να γνωρίσουμε”. Από την άλλη μεριά της Μάγχης, ένας υστερορομαντικός αρνητής της κλασικότητας, ο έξοχος Ruskin, σαγηνευμένος από τη “λανθάνουσα γραφικότητα” του κατεξοχήν κλασικού μνημείου, έγραφε: “Ας μη λεχθεί, όπως έγινε με τις τελευταίες ανακαλύψεις της λεπτής καμπυλότητας στον Παρθενώνα, πως ό,τι δεν μπορεί να καταδειχθεί παρά με επίμοχθη μέτρηση είναι αδύνατο να επηρεάζει την ομορφιά του

σχεδίου. Το μάτι συνεχώς επηρεάζεται από αυτό που δεν μπορεί να επισημάνει. Και δε θα ήταν υπερβολή να πούμε πως επηρεάζεται περισσότερο από αυτό που επισημαίνει λιγότερο” [3].

Οι επιφάνειες των λίθων του Παρθενώνα είναι τελείως επίπεδες τόσο στα στάδια των διαφόρων απέργων όσο και στην τελική τους λείανση. Οι ακμές των λίθων είναι τελείως ευθύγραμμες και οι γωνίες σε κάτοψη απολύτως ορθές. Το σφάλμα επιπέδωσης ή ευθείασης των τελικών επιφανειών των λίθων δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση το 1/10 ή έστω τα 2/10 του χιλιοστομέτρου και όταν ακόμη μία από τις διαστάσεις του λίθου φθάνει και ξεπερνά τα 4 m [5]. Η παραλληλία των εδρών είναι τόσο τέλεια, ώστε κατά κανόνα το ύψος της παράπλευρης επιφάνειας οποιουδήποτε σπονδύλου να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις μεγαλύτερες των 15/100 του mm! Οι αρμοί της κρηπίδος είναι, όπου διατηρούνται, τόσο ερμητικά κλειστοί ώστε να μη διακρίνονται ούτε και κάτω από μικροσκόπιο μεγεθυντικής ισχύος X60 (!) [3]. Σφάλματα ορθογωνίσεως δεν είναι διαπιστώσιμα ακόμη και με τις χρησιμοποιούμενες για τον έλεγχο των γωνιών χαλύβδινες γωνίες ακριβείας [5].

Είναι γνωστό ότι οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων των μνημείων είχαν καθορισθεί με βάση μορφολογικά και λειτουργικά κριτήρια και χωρίς φυσικά να έχει προηγηθεί στατικός υπολογισμός με τη σημερινή έννοια του όρου. Εν τούτοις, η άριστη μηχανική συμπεριφορά των μνημείων σε όλες τις φυσικές δράσεις κατά τα 2500 χρόνια της ιστορίας τους αποδεικνύει ότι οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν γνωστές και ότι ο τρόπος λειτουργίας των φορέων που διαμορφώθηκαν είχε εκτιμηθεί με πολύ καλή προσέγγιση. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα μνημεία της Ακρόπολης ως δομικά συστήματα ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις αντισεισμικού σχεδιασμού: διακρίνονται για την απλότητα και σαφήνεια της στατικής τους λειτουργίας, χαρακτηρίζονται από κανονικότητα σε κάτοψη, έχουν περίπου συμμετρική διάταξη φερόντων στοιχείων και μαζών και περίπου κανονική κατανομή ακαμψίας. Οι μεγάλες ακαμψίες των τοίχων, σε συνδυασμό με τη διαφραγματική λειτουργία οροφών και στεγών μέσω τριβής, συμβάλλουν στην αντοχή των κτηρίων σε οριζόντιες φορτίσεις. Τέλος, η έδραση σε σταθερό βράχο στο μεγαλύτερο μέρος τους και η καλή ποιότητα δομής των θεμελίων ευνοούν την καλή αντισεισμική συμπεριφορά τους. Είναι χαρακτηριστικό ότι μεγάλο μέρος των φθορών που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σήμερα δεν οφείλεται σε φυσικά αίτια αλλά σε ανθρώπινες ενέργειες και δραστηριότητες [10].

1.1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΠΑΛΑΙΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ

Οι διάφορες επεμβάσεις που έγιναν στον Παρθενώνα κατά τη μακρά ζωή του σχετίζονται με τις περιπέτειες, τις ζημιές και τις καταστροφές που κατά καιρούς υπέστη αλλά και με τους τρόπους με τους οποίους τον χρησιμοποίησαν κάθε φορά. Πράγματι, ο Παρθενώνας δεν έπαψε να μεταβάλλεται από την αρχαιότητα έως σήμερα και να απομακρύνεται από την κατάσταση της τελειότητας στην οποία τον παρέδω-

σαν οι δημιουργοί του. Ωστόσο, όπως λίγα σπουδαία κτήρια στην ιστορία της αρχιτεκτονικής, ο Μεγάλος Ναός ήταν πάντοτε εκεί, μεγαλειώδης, πάνω από τις ανθρώπινες ατυχίες και μικρότητες. Ίσως, περισσότερο από κάθε άλλο κτήριο στον κόσμο, έγινε το βασικό τεκμήριο της υπεροχής του αρχαίου πολιτισμού, και στα νεώτερα χρόνια έλαβε για πολλούς τον χαρακτήρα συμβόλου. Επί αιώνες, σε όποιον είχε την τύχη (και τα μάτια) να τον δει, ο Παρθενώνας επέβαλε την καλλιτεχνική του παρουσία. Έγινε ένα μέτρο ποιότητας.

Η ζωή του Μεγάλου Ναού μπορεί να διακριθεί σε οκτώ (8) “εποχές” των οποίων οι οικοδομικές επεμβάσεις άφησαν τα αποτελέσματά τους στην μορφή του, αυτή που έχουμε σήμερα μπροστά μας.

1) Σύμφωνα με την άποψη του Ι. Τραυλού, η πρώτη σημαντική ζημιά του Παρθενώνα έγινε από εμπρησμό, πιθανότατα κατά την επιδρομή των Ερούλων το 267 μ.Χ. Η πρώτη σημαντική σε έκταση αποκατάσταση του κτηρίου πραγματοποιήθηκε ίσως με την ηθική ενθάρρυνση ή ακόμα με πρωτοβουλία και δαπάνες του αυτοκράτορα Ιουλιανού το 362-365 μ.Χ. Από τη μορφή θραύσης του υλικού του ναού είναι βέβαιο ότι η καταστροφή υπήρξε θερμική. Ήταν μία πολύ μεγάλη πυρκαγιά που κατέστρεψε τα ξύλα και προκάλεσε την κατάρρευση μεγάλων τμημάτων της λίθινης οικοδομής. Μεγάλες μάζες, αν και δεν κατέρρευσαν αμέσως, κατέστησαν τόσο ετοιμόρροπες ώστε και μετά την επισκευή να καταρρέουν σε σημαντική έκταση κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών καθώς και κατά τις διάφορες οικοδομικές επεμβάσεις ή και δυναμικές καταστροφές που υπέστη το μνημείο από την ύστατη αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

Η αποκατάσταση ήταν χονδροειδής και κακότεχνη. Οι ζημιές στα κιονόκρανα και τους θριγκούς παλώθηκαν με ασβεστοκονίαμα που σταθεροποιήθηκε με σιδηρά στελέχη. Στο αέτωμα ορισμένα γλυπτά φαίνεται ότι απομακρύνθηκαν ή καταστράφηκαν και όλη η επέμβαση υπήρξε πρόχειρη και βιαστική.

Όλα αυτά δείχνουν ότι ήδη από τον 4^ο αιώνα μ.Χ. η μορφή του Μεγάλου Ναού άρχισε να αλλοιώνεται. Η πυρκαγιά έγινε η αιτία όχι μόνον σοβαρών αμέσων καταστροφών αλλά και της πιο ζοφερής εμφάνισης των αρμών μεταξύ των αρχιτεκτονικών μελών και της απώλειας της μονολιθικής εντύπωσης των κιόνων.

2) Η αρχαία λειτουργία του Παρθενώνα καταργείται τον 5^ο αιώνα μ.Χ. Λίγο αργότερα, πιθανότατα επί Ιουστινιανού, ο Παρθενώνας μετατρέπεται σε χριστιανικό ναό αφιερωμένο στην Αγία του Θεού Σοφία. Κατά τη μέση βυζαντινή περίοδο ο ναός τιμάται στη μνήμη της Θεοτόκου και έχει μεγάλη φήμη στον ελληνικό χώρο ως Παναγία η Αθηνιώτισσα. Ο εκχριστιανισμός του Μεγάλου Ναού δεν προκάλεσε μεγάλες αλλαγές στη γενική διάταξη, η εξωτερική του μορφή όμως αλλοιώθηκε σημαντικά από τους τοίχους που υψώθηκαν στα μετακίονιά του, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα είδος περιβόλου, στον οποίο προσαρμόστηκαν οι διάφορες δευτερεύουσες λειτουργίες που συνόδευαν τις μεγάλες βασιλικές της εποχής. Εν πάση περιπτώσει επρόκειτο για μια αλλοίωση αναστρέψιμη.

Αλλά στην παλαιοχριστιανική αυτή παρέμβαση φαίνεται ότι πρέπει να αναχθούν και οι σοβαρότερες ως τώρα καταστροφές του γλυπτικού διακόσμου του Παρθενώνα. Το ανατολικό αέτωμα έχασε τα κεντρικά του αγάλματα, οι περισσότερες από τις μετόπες σφυροκοπήθηκαν με τον αγριότερο τρόπο έτσι ώστε να μην διακρίνονται τα θέματά τους και διάφοροι βανδαλισμοί έγιναν στη συνεχή ζωφόρο. Πρόκειται για μια μεγάλη σε έκταση καταστροφή που υποβάθμισε τραγικά την καλλιτεχνική αξία του μνημείου.

Οι αλλοιώσεις λοιπόν του 6^{ου} αιώνας μ.Χ. δεν είχαν ως αφετηρία μια καταστροφή ή μια θεομηνεία αλλά μια αλλαγή χρήσης.

- 3) Κατά τον 12^ο και 13^ο αιώνα μ.Χ., πιθανότατα όταν αρχιεπίσκοπος ήταν ο Νικόλαος Αγιοθεοδωρίτης, αλλά και επί Μιχαήλ Χωνιάτη, ανάγονται σοβαρά έργα προσθηκών και αποκαταστάσεων στον Παρθενώνα. Στον οπισθόναο υψώθηκε ένας τετράγωνος πύργος με εσωτερικό κλιμακοστάσιο (κοχλία) και πρόσβαση από το νότιο άκρο. Μέσα στο ναό έγινε τοιχογράφηση και πιθανώς άσπρισμα όλων των εξωτερικών επιφανειών. Η ανεύρεση όχι λίγων γλυπτών μελών του 12^{ου} αιώνας πάνω στην Ακρόπολη από τέμπλα, περιθυρώματα και άλλα αποτελεί ένδειξη ότι το μνημείο πλουτίστηκε παραλλήλως και με σύγχρονα στοιχεία μαρμαρινής τέχνης.

Οι προσθήκες αυτές στον Παρθενώνα εντάχθηκαν με ιδιαίτερη φροντίδα στο αρχαίο κτήριο. Έγιναν εξ ολοκλήρου από ορθογωνισμένα παλιά μάρμαρα σε δεύτερη χρήση και την ένταξή τους ολοκλήρωσε το γενικό άσπρισμα.

- 4) Κατά την Τουρκοκρατία η Ακρόπολη έγινε ένα κάστρο με καθαρά στρατιωτικό ενδιαφέρον, απροσπέλαστο στους Χριστιανούς, και ο Παρθενώνας μετετράπη βιαστικά σε μουσουλμανικό τέμενος. Κατά τον ενετοτουρκικό πόλεμο χρησιμοποιήθηκε και ως πυριτιδαποθήκη. Έτσι επήλθε η συμφορά του 1687 μετά από την οποία άλλαξαν τα πάντα. Στις 14-09-1687 αποφασίστηκε από τους Ενετούς η κατάκτηση του κάστρου της Αθήνας. Ο βομβαρδισμός του Morosini υπήρξε ανηλεής και ακατάπαυστος και πολλές εκατοντάδες βλήματα έπληξαν τον Παρθενώνα, στον οποίο οι Τούρκοι είχαν αποθηκεύσει τεράστιες ποσότητες πυρίτιδος. Δυστυχώς μετά από τετραήμερο κανονιοβολισμό, την εσπέρα της 26ης Σεπτεμβρίου 1687, συνέβη το μοιραίο: Ένα βλήμα διαπέρασε τη στέγη, ίσως από υπάρχον άνοιγμα, προκαλώντας την ανάφλεξη της πυρίτιδος και την ανατίναξη του μεσαίου μέρους του κτηρίου (Εικ. 1.3).

Από την έκρηξη ανατράπηκαν σχεδόν στο σύνολο οι τρεις από τους τέσσερις τοίχους του σηκού, έξι κίονες της νότιας πλευράς, οκτώ της βόρειας και ό,τι απέμεινε από την ανατολική πρόσταση πλην ενός κίονος. Ολόκληρο το κτίσμα υπέστη φοβερό κλονισμό. Την καταστροφή επαύξησε η πυρκαγιά που επακολούθησε και η κατακρήμνιση αγαλμάτων του δυτικού αετώματος τα οποία προσπάθησαν να αποσπάσουν οι Βενετοί, μετά την παράδοση της Ακρόπολης. Τη σοβαρότητα της ζημιάς επιδείνωσε το γεγονός ότι η ερείπωση έκανε δυνατή τη λεηλασία του υλικού, τόσο των αρχιτεκτονικών μελών (για τον προσπορισμό οικοδομικού υλικού) όσο και των γλυπτών, αργότερα.

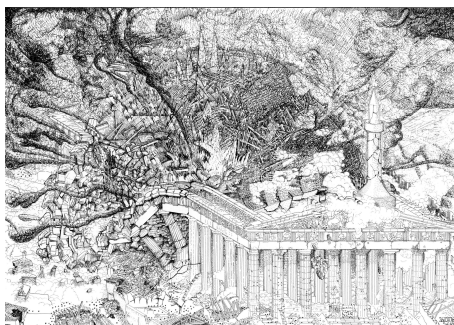
Βεβαίως δεν γίνεται λόγος για αποκατάσταση. Ο Παρθενώνας είναι ένα ερείπιο, ένα ανοικτό κέλυφος με χρήσεις λατομείου.

Κατά τον 18^ο αιώνα ο Μεγάλος Ναός ξανακερδίζει το γόητρο που είχε κάποτε και δημιουργεί ένα νέο θρύλο. Έτσι αποκτά μια νέα “χρήση”: γίνεται έκθεμα. Αυτό θα αποβεί ολέθριο εξαιτίας του λόρδου Έλγιν, ο οποίος προχώρησε στη συστηματική λεηλασία των γλυπτών, πιστεύοντας ότι η χρήση τους ως εκθεμάτων θα ήταν πολύ πιο ωφέλιμη στο Λονδίνο παρά στην Αθήνα. Η αφαίρεση των γλυπτών από το μνημείο έγινε η αιτία πολλών ζημιών. Το πίσω μέρος των πλακών της ζωφόρου πριονίστηκε, πολλά γείσα καταρρίφθηκαν και άλλα μέλη μετακινήθηκαν βίαια, προκειμένου να διευκολυνθεί η λεηλασία. Τελικά στο Λονδίνο έφθασαν 18 εναέτια αγάλματα, 15 μετόπες, 56 πλάκες της συνεχούς ιωνικής ζωφόρου και αρκετά τμήματα αρχιτεκτονικών μελών του μεγάλου ναού.

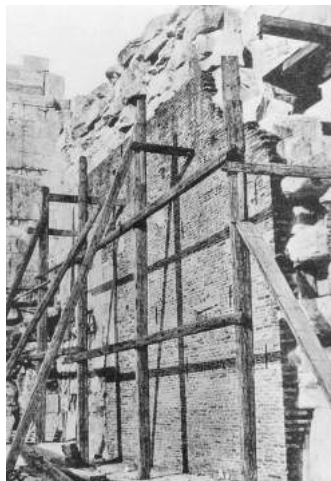
- 5) Ευθύς μετά τη λήξη του πολέμου και την παράδοση της Ακρόπολης από τους Τούρκους το 1833, άρχισε η φροντίδα για τα μνημεία της.

Τα άφθονα αρχαία μέλη του Μεγάλου Ναού άρχισαν να συγκεντρώνονται από τον Κ. Πιττάκη σε μια προσπάθεια περισυλλογής και τακτοποίησης. Ήδη από τα χρόνια της αντιβασιλείας ο γερμανός αρχιτέκτων Leo von Klenze άρχισε να μελετά τις αναστηλώσεις των μνημείων και ετοίμασε προϋπολογισμό δαπανών για τα έτη 1834-1847. Οι καθαρισμοί και οι διευθετήσεις πάνω στη ρημαγμένη από τον πόλεμο Ακρόπολη άρχισαν ευθύς αμέσως. Στις 28 Αυγούστου/10 Σεπτεμβρίου 1834 (Ιουλιανό/Γρηγοριανό ημερολόγιο) παρουσία του Όθωνα έγινε συμβολικά η έναρξη της αναστήλωσης με την τοποθέτηση ενός σφονδύλου κίονος της βόρειας πλευράς του Παρθενώνα στη θέση του.

Μεγαλύτερη σημασία έχουν οι θεωρητικές προδιαγραφές της αναστήλωσης που διατυπώθηκαν από τον Klenze. Είναι οι παλαιότερες για τον Παρθενώνα και πραγματικά διαφωτιστικές για τις αντιλήψεις της εποχής: αποκάθαρση των νεωτέρων στοιχείων, αναστήλωση με το αρχαίο υλικό και με λογικές συμπληρώσεις, διατήρηση του



Εικ. 1.3: Η ανατίναξη του Παρθενώνα στις 26 Σεπτεμβρίου 1687. Διμετρική αναπαράσταση. Σχέδιο: Μ. Κορρές [3].



Εικ. 1.4: Η μετά την Επανάσταση κατάσταση. Αναστήλωση του βορείου τοίχου του σηκού από τον Πιττάκη, με απλά τούβλα. Φωτ.: Ν. Μπαλάνος. Πηγή: Ν. Μπαλάνος, ό.π. [3].

ύφους του ερειπίου και απομάκρυνση του άχρηστου υλικού από την Ακρόπολη. Δηλαδή μεγάλη εκτίμηση των καλλιτεχνικών, των περιβαλλοντικών και των αισθητικών αξιών και πολύ μικρή των ιστορικών και των χρηστικών.

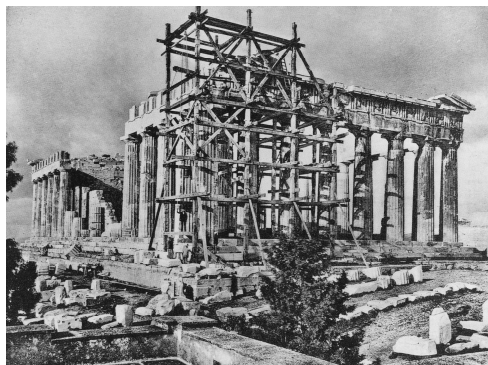
Το πρώτο αναστηλωτικό πρόγραμμα επιμελήθηκε ο Κυριάκος Πιττάκης μαζί με τον μετέπειτα αντίπαλό του Α. Ρίζο-Ραγκαβή στα 1842-1845. Η αναστήλωση αυτή πολύ απέχει από το να θεωρείται με τα σημερινά κριτήρια παραδεκτή (τοποθέτηση ομοειδών μελών σε τυχαίες θέσεις, χρησιμοποίηση διαφόρων σπολίων, εφαρμογή αταίριαστων υλικών λ.χ. κόκκινα μηχανοποίητα τούβλα στους τοίχους σε μεγάλη έκταση (Εικ. 1.4)), πέτυχε όμως να ξαναδώσει στο ρημαγμένο Παρθενώνα έναν οικοδομικό όγκο και να αναβαθμίσει έτσι αισθητικώς το κτήριο, σεβόμενος όμως και το χαρακτήρα του ερειπίου.

Κατά το δεύτερο πρόγραμμα αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκε το 1872 (έξι χρόνια μετά το θάνατο του Πιττάκη) ενσωματώθηκαν στο ναό σιδηρές ράβδοι για πρώτη φορά κατά τα νεώτερα χρόνια. Κατά το ίδιο διάστημα έγινε συντήρηση των γλυπτών της ζωφόρου της δυτικής πρόστασης σε συνδυασμό με τη συμπλήρωση των υποκειμένων επιστυλίων σε πέντε σημεία. Το έργο ήταν και πάλι αυτοσχεδιαστικό, χωρίς τεκμηρίωση και αισθητικώς μειονεκτικό.

- 6) Οι αισθητές αλλαγές στη δομή και τη μορφή του ερειπωμένου Μεγάλου Ναού συνεχίστηκαν κατά το πρώτο τρίτο του 20^{ου} αιώνα, χάρη στα δύο προγράμματα που έμειναν γνωστά με το όνομα του Νικόλαου Μπαλάνου (Εικ. 1.5).

Το πρώτο πρόγραμμα υλοποιήθηκε στα χρόνια 1899-1902 και το δεύτερο από το 1922 έως το 1933. Τα τελικά αποτελέσματα του δεύτερου προγράμματος εργασιών του Ν. Μπαλάνου συνοπτικά έχουν ως εξής: Στο βόρειο πτερό αναστηλώθηκαν οι κίονες 4-12 (μετρούμενοι από τα ανατολικά) με τα επιστυλία τους και εν μέρει η ζωφόρος και τα γείσα. Κατά τις συμπληρώσεις στους σφονδύλους έγινε χρήση ενός οπλισμένου σκυροκονιάματος ενώ στα κιονόκρανα και το θριγκό χρησιμοποιήθηκε πεντελικό μάρμαρο. Το δεύτερο πρόγραμμα των εργασιών του Ν. Μπαλάνου στον Παρθενώνα έκλεισε το 1933 με την αναστήλωση των κίωνων του νοτίου πτερού και την τοποθέτηση μερικών εκμαγείων από τσιμεντοκονίαμα που εστάλησαν από την Αγγλία.

Το έργο του Μπαλάνου κρίθηκε θετικά ενόσω ζούσε και αρνητικά όταν φάνηκαν οι ολέθριες επιπτώσεις του στα μνημεία. Και όλοι σήμερα γνωρίζουν ότι η αχίλλειος πτέρνα του έργου αυτού ήταν μια λεπτομέρεια της μεθόδου ή μάλλον της τεχνικής που εφήρμοσε ο Ν. Μπαλάνος: Η διόγκωση δηλαδή του σιδή-



Εικ. 1.5: Η αποκατάσταση και αναστήλωση του Ν. Μπαλάνου. Η σκαλωσιά του Μπαλάνου στη ΝΑ γωνία του ναού. Φωτ.: Ν. Μπαλάνος. Πηγή: Ν. Μπαλάνος, ό.π. [3].

ρου κατά την οξειδωσή του, που προκάλεσε τη ρηγμάτωση των αρχαίων μελών στα οποία είχε αυτός ενσωματωθεί.

Πρέπει εν τούτοις να αναφερθεί ότι υπήρξαν και θετικά στοιχεία στο έργο του Ν. Μπαλάνου. Το σημαντικότερο εξ αυτών ίσως είναι η προσπάθειά του να εντάξει τα διασωζόμενα αρχαία μέλη και να κάνει όσο το δυνατόν λιγότερες προσθήκες νέου υλικού, πράγμα που προκάλεσε γενική εκτίμηση στη μέθοδό του και διεθνή καθιέρωση του όρου “αναστήλωση”. Θετικές επίσης κρίνονται οι προθέσεις του: α) να σεβασθεί την “ερειπιώδη κατάσταση” του μνημείου, β) να σεβασθεί τις οψιμότερες φάσεις του ναού, διατηρώντας τον πύργο με τον κοχλία και τις παραστάδες των θυρών της επισκευής του Ιουλιανού, γ) να μην απομακρύνει γλυπτά αλλά αντίθετα να εντάξει αντίγραφα ορισμένων εναετίων αγάλματων, προφανώς για διδακτικούς λόγους, δ) να σεβασθεί την ανάγκη διαφοροποίησης αρχαίου-νέου υλικού κατά τις συμπληρώσεις του και ε) να μην σεβασθεί νεωτερικά στοιχεία που κατέστρεφαν την ενότητα του έργου.

Τα αρνητικά σημεία των δύο αυτών προγραμμάτων είναι δυστυχώς πολλά. Θα μπορούσαν να συνοψισθούν στα εξής: α) αγνόησε τις ιδιαιτερότητες ενός εκάστου αρχιτεκτονικού μέλους και χρησιμοποιούσε τα ομοειδή αδιακρίτως της αρχικής τους θέσης ή ακόμα συνέδεε θραύσματα από διάφορα μέλη για να συνθέσει νέα, β) αγνόησε την αξία του αρχαίου υλικού και απολάξευσε βάνανυσα τα αρχιτεκτονικά μέλη για να τους δημιουργήσει επίπεδες επιφάνειες προσαρμογής συμπληρωμάτων ή για να ενσωματώσει σιδηρά φέροντα στοιχεία, γ) αγνόησε την επιστημονική έρευνα και χρησιμοποιούσε απλό μορφοσίδηρο του εμπορίου στα μνημεία, χωρίς στοιχειωδώς να ελέγξει τις ιδιότητές του, δ) χρησιμοποιούσε ευτελή τσιμεντοκονιάματα εμφανή σε καίριες θέσεις του ναού και ε) αγνόησε θέματα υφής και πάτινας στα συμπληρώματα από νέο μάρμαρο.

- 7) Σε διάστημα σαράντα ετών (1935-1975) οι μεταβολές που έγιναν στον Παρθενώνα είναι ελάχιστες.
 - 1943-44: Πρώτη διαπίστωση ρηγματώσεων μαρμάρων στα αναστηλωμένα από τον Μπαλάνο μέρη του Παρθενώνα.
 - 1941-44: Συστηματική μελέτη του μνημείου από τον Αν. Ορλάνδο.
 - 1944: Ζημιές στον Παρθενώνα κατά τη διάρκεια των Δεκεμβριανών.
 - 1953: Έναρξη της κατεδάφισης του πύργου-κλιμακοστασίου στον οπισθόναο του Παρθενώνα και διακοπή του έργου.
 - 1953-58: Προετοιμασία μελών από νέο μάρμαρο για την κάλυψη της δυτικής ζωφόρου του Παρθενώνα.
 - 1960-64: Εργασίες στον Παρθενώνα: δάπεδο σηκού, δύο πλάγιες εισόδους σηκού και υποδομή κρηπίδας.
 - 1967-73: Συνεχή έργα συντήρησης στον Παρθενώνα.
- 8) Οι νεώτερες επεμβάσεις από το 1976 έως σήμερα [3,5]. Λόγω της σημασίας αλλά και των καινοτομιών των εργασιών της περιόδου αυτής, παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα 1.1.3.

1.1.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

1.1.3.1 Εισαγωγή

Πολλά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται σήμερα στην Ακρόπολη οφείλονται στις επιλογές των αναστηλωτικών επεμβάσεων την ευθύνη των οποίων είχε ο Νικόλαος Μπαλάνος. Η νέα επέμβαση, έπρεπε να αντιμετωπίσει τα δομικά προβλήματα των μαρμάρων στις αναστηλωμένες και μη περιοχές αλλά και τη μειωμένη στατική επάρκειά τους εξαιτίας της ερειπιώδους κατάστασης στην οποία βρίσκονταν. Ένας άλλος παράγοντας που έπρεπε να αντιμετωπισθεί ήταν η ραγδαία φθορά της επιφάνειας των μνημείων, εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη χρήση ρυπογόνων πηγών ενέργειας στην Αθήνα αλλά και από βιολογικούς παράγοντες [11].

Στην Ακρόπολη πραγματοποιείται σήμερα ένα μεγάλο τεχνικό έργο αλλά και μια εκτεταμένη ερευνητική προσπάθεια έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι διεθνείς απαιτήσεις για τη συντήρηση και την αποκατάσταση των μνημείων τόσο μεγάλης σημασίας. Επικεφαλής των αναστηλωτικών έργων από το 1975 είναι η Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως (ΕΣΜΑ), οργανικό τμήμα του Υπουργείου Πολιτισμού με αρμοδιότητες “τον προγραμματισμό, την κατεύθυνση και την εποπτεία” των έργων (Εικ. 1.6). Το 2000 έγινε ριζική αναμόρφωση του συστήματος βάσει του οποίου εκτελούνται τα έργα στην Ακρόπολη με την αυτόνομη, ορθολογιστική οργάνωση και στελέχωση με εξειδικευμένο τεχνικό και επιστημονικό δυναμικό μιας νέας ειδικής περιφερειακής υπηρεσίας του Υπουργείου Πολιτισμού, της “Υπηρεσίας Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως” (ΥΣΜΑ). Σκοπός των ενεργειών αυτών είναι η επιτάχυνση των έργων και η σύντομη ολοκλήρωσή τους [3,4].



Εικ. 1.6: Το εσωτερικό του Παρθενώνα πριν αρχίσουν τα έργα της Επιτροπής Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως. Φωτ.: Σ. Μαυρομαμάτης [3].

1.1.3.2 Αφαίρεση σιδερένιων συνδέσμων και γόμφων - Αποξήλωση

Τα σιδερένια συνδετήρια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις αναστηλώσεις έχουν κατά κανόνα οξειδωθεί και έχουν προκαλέσει τον κατακερματισμό των μαρμάρων (Εικ. 1.7). Τα αρχαία συνδετήρια στοιχεία βρέθηκαν σε πολλές περιπτώσεις σε καλή κατάσταση, προφυλαγμένα μέσα σε παχιά στρώματα μολύβδου, σε άλλες όμως έχουν αστοχήσει λόγω μηχανικής καταπόνησης ή έχουν οξειδωθεί με αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του μαρμάρου. Σήμερα τα σιδερένια συνδετήρια στοιχεία αποσπώνται

αφού αφαιρεθεί το υλικό πλήρωσης του χώρου μεταξύ του συνδετηρίου στοιχείου και του μαρμάρου (τσιμεντοκονίαμα συνήθως στα αναστηλωμένα τμήματα και σπανιότερα μόλυβδος). Η αφαίρεση του υλικού πλήρωσης γίνεται με εργαλεία χεριού είτε ηλεκτρικά δράπανα. Αφού το κάθε μέλος ελευθερωθεί από τα συνδετήρια στοιχεία μεταφέρεται στα εργαστήρια για να ακολουθήσει η αποκατάστασή του [12].

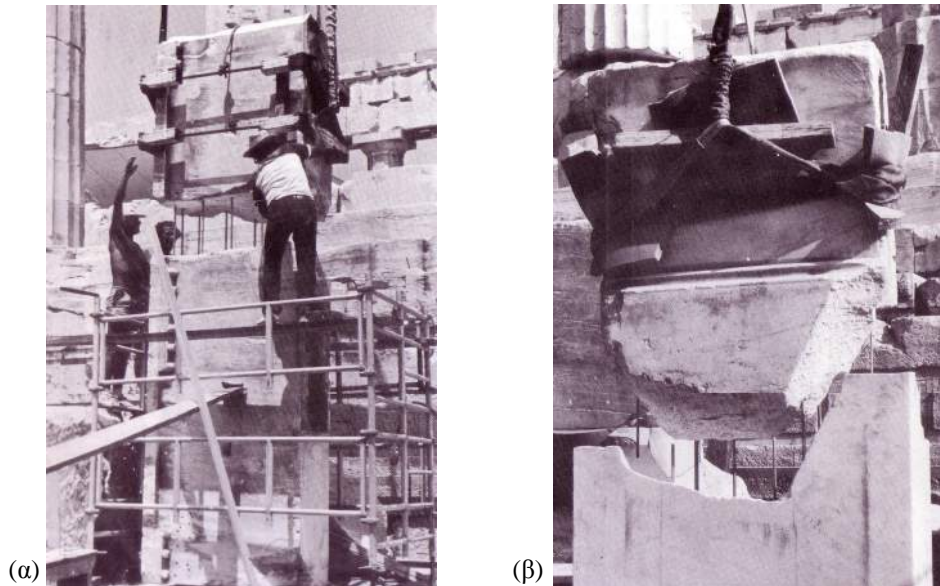


Εικ. 1.7: Καταστροφές που προκάλεσε η διάγκωση των οξειδωμένων συνδετηρίων στοιχείων της αναστήλωσης Μπαλάνου στη ΝΑ γωνία του Θρησκείου του Παρθενώνα. Διακρίνεται (δεξιά) ένα από τα θραύσματα του οριζόντιου γείσου που απεκόπη λόγω της διάγκωσης των ελασμάτων που είχαν ενσωματωθεί σε εγκοπή της πάνω επιφάνειας και της ράβδου που είχε εμφυτευτεί σε διάτρημα στο μέσο του ύψους. Διακρίνεται επίσης (κάτω στο μέσον) ότι έχει αποκοπεί τμήμα του γωνιακού τριγλύφου λόγω της διάγκωσης ενός συνδετηρίου στοιχείου αγκυρωμένου στην τραπεζοειδή εντορμία του τριγλύφου [12].

1.1.3.3 Αποκατάσταση μονολιθικότητας και συμπλήρωση των αρχιτεκτονικών μελών

Η αποκατάσταση της μονολιθικότητας των μελών γίνεται με συγκόλληση των τμημάτων τους με λευκό τσιμέντο Portland και οπλισμούς τιτανίου (Εικ. 1.8α). Οι επιφάνειες των προς συγκόλληση τεμαχίων καθαρίζονται από τους ρύπους και τις σαθρές φλούδες με οδοντωτό εργαλείο ώστε να αφαιρείται ενιαίο στρώμα με πάχος περίπου 1 mm. Ο χώρος που προκύπτει καλύπτεται με το τσιμεντοπολτό ώστε να μην μεταβάλλονται οι γενικές διαστάσεις των μελών. Οι οπλισμοί είναι ράβδοι τιτανίου στις οποίες έχει διαμορφωθεί σπείρωμα και εμφυτεύονται με τσιμεντοπολτό σε διατρήματα στη μάζα του μαρμάρου. Η συγκόλληση των τεμαχίων γίνεται έτσι ώστε η πήξη του τσιμεντοπολτού στη διεπιφάνεια συγκόλλησης να γίνεται υπό πίεση. Τα διατρήματα συνήθως δεν καταλήγουν στις εξωτερικές επιφάνειες των μελών (τυφλά), όταν όμως αυτό δεν είναι εφικτό καταλήγουν σε χονδρολαξευμένες επιφάνειες που μετά την τοποθέτηση δεν είναι θεατές.

Συμπληρώματα από νέο μάρμαρο χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση αρχιτεκτονικών μελών ή για αντικατάσταση συμπληρωμάτων από σκυρόδεμα των προηγούμενων αναστηλώσεων (Εικ. 1.8β). Η επιφάνεια του συμπληρώματος λαξεύεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται με ακρίβεια στην επιφάνεια θραύσης του αρχαίου μέλους (με τη χρήση πονταδόρου και παντογράφου). Η συγκόλληση του συμπληρώματος γίνεται επίσης με τσιμεντοπολτό και οπλισμό τιτανίου [12].



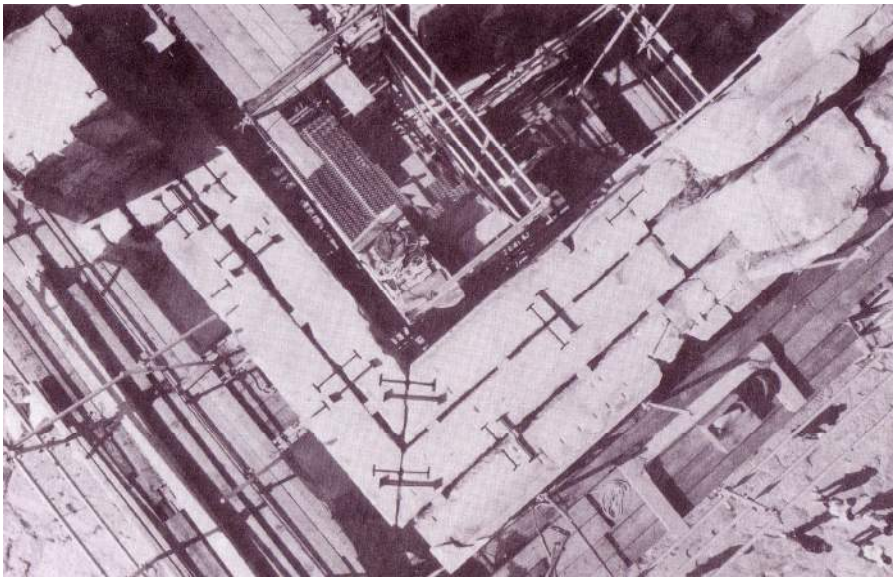
Εικ. 1.8: (α) Συγκόλληση δύο τμημάτων του εξωτερικού επιστυλίου της βόρειας γωνίας της ανατολικής πλευράς με οπλισμούς τιτανίου. (β) Συγκόλληση αυθεντικού προέρχοντος τμήματος καταετίου γείσου με συμπλήρωμα από νέο μάρμαρο που αντικαθιστά συμπλήρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα της αναστήλωσης Μπαλάνου [12].

1.1.3.4 Επανατοποθέτηση αρχιτεκτονικών μελών και σύνδεσή τους με συνδέσμους και γόμφους

Αφού επισκευαστούν τα αρχιτεκτονικά μέλη επανατοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις και συνδέονται με ελάσματα τιτανίου διαμορφωμένα σε συνδέσμους ή γόμφους (Εικ. 1.9) που τοποθετούνται κατά κανόνα στις υφιστάμενες αρχαίες εντορμίες με ισχυρό τσιμεντοκονίαμα (λευκό τσιμέντο Portland και χαλαζιακή άμμος).

Κατά την επανατοποθέτηση των μελών γίνεται μερική άρση των γεωμετρικών παραμορφώσεων του τμήματος του κτηρίου, όσο επιτρέπουν οι παραμένουσες παραμορφώσεις των μελών που δεν αποξηλώνονται, ώστε να προσεγγίζεται η αρχική γεωμετρική μορφή. Επειδή λόγω των διορθώσεων κάποιοι αρμοί παραμένουν ανοικτοί, χρησιμοποιούνται φύλλα μολύβδου που διαστρώνονται στις επιφάνειες έδρασης ή σφηνώνονται στους κατακόρυφους αρμούς ώστε να εξασφαλίζεται η επαφή

των μελών. Τα φύλλα μολύβδου που είχαν χρησιμοποιηθεί στις εδράσεις μελών του θριγκού του Παρθενώνα και από τους κατασκευαστές του ναού επιτρέπουν την ομοιόμορφη διανομή των θλιπτικών τάσεων στις επιφάνειες επαφής [12].



Εικ. 1.9: Γενική κάτοψη της ΒΑ γωνίας του Παρθενώνα στη στάθμη των επιστυλίων. Έχουν επανατοποθετηθεί μετά την αποκατάστασή τους 5 από τα 6 επιστύλια. Διακρίνονται οι εντορμίες των διαμήκων και εγκάρσιων συνδέσεων και δίπλα σε αυτές σύνδεσμοι κατασκευασμένοι από χαλύβδινα ελάσματα, που θα χρησιμοποιηθούν σαν πρότυπα για την κατασκευή συνδέσμων από τιτάνιο [12].

1.1.3.5 Αναστήλωση διάσπαρτων μελών

Στη μελέτη του Μ. Κορρέ [1] έχουν προσδιοριστεί οι αρχικές θέσεις πολλών διάσπαρτων μελών. Ανεξάρτητα από οποιαδήποτε φιλολογική προσέγγιση του προβλήματος της αναστήλωσης, είναι σίγουρο ότι η επανατοποθέτηση των πεσμένων μαρμάρων θα συντελέσει στην καλύτερη διατήρησή τους. Αν η φθορά των προσώπων των αρχιτεκτονικών μελών και ιδιαίτερα αυτών που φέρουν γλυπτό διάκοσμο συνεπάγεται την καλλιτεχνική υποβάθμιση του μνημείου, η φθορά των εκτιθέμενων επιφανειών έδρασης των διάσπαρτων μελών οδηγεί τελικά στην αχρήστευσή τους ως δομικών στοιχείων. Τα θραύσματα που συναποτελούν ένα αρχιτεκτονικό μέλος συγκολλούνται με τσιμεντοποττό και ράβδους τιτανίου ενώ όσα έχουν σημαντική απώλεια από την αρχική μάζα συμπληρώνονται με νέο μάρμαρο. Τα φορτία που φέρονται από τα *in situ* τμήματα μετά την αναστήλωση είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερα από αυτά που έφεραν επί 22 αιώνες, μέχρι δηλαδή την ανατίναξη του ναού [12].

1.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ - ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ - ΒΛΑΒΕΣ

1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα δομικά μέλη του Παρθενώνα συνδέονται με συνδετήρια στοιχεία (σύνδεσμοι και γόμφοι) που αποτελούνται από στρώματα μαλακού καθαρού σιδήρου και σκληρού χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Τα στοιχεία αυτά ήταν άτονα και επομένως δεν λειτουργούσαν στην κανονική κατάσταση της δομής. Η ενεργοποίησή τους προϋποθέτει μία πρώτη παραμόρφωση της κατασκευής και χαλάρωση των αρμών ώστε εντεινόμενα να αναπτύσσουν τις αναγκαίες δυνάμεις εξισορρόπησης των διαφόρων εξωτερικών δυνάμεων. Πρακτικώς, τα συνδετήρια στοιχεία προσφέρουν τις όποιες υπηρεσίες τους μόνο κατά τη σύντομη διάρκεια ενός σεισμού ή άλλης δυναμικής καταπόνησης της κατασκευής και μάλιστα τότε και μόνον τότε όταν αρχίσει να ξεπερνιέται η αντίσταση τριβής και πλοκής των λίθων.

Οι συνδέσεις των λίθων και τα αντίστοιχα συνδετικά στοιχεία έχουν ως εξής:

- Οριζόντιες εφελκυστικές συνδέσεις: σύνδεσμοι μορφής “I” και αγκυρώσεις
- Οριζόντιες προεντεταμένες θλιπτικές συνδέσεις: παράγομοφοι ή σφηνόγομοφοι
- Κατακόρυφες διατμητικές συνδέσεις: γόμφοι
- Κατακόρυφες εφελκυστικές συνδέσεις: κατακόρυφοι σύνδεσμοι και αγκυρώσεις.

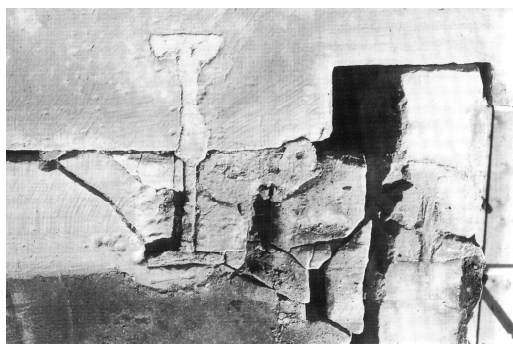
Η δηλούμενη από τις πιο πάνω ονομασίες λειτουργία είναι η τυπική, όχι όμως και η μόνη. Οι εφελκυστικοί σύνδεσμοι αναπτύσσουν σημαντική διατμητική λειτουργία ενώ οι διατμητικοί αναπτύσσουν λόγω πρόσφυσης σημαντική εφελκυστική λειτουργία. Αυτές οι δευτερες περιπτώσεις αποτελούν την άτυπη λειτουργία των συνδέσμων.

Τα συνδετήρια στοιχεία γενικώς τοποθετούνται σε εγκοπές των συνδεομένων λίθων, τις εντορμίες. Οι σύνδεσμοι εφελκυσμού διαθέτουν κατάλληλη ευρεία κεφαλή για την ασφαλή αγκύρωση των άκρων τους μέσα στους δύο λίθους. Στην κλασική εποχή οι κεφαλές αυτές μαζί με τον κορμό του συνδέσμου σχηματίζουν στοιχείο μορφής “I”. Ο χώρος των εγκοπών είναι πολύ ευρύτερος από τους συνδέσμους και πληρωνόταν με μολυβδοχόηση. Εξαιρούνται οι παράγομοφοι που παραμένουν γυμνοί. Ο σίδηρος των κλασικών συνδετηρίων και ο μολυβδος της μολυβδοχόησής τους έχουν ιδιότητες πολύ ευνοϊκότερες από τα αντίστοιχα σύγχρονα υλικά, ως προς την αντοχή, τη διάβρωση και την οξειδωση αλλά και τη συμβατότητά τους με το μάρμαρο από μηχανική σκοπιά. Πάντως, η καλή διατήρηση του αρχαίου υλικού των συνδέσεων δεν οφείλεται μόνο στον υψηλό βαθμό αυτοπροστασίας: Η τέλεια επαφή των λίθων, εφ’ όσον τηρείται αδιατάρακτη, απαγορεύει τη διείσδυση στους αρμούς όχι μόνο του νερού αλλά ακόμη και του αέρα, όπως διαπιστώθηκε σε πολλά σημεία της κατασκευής.

Η ανομοιογένεια και η μηχανική ανισοτροπία του μαρμάρου παίζει σημαντικό ρόλο στις διακυμάνσεις των αποστάσεων των συνδετηρίων στοιχείων από τις εξωτερικές ορατές επιφάνειες των λίθων. Η “τυχειότητα” των αποστάσεων αυτών καθώς

και η ασύμμετρη τοποθέτηση των συνδέσμων μορφής “Γ” οφείλονται στην αναζήτηση της καταλληλότερης θέσης για την αποφυγή πότε ενός κομμού ή ενός «γυαλιού» ή την προσαρμογή στις διακυμάνσεις αντοχής του λίθου σε διάτμηση, αναλόγως προς τον προσανατολισμό του κρυσταλλικού του ιστού [5].

Στις συνδέσεις μαρμάρων της ίδιας στρώσης με συνδετήρια στοιχεία μορφής “Γ” παρατηρούνται αστοχίες με θραύση του συνδέσμου χωρίς βλάβη του μαρμάρου και με θραύση του μαρμάρου με ή χωρίς βλάβη του συνδετηρίου στοιχείου αντιστοίχως (Εικ. 1.10) [6]. Εφ’ όσον ο σύνδεσμος εφελκύεται, αναπτύσσεται στο μάρμαρο διατμητική τάση σε μία περιοχή γύρω από το σύνδεσμο. Η επιφάνεια ελάχιστης αντίστασης στη διάτμηση έχει μορφή κολουροκωνική με θεωρητική κλίση γενετειρών περίπου 45° ως προς τον άξονα του συνδέσμου, εφ’ όσον ο λίθος είναι ομοιογενής και εφ’ όσον η απόσταση του συνδέσμου από την παρειά του λίθου είναι μεγαλύτερη από το μήκος αγκύρωσης (δηλαδή από το μισό μήκος του συνδέσμου) [5].



Εικ. 1.10: Αστοχία σύνδεσης με θραύση του μαρμάρου χωρίς βλάβη του αρχαίου συνδετηρίου στοιχείου [6].



Εικ. 1.11: Αστοχία σε γόμφωση με θραύση του μαρμάρου στην περιοχή της αγκύρωσης [6].

Οι γομφώσεις είναι οι ευπαθέστερες συνδέσεις δεδομένου ότι παρεμποδίζουν τις σχετικές ολισθήσεις δύο διαδοχικών στρώσεων λίθων, καταπονούνται κυρίως σε διάτμηση και έχουν πολύ λίγα περιθώρια παραμόρφωσης σε αντίθεση με τις οριζόντιες συνδέσεις που παρεμποδίζουν το άνοιγμα των αρμών, δέχονται εφελκυστική καταπόνηση και έχουν τόση δυνατότητα παραμόρφωσης όση η παραμόρφωση θραύσης του σιδηρού συνδέσμου. Σε πολλές περιπτώσεις οι γόμφοι είναι τοποθετημένοι σε μικρή απόσταση από την παρειά του αρχιτεκτονικού μέλους (π.χ. επιστύλια, μετόπες, γείσα) με αποτέλεσμα η φέρουσα ικανότητα του μαρμάρου να είναι σημαντικά μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του γόμφου. Η εκτίναξη της κάτω γωνίας των μαρμάρων με επιφάνεια θραύσης που έχει κατά προσέγγιση τη μορφή ενός τετάρτου κώνου, είναι μια τυπική βλάβη στον Παρθενώνα (Εικ. 1.11).

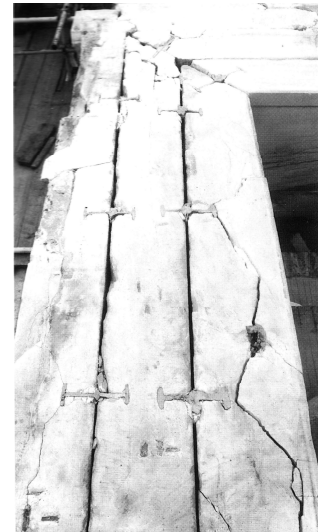
Οι βλάβες των αρχαίων συνδέσεων οφείλονται σε φυσικοχημικές και μηχανικές δράσεις. Η οξειδωση του σιδήρου, που έχει επιταχυνθεί από την ατμοσφαιρική ρύ-

πανση κατά τις τελευταίες δεκαετίες, συνεπάγεται διόγκωση που προκαλεί από τριχοειδείς ρωγμές μέχρι διάρρηξη του μαρμάρου. Όταν οι μηχανικές καταπονήσεις που δέχεται το κτήριο έχουν σαν αποτέλεσμα μετακινήσεις των μαρμάρων, τα συνδετήρια στοιχεία αντιστέκονται, αναλαμβάνουν φορτία και όταν αυτά είναι μεγαλύτερα από τα δυνάμενα να αναληφθούν, εκδηλώνεται αστοχία είτε στο συνδετήριο στοιχείο είτε στο μάρμαρο, που είναι ευπαθές εάν έχει ήδη υποστεί τις τριχοειδείς ρωγμές από τη διόγκωση του σιδήρου. Οι συνθήκες που δημιουργούνται από τη διάνοιξη των αρμών και των ρηγμάτων ευνοούν τη διάβρωση του συνδετηρίου στοιχείου και τη διόγκωσή του με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ρηγμάτων και διεύρυνση των προϋπαρχόντων κ.ο.κ. [6]. Διαπιστώθηκε ότι, κατά κανόνα, η συχνή φυσική καταστροφή και απόθραυση του μαρμάρου στην περιοχή των συνδέσεων εξαιτίας της διόγκωσης των σιδήρων λόγω οξειδωσης προξενήθηκε κυρίως μετά από την ανατίναξη και την κατάρρευση, οπότε για πρώτη φορά τα στοιχεία σύνδεσης γυμνώθηκαν και εκτέθηκαν στην ατμόσφαιρα [5].

Οι βλάβες των συνδέσεων έχουν σαν αποτέλεσμα τον κατακερματισμό των μαρμάρων (Εικ. 1.12) και σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλούν κίνδυνο πτώσης θραυσμάτων αλλά δεν δημιουργούν κατά κανόνα μείζον πρόβλημα επάρκειας στην ανάλυση των μονίμων στατικών φορτίων που δέχεται το κτήριο. Αποτελούν όμως σοβαρότατη βλάβη από την άποψη της επάρκειας του κτηρίου σε σεισμική καταπόνηση.

Η μεγάλη έκταση και η σοβαρότητα των βλαβών των συνδέσεων, κυρίως των συνδέσεων των αναστηλώσεων Μπαλάνου, είναι από τους κύριους λόγους που επέβαλαν τις σημερινές εκτεταμένες επεμβάσεις στα μνημεία της Ακρόπολης [6]. Η αποκατάσταση των συνδέσεων είναι επέμβαση που συντελεί στην αύξηση της επάρκειας του κτηρίου σε σεισμική καταπόνηση γιατί οι σύνδεσμοι είναι αυτοί που σε περίπτωση σεισμού καλούνται να αναλάβουν φορτία και να επικουρήσουν το δεσμό τριβής παρεμποδίζοντας τις σχετικές μετακινήσεις των μαρμάρων [10].

Όσον αφορά το σχεδιασμό των συνδετηρίων στοιχείων, τέλεια στατιστική εξίσωση των αντοχών του σιδήρου προς το μαρμάρινο μέρος της σύνδεσης θα είχε ως αποτέλεσμα μετά από υπερβάλλουσα φόρτιση την εμφάνιση της θραύσης τότε στο σίδηρο και τότε στο μάρμαρο. Όμως, ενώ αυτό θα σήμαινε την αποτελεσματικότερη συνδεσμολογία από στατικής άποψης, δεν θα σήμαινε το ίδιο και από οικοδομικής και αρχιτεκτονικής άποψης. Τούτο διότι τα συνδετήρια στοιχεία έχουν πολύ μικρότερη οικονομική και οικοδομική αξία από τους λίθους και φυσικά δεν έχουν αρχιτεκτονική ή καλλιτεχνική αξία. Επομένως, σε κάθε περίπτωση, και αυτό



Εικ. 1.12: Τα επιστόλια της ΝΔ γωνίας της δυτικής πρόστασης με εκτεταμένη θραύση στην περιοχή των συνδέσεων και σε ενδιάμεσες θέσεις (Σ. Μ.) [6].

ισχύει τόσο για την αρχαία κατασκευή όσο και για την αναστήλωση, το μαρμάρινο μέρος πρέπει να είναι ανθεκτικότερο από το συνδετήριο μέρος και μάλιστα με τους αναγκαίους συντελεστές ασφαλείας, λόγω της ανομοιογένειας του μαρμάρου, έτσι ώστε σε περίπτωση μεγάλης καταπόνησης η σύνδεση να μπορεί να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση, και, αν κριθεί αναγκαία νέα επέμβαση, αυτή να περιορισθεί στην αντικατάσταση των συνδετηρίων στοιχείων [5].

Στο σχεδιασμό των συνδέσεων εφαρμόζονται οι γενικές αρχές που τηρούνται στο έργο αποκατάστασης του Παρθενώνα. Ο σεβασμός στα αυθεντικά στοιχεία του κτηρίου δεν επιτρέπει τη διάνοιξη νέων εντορμιών στα αρχαία μάρμαρα για τη διαμόρφωση νέων συνδέσεων. Άρα εάν οι εντορμίες σώζονται σε καλή κατάσταση σχεδιάζεται ένα συνδετήριο στοιχείο μορφής “Γ” από τιτάνιο που να έχει μια επιθυμητή συμπεριφορά. Αντίθετα αν οι συνδέσεις είναι κατεστραμμένες σχεδιάζεται μια σύνδεση που να συνεπάγεται την ελάχιστη επέμβαση στο αρχαίο μάρμαρο. Ο σεβασμός της αρχικής υπόστασης του κτηρίου, άρα και της συνδεσμολογίας των αρχιτεκτονικών μελών, δεν υπαγορεύεται μόνο από τη γενική δεοντολογία του σεβασμού του μνημείου αλλά και από στατικούς λόγους. Οι επεμβάσεις γίνονται στις περιοχές του μνημείου όπου υπάρχει σοβαρό πρόβλημα ενώ οι άλλες παραμένουν στην αρχική τους κατάσταση.

Πιο αναλυτικά, όταν η αρχική εντορμία ενός συνδετηρίου σώζεται ο σύνδεσμος σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει τη μέγιστη δυνατή αντοχή και πλαστιμότητα, που καθορίζονται από τη φέρουσα ικανότητα του μαρμάρου στην περιοχή της αρχαίας εντορμίας. Οι αρχαίοι σύνδεσμοι λόγω του τρόπου κατασκευής με αναδίπλωση και σφυρηλάτηση έχουν εγκάρσια σκέλη που είναι παχύτερα στη θέση προσαρμογής με το διάμηκες σκέλος. Η ίδια μορφή δίνεται και στους συνδέσμους τιτανίου όπου το εγκάρσιο σκέλος διαμορφώνεται με πλάνισμα έτσι ώστε στη θέση συγκόλλησής του με το διάμηκες να είναι παχύτερο. Στο διάμηκες σκέλος διαμορφώνεται σε μεγάλο μήκος λαιμός (Εικ. 1.13) ώστε όταν ο σύνδεσμος εφελκύεται και το υλικό ξεπεράσει το όριο διαρροής να προηγείται της αστοχίας σημαντική παραμόρφωσή του άρα και σημαντική απορρόφηση ενέργειας.

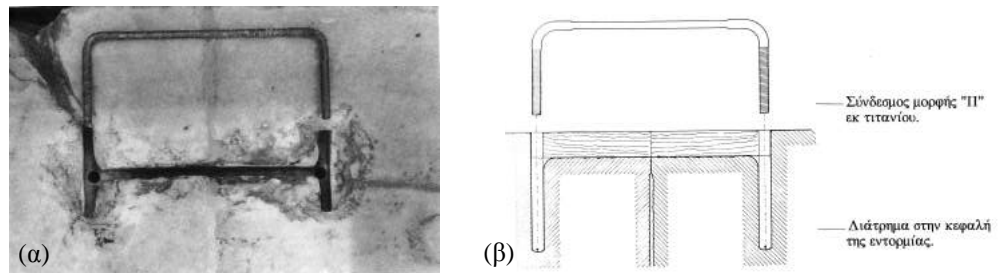


Εικ. 1.13: Σύνδεσμος τιτανίου μορφής “Γ” και η εντορμία στην οποία θα εισαχθεί.

Εάν η εντορμία είναι κατεστραμμένη η ελάχιστη επέμβαση στο αρχαίο μάρμαρο εξασφαλίζεται με τη διάνοιξη δύο διατηρημάτων στις θέσεις όπου αγκυρωνόταν τα εγκάρσια σκέλη του συνδετηρίου στοιχείου μορφής “Γ” και τη χρησιμοποίηση ενός συνδέσμου μορφής “Π” κατασκευασμένου από ράβδο τιτανίου (Εικ. 1.14α). Οι σύνδεσμοι αυτοί υστερούν σε σύγκριση με τους συνδέσμους μορφής “Γ” γιατί τα κατακόρυφα σκέλη τους είναι συνήθως κοντά και η αγκύρωσή τους στο μάρμαρο αβαθής με αποτέλεσμα όταν δέχονται σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις να εξολ-

κεύονται. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν επαρκή αγκύρωση με μακρά κοχλιοτομημένα κατακόρυφα σκέλη και με διαμόρφωση λαιμού στο διάμηκες σκέλος (Εικ. 1.14β).

Στις διατμητικές συνδέσεις (γόμφοι και σύνδεσμοι όταν φορτίζονται εγκάρσιως) ο κενός χώρος μεταξύ της εντορμίας και του συνδετηρίου στοιχείου πληρώνεται με τσιμεντοκονίαμα εκτός από μια μικρή περιοχή πλάτους 1-2 cm που επιτρέπει μια εγκάρσια παραμόρφωση του συνδετηρίου στοιχείου [6].



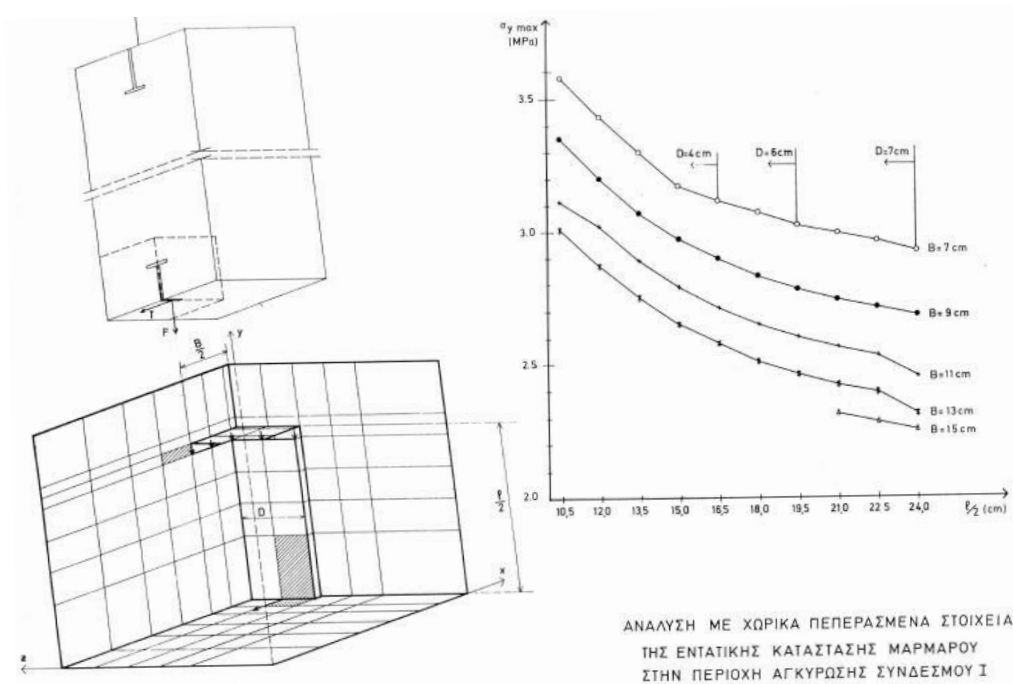
Εικ. 1.14: (α) Σύνδεσμος μορφής "Π" κατασκευασμένος από ράβδο τιτανίου.
(β) Τοποθέτηση συνδέσμου "Π" στη θέση κατεστραμμένης εντορμίας μαρμάρου [6].

1.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΑΡΜΑΡΙΝΩΝ ΟΓΚΩΝ

1.2.2.1 Η πρώτη αριθμητική και πειραματική μελέτη για τον εφελκυσμό των συνδέσμων [6]

Το κρίσιμο μέγεθος για τη διαστασιολόγηση των συνδετηρίων στοιχείων είναι η φέρουσα ικανότητα του αρχαίου μαρμάρου στην περιοχή αγκύρωσής τους. Στην περιοχή αυτή αναπτύσσεται μια πολύπλοκη τριαξονική εντατική κατάσταση και ένας ικανοποιητικός υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του μαρμάρου μπορεί να γίνει μόνο με τη βοήθεια των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Επειδή στις διαστάσεις των συνδέσμων υπάρχει τυποποίηση έγινε μια παραμετρική επίλυση στην περιοχή ενός συνδέσμου και συντάχθηκαν νομογραφήματα που για έναν συνδυασμό διαστάσεων δίνουν την καταπόνηση του μαρμάρου. Η μελέτη έγινε θεωρώντας σύνδεσμο τιτανίου. Το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωνε το μισό ενός τυπικού επιστυλίου (λόγω συμμετρίας) και επομένως το 1/4 της εντορμίας (Εικ. 1.15). Ο σύνδεσμος δεν προσομοιώθηκε άμεσα δηλαδή με την κατασκευή του. Προσομοιώθηκε όμως η επίδρασή του στο μάρμαρο με την επιβολή δύναμης τριγωνικής κατανομής στο πέλμα της εντορμίας. Η επιβαλλόμενη δύναμη αντιστοιχεί σε συνολική εφελκυστική δύναμη στο σύνδεσμο ίση με 20 kN. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν γραμμικώς ελαστική. Η δυσμενέστερη εντατική κατάσταση με εφελκυσμό κατά τους τρεις άξονες εμφανίζεται στο γραμμοσκιασμένο στοιχείο, στο άκρο του εγκάρσιου σκέλους της εντορμίας (Εικ. 1.15), όπως άλλωστε αναμενόταν αφού από

τη θέση αυτή ξεκινούν κατά κανόνα τα ρήγματα σε όσες συνδέσεις του Παρθενώνα έχουν αστοχήσει. Ως οριακή κατάσταση θεωρήθηκε αυτή όπου η εφελκυστική τάση σ_y στο μάρμαρο έλαβε την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του. Στην πραγματικότητα η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής στη θέση αυτή δεν συνεπάγεται αστοχία της σύνδεσης αφού υπάρχουν (έστω και μικρά) περιθώρια ανάληψης επί πλέον φορτίου και στη μετελαστική φάση. Η παραδοχή όμως είναι υπέρ της ασφαλείας αφού κριτήριο σχεδιασμού είναι να μην αστοχήσει τα αρχαίο μάρμαρο κι έτσι η επίλυση στην ελαστική περιοχή είναι επαρκής.



Εικ. 1.15: Νομογράφημα υπολογισμού της μέγιστης αναπτυσσόμενης εφελκυστικής τάσης στην περιοχή αγκύρωσης συνδέσμου μορφής "I" [6].

Με τους συμβολισμούς της Εικ. 1.16 η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναληφθεί από το σύνδεσμο είναι:

$$N_d = \frac{f_{Mtd}}{\sigma_{y \max}} \cdot 20 \text{ (σε kN)} \quad (1.1)$$

όπου f_{Mtd} είναι η αντοχή σχεδιασμού του μαρμάρου σε εφελκυσμό. Η αναγκαία διατομή του συνδέσμου στο διάμηκες σκέλος του είναι:

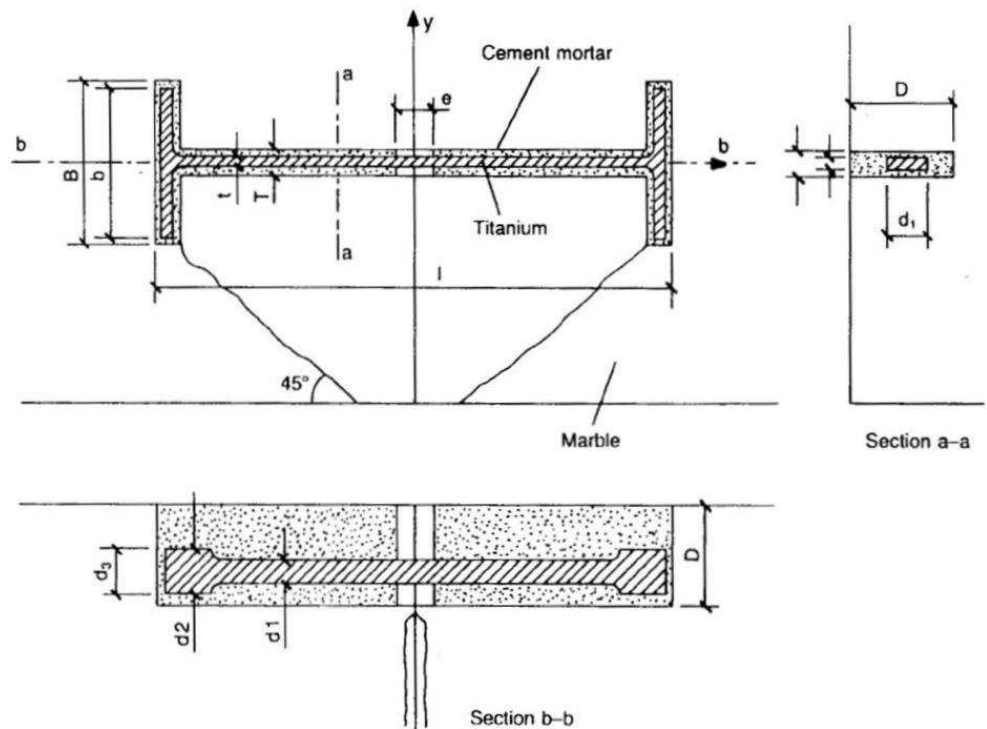
$$A_{T1} = d_1 \cdot t_1 = \frac{N_d}{f_{Ttd}} \quad (1.2)$$

όπου f_{Ttd} είναι η αντοχή σχεδιασμού του τιτανίου σε εφελκυσμό. Λόγω της (1.1) η (1.2) γίνεται:

$$A_{T1} = d_1 \cdot t_1 = \frac{2 \cdot 10^4}{\sigma_{y \max}} \cdot \frac{f_{Mtd}}{f_{Ttd}} \quad (\sigma \text{ σε } mm^2) \quad (1.3)$$

Για να μην υπάρξει διαρροή κοντά στη συγκόλληση θα πρέπει το διάμηκες σκέλος να έχει διατομή A_{T2} , ώστε αν f_{Tty} είναι το όριο διαρροής του τιτανίου να ισχύει:

$$A_{T2} \geq A_{T1} \cdot \frac{f_{Ttd}}{f_{Tty}} \quad \text{ή} \quad d_2 \geq d_1 \cdot \frac{f_{Ttd}}{f_{Tty}} \quad (\gamma\iota\alpha \quad t_1 = t_2) \quad (1.4)$$



Εικ. 1.16: Συμβολισμός διαστάσεων τυπικού συνδετηρίου στοιχείου μορφής "I" από τιτάνιο [6].

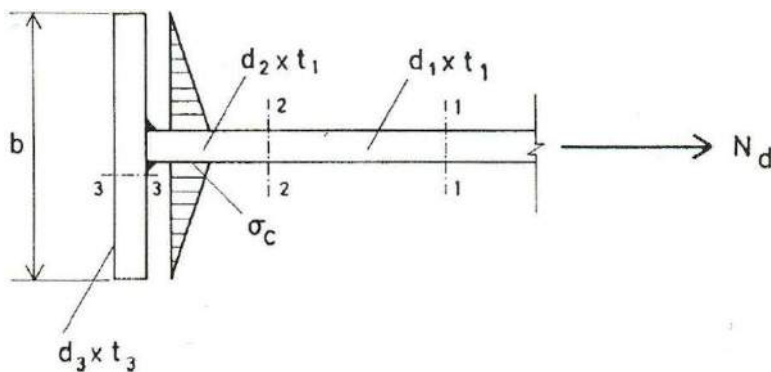
Από την N_d υπολογίζεται επίσης η αναγκαία διατομή του εγκάρσιου σκέλους του συνδέσμου. Αν σ_c είναι η ακραία τάση στο εγκάρσιο τμήμα της εντορμίας (για τριγωνική κατανομή της τάσης όπως φαίνεται στην Εικ. 1.17) και M_3 είναι η ροπή στη θέση συνάντησης των δύο σκελών, τότε:

$$\sigma_c = \frac{N_d}{(b-t_1) \cdot d_3} \quad \text{και} \quad M_3 = \frac{N_d \cdot (b-t_1)}{12} \leq W_3 \cdot f_{Ttd} \quad (1.5)$$

όπου W_3 είναι η ροπή αντίστασης στη θέση 3, άρα:

$$d_3 \cdot t_3^2 = \frac{N_d \cdot (b-t_1)}{f_{Tty}} \quad \text{και λόγω της (1.1):}$$

$$d_3 \cdot t_3^2 = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot (b-t_1) \cdot f_{Mtd}}{\sigma_{y \max} \cdot f_{Tty}} \quad (1.6)$$



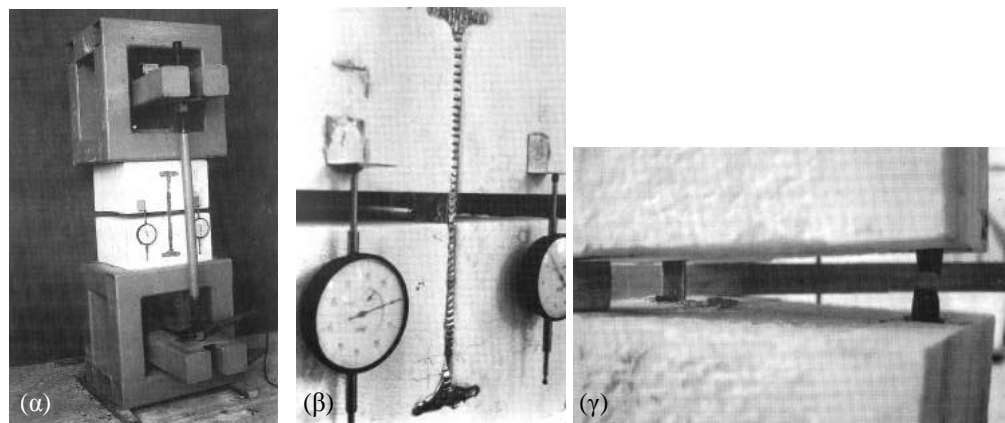
Εικ. 1.17: Κατανομή τάσεων στο εγκάρσιο σκέλος συνδέσμου [6].

Παράλληλα με την αναλυτική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκε στο εργοτάξιο του έργου αποκατάστασης του Παρθενώνα μια σειρά πειραματικών δοκιμών για τον έλεγχο των παραδοχών και των αναλυτικών μεθόδων. Τα δοκίμια αποτελούνταν από δύο όμοιους όγκους μαρμάρου (Εικ. 1.18α) στους οποίους, για λόγους συμμετρίας και μόνο, είχαν διαμορφωθεί δύο εντορμίες, δύο συνδέσμους μορφής “Γ” από σίδηρο (Εικ. 1.18β) και υλικό πλήρωσης της εντορμίας. Για τη σύγκριση της συμπεριφοράς των συνδέσεων, όταν το υλικό πλήρωσης της εντορμίας είναι χυτός μολυβδος ή τσιμεντοκονίαμα, κατασκευάστηκαν και υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού συνολικά τέσσερα δοκίμια. Στα δύο χρησιμοποιήθηκε χυτός μολυβδος και στα άλλα δύο τσιμεντοκονίαμα από λευκό τσιμέντο και χαλαζιακή άμμο σε αναλογία 1/3 κ.ό. Για την υλοποίηση των πειραμάτων κατασκευάστηκε ιδιο-συσκευή επιβολής εφελκυστικών φορτίων, στην οποία το φορτίο επιβάλλεται με μηχανικό τρόπο μέσω δύο κοχλιοτομημένων ράβδων επαρκούς ακαμψίας (Εικ. 1.19α). Η απομά-

κρυνση των δύο όγκων μαρμάρου και επομένως η κατά προσέγγιση επιμήκυνση των συνδέσμων και του μολύβδου, μετρήθηκε με τη βοήθεια τριών ωρολογιακών βελομέτρων (Εικ. 1.19β).



Εικ. 1.18: (α) Ο ένας εκ των δύο όγκων μαρμάρου και (β) ο ένας εκ των δύο σιδερένιων συνδέσμων των δοκιμών εφελκυσμού [6].



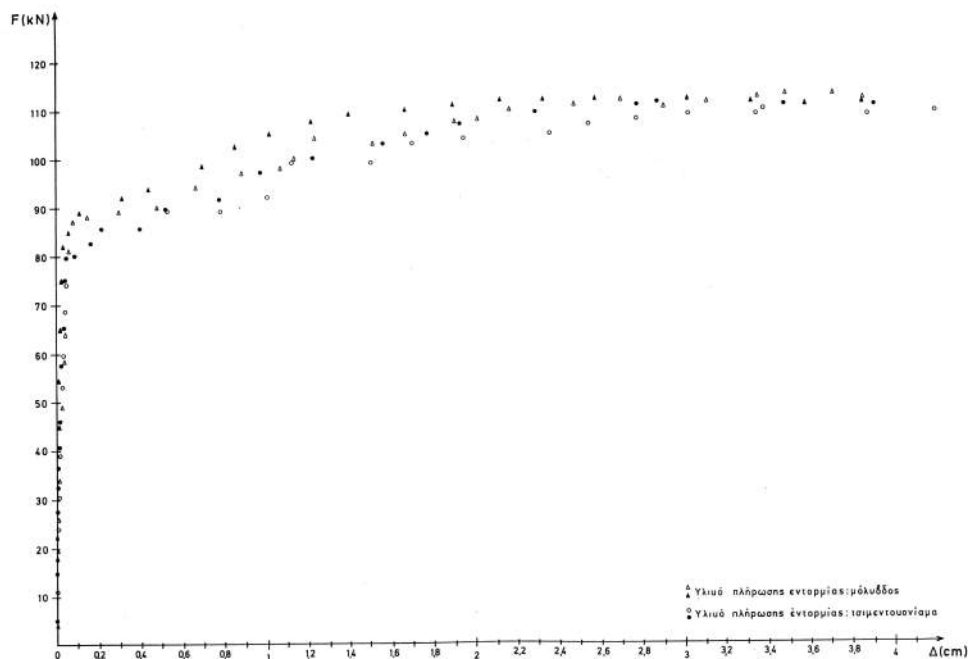
Εικ. 1.19: (α) Πειραματική διάταξη εφελκυστικών δοκιμών συνδέσεων. (β) Λεπτομέρεια στον αρμό λίγο πριν από την αστοχία του δοκιμίου. (γ) Αστοχία συνδέσμου με λαιμό θραύσης στο διάμηκες σκέλος του συνδέσμου. Έχει προηγηθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση [6].

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν το βασικό στόχο σχεδιασμού των συνδετηρίων στοιχείων:

1. Σε καμιά περιοχή αγκύρωσης των δοκιμίων δεν παρατηρήθηκε οποιαδήποτε ένδειξη αστοχίας στο μάρμαρο. Οι συνδέσεις αστόχησαν στο συνδετήριο στοιχείο με πλήρη αξιοποίηση της πλαστιμότητάς του, με μέγιστη παραμόρφωση θραύσης της τάξης των 4 cm (Εικ. 1.19β). Η θραύση έγινε στο μέσο του διαμήκους σκέλους με λαιμό θραύσης στην περιοχή του κατασκευαστικού λαιμού (Εικ. 1.19γ).

2. Το υλικό πλήρωσης (χυτός μόλυβδος, τσιμεντοκονίαμα) έδειξε να μην επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά της σύνδεσης [6].

Τα διαγράμματα της επιβαλλόμενης δύναμης - μετατόπισης που προέκυψαν παρουσιάζονται στην Εικ. 1.20.

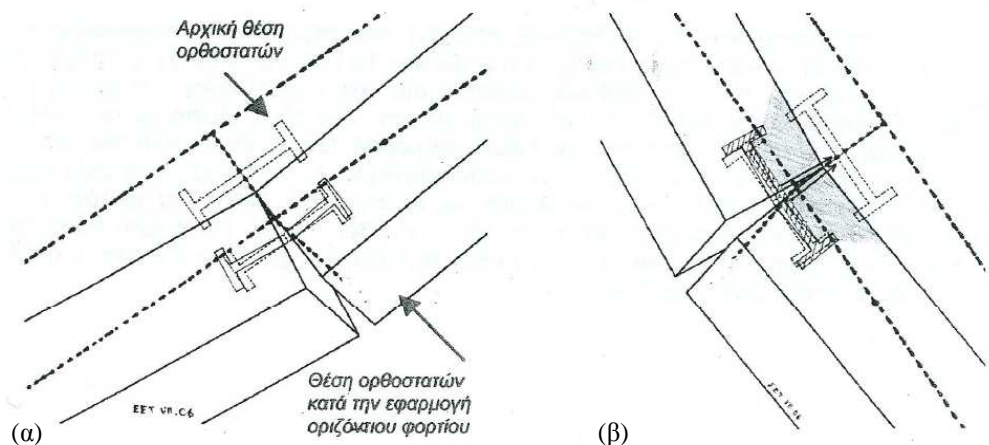


Εικ. 1.20: Τα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης όπως προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού των συνδέσεων [6].

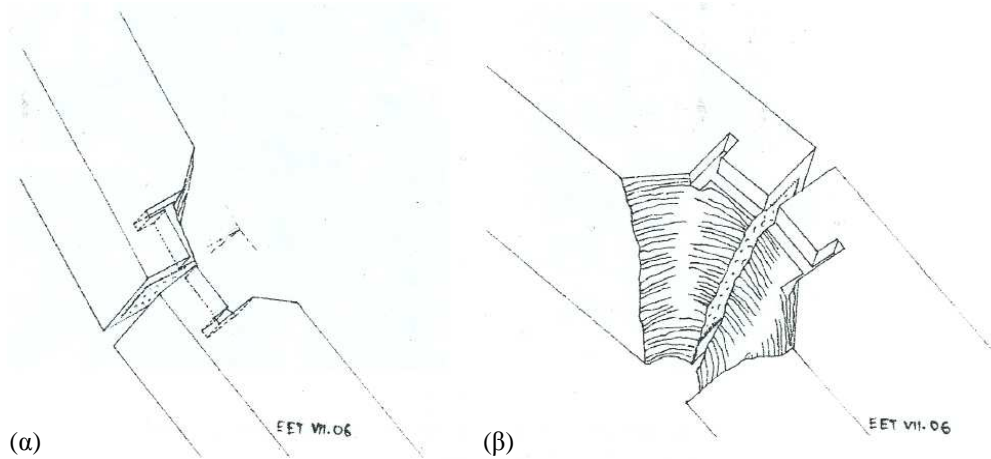
1.2.2.2 Μια εναλλακτική ερμηνεία των βλαβών στην περιοχή των συνδέσεων

Στη “Μελέτη Δομικής Αποκαταστάσεως Ορθοστατών Βορείου Τοίχου Σηκού Παρθενώνος” [7] διατυπώνονται κάποιες “παρατηρήσεις” σχετικά με θέματα που αφορούν τα συνδετήρια στοιχεία. Η σημαντικότερη είναι ότι σχετικά με τις αρχαίες συνδέσεις με συνδέσμους μορφής “Γ” που καταπονούνται σε εφελκυσμό, η συγγραφέας αναφέρει ότι οι θραύσεις που παρατηρούνται στις περισσότερες περιοχές των αρχαίων συνδέσεων ήταν αναμενόμενες. Με σχετικά απλές μαθηματικές μεθόδους καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η δύναμη που μπορεί να παραλάβει ο σύνδεσμος είναι μεγαλύτερη από αυτή του μαρμάρου. Για τη δύναμη του μαρμάρου ελήφθησαν υπ’ όψιν το γεγονός ότι η περιοχή επιρροής ενός συνδέσμου σε εφελκυσμό έχει τη μορφή ενός κούλουρου κώνου [5] και μία μέση τιμή της αντοχής του μαρμάρου σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αυτόματα “απενοχοποιεί” την οξείδωση των σιδηρών συνδέσεων ως κύρια αιτία των βλαβών στις περιοχές των συνδέσεων.

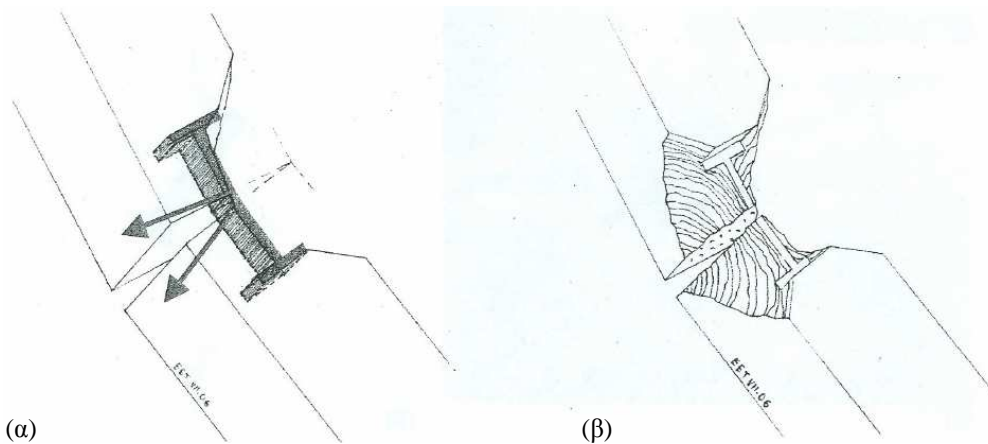
Στην ίδια μελέτη δίνεται μια ερμηνεία της παθολογίας που παρατηρήθηκε στους ορθοστάτες του σηκού και μπορεί κάλλιστα να αναχθεί και στη σύνδεση των επιστυλίων. Με την εφαρμογή μιας οριζόντιας δύναμης ή μετατόπισης (ανεξάρτητα από τη γενεσιουργό αιτία αυτής) προκαλείται αλλαγή του σχήματος του διαμήκους άξονα που αντιστοιχεί στο μέσο επίπεδο του μέλους. Η αρχική ευθεία γραμμή μετατρέπεται σε καμπύλη με τα κοίλα προς τα μέσα (Εικ. 1.21α) χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι ο φορέας θα παραμορφωθεί. Οι δύο όγκοι δεν είναι ανεξάρτητοι οπότε ο σύνδεσμος που βρίσκεται μεταξύ τους τείνει να λάβει την παραμορφωμένη καμπύλη μορφή που προαναφέρθηκε. Ένας σύνδεσμος από υλικό με ιδιαίτερα μικρό μέτρο ελαστικότητας θα ακολουθούσε την παραμόρφωση του φορέα χωρίς να επηρεάζει το σύστημα. Στην αντίθετη περίπτωση ενός συνδέσμου από υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ο σύνδεσμος αρχικά θα αντιστεκόταν στην παραμόρφωση που του επιβλήθηκε με αποτέλεσμα να ασκήσει δυνάμεις στο μάρμαρο με διεύθυνση αντίθετη της φοράς κίνησης του μέλους (Εικ. 1.21β). Αν, λοιπόν, η δύναμη που ασκεί ο σύνδεσμος στο μάρμαρο είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη που αναπτύσσεται στα όρια του κώνου επιρροής, θα επέλθει θραύση του μαρμάρου με τη μορφή που φαίνεται στην Εικ. 1.22. Μόλις συμβεί αυτό, ο σύνδεσμος απελευθερώνεται από την επικάλυψή του και μπορεί να καμφθεί και να ακολουθήσει πλήρως ή εν μέρει την παραμόρφωση του φορέα (θεωρώντας φυσικά ότι ο σύνδεσμος δεν έχει ακόμη θραυστεί). Τώρα, οι δυνάμεις ασκούνται στα εναπομείναντα τοιχώματα της εντορμίας (Εικ. 1.23α) και ξεκινά η δεύτερη φάση της αστοχίας. Αν η ασκούμενη από το σύνδεσμο δύναμη είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη που αναπτύσσεται στα όρια του κώνου επιρροής επέρχεται αποκόλληση και των εναπομεινάντων τοιχωμάτων της εντορμίας (Εικ. 1.23β).



Εικ. 1.21: (α) Ορθοστάτες στην αρχική “απαραμόρφωτη” και στην παραμορφωμένη κατάσταση. (β) Περιοχή επιρροής του συνδέσμου κατά την πρώτη φάση της παραμόρφωσης [7].

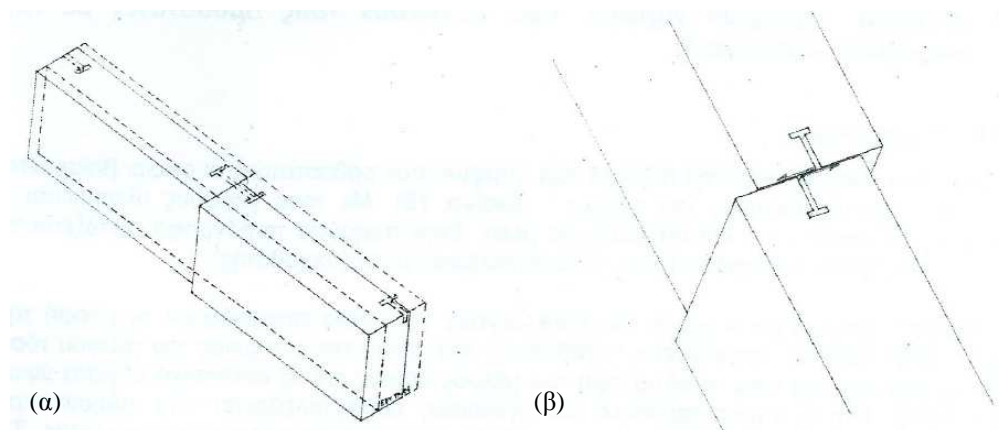


Εικ. 1.22: Ορθοστάτες Β. Τοίχου. Αποψη της πρώτης φάσης της αστοχίας από (α) βορράν και (β) νότον [7].



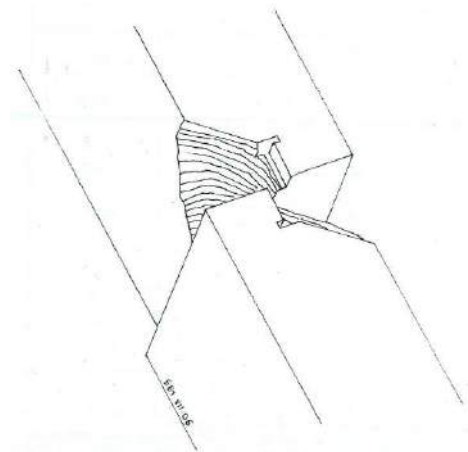
Εικ. 1.23: (α) Καμπτική παραμόρφωση συνδέσμου και η αντίστοιχη εφαρμοζόμενη δύναμη. (β) Η περιοχή των συνδέσμων μετά την αστοχία [7].

Ένα μέρος της αστοχίας που μόλις περιγράφηκε θα μπορούσε να ερμηνευτεί θεωρώντας διατμητική καταπόνηση του συστήματος. Όταν λάβει χώρα σχετική μετακίνηση των δύο όγκων χωρίς στροφή (Εικ. 1.24α) οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι καθαρά διατμητικές (Εικ. 1.24β) και προκαλούν την αντισυμμετρική θραύση που εμφανίζεται στην Εκ. 1.25. Η συγκεκριμένη μορφή της θραύσης θεωρείται ότι δημιουργείται κατά την πρώτη φάση της αστοχίας και δρα σε επαλληλία με την περιγραφείσα στην Εικ. 1.21.



Εικ. 1.24: (α) Σχετική μετακίνηση ορθοστατών χωρίς στροφή.
(β) Διατμητική καταπόνηση περιοχής συνδέσμου [7].

Ένα σημείο που στηρίζει την ερμηνεία των αστοχιών στην περιοχή των συνδέσμων μορφής “I”, πρωτίστως ως αποτέλεσμα επιβαλλόμενων οριζόντιων μετατοπίσεων [13] είναι η συγκέντρωση των αστοχιών στις περιοχές αγκύρωσης των διαμήκων και όχι των εγκαρσίων συνδέσμων (όπως αυτές καταγράφηκαν στη στάθμη των επιστυλίων του Οπισθονάου του Παρθενώνα). Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν αστοχίες στο 50% του αριθμού των διαμήκων συνδέσμων έναντι 13% επί των εγκαρσίων συνδέσμων. Έτσι, διατυπώνεται η άποψη ότι η κατανομή των αστοχιών θα έπρεπε να είναι πιο ομοιογενής αν η οξείδωση των συνδετηρίων στοιχείων αποτελούσε της πρωτογενή αιτία αστοχίας. Όταν, λοιπόν, επιβάλλεται μία οριζόντια μετατόπιση οι διαμήκεις σύνδεσμοι καταπονούνται διατμητικά ενώ οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι μπορεί να βρίσκονται υπό συνδυασμένη φόρτιση (εφελκυστική και διατμητική). Οι κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων συνδέσμων συνοψίζονται στη δυνατότητα ή όχι της απορρόφησης ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται μεταξύ άλλων με την ύπαρξη ελεύθερου τμήματος στο μέσο του συνδέσμου. Λόγω του εξαιρετικά επιμελημένου τρόπου κατασκευής και της άριστης εφαρμογής των εγκαρσίων πλευρών των εξωτερικών και των εσωτερικών επιστυλίων δεν είναι δυνατόν να διαμορφωθεί κάποιου είδους κενό στο μέσο των διαμήκων



Εικ. 1.25: Μορφή αστοχίας λόγω διατμητικής καταπόνησης (αστοχία είτε από τη μία είτε από την άλλη πλευρά) [7].

συνδέσμων. Αντίθετα, το κενό μερικών εκατοστών που υπάρχει μεταξύ των “εσωτερικών” μη ορατών όψεων των επιστυλίων απεδείχθη ευεργετικό για τους εγκάρσιους συνδέσμους αφού τους επιτρέπει να παραμορφωθούν σχεδόν ανεμπόδιστα. Βέβαια, ο εγκάρσιος σύνδεσμος στο τμήμα του μεταξύ των επιστυλίων περιβάλλεται με μόλυβδο, δεν παύει όμως να βρίσκεται εντός των απαραμόρφωτων ορίων της εντορμίας.

Η εμφάνιση της αστοχίας στο μάρμαρο καθώς και η μορφή της αστοχίας επηρεάζεται σημαντικά από την κατεύθυνση ανισοτροπίας του μαρμάρου [13,14]. Τα επιστύλια καταπονούνται υπό κανονικές συνθήκες σε κάμψη (στο κατακόρυφο επίπεδο) γι’ αυτό τοποθετούνται έτσι ώστε οι υλικές στρώσεις του μαρμάρου να είναι παράλληλες (ή με μικρή γωνία) ως προς το διαμήκη άξονα του μέλους. Ωστόσο, στην περίπτωση της επιβολής οριζόντιων μετατοπίσεων η συγκεκριμένη κατεύθυνση των υλικών στρώσεων δεν λειτουργεί υπέρ της προστασίας του μαρμάρου.

1.2.2.3 Σχετικές μελέτες εντός της τελευταίας δεκαετίας

Στην “Ανάλυση κι Ερμηνεία της Δομικής Παθολογίας του Β. Τοίχου του Σηκού του Παρθενώνα και οι συνέπειες για το σχεδιασμό της δομικής αποκατάστασης” [13] υλοποιήθηκε μία αριθμητική μελέτη με στόχο να διερευνηθεί αν οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω της δράσης ενός συνδέσμου μπορούν να οδηγήσουν το μάρμαρο σε αστοχία. Το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωνε ένα επιστύλιο με την εντορμία του χωρίς την κατασκευή του συνδέσμου. Ο μαρμάρινος όγκος υποβλήθηκε σε διατμητική και σύνθετη φόρτιση. Η διατμητική δράση εφαρμόστηκε στο μάρμαρο με τη μορφή δύο κατανομών (ομοιόμορφη και τριγωνική). Η ανάλυση ήταν γραμμικώς ελαστική και αποδεικνύει την αστοχία του μαρμάρου αντί του συνδέσμου στην περίπτωση της διατμητικής καταπόνησης.

Η συμπεριφορά μιας παρόμοιας σύνδεσης (συγκεκριμένα του Ναού του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις της Φιγαλείας) υπό συνδυασμένη φόρτιση (εφελκυσμός και διάτμηση) έχει μελετηθεί αριθμητικά από τον Κ. Παπαδόπουλο [15]. Στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης του βάθους και του μήκους της εντορμίας καθώς και το μήκος του πέλματός της (κατ’ επέκταση και των αντίστοιχων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συνδέσμου) στην αντοχή της σύνδεσης. Το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελούνταν από έναν όγκο ασβεστόλιθου με την εντορμία του, μισό σύνδεσμο και τσιμεντιτικό κονίαμα (ας σημειωθεί ότι το κονίαμα περιέβαλε το σύνδεσμο μόνο περιμετρικά). Η ανάλυση ήταν γραμμικώς ελαστική και κατέδειξε ως σημαντικότερη παράμετρο το βάθος της εντορμίας, η αύξηση του οποίου οδηγεί σε αύξηση της αντοχής της σύνδεσης.

Όσον αφορά την πειραματική μελέτη της καθαρά εφελκυστικής απόκρισης των συνδέσεων (με σύνδεσμο μορφής “Γ”), εκτός της πρώτης μελέτης που περιγράφηκε στην ενότητα 1.2.2.1, βρέθηκε μόνο μία νεότερη σχετική. Οι Pavnlončič et al. [16,17] υλοποίησαν μία σειρά δοκιμών εφελκυσμού με σκοπό να μελετήσουν την αστοχία του λίθου όταν μεταβάλλονται συγκεκριμένες γεωμετρικές παράμετροι της σύνδε-

σης. Οι παράμετροι ήταν οι εξωτερικές διαστάσεις του λίθου, το μήκος της εντορμίας (άρα και του συνδετηρίου στοιχείου), το μήκος του πέλματος της εντορμίας, το μήκος του πέλματος του συνδέσμου, το βάθος της εντορμίας και το πάχος της στρώσης του υλικού πλήρωσης της εντορμίας που βρίσκεται κάτω από το σύνδεσμο. Μία πρόσθετη παράμετρος ήταν ο τρόπος επιβολής της φόρτισης (στατική μονότονη, γρήγορη μονότονη ή κυκλική). Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν από έναν όγκο ασβεστολίθου, έναν σύνδεσμο από ανοξείδωτο χάλυβα και τσιμεντικό κονίαμα. Η μελέτη κατέδειξε τη σημαντική επίδραση του βάθους της εντορμίας στην αύξηση της αντοχής της σύνδεσης και προσδιόρισε ως κρίσιμη ακμή έναρξης της ρηγμάτωσης, αυτή του πέλματος της εντορμίας (στην κατώτατη στάθμη της).

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, γίνεται σαφές ότι υπάρχουν μεν αριθμητικές μελέτες σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των συνδέσεων, ωστόσο είναι λίγες, περιορίζονται στη γραμμική ελαστικότητα και δεν προσομοιώνουν το σύνολο της σύνδεσης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν σοβαρές ελλείψεις όσον αφορά τη μελέτη του προβλήματος πειραματικά. Η παρούσα διατριβή καλύπτει το κενό αυτό και θεωρούμε ότι συμπληρώνει τις υπάρχουσες γνώσεις σχετικά με το πρόβλημα των συνδέσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

2.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ (DIC)

Το θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνικής αυτής περιγράφηκε για πρώτη φορά από τους Sutton et al. [18] το 1983. Η τεχνική στηρίζεται στον εντοπισμό της θέσης κάθε σημείου του υπό μελέτη δοκιμίου στην απαραμόρφωτη και στην παραμορφωμένη κατάσταση (Εικ. 2.1, [19]). Το κεντρικό σημείο σε ένα τμήμα της εικόνας στην απαραμόρφωτη κατάσταση είναι το P ενώ στην παραμορφωμένη θέση είναι το P^* . Η σχέση που τα συνδέει είναι:

$$x^* = x + u(x, y) \quad \text{και} \quad y^* = y + v(x, y) \quad (1)$$

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_{uM} = \frac{\sqrt{2 \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2 \right]}}{3} \quad (5)$$

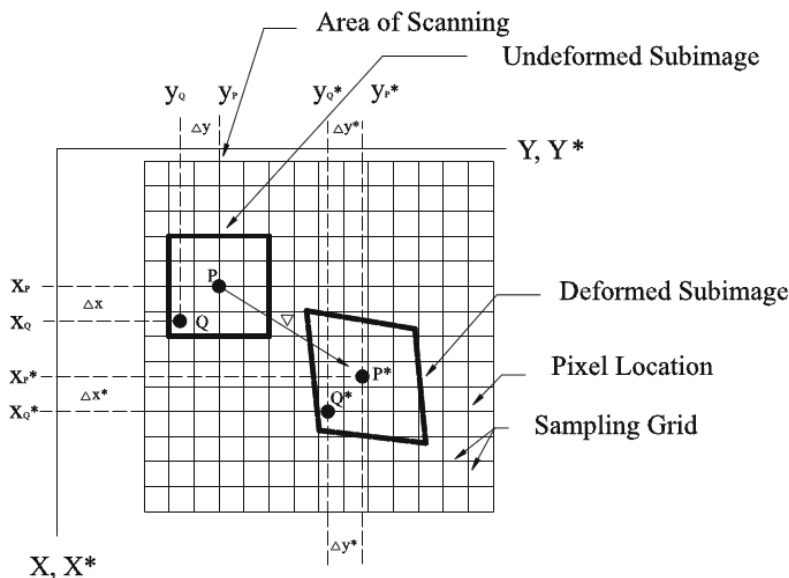
όπου ε_{uM} είναι η ισοδύναμη κατά Mises ανηγμένη παραμόρφωση [20] και ε_1 και ε_3 η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, ανηγμένη παραμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το πεδίο των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Για τη σωστή εφαρμογή της τεχνικής πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις:

1. Να υπάρχει ένα μοτίβο κουκκίδων στην επιφάνεια του υπό μελέτη δοκιμίου.
2. Το επίπεδο των καμερών να είναι παράλληλο με την επιφάνεια του δοκιμίου.

Η τεχνική αυτή έχει εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό του πεδίου των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων (σε δύο διαστάσεις) κοντά στην αιχμή μιας ρωγμής σε μέταλλα, π.χ. D. S. Dawicke and M. A. Sutton [21] και G. Han, M. A. Sutton and Y. J. Chao [22], αντίστοιχα ενώ οι πρώτες μετρήσεις στο χώρο (τρεις διαστάσεις) πραγματοποιήθηκαν από τον McNeill [23] (unpublished).

Πολλές είναι οι μελέτες που βρέθηκαν για τη μελέτη της θραύσης (προσδιορισμός της ζώνης εσωτερικών διεργασιών, του ανοίγματος της αιχμής της ρωγμής CTOD και της διάδοσης της ρωγμής) στο σκυρόδεμα και διάφορα κονιάματα, ενδεικτικά [24-26]. Αντίθετα, η εφαρμογή της τεχνικής σε λίθους είναι περιορισμένη είτε πρόκειται για τη μελέτη ρωγμών είτε για τον προσδιορισμό του πεδίου των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου, ενδεικτικά αναφέρονται [27,28].



Εικ. 2.1: Σχηματική απεικόνιση της σχετικής θέσης των εικόνων στην απαραμόρφωτη και την παραμορφωμένη κατάσταση της επιφάνειας [19].

2.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (ΑΕ)

Εδώ και 2500 χρόνια στο εγκαταλελειμμένο και κατεστραμμένο πια λατομείο της Πεντέλης κείται ένα ημιτελές κιονόκρανο το λεγόμενο ημίεργο [29]. Λόγω κάποιας αθέατης εσωτερικής ασυνέχειας απορρίφθηκε από τους έμπειρους λατόμους και δεν μεταφέρθηκε ποτέ στο μεγαλύτερο εργοτάξιο της εποχής, στην Ακρόπολη. Οι λατόμοι της αρχαίας εποχής είχαν την εμπειρία να ανιχνεύουν τις αθέατες εσωτερικές

ασυνέχειες αλλά και λιθοτεχνικά ελαττώματα των πετρωμάτων. Η μεθοδολογία τους στηρίζονταν στην παραγωγή ήχου από το μάρμαρο όταν φορτιζόταν μηχανικά π.χ. με ένα μεταλλικό εργαλείο.

Ως Ακουστική Εκπομπή ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο παροδικά ελαστικά κύματα δημιουργούνται στο εσωτερικό ενός υλικού από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας από μια συγκεκριμένη πηγή ή πηγές αυτού (ANSI/ASTM E 610-77) [30,31]. Η απότομη απελευθέρωση ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ακουστικών μηχανικών κυμάτων τα οποία διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις του υλικού. Τα ακουστικά κύματα χαρακτηρίζονται ως μηχανικά γιατί διαδίδονται μόνο όπου υπάρχει ύλη και ως ελαστικά διότι η διάδοσή τους οφείλεται στις ελαστικές ιδιότητες των σωμάτων που είναι υπεύθυνες για τις συνεχείς ταλαντώσεις των σωματιδίων της ύλης [32,33].

Η παραγωγή των ακουστικών κυμάτων εξαρτάται από τους εκάστοτε μηχανισμούς παραμόρφωσης, δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών. Στα μέταλλα οι πηγές εκπομπής ακουστικών κυμάτων μπορεί να προέρχονται από πολλά σημεία στο εσωτερικό του υλικού όπως μικρορωγμές, κρυσταλλικές ατέλειες (π.χ. μεταστάσεις, διδυμίες, κατακρημνίσεις, ολίσθηση διαχωριστικών επιφανειών κόκκων, τη θραύση και τον αποχωρισμό τους κ.ά.), θραύση και αποχωρισμός προσμείξεων από τη μήτρα του υλικού [34]. Στα σύνθετα υλικά τα σημεία εκπομπής περιλαμβάνουν τους μηχανισμούς υποβάθμισης του υλικού, αναφορικά η μικρορωγμάτωση της μήτρας, η αποκόλληση των ινών ενίσχυσης από τη μήτρα, η διαστρωματική αποκόλληση και τέλος η μακροσκοπική θραύση των ινών του υλικού [35]. Η παραγωγή των ηχητικών γεγονότων της ακουστικής εκπομπής είναι ουσιαστικά η απόκριση των υλικών στα επιβαλλόμενα μηχανικά φορτία. Οι παραπάνω πηγές απελευθέρωσης ενέργειας και παραγωγής ακουστικών κυμάτων στο εσωτερικό του υλικού ονομάζονται πρωτεύουσες πηγές λόγω του μηχανικού τρόπου παραμόρφωσης των υλικών. Υπάρχουν όμως και οι δευτερεύουσες πηγές ή ψευδοπηγές που περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως σπηλαίωση, τριβή σε περιστρεφόμενα έδρανα, υγροποίηση, επανευθυγράμμιση ή εξάπλωση μαγνητικών πεδίων που επίσης ανιχνεύονται από τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Το πρόβλημα της απομόνωσης εκ των ήχων που παράγονται στο εσωτερικό του υλικού εκείνων που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα σε κάθε εφαρμογή, έχει αντιμετωπιστεί με τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων. Με αυτόν τον τρόπο απομονώνονται και οι εξωτερικοί θόρυβοι του συστήματος που δεν ενδιαφέρουν και καταγράφονται οι παραγόμενοι ήχοι από μια συγκεκριμένη περιοχή, την προς έλεγχο περιοχή του υλικού.

Η τεχνική της ακουστικής εκπομπής θεωρείται ιδιαίτερη συγκρινόμενη με τις άλλες μη καταστροφικές μεθόδους, μιας και υπάρχει το ερώτημα αν η μέθοδος αυτή μπορεί να ενταχθεί στις απολύτως μη καταστροφικές ή όχι, αφού η θραύση του υλικού είναι απαραίτητη για τη δοκιμή του. Σε αντίθεση με άλλες μη καταστροφικές μεθόδους, ωστόσο, η ακουστική εκπομπή συνήθως εφαρμόζεται κατά τη φόρτιση της κατασκευής/δοκιμίου ενώ οι περισσότερες από τις άλλες εφαρμόζονται πριν ή μετά τη φόρτιση της κατασκευής. Μετά από αυτά τα επιχειρήματα και σύμφωνα με

τον τρόπο με τον οποίο καταγράφονται τα σήματα, η ακουστική εκπομπή ορθώς χαρακτηρίζεται ως μη καταστροφική μέθοδος. Αυτό είναι αληθές στην περίπτωση ενός υλικού που εξετάζεται κάτω από τα φορτία λειτουργίας του χωρίς πρόσθετη φόρτιση. Από την άλλη, η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται συχνά για να ανιχνεύσει μία αστοχία σε πολύ πρώιμο στάδιο, αρκετά νωρίτερα πριν την ολική κατάρρευση της κατασκευής [36].

Η συγκεκριμένη πειραματική μέθοδος πλεονεκτεί στο ότι:

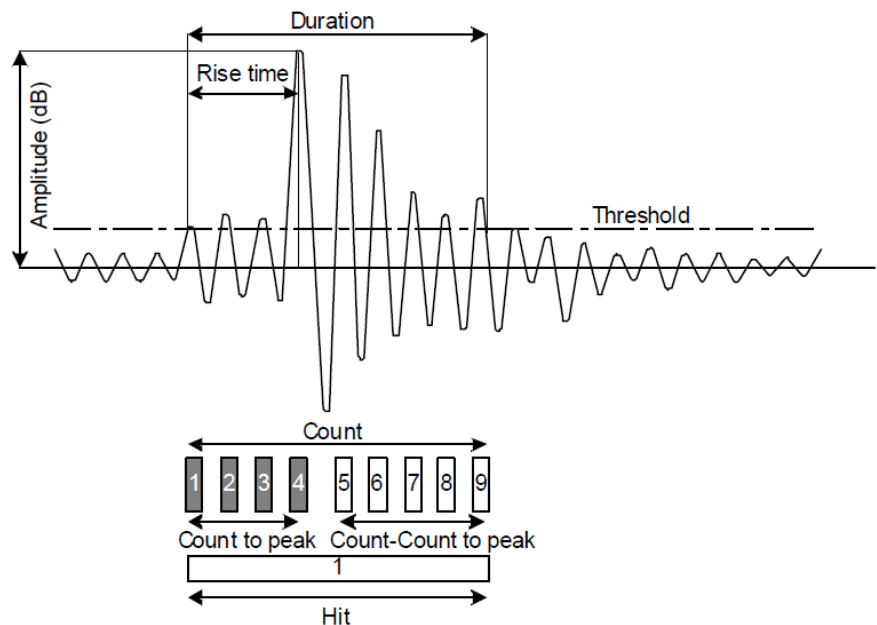
- Η εξέλιξη της αστοχίας του υλικού παρακολουθείται καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισής του χωρίς καμιά διατάραξη του δοκιμίου.
- Απαιτούνται μόνο λίγοι αισθητήρες για την καταγραφή των σημάτων που εκπέμπονται με την προϋπόθεση ότι τα σήματα αυτά είναι ισχυρά ώστε να ξεπερνούν το κατώφλι. Οι αισθητήρες στερεώνονται πάνω στο δοκίμιο και δεν χρειάζεται να μετακινηθούν κατά τη διάρκεια των δοκιμών.
- Εξαρτάται από τις μη αντιστρεπτές (μη ελαστικές) παραμορφώσεις των υλικών. Επομένως, μπορεί και ανιχνεύει τη δημιουργία νέων ρωγμών καθώς και τη διάδοση - εξέλιξη υπαρχόντων ρωγμών ή φαινόμενα τριβής. Γι' αυτό είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος στην παρακολούθηση κατασκευών υπό πραγματικά φορτία ώστε να καταγραφεί πιθανή αστοχία [36].

Από την άλλη μεριά, το γεγονός ότι κάθε δοκιμή δεν είναι απόλυτα επαναλαμβανόμενη εξαιτίας της φύσης της πηγής των σημάτων π.χ. την ξαφνική και μερικές φορές τυχαία δημιουργία μιας ρωγμής, κατατάσσεται στα αρνητικά της συγκεκριμένης μεθόδου. Ένα άλλο μειονέκτημα σχετίζεται με την ενέργεια που ελευθερώνεται από μια ακουστική εκπομπή. Τα σήματα, ιδίως αυτά που χρησιμοποιούνται ως προ-άγγελοι της αστοχίας, είναι συνήθως αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερα συγκρινόμενα με τα σήματα που χρησιμοποιούνται στους υπερήχους. Αυτό απαιτεί πολύ πιο ευαίσθητους αισθητήρες καθώς και αξιόπιστους ενισχυτές και προ-ενισχυτές. Σχετικά προβλήματα είναι η επίδραση του περιβάλλοντος θορύβου, η απόσβεση των σημάτων και ο πιθανόν μικρός λόγος σήματος προς θόρυβο. Έτσι, για την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών, για τον προσδιορισμό της θέσης τους και για την εφαρμογή άλλων προηγμένων τεχνικών απαιτούνται τεχνικές εξελιγμένης επεξεργασίας δεδομένων [36].

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παράμετροι ακουστικής εκπομπής είναι (Εικ. 2.2):

- “Χτύπος” (hit): Όταν ένα σήμα ξεπεράσει το κατώφλι τάσης. Δείχνει την ακουστική δραστηριότητα.
- “Απαριθμήσεις” (count or ring-down count or emission count): Πόσες φορές περνά ένα σήμα το κατώφλι τάσης. Δείχνει την ακουστική δραστηριότητα. Οι “απαριθμήσεις” εξαρτώνται από το κατώφλι τάσης που έχει οριστεί και τη συχνότητα λειτουργίας. Μερικές φορές, οι “απαριθμήσεις” μέχρι το μέγιστο πλάτος του σήματος αναφέρονται ως “απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο (counts to peak)”.

- Πλάτος (amplitude): Η μέγιστη τάση ρεύματος του σήματος. Το πλάτος εκφράζεται σε decibels αντί για γραμμική κλίμακα όπου 1 μV στον αισθητήρα αντιστοιχεί σε 0 dB ακουστικής εκπομπής. Το πλάτος σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος της πηγής του ακουστικού γεγονότος. Συχνά το πλάτος κάθε σήματος εκφράζεται ως προς την κατανομή συχνότητας.



Εικ. 2.2: Ένα τυπικό ακουστικό σήμα και βασικές έννοιες [36].

- Διάρκεια (duration): Ο χρόνος από την πρώτη φορά που ξεπερνιέται το κατώφλι τάσης μέχρι το σήμα να μην ανιχνεύεται πια. Η διάρκεια εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής και το φιλτράρισμα του θορύβου.
- Χρόνος ανύψωσης (rise time): Ο χρόνος από την πρώτη φορά που ξεπερνιέται το κατώφλι τάσης μέχρι το μέγιστο πλάτος. Ο χρόνος ανύψωσης συνδέεται στενά με τη συνάρτηση πηγής-χρόνου και χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση του τύπου θραύσης ή για την εξάλειψη των σημάτων θορύβου.
- Ενέργεια (energy): Γενικά, ορίζεται από την επιφάνεια κάτω από μια τροποποιημένη καμπύλη του σήματος. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για την ερμηνεία του μεγέθους της πηγής του γεγονότος ακουστικής εκπομπής (απ' ότι οι "απαριθμήσεις") επειδή είναι ευαίσθητη στο πλάτος καθώς και στη διάρκεια, και λιγότερο εξαρτώμενη από το κατώφλι τάσης και τις συχνότητες λειτουργίας.
- Μέση συχνότητα (average frequency): Ο λόγος των "απαριθμήσεων" προς τη διάρκεια, για κάθε χτύπο. Η μέση συχνότητα χρησιμοποιείται συνήθως όταν οι κυματομορφές είναι πρακτικά δύσκολο να καταγραφούν.

- Αρχική συχνότητα (initial frequency): Ο λόγος των “απαριθμήσεων μέχρι το μέγιστο” προς το χρόνο ανύψωσης.
- Συχνότητα αντήχησης (reverberation frequency): Ο λόγος των (“απαριθμήσεων” - “απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο”) προς το χρόνο (“διάρκεια” - “χρόνος ανύψωσης”).
- Τιμή RA (RA value): Ο λόγος του χρόνου ανύψωσης προς το πλάτος. Μετράται σε ms/V. Οι τιμές RA χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση του τύπου των ρωγμών [36].

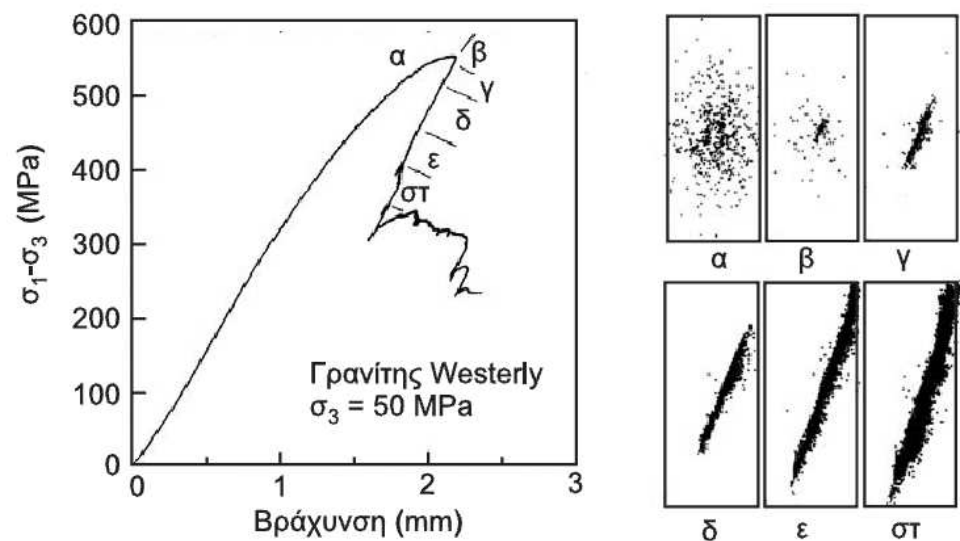
Η παλαιότερη και πρώτη καταγραφή σε επιστημονικό πείραμα ακουστικής εκπομπής βρέθηκε από τον Drouillard το 1990. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε από τον F. Kishinoue στις 21 Νοεμβρίου 1933 σε μια συνάντηση του Ινστιτούτου Έρευνας Σεισμών (Earthquake Research Institute) στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο (Imperial University of Tokyo). Το άρθρο δημοσιεύτηκε το 1934, μεταφράστηκε στα Αγγλικά από τον K. Ono και δημοσιεύτηκε στο Περιοδικό Ακουστικής Εκπομπής (Journal of Acoustic Emission) (Kishinoue, 1990). Η μελέτη αφορούσε τη διάδοση της δόνησης (shock occurrence) σε ένα δοκίμιο ξύλου υπό κάμψη [36]. Ιστορικά, οι μελέτες των Obert και Duvall (1942) [37] για την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930 μπορούν να θεωρηθούν ως η αρχή της εφαρμογής της ΑΕ στη μηχανική πετρωμάτων ενώ από τις πιο σημαντικές μελέτες θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950) [38], ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν “μνήμη” των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser [39].

Με την προσαρμογή περισσότερων του ενός ακουστικών αισθητήρων σε ένα δοκίμιο μπορεί να προσδιοριστεί η θέση της πηγής των ακουστικών γεγονότων. Επειδή στη φάση της αστοχίας ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών γεγονότων είναι πολύ υψηλός, είναι σχεδόν αδύνατος ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων. Για το λόγο αυτό, το 1993 ο Lockner [40] υποστήριξε ότι για την παρακολούθηση της αστοχίας απαιτείται ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης έτσι ώστε ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών γεγονότων να διατηρείται σταθερός. Τα αποτελέσματα σχετικών πειραμάτων που υλοποίησε φαίνονται στην Εικ. 2.3 [39].

Στη συνέχεια γίνεται ενδεικτική αναφορά σε μελέτες που έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής στη μελέτη λίθων.

Μία από τις συνηθισμένες δοκιμές που υλοποιούνται για τη μελέτη των ακουστικών γεγονότων σε δοκίμια λίθου με ή χωρίς εγκοπή είναι η κάμψη. Ήδη από το 1985 [41] δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια γνευσίτη επέτρεψαν τη συσχέτιση της παραγωγής ακουστικών γεγονότων με χαρακτηριστικά της καμπύλης δύναμης - βύθισης και συγκεκριμένα επισημάνθηκε η έναρξη των ακουστικών γεγονότων όταν η καμπύλη δύναμης - βύθισης παύει να είναι γραμμική. Η μορφή της καμπύλης των ακουστικών εκπομπών αποδείχθηκε ότι δεν είναι συνάρτηση του τύπου του λίθου που εξετάζεται αλλά της ταχύτητας ανάπτυξης της ρωγμής και της αύξησης της επιφάνειας της κύριας ρωγμής ανά μονάδα χρόνου. Σε κάμψη τριών σημείων υποβλήθηκαν επίσης δοκίμια γρανίτη από τους Hashida and Takahashi [42] με

σκοπό να υπολογίσουν τη δυσθραυστότητα του γρανίτη μέσω του ολοκληρώματος J όπως αυτό προσδιορίστηκε μέσω της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής. Και εδώ υπάρχει αναφορά στο γεγονός της έναρξης των ακουστικών εκπομπών που χρονικά συμπίπτει περίπου με το επίπεδο φόρτισης όπου η καμπύλη δύναμης-βύθισης γίνεται μη γραμμική. Οι Labuz and Biolzi [43] υπέβαλαν μεγάλα δοκίμια γρανίτη και αμμόπετρας (sandstone) με εγκοπή σε κάμψη τεσσάρων σημείων και κατάφεραν να προσδιορίσουν τη ζώνη εσωτερικών διεργασιών (fracture process zone) τους. Μάλιστα, γίνεται αναφορά στο ότι το πλάτος της ζώνης αυτής μπορεί να αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού, όπως υποστήριξαν το 1989 οι Bazant and Pijauder-Cabot [44].



Εικ. 2.3: Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ακουστικών γεγονότων σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76.2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3=50$ MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ακουστικών γεγονότων [40].

2.3 ΤΕΧΝΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΓΕΙΡΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PSC)

2.3.1 ΔΙΑΤΟΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ [45]

Στην στερεή κατάσταση υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί δεσμού που κρατούν τα άτομα “ενωμένα”. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ως αποτέλεσμα μία “καθαρή” έλξη μεταξύ των ατόμων και σε συγκεκριμένη απόσταση η έλξη αυτή εξισορροπείται από μία απόθεση λόγω της συνύπαρξης των ηλεκτρικών νεφών.

Η συμπεριφορά αυτή για ένα ζεύγος ατόμων μπορεί να εκφραστεί αποδίδοντας σε αυτά μία δυναμική ενέργεια, V , που είναι συνάρτηση της απόστασης, r , μεταξύ τους:

$$V = \frac{-A}{r^n} + \frac{B}{r^m} \quad (6)$$

όπου ακολουθώντας τη συνήθη σύμβαση η δυναμική ενέργεια είναι αρνητική όταν προέρχεται από μία ελκτική δύναμη και θετική όταν οφείλεται σε μια απωθητική δύναμη. Στην παραπάνω εξίσωση τα A και B είναι σταθερές ενώ τα n και m είναι άγνωστα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ηλεκτροστατικής έλξης μεταξύ ανόμοιων ηλεκτρικών φορτίων το n θα είναι μονάδα. Εξ ορισμού, η “καθαρή” δύναμη μεταξύ των ατόμων θα είναι:

$$F = \frac{-\partial V}{\partial r} = \frac{-nA}{r^{n+1}} + \frac{mB}{r^{m+1}} \quad (7)$$

και αν τα άτομα βρίσκονται σε ισορροπία η δύναμη αυτή θα είναι μηδενική σε κάποια κρίσιμη απόσταση r_0 , δηλ.

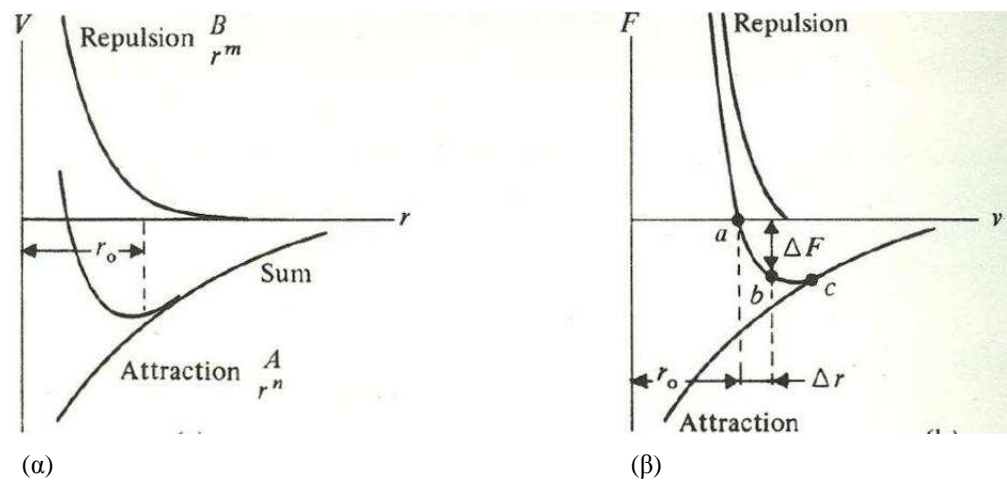
$$0 = \frac{-nA}{r_0^{n+1}} + \frac{mB}{r_0^{m+1}} \quad (8)$$

Οι εξισώσεις αυτές απεικονίζονται γραφικά για τυχαίες τιμές των n και m στην Εικ. 2.4. Οι καμπύλες αυτές είναι γνωστές ως καμπύλες Gondon-Morse από τους εισηγητές τους. Η Εικ. 2.4 περιγράφει τη συμπεριφορά ενός απομονωμένου ζεύγους ατόμων. Παρόμοια συμπεριφορά προφανώς θα έχει οποιοδήποτε ζεύγος ατόμων ανήκει σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα. Οι πραγματικές τιμές των n και m εξαρτώνται από τη φύση των δυνάμεων συνοχής του κρυστάλλου και από τον ίδιο τον κρύσταλλο. Για παράδειγμα, το n είναι μονάδα (όπως αναμένεται στην ηλεκτροστατική έλξη) και η τιμή του m είναι περίπου δέκα για έναν ιοντικό κρύσταλλο όπως το ορυκτό άλας.

Όταν μία εξωτερική δύναμη που αναγκάζει τα άτομα να απομακρυνθούν εφαρμόζεται σε έναν κρύσταλλο, τα άτομα θα μετατοπιστούν από τη θέση ισορροπίας τους μέχρις ότου η εφαρμοζόμενη δύναμη εξισορροπηθεί από την αύξηση, ΔF , της ελκτικής δύναμης μεταξύ των ατόμων που αντιστοιχεί στην μετατόπιση από το σημείο a στο σημείο b της καμπύλης της Εικ. 2.4β. Υποθέτοντας ότι η εφαρμοζόμενη δύναμη επιμηκώνει τον κρύσταλλο, το μήκος του από l γίνεται $l+\Delta l$. Η κλασματική αλλαγή του μήκους είναι $\Delta l/l$. Η μετατόπιση κάθε ατόμου από τη θέση ισορροπίας του θα έχει την ίδια αναλογία

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

Αν ο κρύσταλλος συμπεριφέρεται ελαστικά τα άτομα θα επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις όταν η εξωτερική δύναμη αφαιρεθεί.



Εικ. 2.4: Οι καμπύλες Gordon-Morse. (α) Η δυναμική ενέργεια, V και (β) η δύναμη συναρτήσει της διατομικής απόστασης, r [45].

Ο λόγος $\Delta F/\Delta r$, για μικρές τιμές του Δr , προσδιορίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη, στη θέση ισορροπίας, δηλ.

$$\left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (10)$$

Στην πράξη, η ελαστική συμπεριφορά των κρυστάλλων σπάνια προκαλεί κλασματικές επιμηκύνσεις που υπερβαίνουν το 0.5% οπότε το Δr είναι πάντα πολύ μικρό και η κλίση $\partial F/\partial r$ στην καμπύλη της δύναμης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή για το μικρό αυτό εύρος του r. Αυτό σημαίνει ότι στην ελαστική περιοχή η μετατόπιση, Δr , των ατόμων είναι ανάλογη της εξωτερικής εφαρμοζόμενης δύναμης σύμφωνα με τον νόμο ελαστικότητας του Hooke.

Ακριβώς τα ίδια ισχύουν αν εφαρμοστεί εξωτερικά μία θλιπτική δύναμη. Η απόσταση ισορροπίας μεταξύ των ατόμων μειώνεται μέχρι η αυξανόμενη αποθνητική δύναμη μεταξύ των ατόμων ισορροπήσει την εφαρμοζόμενη δύναμη.

Αν ασκηθεί μια πολύ μεγάλη εξωτερική εφελκυστική δύναμη έτσι ώστε η απόσταση ισορροπίας να αυξηθεί μέχρι το σημείο c στην Εικ. 2.4β, το υλικό θα αστοχήσει αφού το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη δύναμη συνοχής του υλικού. Η κλασματική αλλαγή $\Delta r/r_0$ στην καμπύλη είναι ακόμη αρκετά μικρή όσον αφορά στο σημείο c. Επομένως το υλικό θα έχει αστοχήσει μετά από μια μικρή ελαστική επιμήκυνση. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται στα ψαθυρά υλικά όπως οι κρύσταλλοι καθαρού πυριτίου ή γερμανίου. Τα περισσότερα μέταλλα, καθώς και πολλά άλλα υλικά, μπορούν να επιμηκύνονται σημαντικά (μέχρι και 60% στην περίπτωση του χαλκού)

πριν αστοχήσουν. Επιπλέον, αυτά τα υλικά δεν επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά την εφαρμογή μεγάλων δυνάμεων. Είναι προφανές ότι η απλή θεώρηση που βασίζεται στις διατομικές δυνάμεις συνοχής δεν επαρκεί ώστε να ερμηνευτούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Στην πραγματικότητα οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά από τις ατέλειες που υπάρχουν στην κρυσταλλική δομή των υλικών και επομένως πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η φύση και η επίδρασή τους.

2.3.2 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Στη φύση είναι πρακτικά ανύπαρκτες οι περιπτώσεις που η δομή κάποιου κρυσταλλικού υλικού να είναι τέλεια. Με άλλα λόγια όλοι οι κρύσταλλοι και όλα τα κρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά υλικά παρουσιάζουν ατέλειες, οι οποίες “επιβάλλονται” από την ίδια τη φύση που προτιμάει ατελείς παρά τέλειους κρυστάλλους [46, 47]. Οι ατέλειες διακόπτουν την κανονικότητα του κρυσταλλικού πλέγματος και σύμφωνα με τη γεωμετρία και τη μορφή τους διαιρούνται σε τέσσερις κατηγορίες:

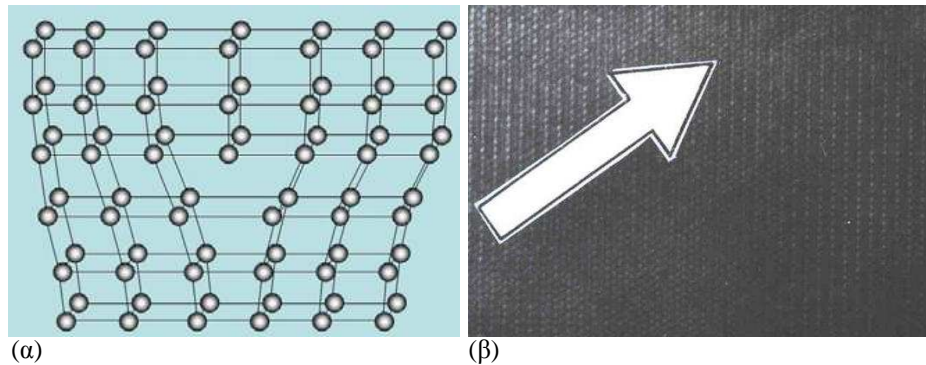
- Ατέλειες μηδενικής διάστασης ή σημειακές ατέλειες.
Πλεγματικά κενά, ένθετα άτομα παρεμβολής και αντικατάστασης, ατέλειες Frenkel και Schottky.
- Ατέλειες μίας διάστασης ή γραμμικές ατέλειες (διαταραχές).
Διαταραχές ακμής, έλικα και μικτές.
- Ατέλειες δύο διαστάσεων ή επίπεδες ατέλειες.
Όρια κόκκων, διδυμίες, σφάλματα επιστοίβασης.
- Ατέλειες τριών διαστάσεων.
Πόροι, ρωγμές, ακαθαρσίες (εγκλείσματα), κατακρημνίσματα [47].

Οι γραμμικές ατέλειες (Εικ. 2.5) αφορούν τη διατάραξη μερικών ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος κατά μήκος μιας γραμμής. Συνήθως αποκαλούνται διαταραχές. Δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ή της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού ή λόγω των θερμικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη γρήγορη ψύξη του. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι διαταραχών, οι διαταραχές ακμής και οι διαταραχές κοιλία ή ελικοειδείς διαταραχές. Αρκετά κοινές είναι και οι μεικτές διαταραχές, οι οποίες συνδυάζουν στοιχεία και από τους δυο τύπους [47].

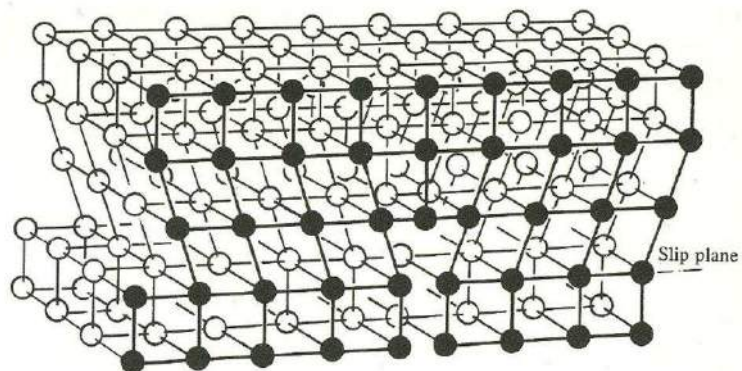
Ένα επιπλέον ημι-επίπεδο ατόμων που εισέρχεται μεταξύ των παράλληλων επιπέδων που σχηματίζουν τα άτομα σε έναν φυσιολογικό κρύσταλλο μπορεί εύκολα να στρεβλώσει το κρυσταλλικό πλέγμα (Εικ. 2.6). Αυτό καλείται γραμμική διαταραχή ή διαταραχή ακμής (edge dislocation) και μπορεί να μετακινηθεί μέσα στον κρύσταλλο προκαλώντας ολίσθηση υπό μία διατμητική δύναμη μικρότερη από αυτή που θα απαιτούνταν για να προκληθεί ολίσθηση ενός ολόκληρου επιπέδου ως προς ένα άλλο.

Μια γενική μορφή αυτού φαίνεται στην Εικ. 2.7. Αρχικά τα άτομα των επιπέδων που βρίσκονται πλησίον της γραμμικής διαταραχής βρίσκονται σε κατάσταση παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα στην Εικ. 2.7, τα ζεύγη 1-2 και 3-4 απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από τη φυσιολογική τους απόσταση ισορροπίας κι έτσι έχουν

αποθηκευμένη μία συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης. Όταν εφαρμοστεί η διατμητική τάση, τ , το 1 μετατοπίζεται σε μια νέα θέση, 1', μειώνοντας την ενέργεια παραμόρφωσης μεταξύ του 1 και του 2. Το άτομο 5 θα μετακινηθεί στο 5' πλησιάζοντας περισσότερο στο 4 δηλ. στην κανονική διατομική απόσταση ισορροπίας από το 4, ενώ το 3 μετακινούμενο στο 3' απομακρύνεται από το 4 αυξάνοντας την ενέργεια παραμόρφωσης. Η αύξηση αυτή αντισταθμίζεται από το άτομο 3 που γίνεται τώρα άτομο της διαταραχής ακμής, ενώ τα 1-2 και 5-4 γίνονται ζεύγη σε γειτονικά επίπεδα. Έτσι, η εξάρμωση έχει μετακινηθεί υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης κατά μία θέση στο πλέγμα προς τα δεξιά. Αν η μετατόπιση συνεχιστεί το τελικό αποτέλεσμα θα είναι η ολίσθηση ολόκληρου του επιπέδου που περιλαμβάνει τη γραμμική διαταραχή (Εικ. 2.8). Ας σημειωθεί ότι το επίπεδο της διαταραχής ακμής και η κατεύθυνση της κίνησής της είναι κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης [45].



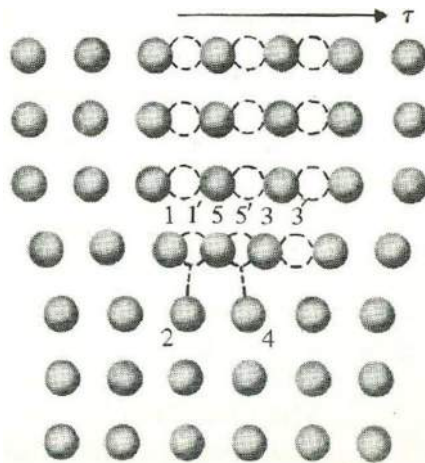
Εικ. 2.5: (α) Σχηματική παράσταση μιας τυπικής περίπτωσης γραμμικής ατέλειας σε κρύσταλλο. (β) Η γραμμική ατέλεια όπως προσδιορίζεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης υψηλής διακριτικής ικανότητας [46].



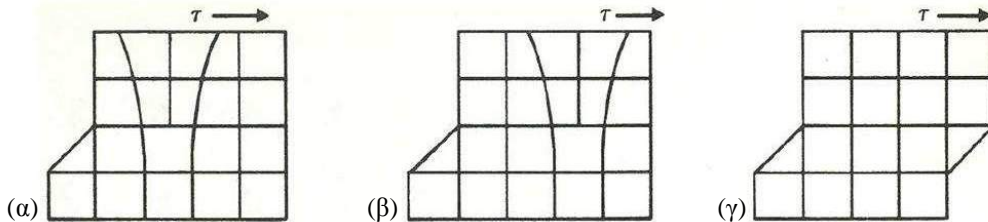
Εικ. 2.6: Μια διαταραχή ακμής [45].

Ένας δεύτερος τύπος διαταραχής είναι η ελικοειδής διαταραχή ή διαταραχή κοχλία (screw dislocation), Εικ. 2.9 [45]. Οφείλει το όνομά της στην ελικοειδή διαδρομή που σχηματίζεται γύρω από τη γραμμική διαταραχή από τα επίπεδα των ατόμων στον κρύσταλλο [47]. Στην περίπτωση αυτή τα άτομα μετατοπίζονται σε δύο διαφορετικά επίπεδα που είναι κάθετα μεταξύ τους [45]. Υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης η διαταραχή μετατοπίζεται εντός του επιπέδου ολίσθησης αλλά η κατεύθυνση της κίνησής της είναι κάθετη στη κατεύθυνση ολίσθησης. Οι δύο τύποι διαταραχής (γραμμική και ελικοειδής διαταραχή) συγκρίνονται στην Εικ. 2.10.

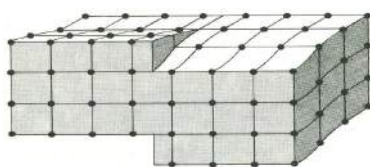
Γενικά οι διαταραχές είναι πιο σύνθετες από τις προαναφερθείσες αλλά πάντα μπορούν να αναλυθούν στους δύο προηγούμενους τύπους [45,47].



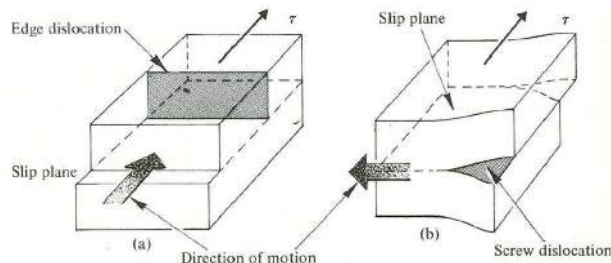
Εικ. 2.7: Κίνηση των ατόμων γύρω από μια διαταραχή ακμής, όταν επιβάλλεται διατμητική τάση [45].



Εικ. 2.8: Η εξέλιξη μιας διαταραχής ακμής μέσω ενός κρυστάλλου και η ολίσθηση που προκαλείται [45].



Εικ. 2.9: Μια διαταραχή κοχλία [45].



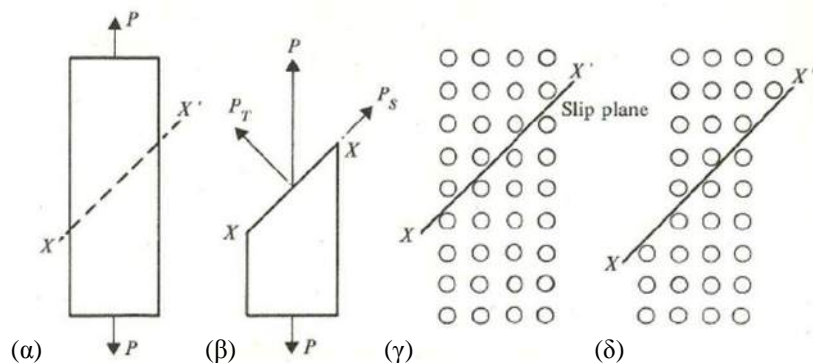
Εικ. 2.10: Οι κατευθύνσεις ολίσθησης και κίνησης μιας (α) γραμμικής διαταραχής και (β) μιας διαταραχής κοχλία [45].

2.3.3 ΕΠΙΠΕΔΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ [45]

Μελετώντας σε ατομικό επίπεδο την αντοχή των υλικών, απαιτούνται πολύ μεγάλες δυνάμεις για την απομάκρυνση των ατόμων και την αστοχία του υλικού. Συχνά σε έναν πραγματικό τρισδιάστατο κρύσταλλο δεν είναι απαραίτητη η υπέρβαση των δυνάμεων συνοχής για να προκληθεί αλλαγή στο σχήμα του, δηλ. πλαστική ροή.

Ας θεωρηθεί ένα δοκίμιο που υπόκειται σε εφελκυσμό, Εικ. 2.11α. Αν το δοκίμιο χωριστεί σε δύο μέρη κατά τη γραμμή xx' και εφαρμοστεί σε αυτό εφελκυστική δύναμη, P , αυτή μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, P_S και P_T (Εικ. 2.11β). Η P_S είναι μια διατμητική δύναμη στο επίπεδο xx' ενώ η P_T είναι μία εφελκυστική συνιστώσα που ασκείται κάθετα στο επίπεδο xx' . Επομένως, ακόμη και μία απλή εφελκυστική δύναμη δημιουργεί διατμητικές τάσεις στο δοκίμιο. Ας θεωρηθεί τώρα το δοκίμιο ως ένα πλήθος σφαιρικών ατόμων σε πυκνή διάταξη (Εικ. 2.11γ). Στην κατεύθυνση xx' τα άτομα βρίσκονται σε επίπεδα πυκνής διάταξης κι έτσι είναι σχετικά εύκολο ένα από αυτά τα επίπεδα να ολισθήσει ως προς το άλλο υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης. Αυτό ονομάζεται ολίσθηση και το επίπεδο xx' επίπεδο ολίσθησης. Καθώς ένα επίπεδο ατόμων ολισθαίνει ως προς το άλλο, τα άτομα των γειτονικών επιπέδων προφανώς μετακινούνται σε νέες θέσεις πυκνής διάταξης (Εικ. 2.11δ). Η ενέργεια ή η δύναμη που απαιτείται γι' αυτό είναι προφανώς μικρότερη από αυτή που απαιτείται για τη διάρρηξη των ατομικών δεσμών. Γενικά, όπου η κρυσταλλική δομή ενός υλικού είναι τέτοια που να ευνοεί - επιτρέπει έναν αριθμό επιπέδων ολίσθησης, ο κρύσταλλος αυτός θα είναι πιο ασθενής σε διάτμηση απ' ότι σε εφελκυσμό και επομένως θα διαρρέει από ολίσθηση με πλαστική ροή.

Η ολίσθηση γενικά παρατηρείται σε επίπεδα συμπαγούς δομής και αυτό επιτρέπει έναν πρόχειρο τρόπο εκτίμησης της ολκιμότητας κάθε κρυστάλλου.

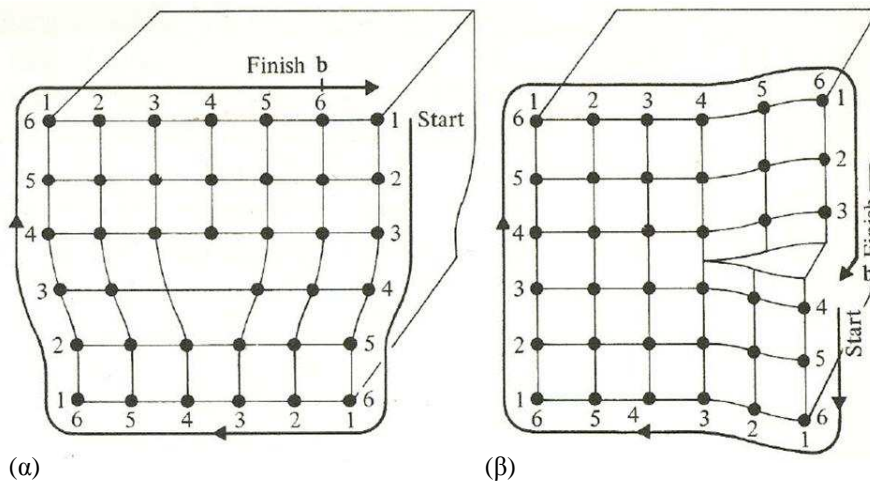


Εικ. 2.11: Ανάλυση της εφελκυστικής τάσης και παραμόρφωσης [45].

2.3.4 ΔΙΑΝΥΣΜΑ BURGERS [45]

Το μέτρο και η διεύθυνση της ολίσθησης που σχετίζεται με κάποια διαταραχή δίνονται από το διάνυσμα Burgers, \mathbf{b} . Αν κινηθούμε στην περίμετρο μιας διαταραχής, Εικ. 2.12, και απαιτήσουμε κάθε παράλληλο ζεύγος “ποδιών” της περιμέτρου να πε-

ριλαμβάνει τον ίδιο αριθμό ατόμων, τότε η διαδρομή αυτή δεν μπορεί να “κλείσει” λόγω του διάνυσματος Burgers. Βάσει του σχεδιαγράμματος, η κατεύθυνση του διάνυσματος είναι ίδια με την κατεύθυνση της ολίσθησης που προκαλείται από τη μετακίνηση της διαταραχής. Θεωρώντας την περίμετρο του Burgers σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού και από τα μη ολισθαίνοντα προς τα ολισθαίνοντα τμήματα του κρυστάλλου, η φορά αυτή θεωρείται θετική για το διάνυσμα Burgers. Αφού το πλέγμα για μια τέλεια διαταραχή πρέπει να είναι σε συμφωνία με τα ολισθαίνοντα και τα μη ολισθαίνοντα όρια, το διάνυσμα Burgers θα είναι πάντα ένας ακέραιος αριθμός της χωροθέτησης των ατόμων για μια τέτοια διαταραχή.



Εικ. 2.12: Η “διαδρομή” Burgers που ορίζει το διάνυσμα Burgers για μια (α) γραμμική διαταραχή και (β) ελικοειδή διαταραχή [45].

2.3.5 “ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ” (CLIMB) [45]

Η κίνηση μιας διαταραχής κατά μήκος ενός επιπέδου ολίσθησης συνήθως ονομάζεται “ολίσθηση” (glide) και η ολίσθηση αυτή μπορεί να σταματήσει λόγω ποικίλων εμποδίων. Συγκεκριμένα, τα όρια ενός κόκκου όπου τα άτομα δεν βρίσκονται στην κανονική τους διάταξη, θα σταματήσουν τη μετακίνηση της διαταραχής. Μία διαταραχή ακμής μπορεί να μετακινηθεί εντός του δικού της επιπέδου, κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης, αν άτομα ή κενά (θέσεις όπου απουσιάζουν άτομα) μπορούν να διαχυθούν στον κρύσταλλο. Αν μία γραμμή από άτομα μπορεί να μετακινηθεί στο επίπεδο της γραμμικής διαταραχής και προστεθούν στο άκρο του πρόσθετου ημι-επιπέδου τότε η διστοπία θα έχει μετακινηθεί καθοδικά κατά μία θέση στο πλέγμα εντός του επιπέδου ολίσθησης. Όμοια, αν μια γραμμή από κενά μπορεί να μετακινηθεί στο τέλος του ημι-επιπέδου, η γραμμική διαταραχή θα μετακινηθεί ανοδικά κατά μία θέση στο πλέγμα εντός του επιπέδου ολίσθησης. Αυτό ονομάζεται “υπερπήδη-

ση” διαταραχής και με τον τρόπο αυτό ξεπερνιέται ένα εμπόδιο που εμφανίζεται στο επίπεδο ολίσθησης έτσι ώστε η διαταραχή να υπερπηδά σε ένα άλλο επίπεδο και να συνεχίζει να ολισθαίνει. Αυτό ενισχύεται από τις υψηλές θερμοκρασίες που αυξάνουν την ταχύτητα του ρυθμού διάχυσης των διαμέσων ατόμων και των κενών.

2.3.6 “ΩΘΗΣΕΙΣ” (JOGS) [45]

Η “υπερπήδηση” της διαταραχής (ενότητα 2.3.5) απαιτεί μία πλήρη γραμμή ατόμων να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από τη γραμμική διαταραχή καθ’ όλο το μήκος της. Αυτό μπορεί να μην συμβεί και το πρόσθετο ημι-επίπεδο να υπερβαίνει ή να υπολείπεται μόνο κατά ένα μέρος του μήκους του. Στην περίπτωση αυτή η διαταραχή θα πραγματοποιηθεί σε δύο επίπεδα ολίσθησης ταυτόχρονα. Το σημείο στο οποίο περνά από το ένα επίπεδο ολίσθησης στο άλλο ονομάζεται “ώθηση” διαταραχής (dislocation jog).

Ενώ είναι πιο δύσκολο να το φανταστούμε, μία διαταραχή κοχλία μπορεί επίσης να εμφανίζει “ωθήσεις”. Η διαφορά είναι ότι η κατεύθυνση ολίσθησης μιας διαταραχής κοχλία ταυτίζεται με τη γραμμή της διαταραχής. Η “ώθηση” μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μικρό τμήμα μιας γραμμικής διαταραχής που εισέρχεται στην ελικοειδή διαταραχή. Παρ’ όλα αυτά μία διαταραχή κοχλία με “ωθήσεις” μπορεί να συνεχίσει να κινείται στο επίπεδο ολίσθησης και να μεταφέρει την “ώθηση” κατά μήκος της. Η γραμμική διαταραχή δεν μπορεί να κινηθεί προς την ίδια κατεύθυνση με την διαταραχή κοχλία, χωρίς άτομα να διαχυθούν σε αυτή ώστε να μεγαλώσουν το ημι-επίπεδο κι έτσι να μετακινείται αφήνοντας πίσω της ίχνη από κενά.

Η ύπαρξη “ωθήσεων” καθιστά τις διαταραχές λιγότερο εύκολες να κινηθούν. Το έργο που απαιτείται για να κινηθεί μία διαταραχή με “ωθήσεις” είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με αυτό που απαιτείται για την κίνηση μιας μίας διαταραχής χωρίς ωθήσεις.

2.3.7 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΕΞΑΡΜΩΣΕΩΝ (MOVING CHARGED DISLOCATIONS - MCD MODEL)

Η συγκεκριμένη θεωρία διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τους Vallianatos and Tzanis [48] και στηρίζεται σε πειραματικά δεδομένα από δοκιμές γεωυλικών. Όταν οι εξαρμώσεις κινούνται, η ηλεκτρική ουδετερότητα μεταβάλλεται. Στην περίπτωση μιας μονοαξονικής θλίψης (ή εφελκυσμού), αν Λ^+ είναι η πυκνότητα των θετικά φορτισμένων γραμμικών εξαρμώσεων και Λ^- είναι η πυκνότητα των αρνητικά φορτισμένων εξαρμώσεων, η κίνησή τους προκαλεί μία εγκάρσια πόλωση P [49]:

$$P = (\Lambda^+ - \Lambda^-) \cdot q_1 \cdot \frac{\delta x}{\sqrt{2}} = \delta\Lambda \cdot q_1 \cdot \frac{\delta x}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

όπου q_1 είναι το φορτίο ανά μονάδα μήκους της εξάρμωσης (της τάξης 10^{-11} Cb/m). Αν αγνοηθούν οι ελικοειδείς εξαρμώσεις, όταν οι εξαρμώσεις με διάνυσμα Burgers \mathbf{b} κινηθούν κατά μία απόσταση δx , η πλαστική παραμόρφωση είναι:

$$\varepsilon = (\Lambda^+ + \Lambda^-) \cdot \vec{b} \cdot \frac{\delta x}{2} \quad (12)$$

Ο ρυθμός αλλαγής της πολικότητας είναι εξ ορισμού ισοδύναμος με την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Από τις εξισώσεις (11) και (12) εύκολα προκύπτει ότι:

$$J = \frac{\partial P}{\partial t} \Rightarrow J = \frac{\sqrt{2}}{\beta} \cdot \frac{q_1}{b} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (13)$$

και επομένως το ηλεκτρικό ρεύμα είναι:

$$I = \frac{\sqrt{2}}{\beta} \cdot \frac{q_1}{b} \cdot \frac{A}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \Rightarrow I = \gamma \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (14)$$

όπου $\beta = \frac{\Lambda^+ + \Lambda^-}{\Lambda^+ - \Lambda^-}$ είναι μία σταθερά, \mathbf{b} το διάνυσμα Burgers, A το εμβαδό του ηλεκτροδίου, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και γ ένας συντελεστής αναλογίας που εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

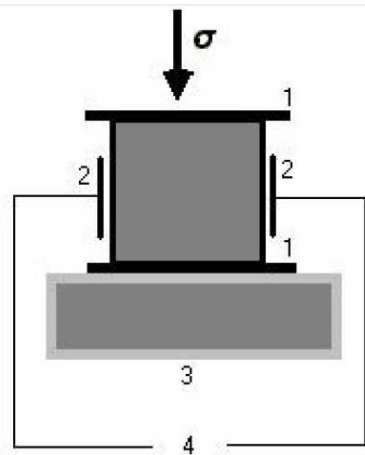
2.3.8 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ PSC ΤΕΧΝΙΚΗΣ

Η εφαρμογή μηχανικής τάσης σε ψαθυρά μη μεταλλικά υλικά προκαλεί διαταραχή της ηλεκτρικής τους ισορροπίας, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί μετρώντας ηλεκτρικά σήματα [50-52]. Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις σε μία προσπάθεια να ερμηνευτούν τα αίτια και οι μηχανισμοί γένεσης τέτοιων ηλεκτρικών εκπομπών. Στην περίπτωση μη πιεζοηλεκτρικών υλικών, χαμηλής φυσικής ενυδάτωσης υλικά με μικρό πορώδες η δημιουργία μικρορωγμών διαταράσσει τις τοπικές πολικότητες στον όγκο του υλικού οδηγώντας στη γέννηση ηλεκτρικού ρεύματος [52,53].

Πρόσφατα αναπτύχθηκε μια ενδιαφέρουσα εργαστηριακή τεχνική ανάδειξης τέτοιων ηλεκτρικών εκπομπών που καθιερώθηκε με τον όρο “Pressure Stimulated Currents” (PSC) [54]. Η τεχνική αυτή (PSC technique) συνίσταται στην καταγραφή ασθενούς ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια ενός ευαίσθητου ηλεκτρομέτρου (μέτρηση της τάξης των pA) και ως αισθητήρας ανίχνευσης του ασθενούς αυτού ρεύματος χρησιμοποιείται ένα ζεύγος επίχρυσων ηλεκτροδίων.

Στην περίπτωση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης τα ηλεκτρόδια προσαρμόζονται στις δύο αντικριστές πλευρικές επιφάνειες του δοκιμίου (Εικ. 2.13). Η τεχνική των ηλεκτρικών σημάτων έχει εφαρμοστεί μέχρι σήμερα κατά τη διάρκεια δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια λίθων, κυρίως μαρμάρου [55-59], αλλά και σε άλλα

π.χ. αμιφβολίτη [60], ενώ ενδιαφέρουσα είναι και η εφαρμογή της μεθόδου σε υλικά με βάση το τσιμέντο [61,62]. Χαρακτηριστικό των PSC σημάτων (το οποίο έχει επιβεβαιωθεί από σειρά πειραμάτων) είναι ότι αρχίζουν να αναδεικνύονται, όταν η εφαρμοζόμενη θλιπτική τάση ξεπεράσει την τάση διαρροής του υλικού οπότε αρχίζουν να ενεργοποιούνται εσωτερικές διεργασίες (π.χ. δημιουργία μικρορωγμών). Επιπρόσθετα, αρκετά ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι εμφανίζεται μια τάση “κορύφωσης” όταν το υλικό προετοιμάζεται να αστοχήσει.



Εικ. 2.13: Η θέση προσαρμογής των ηλεκτροδίων πάνω σε ένα δοκίμιο που υποβάλλεται σε μονοαξονική τάση για τη μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος [55].

1. Teflon sheet
2. Electrodes
3. Steel base
4. Leads to electrometer

Η εφαρμογή διαδοχικών κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης, με τη μέγιστη επιβαλλόμενη τάση να διατηρείται σταθερή σε κάθε κύκλο, έδειξε ότι το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα βαίνει διαρκώς εκθετικά μειούμενο [54,58,60]. Στην περίπτωση που η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται από κύκλο σε κύκλο, παραμένει να επαληθευτεί πειραματικά ότι το PSC σήμα δεν εμφανίζεται όσο η τάση δεν υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή του προηγούμενου κύκλου. Συνεπώς, το γνωστό φαινόμενο Kaiser που συναντάται στις ακουστικές εκπομπές (AE), που συνήθως ορίζεται ως η μη αναπαραγωγή της AE για καταπονήσεις κατώτερες της προηγούμενης μέγιστης στάθμης καταπόνησης και σημαντικής αύξησης του ρυθμού “hits” όταν η στάθμη αυτή ξεπεραστεί, φαίνεται να επαληθεύεται και για τις PSC εκπομπές.

Τέλος, η PSC τεχνική έχει εφαρμοστεί με ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε πρισματικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος [61,63] και μαρμάρου [64] που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση τους. Σε αυτού του είδους τις δοκιμές η ανίχνευση των ασθενών ηλεκτρικών ρευμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια δυο ζευγών ηλεκτροδίων: ένα ζεύγος στην εφελκυστική και ένα στη θλιβόμενη ζώνη του δοκιμίου [61].

2.4 ΜΕΛΕΤΕΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΑΝΑΦΕΡΘΕΙΣΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Τα τελευταία χρόνια οι ανωτέρω πειραματικές τεχνικές έχουν αρχίσει και εφαρμόζονται συνδυαστικά τόσο σε μεταλλικά υλικά όσο και σε σκυρόδεμα και λίθους. Ενδεικτικά, αναφέρεται για τα μέταλλα η μελέτη των A. V. Byakov et al. [65] που χρησιμοποίησαν την τεχνική της ακουστικής εκπομπής και της συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (DIC) σε δοκίμια κράματος AA2024 καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η τεχνική της ακουστικής εκπομπής είναι πιο ευαίσθητη στην ανίχνευση των παραμορφώσεων από το μικρο- στη μεσο-επίπεδο ενώ η τεχνική DIC “αναγνωρίζει” καλύτερα τις παραμορφώσεις από το μεσο- στο μακρο-επίπεδο. Οι δύο αυτές τεχνικές (AE και DIC) χρησιμοποιήθηκαν επίσης κατά τις δοκιμές κάμψης σε δοκίμια σκυροδέματος [66]. Οι ακουστικές εκπομπές προσδιόρισαν το φορτίο εκκίνησης της ρηγμάτωσης ενώ η τεχνική DIC λειτούργησε βοηθητικά όσον αφορά στη συσχέτιση των ακουστικών παραμέτρων με συγκεκριμένους μηχανισμούς αστοχίας. Την ίδια χρονιά οι S. Rouchier [67] υπέβαλαν σε εφελκυσμό δοκίμια ινοπλισμένου κονιάματος, στα οποία είχαν διαμορφωθεί εγκοπές. Με τη βοήθεια της τεχνικής DIC προσδιορίστηκε το εμβαδό της επιφάνειας θραύσης που αντιστοιχούσε στις ρηγματώσεις της επιφάνειας και στη συνέχεια απεικονίστηκε συναρτήσει του αριθμού των ακουστικών γεγονότων. Η συσχέτισή τους ήταν αρκετά ικανοποιητική, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την τελείως διαφορετική φύση των δύο τεχνικών, υποδηλώνοντας έτσι τη σχέση των παραγόμενων ακουστικών γεγονότων με τη συνολική επιφάνεια των ρηγματώσεων, δηλ. με άλλα λόγια με την έκταση της θραύσης.

Ένας άλλος συνδυασμός των τεχνικών για τις οποίες γίνεται λόγος στο παρόν κεφάλαιο, αυτή της ακουστικής εκπομπής και αυτή των ηλεκτρικών σημάτων (PSC) έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη δοκιμίων κονιάματος καθώς και σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου. Όσον αφορά στα κονιάματα, υλοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια [63,68,69]. Οι δύο τεχνικές (παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και αριθμός ακουστικών εκπομπών) εμφάνισαν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ τους. Οι “κορυφές” (μέγιστα) που παρουσίασε η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος καταγράφηκαν όταν οι ακουστικές εκπομπές είχαν μεγάλο πλάτος, υψηλή ενέργεια και όταν ο ρυθμός παραγωγής τους ήταν μεγάλος. Η συσχέτιση μεταξύ των ηλεκτρικών και των ακουστικών εκπομπών υπάρχει και στην περίπτωση του μαρμάρου Διονύσου, όπως αποδείχθηκε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης [70,71].

Το μάρμαρο Διονύσου μελετήθηκε υπό εφελκυσμό και κάμψη τριών σημείων και στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής με τη χρήση όλων των προαναφερθεισών πειραματικών τεχνικών (ακουστικής εκπομπής, ηλεκτρικών σημάτων και συσχέτισης ψηφιακής εικόνας). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί (ενότητα 3.2.2) και είναι άκρως ενθαρρυντικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΥΘΕΝΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

3.1 ΑΥΘΕΝΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΑΡΘΕΝΩΝΑ

3.1.1 ΜΑΡΜΑΡΟ ΠΕΝΤΕΛΗΣ

Το μάρμαρο της Πεντέλης προέρχεται από μεταμόρφωση ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου [5]. Το ειδικό του βάρος είναι 2.72 g/cm^3 , έχει συντελεστή θερμικής διαστολής $11 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ και το πορώδες του, πολύ χαμηλό, κυμαίνεται από 0.3 σε παρθενική κατάσταση έως 2.1 όταν είναι διαβρωμένο. Το χρώμα του μαρμάρου της Πεντέλης είναι λευκό [72], όταν όμως εκτεθεί στην ατμόσφαιρα με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται μια χρωματική αλλοίωση που οφείλεται στις προσμίξεις υδροξειδίων και οξειδίων του σιδήρου που υπάρχουν σ' αυτό [73].

Η κρυσταλλική του δομή λόγω των συνθηκών μεταμόρφωσης του πετρώματος χαρακτηρίζεται από επάλληλες στρώσεις κρυστάλλων. Οι στρώσεις αυτές είναι πτυχωμένες κατά μία έννοια ενώ κατά την εγκάρσια έννοια είναι σχεδόν ευθυτενείς. Οι μηχανικές ιδιότητες και ιδίως η σκληρότητα του μαρμάρου της Πεντέλης διαφέρουν στις τρεις διευθύνσεις του πετρώματος. Επιφάνειες παράλληλες στις στρώσεις είναι λιγότερο σκληρές, επιφάνειες εγκάρσιες στις στρώσεις και παράλληλες προς τις πτυχώσεις είναι περισσότερο σκληρές, και επιφάνειες εγκάρσιες στις στρώσεις και κάθετες στις πτυχώσεις είναι πολύ περισσότερο σκληρές [5].

Το 1976 ο Καθηγητής Π. Σ. Θεοχάρης προσδιόρισε τη θλιπτική αντοχή του μαρμάρου της Πεντέλης (μέση τιμή ίση με 77.8 MPa) πραγματοποιώντας στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π. τρεις (3) δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πρισματικά (με διαστάσεις $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$) από άμορφο αρχαίο θραύσμα. Αργότερα, το 1983 ο Κ. Ζάμπας μελέτησε σαράντα τρία (43) πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$ που έδωσαν μέση τιμή θλιπτικής αντοχής ίση με 58.5 MPa. Η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο διαφορετικό μέγεθος των δοκιμίων που ελέγχθηκαν καθώς επίσης και στην ανομοιογένεια και την ανισοτροπία του μαρμάρου.

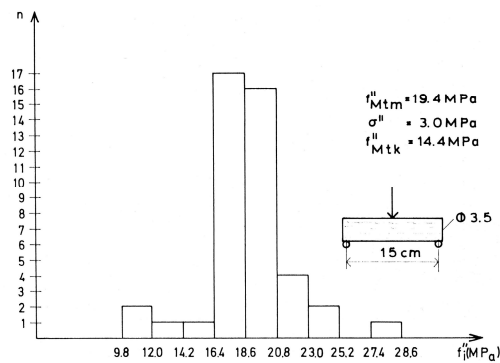
Επίσης, το 1976 ο Π. Σ. Θεοχάρης υπέβαλε σε κάμψη τριών σημείων τρία (3) πρισματικά δοκίμια ($2 \times 2 \times 26 \text{ cm}^3$) που έδωσαν μέση τιμή εφελκυστικής αντοχής του

μαρμάρου ίση με 18.4 MPa. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Ε.Μ.Π.. Σε κάμψη τριών σημείων υπέβαλε επίσης το 1989 ο Κ. Ζάμπας εξήντα οκτώ (68) κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 3.5 \times 15$ cm, στα Εργαστήρια του Έργου Αποκατάστασης του Παρθενώνα και η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής που προσδιορίστηκε ήταν ίση με 19.4 ± 3.0 MPa (στρώσεις μαρμάρου κάθετες στη φόρτιση) και 13.1 ± 2.7 MPa (στρώσεις παράλληλες στη φόρτιση). Ας υπενθυμιστεί στο σημείο αυτό ότι η κάμψη “υπερεκτιμά” την εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από δοκιμές άμεσου εφελκυσμού [74].

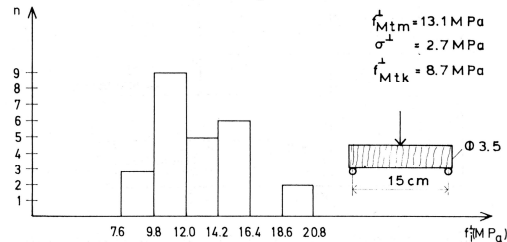
Στις Εικ. 3.1, 3.2 απεικονίζονται με τη μορφή ιστογραμμάτων οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής (όπως προέκυψαν από τις δοκιμές κάμψης του Κ. Ζάμπια) για τις περιπτώσεις που οι στρώσεις είναι ύπιες ή όρθιες, αντίστοιχα. Στις ίδιες εικόνες φαίνονται επίσης η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής για κάθε περίπτωση.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, E , του μαρμάρου της Πεντέλης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. τρεις (3) δοκιμές κάμψης τριών σημείων με δοκούς μεγάλου μεγέθους. Τα δοκίμια ήταν πρισματικά ($19.0 \times 16.5 \times 80.0$ cm³) με όρθιες στρώσεις (παράλληλα στη φόρτιση) (Εικ. 3.3) και έδωσαν μέση τιμή $E=23$ GPa.

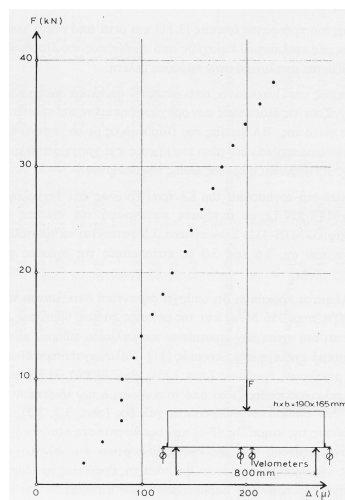
Τέλος, δοκιμές θλίψης από τον Θ. Τάσσιο (1984) σε κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 10 \times 10$ cm έδωσαν μέση τιμή για το συντελεστή Poisson του μαρμάρου της Πεντέλης $\nu=0.35$ [6].



Εικ. 3.1: Ιστόγραμμα εφελκυστικής αντοχής δοκιμών με κρυσταλλικό ιστό κατά μήκος του δοκιμίου [6].



Εικ. 3.2: Ιστόγραμμα εφελκυστικής αντοχής δοκιμών με κρυσταλλικό ιστό εγκάρσιο στο μήκος τους [6].



Εικ. 3.3: Διάγραμμα μέσων τιμών δυνάμεων - βυθίσεων σε τρεις (3) καμπτικές δοκιμές [6].

3.1.2 ΜΟΛΥΒΔΟΣ

Οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποίησαν μολύβδο, ο οποίος μέσα από μια ειδική διαδικασία (μολυβδοχόηση) χυτεύονταν γύρω από το συνδετήριο στοιχείο. Ο μολύβδος έχει τριπλό ρόλο: 1) Επιφέρει πλήρη φυσική και μερική μηχανική συνέχεια μεταξύ του συνδετηρίου στοιχείου και του λίθου, που εν ξηρώ θα ήταν αδύνατη λόγω της ανελαστικότητας του λίθου, 2) Απορροφά, ως μαλακότερο και παραμορφώσιμο υλικό, ένα μέρος από τους κραδασμούς και την ενέργεια που θα ανέπτυξε ένας σεισμός πάνω στις συνδέσεις, 3) Απομονώνει το σιδήρο από το περιβάλλον και τον προστατεύει από την οξείδωση. Αν υπάρξει διάβρωση, ο μολύβδος εξουδετερώνει τις μηχανικές τάσεις από τη διόγκωση του χάλυβα παρεμποδίζοντας τη ρηγμάτωση του περιβάλλοντος μαρμάρου.

Όσον αφορά τον ευεργετικό ρόλο του μολύβδου στην απορρόφηση ενέργειας, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα παραμόρφωσης του υλικού. Όμως, η πολύ καλή εφαρμογή και ο εγκιβωτισμός του μολύβδου σε εντορμίες σε συνδυασμό με την παρουσία υπερκείμενων μελών που δεν επιτρέπουν τη διόγκωσή του, συνεπάγονται την αδυναμία παραμόρφωσης του μολύβδου. Ο μολύβδος δεν παραμορφώνεται, αφού δεν υπάρχει χώρος, κατά συνέπεια τελεί υπό τριαξονικό περιορισμό παραμορφώσεων. Θεωρητικά, λοιπόν, όχι μόνο δεν απορροφά αλλά αντίθετα μεταφέρει αυτούσια την πίεση που εξασκεί το συνδετήριο στα τοιχώματα της εντορμίας. Βέβαια, αν η εφαρμογή του μολύβδου επιτρέπει την ύπαρξη μικρών κενών, τότε πράγματι υπάρχει μια περιορισμένη δυνατότητα παραμόρφωσης [7].

Επιπρόσθετα, ας σημειωθεί ότι ο μολύβδος ως υλικό αντέχει στη διάβρωση γιατί τα οξείδια που δημιουργούνται, PbO , Pb_3O_4 , Pb_2O_3 και PbO_2 , τον παθητικοποιούν. Ωστόσο, η όξινη βροχή διαλύει τα οξείδια αυτά και προωθεί τη διάβρωσή του, σχηματίζοντας το διαλυτό $Pb(NO_3)_2$, και έτσι προχωρεί και η διάβρωση του χάλυβα. Για το λόγο αυτό στις εργασίες αποκατάστασης στην Ακρόπολη δεν χρησιμοποιείται σήμερα το σύστημα χάλυβας-μολύβδος [4,5,73].

3.1.3 ΑΡΧΑΙΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΙΔΗΡΟΣ

Η εξέταση του αρχαίου δομικού σιδήρου από μεταλλουργική άποψη [75-77] έχει αποδείξει ότι δεν είναι ένα ομογενές και ισότροπο υλικό. Οι σύνδεσμοι και οι γόμφοι των συνδέσεων αποτελούνται από στρώματα μαλακού καθαρού σιδήρου και σκληρού χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Από δυο συνδέσμους του Παρθενώνα απεκόπησαν επτά (7) δοκίμια έτσι ώστε από άποψη διαστάσεων να προσεγγίζουν τις διαστάσεις των βραχέων δοκιμίων του προτύπου ASTM E8-69. Οι δοκιμές εφελκυσμού [67] έγιναν στα εργαστήρια του Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογίας της Αεροπορίας (ΚΕΤΑ) σε μηχανή MTS-327.12 με αυτόματη καταγραφή της σχέσης φορτίου - ανηγμένης μήκυνσης με καταγραφικό MTS-431.

Στα διαγράμματα δύο δοκιμίων παρατηρήθηκαν απότομες πτώσεις της καμπύλης στην πλαστική περιοχή που αντιστοιχούν σε μικρορηγματώσεις ψαθυρών περιοχών των

δοκιμίων [12]. Τα πειράματα έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική διακύμανση των τιμών της τάσης διαρροής (min 218 MPa, max 356 MPa) και της μέγιστης τάσης θραύσης (min 335 MPa, max 538 MPa) που οφείλεται στη σχέση των στρωμάτων του μαλακού σιδήρου και σκληρού χάλυβα σε κάθε δοκίμιο και σε μικρά εγκλείσματα σκουριάς [77]. Οι μέσες τιμές της τάσης διαρροής και της τάσης θραύσης που προέκυψαν είναι $f_{sym} = 265$ MPa και $f_{stm} = 428$ MPa. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης των τιμών χρησιμοποιούνται σαν αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές οι: $f_{syk} = 200$ MPa και $f_{stk} = 360$ MPa [12]. Πολύ μεγαλύτερη είναι η διακύμανση των τιμών της ανηγμένης μήκυνσης θραύσης (min 3.5%, max 22.5%).

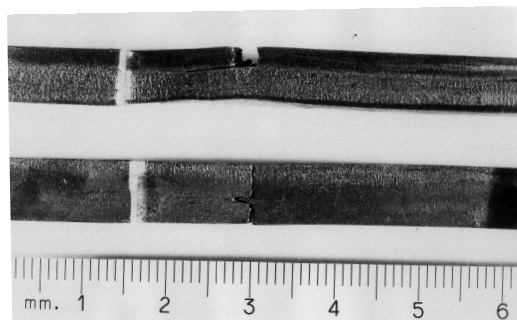
Η συμπεριφορά του αρχαίου δομικού σιδήρου σε εφελκυσμό καθορίζεται από το συνδυασμό των ιδιοτήτων της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των στρωμάτων σιδήρου και χάλυβα (Εικ. 3.4, 3.5). Κατά τη διάρκεια του πειράματος λαμβάνει χώρα σταδιακή αστοχία των χαλύβδινων στρώσεων και ανακατανομή του εφελκυστικού φορτίου στο σύνολο της διατομής. Πολύ χαρακτηριστική αυτής της συμπεριφοράς είναι η εικόνα θραύσης του δοκιμίου M1 (Εικ. 3.5) στο οποίο είναι εμφανής η σημαντική παραμόρφωση των στρωμάτων του μαλακού σιδήρου με εμφάνιση λαιμού [6].

Η φέρουσα ικανότητα και η παραμορφωσιμότητα των συνδέσμων είναι σημαντικά μικρότερα από αυτή που προκύπτει από τις δοκιμές των βραχέων δοκιμίων. Οι παράγοντες που τις επηρεάζουν είναι:

- Η αναλογία των στρωμάτων σιδήρου και χάλυβα.
- Η μέθοδος κατασκευής και ιδιαίτερα ο τρόπος συγκόλλησης των αναδιπλωμένων στρώσεων.
- Η παρουσία εγκλεισμάτων σκουριάς και τυχαίων ατελειών στην παραγωγή σιδήρου.
- Η κατάσταση διατήρησης του συνδέσμου [6].



Εικ. 3.4: Δοκίμια εφελκυσμού αρχαίου δομικού σιδήρου. Η σημαντική διαφορά στην παραμόρφωση θραύσης είναι εμφανής [6].



Εικ. 3.5: Λεπτομέρεια των δοκιμίων M1 (άνω) και B2 (κάτω) [6].

3.2 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ

3.2.1 ΜΑΡΜΑΡΟ ΔΙΟΝΥΣΟΥ

3.2.1.1 Μικροδομή και ανισοτροπία

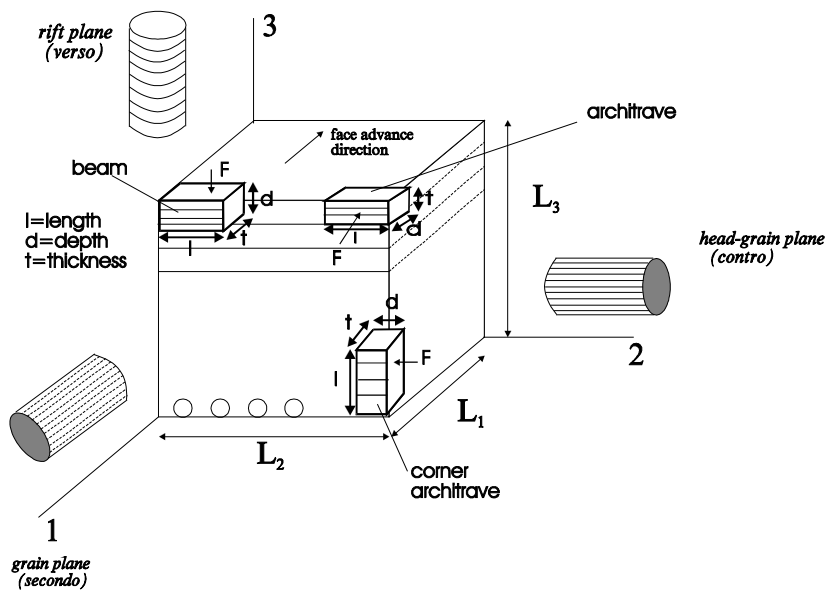
Το μάρμαρο Διονύσου αποτελείται κατά 98% από ασβεστίτη, 0.5% από μοσχοβίτη, 0.3% από σερισίτη, 0.2% από χαλαζία και 0.1% από χλωρίτη, έχει πυκνότητα 2.73 g/cm³, φαινόμενη πυκνότητα 2717 kg/m³ και συντελεστή απορρόφησης κατά βάρος περίπου 0.11. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ μεταξύ 15 °C και 100 °C. Το πορώδες, ιδιαίτερα χαμηλό, κυμαίνεται μεταξύ 0.3% στην παρθενική του κατάσταση και 0.7% μετά την επίδραση διαφόρων φυσικών ή και τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται γύρω στα 0.43×10^{-3} m. Οι κρύσταλλοί του έχουν πολυγωνικό σχήμα με διαστάσεις μεταξύ 900x650 μm και 950x874 μm, και είναι σχεδόν ομοιόμορφοι όσον αφορά τις διαστάσεις τους.

Εν γένει το χρώμα του είναι λευκό με λίγες στακτόχρωμες φλέβες κατά τη διεύθυνση της σχιστότητας του υλικού. Τοπικά εντοπίζονται ασημόχρωμες περιοχές λόγω της παρουσίας μικρών ποσοτήτων μοσχοβίτη και χλωρίτη.

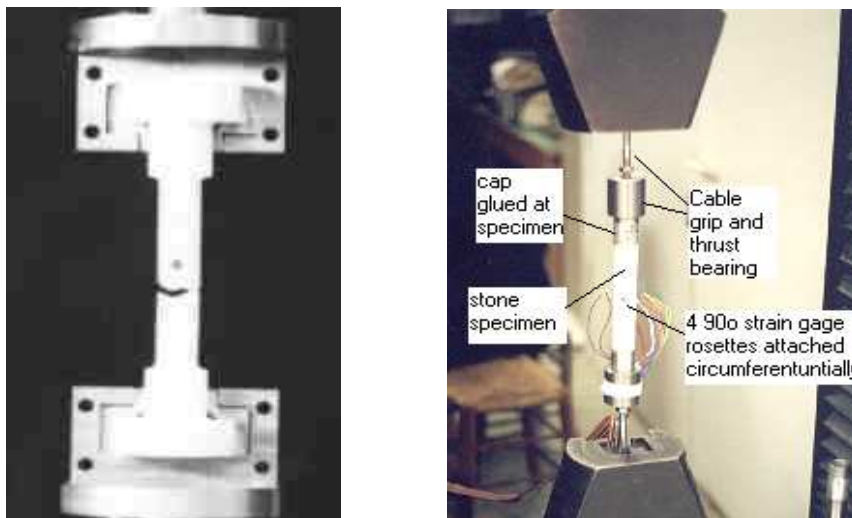
Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητές του μαρμάρου Διονύσου τα αναφερόμενα στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία δεδομένα ποικίλουν εντός ευρέων ορίων. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι για την εφελκυστική αντοχή οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2.4 MPa και 19.4 MPa ενώ για το μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 23 GPa και 90 GPa. Η σημαντικότερη αιτία για τη διασπορά αυτή εντοπίζεται στις διαφορετικές συνθήκες υπό τις οποίες εκτελούνται τα πειράματα αλλά και στην ανισοτροπία που χαρακτηρίζει τη μηχανική συμπεριφορά του μαρμάρου Διονύσου. Υπάρχουν τρεις διευθύνσεις ανισοτροπίας: Μία κάθετη στις υλικές στρώσεις (rift plane ή verso ή Π-plane), και δύο εντός του επιπέδου των στρώσεων (grain plane ή secondo ή M-plane και head-grain plane ή contro ή κ-plane), όπως φαίνεται στην Εικ. 3.6, όπου διευκρινίζεται επίσης και η σχετική ορολογία.

Ωστόσο, μακρά σειρά πειραμάτων αμέσου εφελκυσμού και μονοαξονικής θλίψης από τους I. Vardoulakis and S. K. Kourkoulis το 1997 [79] σε κυλινδρικά δοκίμια που κόπηκαν και φορτίστηκαν με διάφορους τρόπους (Εικ. 3.7) στις τρεις διαστάσεις ανισοτροπίας απέδειξε ότι οι μηχανικές ιδιότητες κατά τις δύο διευθύνσεις (αυτές κατά τα επίπεδα grain και head grain στην Εικ. 3.6) είναι παραπλήσιες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1, όπου καταγράφονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας, E , του λόγου Poisson, ν , και της εφελκυστικής αντοχής, σ_f . Η παρατήρηση αυτή δικαιολογεί την ευρέως αποδεκτή πλέον άποψη ότι το μάρμαρο Διονύσου μπορεί να αντιμετωπίζεται ως εγκαρσίως ισότροπο υλικό με έναν άξονα ελαστικής συμμετρίας απείρου τάξεως (τον κάθετο στις στρώσεις). Επομένως, η μηχανική του συμπεριφορά περιγράφεται με τη βοήθεια πέντε σταθερών: Των δύο μέτρων ελαστικότητας, E και E' , στο επίπεδο εγκαρσίας ισοτροπίας και κάθετα σ' αυτό, των δύο λόγων Poisson, ν και ν' , οι οποίοι περιγράφουν την εγκάρσια ανταπόκριση των παραμορφώ-

σεων εντός του επιπέδου ισοτροπίας σε εφελκυστικές φορτίσεις παράλληλα και κάθετως σε αυτό και το μέτρο διάτμησης, G , σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας [80].



Εικ. 3.6: Η ανισοτροπία του μαρμάρου Διονύσου και η σχετική διεθνής ορολογία για τα δοκίμια [74].



Εικ. 3.7: Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού με (α) τυποποιημένα δοκίμια και (β) κυλινδρικά δοκίμια [79,81].

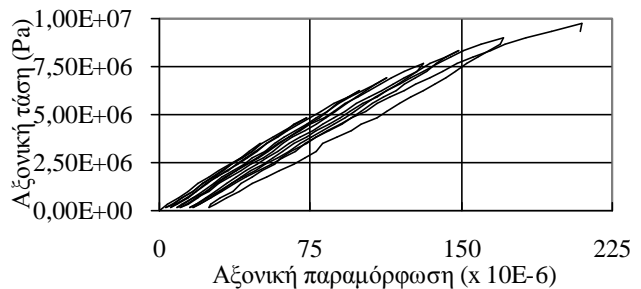
| | | E [GPa] | ν | σ_f [MPa] |
|---------------------|-----|---------|-------|------------------|
| Ισχυρή διεύθυνση | (1) | 84.5 | 0.26 | 10.8 |
| Ενδιάμεση διεύθυνση | (2) | 79.5 | 0.26 | 9.5 |
| Ασθενής διεύθυνση | (3) | 50.0 | 0.11 | 5.3 |

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου [74].

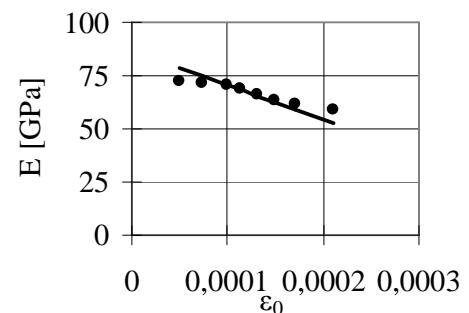
3.2.1.2 Δοκιμές αμέσου εφελκυσμού

Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν [79,81] σε κυλινδρικά δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου χρησιμοποιώντας δύο πειραματικές διατάξεις. Η πρώτη περιελάμβανε δοκίμια μορφής “dogbone” και ειδικές διαιρούμενες αρπάγες (Εικ. 3.7α). Στη δεύτερη, το φορτίο ασκήθηκε μέσω “εύκαμπτων” αρπαγών (συρματοσχοίων ειδικού τύπου) σε ειδικό κέλυφος εντός του οποίου “κοχλιώθηκε” μεταλλική κεφαλή. Το δοκίμιο συγκρατήθηκε εντός της κεφαλής με κατάλληλη κυανοακρυλική συγκολλητική ουσία (Εικ. 3.7β).

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της μελέτης ήταν ότι, όπως φαίνεται στο διάγραμμα αξονικών τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων της Εικ. 3.8 όπου παρουσιάζονται τα δεδομένα σειράς οκτώ κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης, το μάρμαρο Διονύσου εμφανίζει σαφώς μη γραμμική συμπεριφορά ακόμα και από τα αρχικά στάδια φόρτισης. Το ίδιο ισχύει και για το λόγο της εγκάρσιας συστολής σε συνάρτηση με τη διαμήκη επιμήκυνση (λόγος Poisson). Ενδιαφέρον είναι επίσης ότι πέραν της μη γραμμικότητας, το μάρμαρο Διονύσου εμφανίζει σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες στον τέταρτο κύκλο φόρτισης - αποφόρτισης πλησιάζουν το 10×10^{-6} ενώ στον όγδοο εγγίζονται το 25×10^{-6} . Εμφανίζεται δηλαδή το μάρμαρο αυτό ως ένα σχετικώς όλκιμο (!) υλικό με συμπεριφορά που προσεγγίζει (φαινομενικά) την αντίστοιχη του αλουμινίου.



Εικ. 3.8: Το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του μαρμάρου Διονύσου υπό μονοαξονικό εφελκυσμό [74].



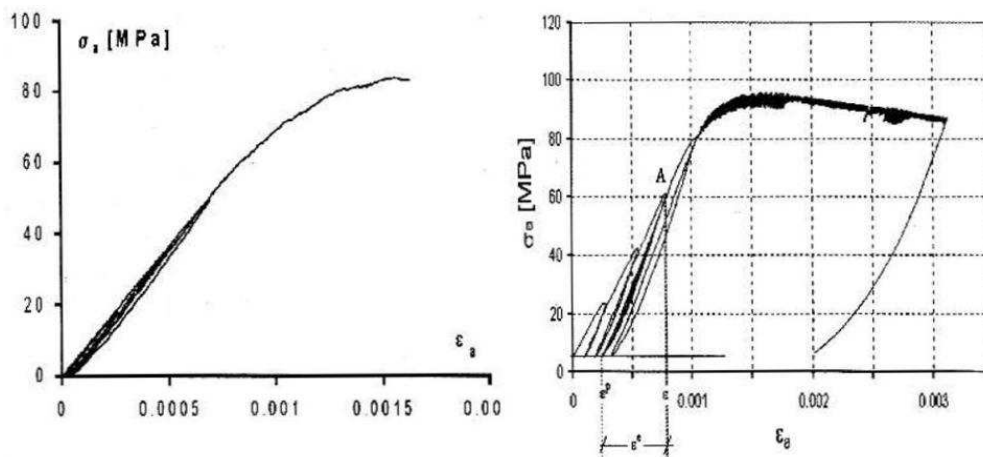
Εικ. 3.9: Φθορά του μέτρου ελαστικότητας του μαρμάρου Διονύσου συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης [74].

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, E , του υλικού συναρτήσει των αξονικών παραμορφώσεων, ε . Στην Εικ. 3.9, στην οποία έχουν καταγραφεί οι τιμές του E συναρτήσει της παραμόρφωσης, φαίνεται ότι η αρχική τιμή των περίπου 80 GPa μειώνεται κάτω από τα 60 GPa ελάχιστα πριν την αστοχία. Η συνάρτηση $E=E(\varepsilon)$ εμφανίζεται ελαφρώς «σιγμοειδής», όμως μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να θεωρηθεί γραμμική. Επομένως, για την ορθή περιγραφή της καταστατικής συμπεριφοράς του μαρμάρου Διονύσου πρέπει πέραν των άλλων να ληφθεί υπ' όψιν και η μηχανική φθορά (mechanical damage).

3.2.1.3 Δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης [74]

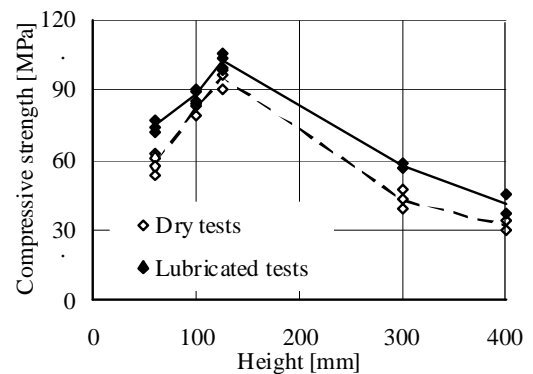
Για τη συμπεριφορά του μαρμάρου Διονύσου υπό θλιπτικά φορτία έγιναν δοκιμές τόσο υπό μονοαξονική θλίψη όσο και υπό θλίψη με παράπλευρη πίεση. Χαρακτηριστικά πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στην Εικ. 3.10.

Μελετώντας τις καμπύλες της μονοαξονικής θλίψης διαπιστώθηκε η μεγάλη διαφορά που υπάρχει μεταξύ της εφελκυστικής και της θλιπτικής αντοχής του μαρμάρου Διονύσου (η θλιπτική αντοχή είναι περίπου δεκαπλάσια της εφελκυστικής). Η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού καταγράφηκε και στις δοκιμές θλίψης αλλά για τιμές των παραμορφώσεων αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του εφελκυσμού. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις σε περίπτωση αποφόρτισης. Η παράπλευρη πίεση όπως αναμένεται αύξησε την ολκιμότητα του μαρμάρου ενώ καταγράφηκε και έντονη μηχανική φθορά (στον κλάδο της αποφόρτισης το μέτρο ελαστικότητας είναι 40% μικρότερο σε σχέση με το αρχικό).



Εικ. 3.10: Το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων υπό (α) μονοαξονική και (β) τριαξονική θλίψη [74].

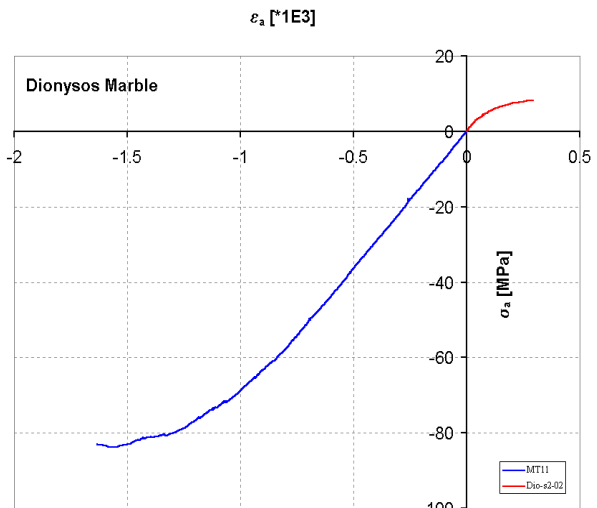
Επιπλέον, προέκυψε ότι καθοριστική παράμετρος για τα αποτελέσματα των πειραμάτων θλίψης είναι και η επιλογή του μεγέθους των δοκιμίων. Είναι κοινός τόπος στη Μηχανική ότι τα αποτελέσματα των πειραμάτων θλίψης, ειδικώς σε γαιώδη υλικά είναι συνάρτηση και των διαστάσεων των δοκιμίων. Το ενδιαφέρον έγκειται στο ότι η εξάρτηση δεν είναι μονότονη: υπάρχει συγκεκριμένη διάσταση (για λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο περίπου με 2, δοκίμια με ύψος 12 cm), για την οποία η θλιπτική αντοχή λαμβάνει μέγιστη τιμή (Εικ. 3.11).



Εικ. 3.11: Το φαινόμενο κλίμακος για το μάρμαρο Διονύσου [74].

3.2.1.4 Το πλήρες διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του μαρμάρου Διονύσου [74]

Το πλήρες διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του μαρμάρου Διονύσου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Vardoulakis et al., Εικ. 3.12. Είναι σαφής η τεράστια διαφορά στις απόλυτες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων. Τονίζεται ότι ενώ στην περιοχή εφελκυσμού η καταστατική σχέση είναι εξ αρχής εξόχως μη γραμμική, στην αντίστοιχη περιοχή θλίψης είναι απολύτως γραμμική. Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του μαρμάρου Διονύσου προέκυψε από δοκίμια που κόπηκαν και φορτίστηκαν κατά την ισχυρή διεύθυνση της ανισοτροπίας, με άλλα λόγια παράλληλα στις στρώσεις του υλικού.

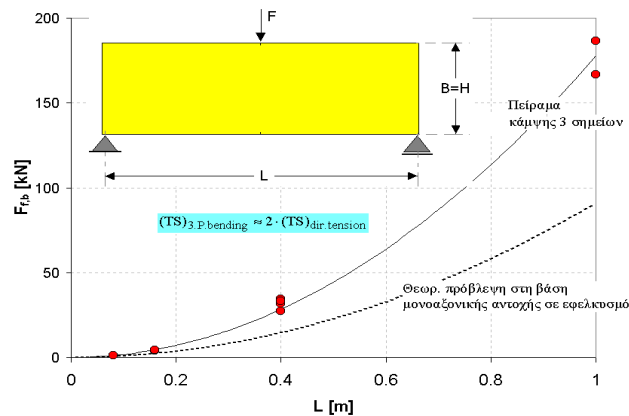


Εικ. 3.12: Το πλήρες διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων [74].

Από την Εικ. 3.12 προκύπτει ότι το μάρμαρο Διονύσου είναι ελαφρώς “διπλομετρικό” (bimodular) υλικό, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη υπερβαίνει το αντίστοιχο σε εφελκυσμό (ο λόγος είναι περίπου 1.15).

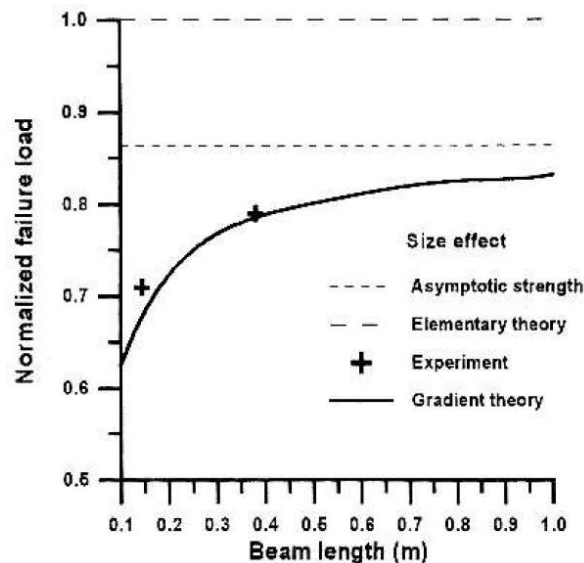
3.2.1.5 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων

Πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων με τέσσερις κλάσεις πρισματικών δοκιμίων (Εικ. 3.13), [82-84]. Η διατομή τους ήταν τετραγωνική με λόγο μήκους δοκιμίου προς ύψος διατομής ίσο με 4, και μήκη αντίστοιχα ίσα με 8, 15, 40 και 100 cm. Η διεύθυνση φόρτισης ήταν η κάθετη στις στρώσεις του υλικού. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με σύστημα ηλεκτρομηκνσιομέτρων, γραμμικώς διατεταγμένων σε διάφορες διατομές του δοκιμίου και σε διάφορα ύψη, με σκοπό να καταστεί δυνατή και η μελέτη της επίδρασης του φαινομένου Poisson στη διατομή επιβολής του συγκεντρωμένου φορτίου.



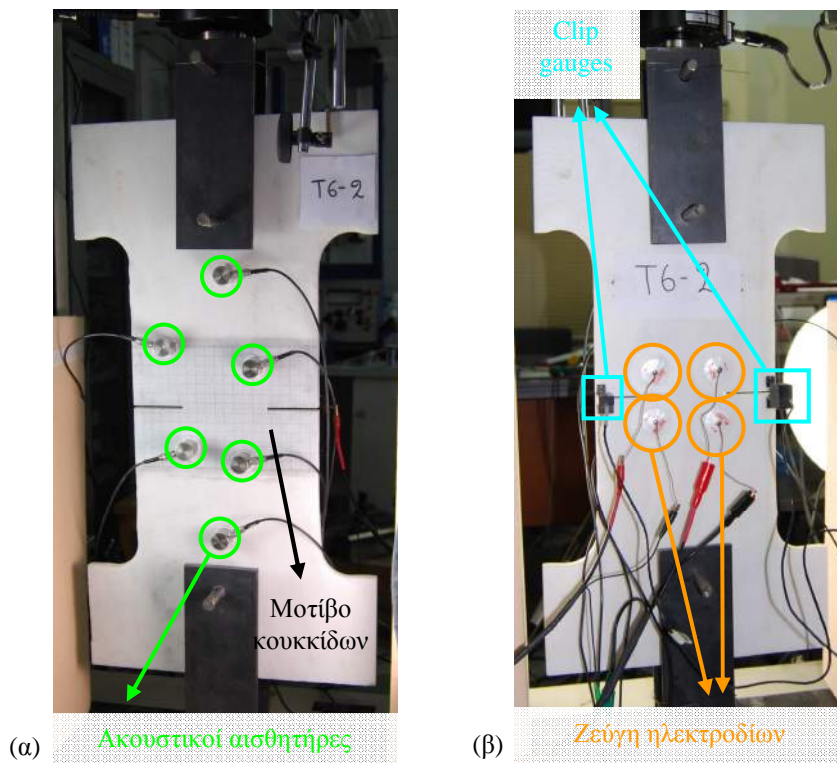
Εικ. 3.13: Η γεωμετρία και η φόρτιση στα πειράματα κάμψης και η εξάρτηση του φορτίου αστοχίας από τις διαστάσεις του [74].

Το πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές ήταν ότι το φορτίο αστοχίας από αναγωγή των δεδομένων εφελκυσμού σε κάμψη υστερεί κατά περίπου 50% του πραγματικού φορτίου αστοχίας υπό κάμψη. Το δεύτερο συμπέρασμα της μελέτης σχετίζεται με την επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου στην κατανομή των παραμορφώσεων. Διαπιστώνεται ότι η κεντρική διατομή του δοκιμίου βρίσκεται συνεχώς υπό εφελκυστική εντατική κατάσταση, καθ' όλο το ύψος της [84, 85]. Τέλος, γίνεται φανερό ότι το φαινόμενο κλίμακος το οποίο εμφανίζει το φορτίο αστοχίας του μαρμάρου Διονύσου είναι εντονότατο [74].



Εικ. 3.14: Το φαινόμενο κλίμακος για το φορτίο αστοχίας υπό κάμψη για το μάρμαρο Διονύσου [74].

γίστηκε ύστερα από κατάλληλους υπολογισμούς βάσει των διαστάσεων του οπτικού παραθύρου και σύμφωνα με τα προβλεπόμενα για την εφαρμογή της μεθόδου. Τέλος, στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου προσαρμόστηκαν κατάλληλα δύο μηχανοσκόμμετρα μέτρησης του ανοίγματος των χειλέων κάθε εγκοπής NMOD (clip gauges).



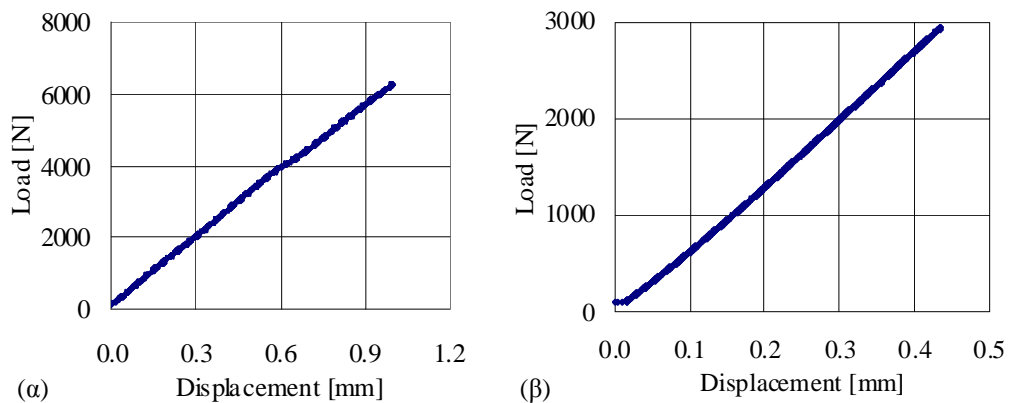
Εικ. 3.16: Η πειραματική διάταξη όπως φαίνεται από (α) την μπροστινή και (β) την πίσω πλευρά του δοκιμίου. Στην μπροστινή πλευρά διακρίνονται οι έξι ακουστικοί αισθητήρες και το μοτίβο των κουκκίδων (α). Στην πίσω πλευρά διακρίνονται τα δύο ζεύγη των ηλεκτροδίων καθώς και τα δύο clip gauges (β).

Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε με έλεγχο της μετατόπισης (*displacement control*) και ρυθμό μεταβολής ίσο με 0.02 mm/min, ώστε να προσομοιώνονται “οιονεί” στατικές (quasi-static) συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγράφονταν:

- Οι ενδείξεις του φορτίου.
- Οι ενδείξεις της μετατόπισης της τραβέρσας του πλαισίου φόρτισης.
- Οι ενδείξεις των μηχανοσκόμμετρων μέτρησης του ανοίγματος των χειλέων εγκοπής NMOD (clip gauge).
- Η θέση και τα χαρακτηριστικά ενός εκάστου εκ των ακουστικών γεγονότων.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται κοντά στις αιχμές των εγκοπών.

Ταυτοχρόνως, γίνονταν λήψη φωτογραφιών της μπροστινής επιφάνειας του δοκιμίου σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα από τις δύο κάμερες της μεθόδου DIC.

Η μέση τιμή του φορτίου θραύσης των δοκιμίων της κατηγορίας T6 και T8 ήταν ίση με 6.56 kN και 2.75 kN, αντίστοιχα. Χαρακτηριστικές καμπύλες δύναμης - μετατόπισης των δύο κατηγοριών παρουσιάζονται στην Εικ. 3.17. Οι καμπύλες αν και σχετικώς γραμμικές παρουσιάζουν μία ανεπαίσθητη αλλαγή στην κλίση τους, η οποία θα μπορούσε να προσδιοριστεί σε φορτίο ίσο με ~85% και ~35% του φορτίου θραύσης στα δοκίμια της κατηγορίας T6 και T8, αντίστοιχα.

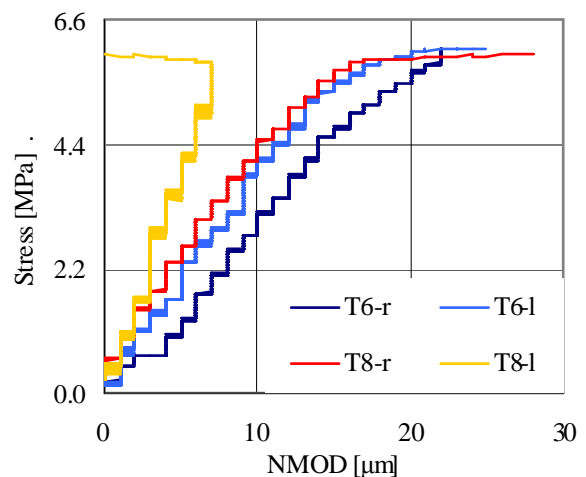


Εικ. 3.17: Χαρακτηριστικές καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για την κατηγορία (α) T6 και (β) T8.

Η τάση θραύσης, σ_f , υπολογίστηκε βάσει του τύπου του αμέσου εφελκυσμού:

$$\sigma_f = \frac{P}{(b - 2a)t} \quad (1)$$

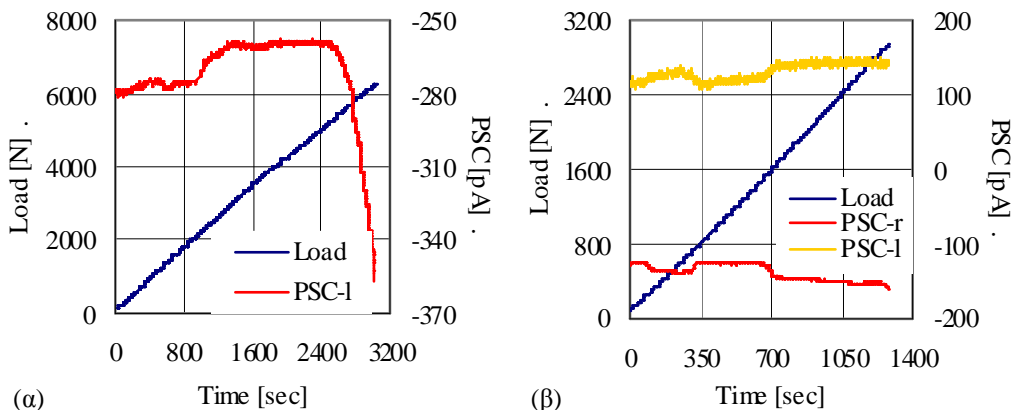
όπου P είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, b το πλάτος του δοκιμίου στη διαμορφωμένη περιοχή, a το μήκος κάθε εγκοπής και t το πάχος του δοκιμίου. Για όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν η τάση θραύσης προέκυψε περίπου ίση με 6 MPa, κάπως μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που προσδιορίστηκε από παρόμοιες δοκιμές από τους I. Vayas et al. [86].



Εικ. 3.18: Η τάση συναρτήσει του NMOD, όπως κατεγράφη από τα μηχανοσκόμμετρα (clip gauges) στις δύο εγκοπές για ένα δοκίμιο της κατηγορίας (α) T6 και (β) T8.

Στην Εικ. 3.18 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης - ανοίγματος των χειλέων των δύο εγκοπών (από τα παραδοσιακά μηκυνσιόμετρα (clip gauges), μέχρι τη μέγιστη τάση) για κάθε κατηγορία δοκιμών. Η μέση τιμή του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής από την οποία ξεκινά η ρωγή ισούται περίπου με 25 μm και 28 μm , για τις κατηγορίες T6 και T8, αντίστοιχα.

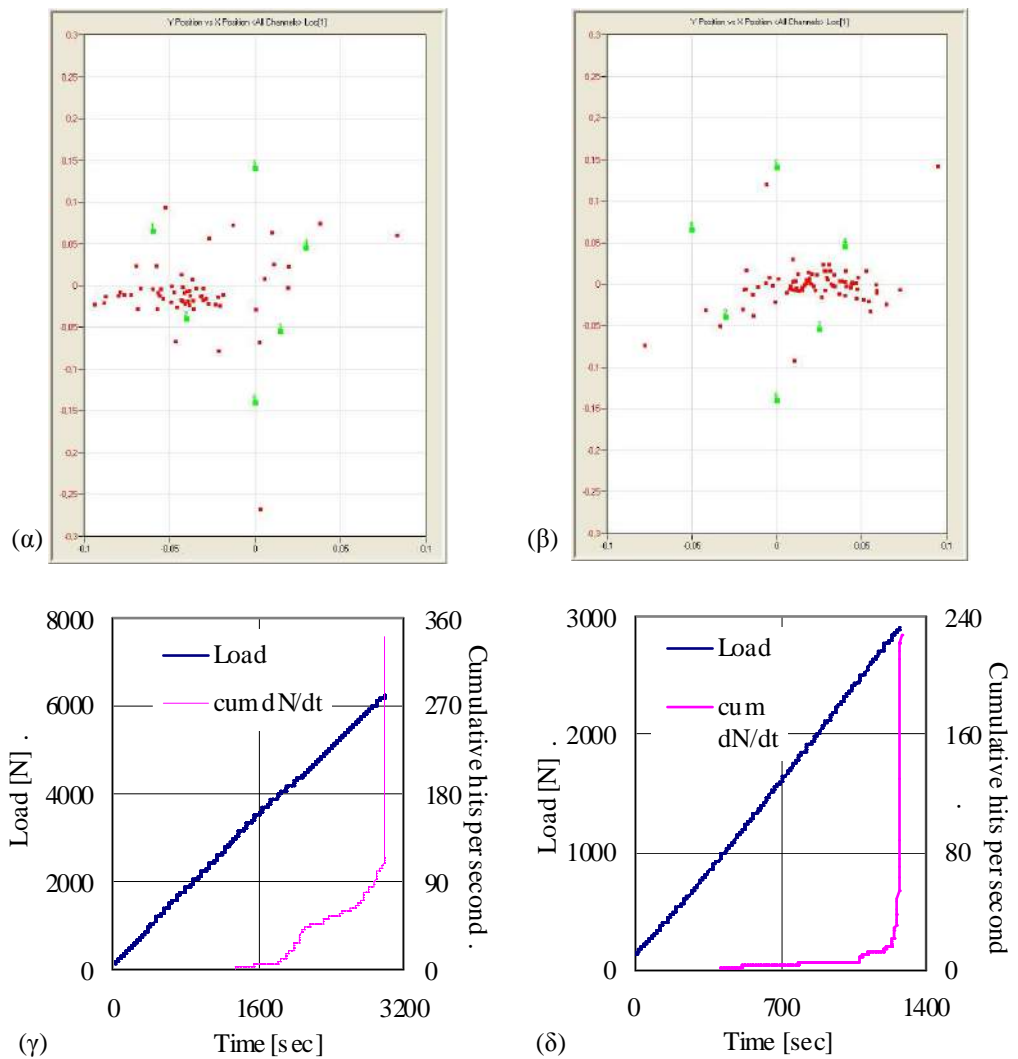
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι καμπύλες του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, που μετράται κοντά στην αιχμή κάθε εγκοπής (Εικ. 3.19). Σημαντική αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος παρατηρείται από το ~35% και ~45% της φόρτισης στα δοκίμια της κατηγορίας T6 και T8, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρόδια πλησίον της αιχμής της εγκοπής από την οποία τελικά ξεκίνησε η ρωγή αντιλαμβάνονται την επερχόμενη αστοχία ήδη από το 85% και το 65% του φορτίου θραύσης για τα δοκίμια τύπου T6 και T8, αντίστοιχα.



Εικ. 3.19: Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πλησίον της αιχμής των εγκοπών για ένα δοκίμιο της κατηγορίας (α) T6 και (β) T8.

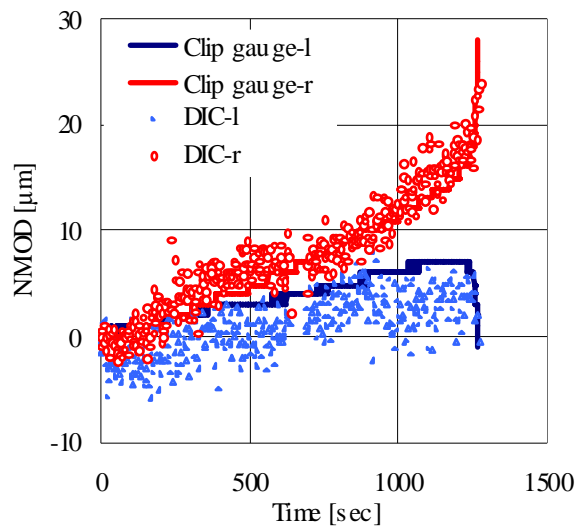
Όσον αφορά τα αποτελέσματα της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής, τα ακουστικά γεγονότα συγκεντρώνονται κοντά στην αιχμή της εγκοπής που τελικά αστοχεί πρώτη (Εικ. 3.20α,β) ενώ ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών εκπομπών στη μονάδα του χρόνου διατηρείται σχεδόν σταθερός περίπου μέχρι το 65% και το 85% του φορτίου θραύσης για τα δοκίμια της κατηγορίας T6 και T8, αντίστοιχα (Εικ. 3.20γ,δ).

Η μέθοδος της οπτικής απεικόνισης του πεδίου των μετατοπίσεων (DIC) χρησιμοποιήθηκε ως ένας δεύτερος τρόπος προσδιορισμού του ανοίγματος των χειλέων των εγκοπών, NMOD. Η απόσταση μεταξύ των κεντροειδών δύο μικρών πολύγωνων εκατέρωθεν κάθε εγκοπής, δηλαδή το άνοιγμα των χειλέων κάθε εγκοπής, απεικονίστηκε συναρτήσει του χρόνου μαζί με τις καταγραφές των παραδοσιακών μηκυνσιόμετρων για ένα δοκίμιο της κατηγορίας T8 (Εικ. 3.21). Η συσχέτιση τους με τις τιμές των μηκυνσιόμετρων είναι αρκετά καλή, ιδίως για τιμές του NMOD μεγαλύτερες των 7 μm .

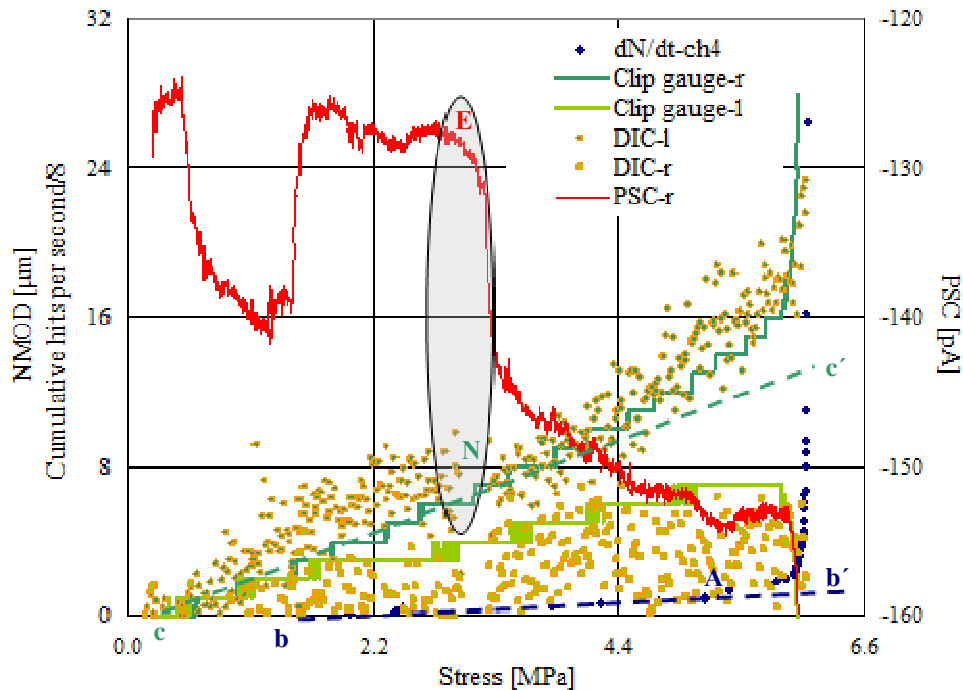


Εικ. 3.20: (α,β) Τα ακουστικά γεγονότα εστιασμένα στην εγκοπή απ' όπου ξεκινά η ρωγμή. (γ,δ) Τυπικές καμπύλες dN/dt των ακουστικών εκπομπών και του φορτίου συναρτήσει του χρόνου για ένα δοκίμιο T6 και T8, αντίστοιχα.

Στην Εικ. 3.22 εκτίθενται τα αποτελέσματα όλων των πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη για ένα τυπικό δοκίμιο της κατηγορίας T8. Η έντονη αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος (σημείο E) παρατηρήθηκε όταν περίπου οι καταγραφές του NMOD από το μηχανοστάσιο σταμάτησαν να μεταβάλλονται γραμμικά με το χρόνο (σημείο N). Αντίθετα, ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών εκπομπών άργησε αρκετά (συγκριτικά με το clip gauge και το ηλεκτρικό ρεύμα) να παρουσιάσει σημαντική αλλαγή στην καταγραφή του (σημείο A).



Εικ. 3.21: Το άνοιγμα των χειλέων των εγκοπών ενός τυπικού δοκιμίου της κατηγορίας T8, όπως προσδιορίστηκε από τα μηχανοσκόπια και την τεχνική DIC.



Εικ. 3.22: Η μεταβολή των τριών ποσοτήτων (μηχανική, ηλεκτρική και ακουστική) συναρτήσει της τάσης για ένα τυπικό δοκίμιο της κατηγορίας T8.

3.2.2.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων

Μελετήθηκαν δύο κατηγορίες δοκιμίων από μάρμαρο Διονύσου. Τα δοκίμια ήταν πρισματικά (Class A: $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}^3$ και Class B: $20 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$) και διαμορφώθηκε με μηχανική κοπή στο μέσον του ανοίγματός τους εγκοπή κάθετη στον διαμήκη άξονα του δοκιμίου (Εικ. 3.23). Ο λόγος του μήκους της εγκοπής προς το ύψος του δοκιμίου (a/h) ήταν ίσος με 0.24 και 0.22, αντίστοιχα. Σε όλα τα δοκίμια οι υλικές στρώσεις ήταν παράλληλες με τον άξονά τους.

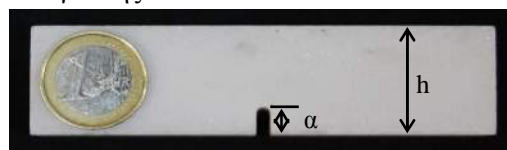
Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες πειραματικές τεχνικές:

- Ακουστικής εκπομπής (ΑΕ).
- Ηλεκτρικών σημάτων διεγερομένων από μηχανική φόρτιση (PSC).
- Συσχέτισης ψηφιακής εικόνας στις τρεις διαστάσεις (3D DIC).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα παραδοσιακό μηχανοστάσιο τύπου clip gauge για τη μέτρηση του ανοίγματος των χειλέων εγκοπής NMOD.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 1.2.2.2.1. Δύο αισθητήρες ακουστικής εκπομπής προσαρμόστηκαν στις πλαϊνές επιφάνειες του δοκιμίου (Εικ. 3.24) και ένας τρίτος αισθητήρας στερεώθηκε στην πίσω επιφάνειά του πλησίον της αιχμής της εγκοπής. Για τη μέθοδο των ηλεκτρικών σημάτων χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος αισθητήρων ηλεκτρικού ρεύματος (ένα ηλεκτρόδιο μέσα στην εγκοπή και ένα στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου). Όταν το δοκίμιο βρέθηκε στην τελική του θέση, πάνω σε δύο μεταλλικούς κυλίνδρους ακτίνας 15 mm που απήχταν μεταξύ τους 80 mm, δημιουργήθηκε στην μπροστινή του επιφάνεια κατάλληλο μοτίβο κουκκίδων (Εικ. 3.24). Τέλος, εκατέρωθεν των χειλέων της εγκοπής, στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου, στερεώθηκαν ειδικά “μαχαιρίδια” (knife edges) για την προσαρμογή ενός μηχανοστασίου μέτρησης του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής NMOD (clip gauge), Εικ. 3.24.

Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε, μέσω ενός κυλίνδρου ακτίνας 10 mm, ομοιόμορφα κατά το πάχος του δοκιμίου κάθετα στις υλικές στρώσεις, με έλεγχο της μετατόπισης (*displacement control*). Στα δοκίμια της πρώτης κατηγορίας ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης ήταν ίσος με 0.1 mm/min και 0.01 mm/min ενώ στα δοκίμια της δεύτερης κατηγορίας ήταν ίσος με 0.005 mm/min ώστε να προσομοιώνονται “οιονεί” στατικές (quasi-static) συνθήκες. Η επιλογή δια-



Εικ. 3.23: Ένα τυπικό δοκίμιο από αυτά που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων.



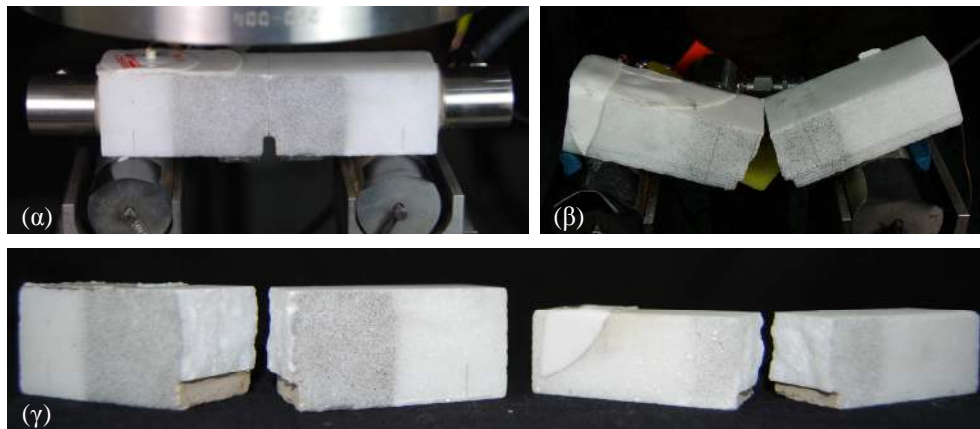
Εικ. 3.24: Ένα τυπικό δοκίμιο στο πλαίσιο φόρτισης αμέσως πριν ξεκινήσει η δοκιμή.

φορετικού ρυθμού επιβολής της φόρτισης έγινε για να διερευνηθεί η πιθανή επίδρασή του στα αποτελέσματα των ηλεκτρικών σημάτων και των ακουστικών εκπομπών. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγράφονταν:

- Οι ενδείξεις του φορτίου.
- Οι ενδείξεις της μετατόπισης της τραβέρσας του πλαισίου φόρτισης.
- Οι ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου μέτρησης του ανοίγματος των χειλέων εγκοπής NMOD.
- Η θέση και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών γεγονότων.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται.

Ταυτοχρόνως, γινόταν λήψη φωτογραφιών της μπροστινής επιφάνειας του δοκιμίου σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα από τις δύο κάμερες της μεθόδου DIC.

Όλα τα δοκίμια εθραύσθησαν με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με την εκκίνηση μιας ρωγμής, σχεδόν παράλληλης με τον άξονα φόρτισης, από την αιχμή της εγκοπής, η οποία και διαδόθηκε προς το σημείο εφαρμογής της δύναμης (Εικ. 3.25α). Μικρές αποκλίσεις της ρωγμής από την κατακόρυφο (Εικ. 3.25β) που παρατηρήθηκαν σε μερικά δοκίμια αποδίδονται σε μικρές κλίσεις των υλικών στρώσεων ως προς τον άξονα των δοκιμίων καθώς και σε τυχόν ασυμμετρίες της πειραματικής διάταξης. Το επίπεδο θραύσης ήταν σχεδόν επίπεδο (με μικρό “κυματισμό”) και κάθετο στον άξονα των δοκιμίων (Εικ. 3.25γ).



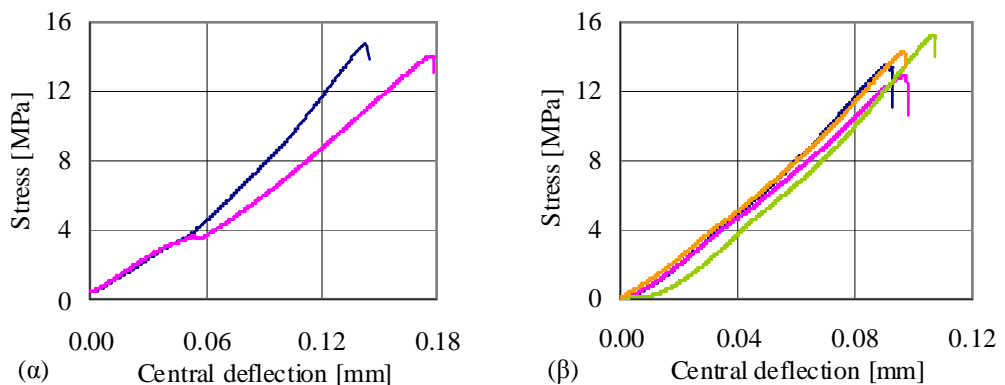
Εικ. 3.25: (α), (β) Τυπικά δοκίμια αμέσως μετά τη θραύση.
(γ) Οι αντίστοιχες επιφάνειες θραύσης.

Όσον αφορά την “ονομαστική” τάση θραύσης, σ_f , υπολογίστηκε βάσει του γνωστού τύπου της κλασικής θεωρίας Bernoulli - Euler, δεδομένου ότι ο λόγος μήκος/ύψος της διατομής υπερβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις την τιμή 4, η οποία θεωρείται το κάτω όριο ισχύος της θεωρίας αυτής:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

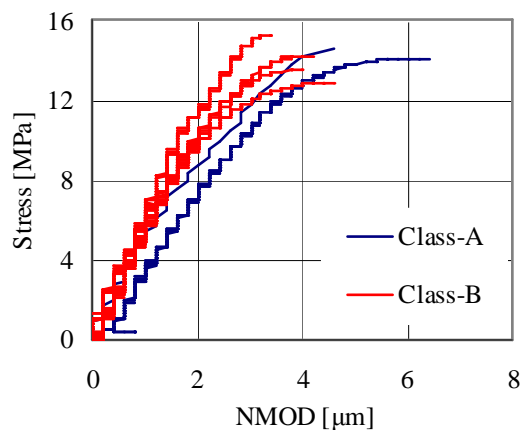
όπου P είναι το φορτίο που επιβάλλεται, L το μήκος του δοκιμίου μεταξύ των στηρίξεων, b το πάχος/πλάτος της κρίσιμης διατομής του δοκιμίου και h το ύψος της διατομής αυτής. Τα b , h αντιστοιχούν στην ενεργό διατομή, δηλαδή στη διατομή χωρίς την εγκοπή. Η μέση τιμή της τάσης θραύσης για τα δοκίμια της κατηγορίας A ήταν ίση με περίπου 14.4 MPa ενώ για τα δοκίμια της κατηγορίας B περίπου 14.0 MPa. Εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η τυπική απόκλιση της τάσης θραύσης μεταξύ των δοκιμών ήταν μικρότερη του 5%, κάτι που αποδεικνύει την ομοιογένεια του μαρμάρου Διονύσου. Επιπρόσθετα, οι ίδιες οι τιμές της τάσης θραύσης αποδεικνύουν ότι το πείραμα της κάμψης τριών σημείων υπερεκτιμά σημαντικά την εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου Διονύσου. Το αποτέλεσμα συμφωνεί με τα αποτελέσματα των δοκιμών που υλοποιήθηκαν από τους Vardoulakis et al. [74] σε πρισματικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου χωρίς εγκοπή. Από την άλλη, η τιμή της τάσης θραύσης (περίπου 14.0 MPa) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που προέκυψε από δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου Διονύσου με εγκοπή που έχουν υλοποιηθεί παλιότερα [86]. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο διαφορετικό μέγεθος των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μελέτη.

Οι πλήρεις καμπύλες τάσης - βέλους κάμψης της κεντρικής διατομής παρουσιάζονται στην Εικ. 3.26 και είναι σχετικά όμοιες μεταξύ τους. Οι καμπύλες και των δύο κατηγοριών των δοκιμών παρουσιάζουν μία αλλαγή στην κλίση τους: τα δοκίμια της κατηγορίας A στο ~25% της μέγιστης τάσης και τα δοκίμια της κατηγορίας B στο ~60% της τάσης θραύσης αλλά λιγότερο ευδιάκριτη. Δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου με λόγο ύψους προς μήκος $h/l=0.25$, ίδιος δηλαδή με τα δοκίμια της κατηγορίας A, με εγκοπές ελέγχθηκαν επίσης σε κάμψη τριών σημείων από τους Vardoulakis et al. [74]. Ένα από τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές ήταν ότι το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων είναι γραμμικό μέχρι το 25% της τάσης αστοχίας.



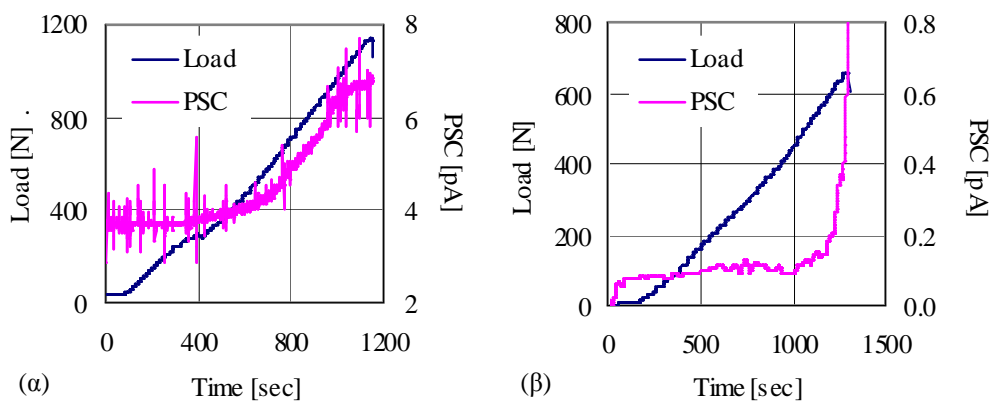
Εικ. 3.26: Τυπικές καμπύλες τάσης - βύθισης για τα δοκίμια
(α) της κατηγορίας A και (β) της κατηγορίας B.

Η Εικ. 3.27 παρουσιάζει τις καμπύλες τάσης - ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής, όπως αυτή καταγράφηκε από το παραδοσιακό μηχανοσκόπιο (clip gauge), μέχρι τη μέγιστη τάση. Οι καμπύλες αυτές έχουν ένα αρχικό γραμμικό τμήμα και στη συνέχεια γίνονται εντόνως μη γραμμικές, κάτι που ίσως να μην αναμένεται για ένα τόσο ψαθυρό υλικό όμως είναι το μάρμαρο Διονύσου.



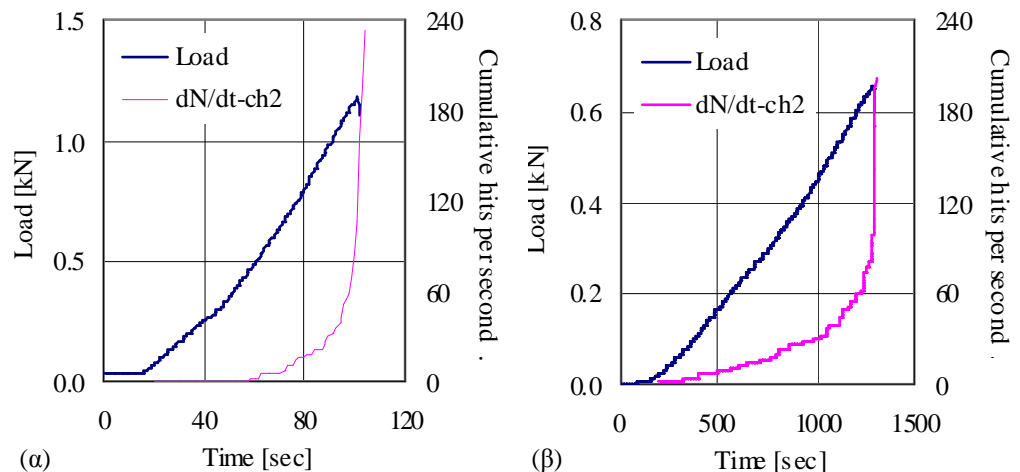
Εικ. 3.27: Η τάση συναρτήσει του NMOD, όπως καταγράφη από τα μηχανοσκόπια (clip gauges).

Οι δύο κατηγορίες δοκιμίων εμφανίζουν ποιοτικά όμοιες καμπύλες της μεταβολής του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται κατά την υποβολή τους σε κάμψη τριών σημείων. Η μεταβολή αυτή σε συνδυασμό με την επιβαλλόμενη δύναμη απεικονίζονται συναρτήσει του χρόνου στην Εικ. 3.28. Στα πρώτα στάδια της φόρτισης τα ηλεκτρόδια καταγράφουν μία σχεδόν σταθερή τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Έπειτα, από τη στιγμή που το φορτίο φτάσει στο ~25% της μέγιστης δύναμης για την κατηγορία A και ~60% του φορτίου θραύσης για την κατηγορία B, η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος αρχίζει σταδιακά να αυξάνεται. Ας σημειωθεί ότι τα ποσοστά των φορτίων που μόλις αναφέρθηκαν ταυτίζονται με τα φορτία στα οποία παρατηρείται αλλαγή στην κλίση των καμπύλων φορτίου - χρόνου (επομένως και των καμπύλων τάσης - βύθισης που προαναφέρθηκε). Η αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος σημαίνει τη γέννηση έντονων μικρορηγματώσεων μέσα στον όγκο του δοκιμίου [55].



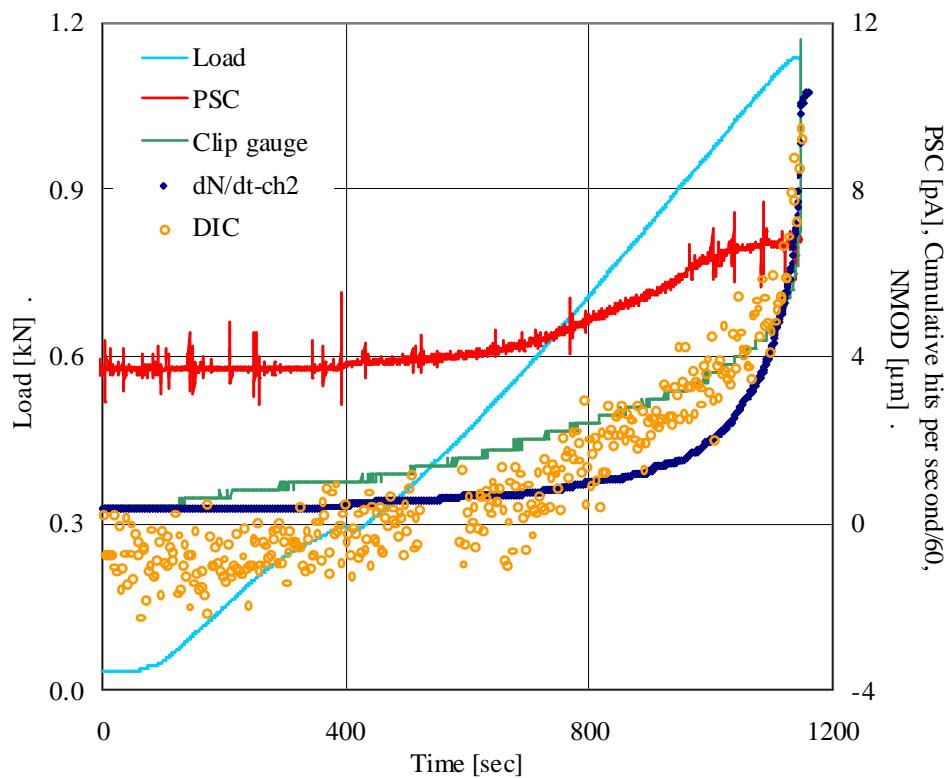
Εικ. 3.28: Τυπικές καμπύλες PSC και φορτίου συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια (α) της κατηγορίας A και (β) της κατηγορίας B.

Παρόμοια αποτελέσματα έδωσε η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής. Αρχικά, ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών εκπομπών στη μονάδα του χρόνου είναι περίπου σταθερός ενώ στη συνέχεια αυξάνεται σημαντικά (Εικ. 3.29). Η αύξηση του ρυθμού αυτού παρατηρείται σε φορτίο ίσο με ~25% της μέγιστης δύναμης για την κατηγορία A και ~60% του φορτίου θραύσης για την κατηγορία B. Τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών (ηλεκτρικών και ακουστικών εκπομπών) βρίσκονται επομένως σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους.

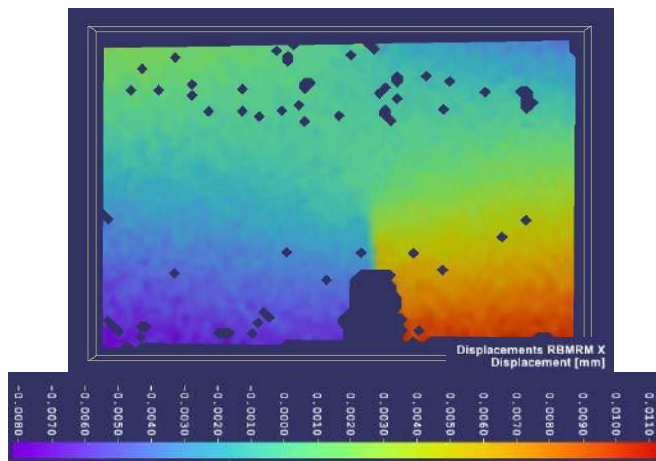


Εικ. 3.29: Τυπικές καμπύλες dN/dt των ακουστικών εκπομπών και του φορτίου συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια (α) της κατηγορίας A και (β) της κατηγορίας B.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των φωτογραφιών της τεχνικής συσχέτισης ψηφιακής εικόνας (DIC) χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά για τον προσδιορισμό του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής, NMOD. Η απόσταση μεταξύ των κεντροειδών δύο μικρών πολύγωνων εκατέρωθεν της εγκοπής (στην κατώτατη στάθμη της) προσδιορίστηκε συναρτήσει του χρόνου. Στο ίδιο γράφημα έχουν συμπεριληφθεί τα αποτελέσματα όλων των πειραματικών τεχνικών. Η μετατόπιση στερεού σώματος αφαιρέθηκε κι έτσι η απόσταση που προέκυψε ταυτίζεται με το άνοιγμα των χειλέων της εγκοπής, NMOD. Οι τιμές του NMOD που προσδιορίστηκαν από τη μέθοδο DIC είναι ικανοποιητικές συγκρινόμενες με αυτές που κατέγραψε το παραδοσιακό μηκυσιόμετρο (clip gauge), αν και στα αρχικά στάδια της φόρτισης η μέθοδος DIC δίνει μικρότερες τιμές για το NMOD. Επομένως, το συνολικό πεδίο των μετατοπίσεων στην μπροστινή επιφάνεια των δοκιμίων μπορεί να αξιοποιηθεί με ασφάλεια. Στην Εικ. 3.30 αποδίδεται με τη μορφή χρωματοκλίμακας η κατανομή της αξονικής συνιστώσας του πεδίου των μετατοπίσεων στην τελευταία φωτογραφία που ελήφθη πριν τη θραύση ενός τυπικού δοκιμίου της κατηγορίας A. Η ρωγμή η οποία πρόκειται να προκαλέσει την τελική θραύση διακρίνεται σαφέστατα.



Εικ. 3.29: Το NMOD όπως προσδιορίστηκε από τη μέθοδο DIC και από το μηχανοσύμμετρο (clip gauge) συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, παρουσιάζονται οι καμπύλες PSC και AE για συγκριτικούς λόγους.



Εικ. 3.30: Η κατανομή της μετατόπισης κατά τον άξονα του δοκιμίου όπως προσδιορίστηκε από τη μέθοδο DIC λίγο πριν επέλθει η αστοχία σε ένα τυπικό δοκίμιο της κατηγορίας A.

Εξαιρετικά ενδιαφέροντα είναι η Εικ. 3.31 στην οποία συνυπάρχουν τα αποτελέσματα όλων των πειραματικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη για ένα τυπικό δοκίμιο της κατηγορίας Β. Παρά την τελειώς διαφορετική φύση των μεθόδων, οι καμπύλες που ελήφθησαν συμπεριφέρονται απολύτως συμβατά μεταξύ τους σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό το ότι σε μία μικρή περιοχή του διαγράμματος (βλ. τη γραμμοσκιασμένη ελλειπτική περιοχή) συγκεντρώνονται τα σημεία στα οποία εμφανίζεται:

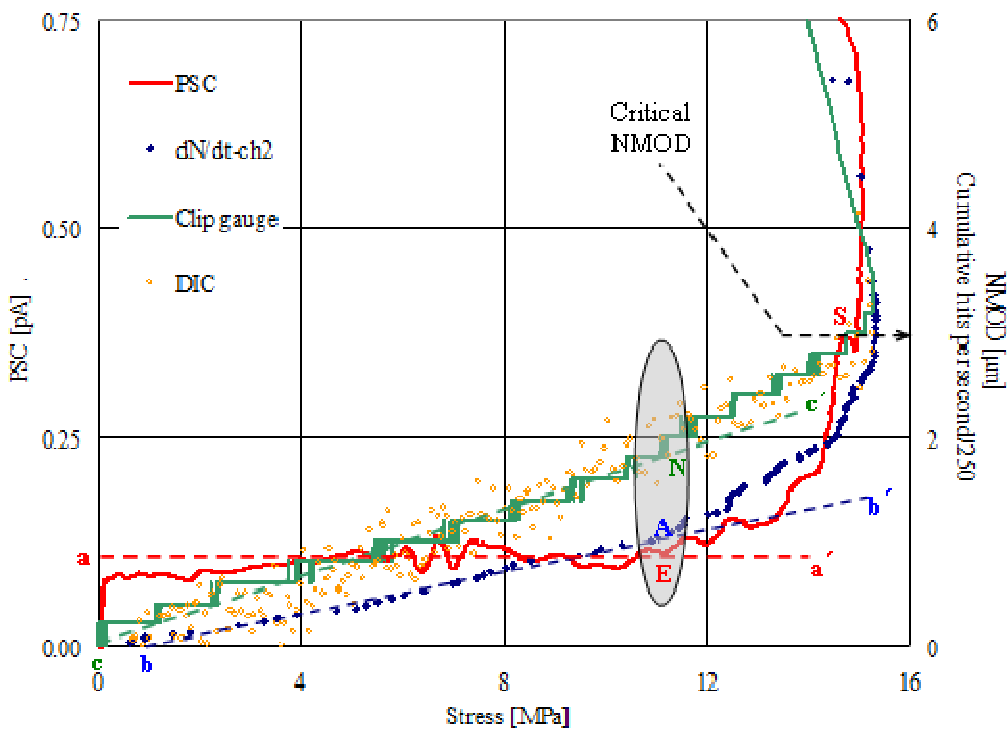
1. Η απόκλιση της τιμής του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος από την αρχική σταθερή τιμή του, που παριστάνεται με την ευθεία aa' (σημείο E).
2. Η απόκλιση του ρυθμού παραγωγής των ακουστικών εκπομπών (dN/dt) από τη γραμμικότητα, που παριστάνεται με την ευθεία bb' (σημείο A).
3. Η απόκλιση του ανοίγματος των χειλέων της εγκοπής (NMOD) από τη γραμμικότητα, που παριστάνεται με την ευθεία cc' (σημείο N).

Επομένως, για το δεδομένο υλικό διαπιστώνεται σαφώς ότι περίπου στο 67% του μέγιστου φορτίου φαίνεται να “πυροδοτούνται” μη αναστρέψιμες διαδικασίες στη μάζα του δοκιμίου, οι οποίες θα οδηγήσουν στην τελική αστοχία.

Ένα δεύτερο σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η πτώση που καταγράφεται στο ηλεκτρικό ρεύμα (σημείο S στην Εικ. 3.31) στο ~95% του φορτίου θραύσης. Είναι εύλογο η πτώση αυτή να συσχετίζεται με τη δημιουργία της τελικής μακροσκοπικής ρωγμής [55]. Αν πράγματι ισχύει αυτό, η στιγμή της πτώσης του ηλεκτρικού ρεύματος θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής του NMOD, σημείο που προκαλεί ισχυρές αντιπαραθέσεις λόγω των δυσκολιών που δημιουργεί η εκθετική μορφή των καμπύλων στην περιοχή αυτή των φορτίων.

3.2.2.3 Συμπερασματικά

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα από τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες δοκιμών (άμεσος εφελκυσμός και κάμψη τριών σημείων) γίνεται αντιληπτό ότι οι πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν συσχετίζονται πολύ καλά μεταξύ τους. Σημειώνεται ωστόσο ότι στην περίπτωση του εφελκυσμού, ενδεχομένως λόγω της εγγενούς αστάθειας του συστήματος που οφείλεται στην παρουσία δύο εγκοπών στα δοκίμια, υπάρχει μεν συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων αλλά όχι τόσο καλή όσο στις δοκιμές κάμψης τριών σημείων.



Εικ. 3.31: Η μεταβολή των τριών ποσοτήτων (μηχανική, ηλεκτρική και ακουστική) συναρτήσει της τάσης για ένα τυπικό δοκίμιο της κατηγορίας B.

3.2.3 ΚΟΝΙΑΜΑ

Πριν την παράθεση των πειραματικών δεδομένων για τη μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων διευκρινίζεται ότι δεν υπάρχει κανονισμός σχετικός με την παρασκευή και τις δοκιμές των κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά τις εργασίες αναστήλωσης και αποκατάστασης στα μνημεία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Το γεγονός αυτό υποχρεώνει τους επιστήμονες και τους υπευθύνους που εργάζονται για την προστασία των μνημείων να χρησιμοποιούν κανονισμούς που αναφέρονται σε σύγχρονα δομικά υλικά όπως είναι για παράδειγμα ο “Κανονισμός Τσιμέντων για Έργα από Σκυρόδεμα” (Προεδρικό Διάταγμα υπ’ αριθ. 244).

Η χρήση του κονιάματος στις εργασίες αναστήλωσης των μνημείων της Ακρόπολης των Αθηνών καθιερώθηκε ύστερα από πρόταση του καθηγητή Θ. Ν. Σκουλικίδη [72]. Κύριο συστατικό του συγκεκριμένου κονιάματος είναι το λευκό τσιμέντο, ειδικής κατασκευής, ώστε να έχει μικρό ποσό θεικών. Η εισήγηση αυτή βασίστηκε στα εξής δεδομένα:

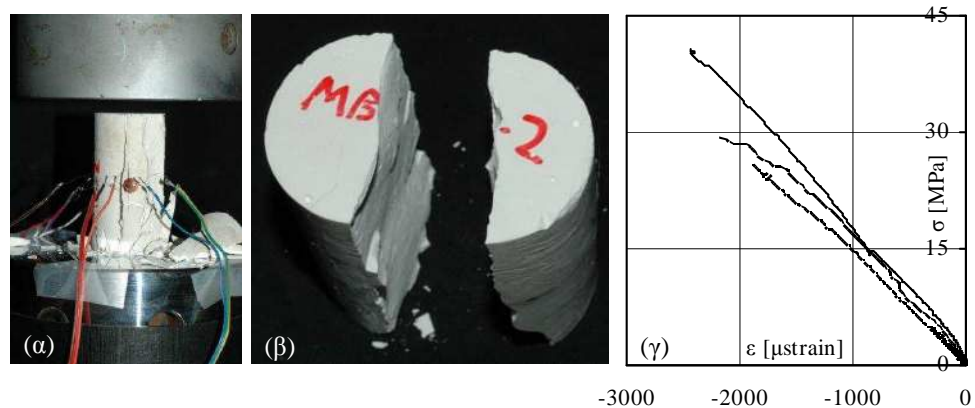
1. Εξετάστηκε το τσιμέντο που είχε χρησιμοποιήσει ο Μπαλάνος κατά την αναστήλωση του Ερεχθείου. Η μηχανική αντοχή, η ανθράκωση και η θείω-

σή του ήταν σε απολύτως ανεκτά όρια, καίτοι η ποιότητά του, την εποχή εκείνη, δεν ήταν ίδια με τη σημερινή.

2. Εξετάστηκαν οι επιφάνειες του μαρμάρου σε επαφή με το τσιμέντο αυτό και πιστοποιήθηκε ότι δεν είχαν υποστεί καμία φθορά, μηχανική ή χημική, από τσιμέντο ηλικίας 80 περίπου ετών.
3. Οι γνωστές επιπτώσεις των αλάτων του τσιμέντου σε πετρώματα μπορούν να εμφανιστούν σε πετρώματα με μεγάλο πορώδες και διαμπερείς πόρους αλλά όχι στο πεντελικό μάρμαρο με το εξαιρετικά μικρό πορώδες σε σύγκριση με τα περισσότερα γνωστά πετρώματα [72]. Η τιμή του πορώδους του μαρμάρου της Πεντέλης με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 2.1 με τα άνω όρια του εύρους να αναφέρονται σε ιδιαίτερα διαβρωμένο υλικό.

Η σύσταση του κονιάματος εξαρτάται από το λόγο για τον οποίο χρησιμοποιείται: αποκατάσταση θραυσμένων δομικών μελών με τη βοήθεια ράβδων οπλισμού (τύπος I) ή αποκατάσταση των συνδέσεων με τη βοήθεια συνδετηρίων στοιχείων (τύπος II).

Στην πρώτη περίπτωση (τύπος I) το κονίαμα αποτελείται από λευκό τσιμέντο και νερό. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του κονιάματος, κυλινδρικά δοκίμια (λόγος διαμέτρου προς ύψος $\sim 1/2$) υποβλήθηκαν σε πειράματα μονοαξονικής θλίψης (Εικ. 3.32α) και με συμπλέγματα ηλεκτρομηκνσιομέτρων μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις της περιφέρειας κάθε δοκιμίου σε 3 σημεία. Η μορφή αστοχίας ήταν ψαθυρή με σημαντική βλάβη στο μέγιστο φορτίο ή ακόμα και πλήρη καταστροφή των δοκιμίων. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αξονικών τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων εμφανίζονται στην Εικ. 3.32γ. Οι δοκιμές αυτές έδωσαν για το κονίαμα τις εξής τιμές: $E \sim 15.5$ GPa, $\nu \sim 0.26$, $\sigma_y \sim 10$ MPa, $\sigma_u \sim 35$ MPa. Επιπρόσθετα, παρόμοια κυλινδρικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian test) (Εικ. 3.32β) με βάση τις οποίες προέκυψε ενδεικτική τιμή εφελκυστικής αντοχής 2 MPa [87].

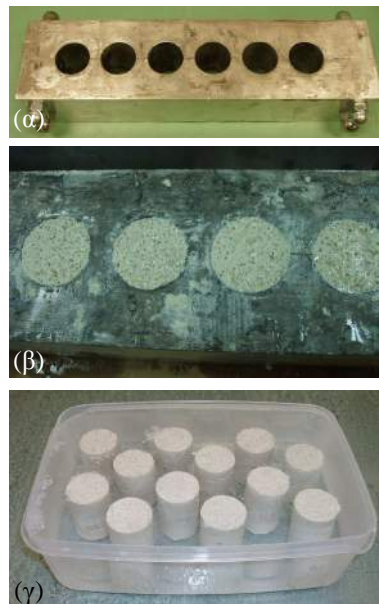


Εικ. 3.32: Μηχανική συμπεριφορά του κονιάματος τύπου I. (α) Δοκίμιο υπό θλίψη.
(β) Δοκίμιο υπό αντιδιαμετρική θλίψη (Brazilian test).
(γ) Καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων υπό μονοαξονική θλίψη [87].

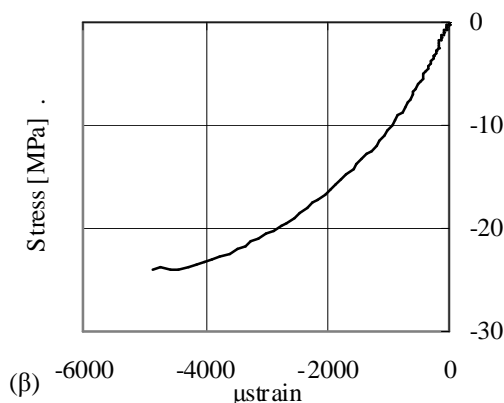
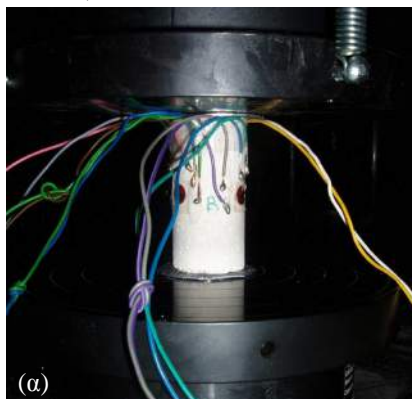
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κονιάματος τύπου Π προσδιορίστηκαν με δοκιμές που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Το κονίαμα αυτού του τύπου που αντικαθιστά τον αρχαίο μόλυβδο στις κατεστραμμένες συνδέσεις αποτελείται από λευκό τσιμέντο, χαλαζιακή άμμο και νερό (τσιμέντο/άμμος = 1/3 κατά βάρος). Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από τεχνίτες του εργοταξίου του Παρθενώνα, τοποθετήθηκαν σε κατάλληλης μορφής μήτρες (Εικ. 3.33α,β) ώστε να προκύψουν κυλινδρικά δοκίμια με λόγο διάμετρος/ύψος = 1/2 και συντηρήθηκαν μέσα σε νερό για 28 ημέρες (Εικ. 3.33γ), όπως επιβάλλεται από τον κανονισμό τσιμεντών.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300 kN που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του Ε.Μ.Π. Προ της πειραματικής διαδικασίας προσαρμόστηκαν με ειδική κόλλα τρία (3) ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges), Εικ. 3.34α, σε κάθε δοκίμιο (ανά 120°) και συνδέθηκαν με κατάλληλη συσκευή καταγραφής των πειραματικών δεδομένων. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν με έλεγχο της μετατόπισης με ρυθμό μεταβολής (*displacement control*) 0.01 mm/sec ώστε να προσομοιώνονται συνθήκες “οιονει” στατικές (quasi-static). Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του συγκεκριμένου κονιάματος (Εικ. 3.34β). Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδωσε τα κάτωθι αποτελέσματα: μέτρο ελαστικότητας $E \sim 10.5$ GPa, τάση διαρροής σε θλίψη $\sigma_{y,c} \sim 17$ MPa, τάση θραύσης σε θλίψη $\sigma_{u,c} \sim 24$ MPa και λόγος Poisson $\nu \sim 0.18$.

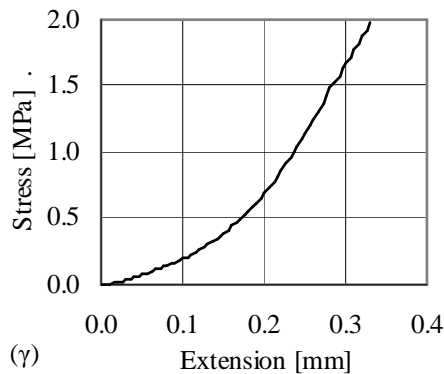
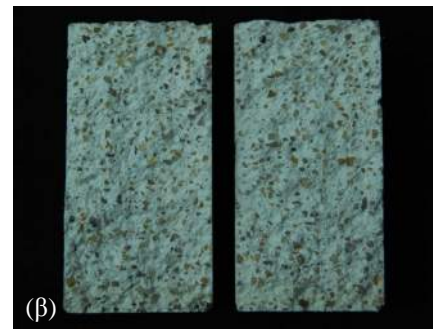


Εικ. 3.33: (α) Τυπική μήτρα χύτευσης του κονιάματος. (β) Κονίαμα μέσα στη μήτρα. (γ) Συντήρηση δοκιμίων σε νερό.



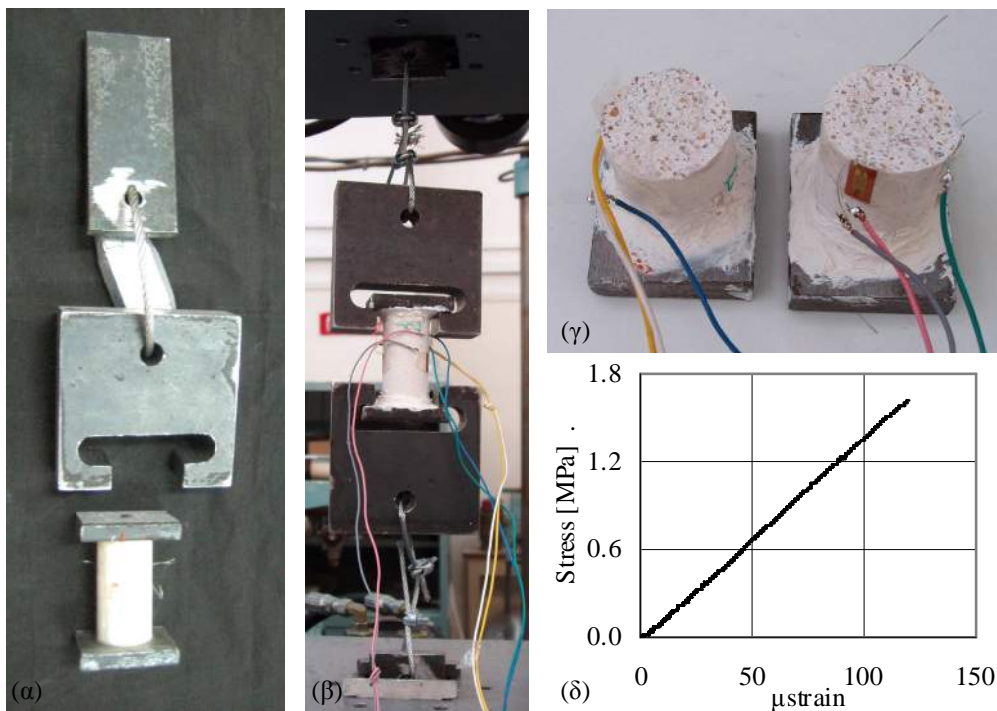
Εικ. 3.34: (α) Τυπικό δοκίμιο κονιάματος στο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη του πειράματος μονοαξονικής θλίψης. (β) Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.

Όπως είναι γνωστό γενικά τα κονιάματα ως ψαθυρά υλικά δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά σε εφελκυσμό και θλίψη. Για μια πρώτη εκτίμηση λοιπόν της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος που μελετάται ακολούθησε μια σειρά δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian tests), Εικ. 3.35. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300 kN με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό μεταβολής (*displacement control*) 0.005 mm/sec. Η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής που προέκυψε από τις δοκιμές αυτές ήταν $\sigma_{u,t}^{Br} \sim 2.14$ MPa.



Εικ. 3.35: (α) Τυπικό δοκίμιο κονιάματος στο πλαίσιο φόρτισης πριν την έναρξη του πειράματος αντιδιαμετρικής θλίψης. (β) Τυπική μορφή θραύσης. (γ) Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης στο κέντρο του δοκιμίου - επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Ωστόσο, για την περιγραφή της εφελκυστικής συμπεριφοράς του κονιάματος με την πλήρη καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων, υλοποιήθηκαν συμπληρωματικά δοκιμές αμέσου εφελκυσμού. Η πειραματική διάταξη (Εικ. 3.36) που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από δύο μεταλλικές πλάκες (στις οποίες κολλήθηκαν οι βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου) που τοποθετούνται μεταξύ δύο ειδικά διαμορφωμένων αρπαγών. Αυτές συνδέονται, με τη βοήθεια συρματοσχοίνων, με δύο μεταλλικές πλάκες που συγκρατούνται από τις αρπάγες του πλαισίου φόρτισης και μέσω αυτών επιβάλλεται η φόρτιση στο δοκίμιο. Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έχει πολλούς βαθμούς ελευθερίας επιτρέποντας την αυτο-ευθυγράμμιση του δοκιμίου και ελαττώνοντας στο ελάχιστο τα παρασιτικά φαινόμενα. Η σχέση αξονικών τάσεων - παραμορφώσεων είναι γραμμική μέχρι το φορτίο αστοχίας, $\sigma_{u,t} \sim 1.70$ MPa.



Εικ. 3.36: (α) Η “μισή” πειραματική διάταξη για την υλοποίηση των δοκιμών αμέσου εφελκυσμού. (β) Η πειραματική διάταξη, με ένα τυπικό δοκίμιο κονιάματος, τοποθετημένη στο πλαίσιο φόρτισης. (γ) Τυπική μορφή θραυσμένου δοκιμίου. (δ) Τυπική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.

3.2.4 TITANIO

Κατά τις αντικαταστάσεις των μεταλλικών σκελετών και συνδέσμων (σύνδεσμοι μορφής “Γ” και γόμφοι) πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των μετάλλων ή κραμάτων που θα τα αντικαταστήσουν. Θα πρέπει να συνεκτιμώνται τα ακόλουθα:

1. Η αντοχή τους στη διάβρωση, λαμβάνοντας υπ’ όψιν τη ρύπανση της ατμόσφαιρας, τη διακύμανση της θερμοκρασίας και υγρασίας και τη ρύπανση του εδάφους, αν το είδος της πέτρας επιτρέπει μεγάλους ύψους τριχοειδή αναρρίχηση.
2. Η μηχανική αντοχή, προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες διατομές συνδέσμων και συνεπώς μεγάλος τραυματισμός του αυθεντικού πετρώματος.
3. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής πρέπει να είναι παραπλήσιος με εκείνον του πετρώματος.

Η χρήση του τιτανίου προτάθηκε το 1971 από τον καθηγητή Θ. Ν. Σκουλικίδη και από το 1979 χρησιμοποιείται στην Ακρόπολη καθώς και σε άλλα μνημεία της Ελλάδας και του εξωτερικού.

Το τιτάνιο αντέχει περισσότερο από κάθε άλλο υποψήφιο μεταλλικό υλικό στη διάβρωση εξαιτίας των $TiO-TiO_2-Ti_2O_3$ που σχηματίζονται αμέσως μόλις έλθει σε επαφή με τον αέρα. Όσο πιο έντονο είναι το περιβάλλον, τόσο η αντοχή του αυξάνει, γιατί αυξάνει το πάχος του TiO_2 , μέχρι κάποιο οριακό σημείο, οπότε η οξειδωση σταματά [72].

Γενικά το τιτάνιο έχει πολύ μεγάλη αντοχή σε όλα τα είδη διάβρωσης, όπως το εμπορικός καθαρό τιτάνιο Grade 2 κατά ASTM B265 και B348 που χρησιμοποιείται στα έργα της Ακρόπολης το οποίο είναι το πλέον συμβατό υλικό με το μάρμαρο και από άποψη φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.2, στον οποίο φαίνονται οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου, τα πλεονεκτήματά του είναι:

- Πολύ μεγάλη αντοχή ανά μονάδα βάρους (διπλάσια του χάλυβα St 42).
- Ο συντελεστής Poisson είναι ίσος με αυτόν του μαρμάρου, άρα δεν υπάρχει κίνδυνος διάρρηξης από διαφορετική εγκάρσια συστολή των δυο υλικών.
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του τιτανίου είναι πολύ κοντά σ' αυτόν του μαρμάρου ($\epsilon_M = 8 \times 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$) άρα δεν υπάρχει κίνδυνος από διαφορετική θερμική διαστολή των δυο υλικών.
- Το εμπορικός καθαρό τιτάνιο έχει σημαντική παραμόρφωση θραύσης άρα ως υλικό ευνοεί τη διαμόρφωση συνδέσεων με ικανοποιητική πλαστικότητα [6].

| | |
|--|---------|
| Πυκνότητα [gr/cm^3] | 4.51 |
| Μέτρο ελαστικότητας [GPa] | 105 |
| Συντελεστής Poisson | 0.32 |
| Συντελεστής θερμικής διαστολής [$10^{-6} \text{ grad}^{-1}$] | 9 |
| Θερμοαγωγιμότητα [$\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{grad} \cdot \text{sec}$] | 0.007 |
| Σκληρότητα [HB] | 130 |
| Εφελκυστική αντοχή [MPa] | 420 |
| Όριο διαρροής [MPa] | 300 |
| Επιμήκυνση θραύσης [%] | 20 - 22 |

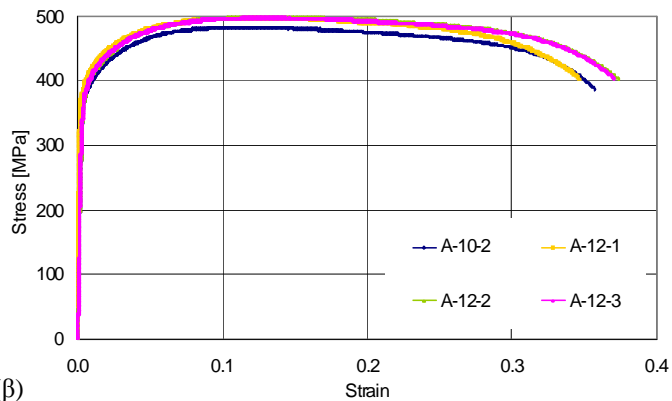
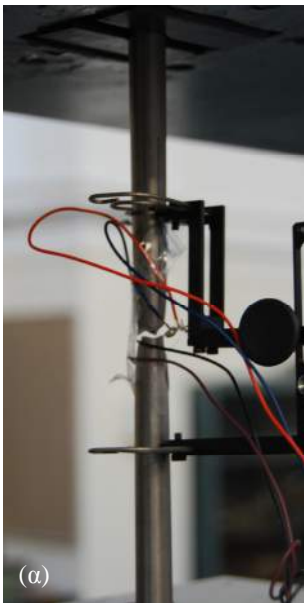
Πίνακας 3.2: Οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου [6].

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής υλοποιήθηκαν συμπληρωματικές δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού σε ράβδους τιτανίου. Η παραμόρφωση των δοκιμίων μετρήθηκε τόσο με την προσαρμογή ηλεκτρομηκυσιομέτρου (strain gauge) όσο και με τη βοήθεια ενός παραδοσιακού μηχανομετρητή (Εικ. 3.37α). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON 300 kN. Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης παρουσιάζονται στην Εικ. 3.37β ενώ τα μηχανικά

χαρακτηριστικά του τιτανίου φαίνονται στον Πίνακα 3.3. Οι διακυμάνσεις αφορούν διαφορετικής παραλαβής δοκίμια.

| | |
|---------------------------|-----------|
| Μέτρο ελαστικότητας [GPa] | 100 -108 |
| Συντελεστής Poisson | 0.34 |
| Όριο διαρροής [MPa] | 270 - 415 |
| Εφελκυστική αντοχή [MPa] | 430 - 492 |
| Επιμήκυνση θραύσης [%] | 25 - 37 |

Πίνακας 3.3: Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου.



Εικ. 3.37: (α) Τυπικό δοκίμιο τιτανίου στο πλαίσιο φόρτισης. Διακρίνονται τα καλώδια του ηλεκτρομηκνσιομέτρου και το παραδοσιακό μηκνσιόμετρο.
(β) Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

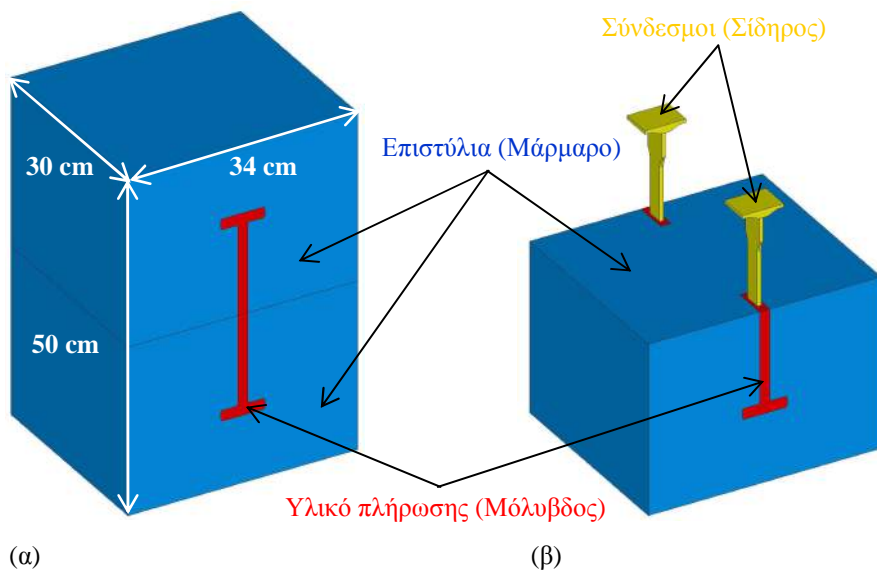
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι μια αριθμητική μελέτη που στηρίζεται σε ένα υπολογιστικό προσομοίωμα που δεν έχει επικυρωθεί βάσει πειραματικών δεδομένων δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Κατ' επέκταση τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν μπορούν να αξιοποιηθούν από την επιστημονική κοινότητα ούτε από τους επιστήμονες που εργάζονται σε έργα αναστήλωσης - αποκατάστασης παρόμοιων αρχαίων μνημείων. Για το λόγο αυτό, η αριθμητική μελέτη της σύνδεσης δύο επιστυλίων με τη βοήθεια συνδέσμων μορφής "Γ" υπό εφελκυσμό που παρουσιάζεται εδώ στηρίζεται στις δοκιμές εφελκυσμού που υλοποιήθηκαν τη δεκαετία του '90 από τον Δρα Κ. Ζάμπα και είναι ανεκτίμητης αξίας δεδομένου ότι είναι τα μοναδικά στη διεθνή βιβλιογραφία.

Η μελέτη αποτελείται από δύο μέρη. Αρχικά κατασκευάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο που προσομοιώνει τα δοκίμια εφελκυσμού του Δρα Κ. Ζάμπα και επικυρώθηκε βάσει των καμπύλων δύναμης - μετατόπισης (Εικ. 1.20). Στη συνέχεια, έγινε τροποποίηση του αριθμητικού μοντέλου ώστε να προσομοιώνεται η πραγματική κατάσταση. Το νέο αυτό αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης σειράς γεωμετρικών παραμέτρων στη μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης.

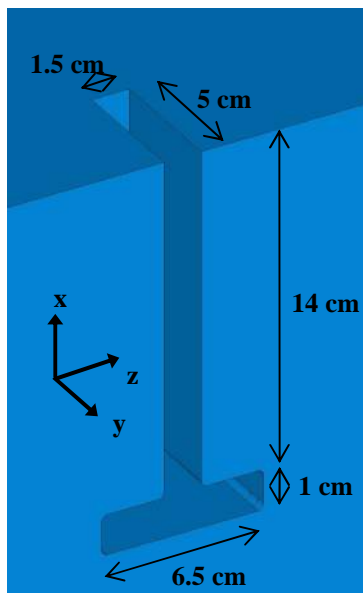
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ - ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ

Το αρχικό αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε προσομοιώνει ακριβώς τη γεωμετρία των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό στο εργοστάσιο του Παρθενώνα [6]. Αποτελείται από δύο όμοιους όγκους μαρμάρου Διονύσου με διαστάσεις 25x30x34 cm³ στους οποίους διαμορφώθηκαν δύο εντορμίες βάθους 5 cm. Μέσα στις εντορμίες τοποθετούνται οι δύο σύνδεσμοι μορφής "Γ" από σίδηρο (σε κλίμακα 2:3) και το κενό που απομένει γεμίζει με συνδετικό υλικό. Αφού το υλικό πλήρωσης της εντορμίας (μόλυβδος/κονίαμα) αποδείχθηκε πειραματικά ότι δεν επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης υπό εφελκυσμό (Εικ. 1.20) [6], επιλέχθηκε ο μόλυβδος ώστε να προσομοιώνεται η αρχαία σύνδεση "μάρμαρο-μόλυβδος-σίδηρος". Η ακριβής γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος παρουσιάζεται στην Εικ. 4.1.

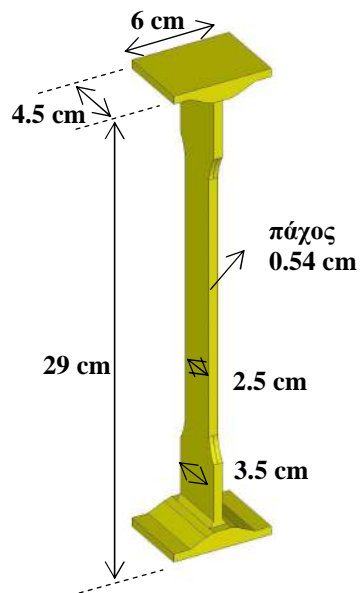


(α)

(β)



(γ)



(δ)

Εικ. 4.1: (α) Το πλήρες αριθμητικό προσομοίωμα.
 (β) Το μισό αριθμητικό μοντέλο. Διακρίνεται καθαρά η θέση των συνδέσμων.
 (γ) Λεπτομέρεια της μισής εντομίας και τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά.
 (δ) Η γεωμετρία και οι διαστάσεις ενός εκ των δύο συνδέσμων.

Οι καταστατικοί νόμοι του σιδήρου και του μολύβδου περιγράφηκαν με τη βοήθεια πολυ-γραμμικών καμπύλων (Εικ. 4.2α,β) βάσει των μηχανικών χαρακτηριστικών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Αντίθετα, το μάρμαρο προσομοιώθηκε ως γραμμικώς ελαστικό υλικό (Εικ. 4.2γ). Οι μηχανικές ιδιότητες των τριών υλικών φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

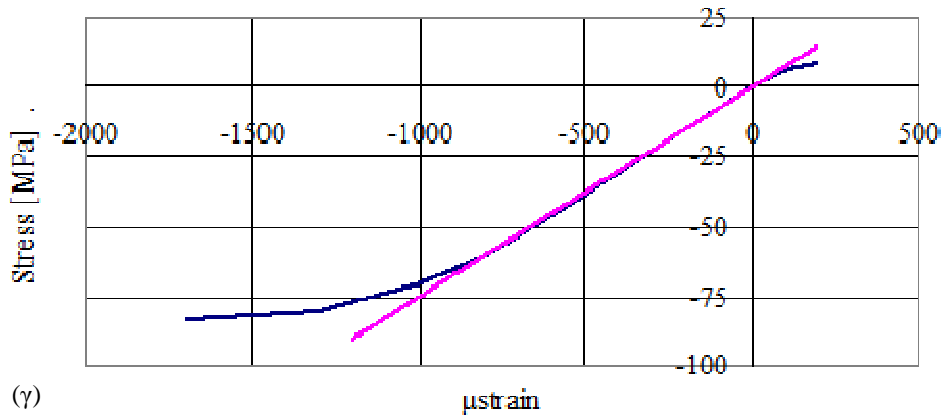
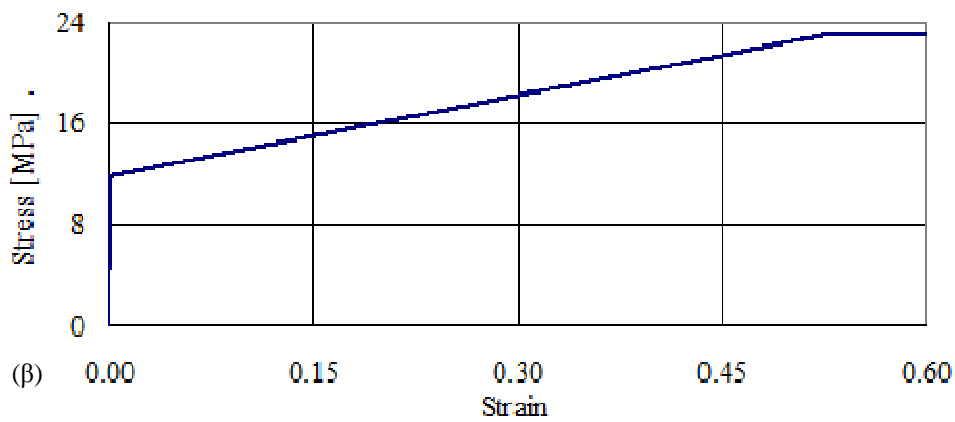
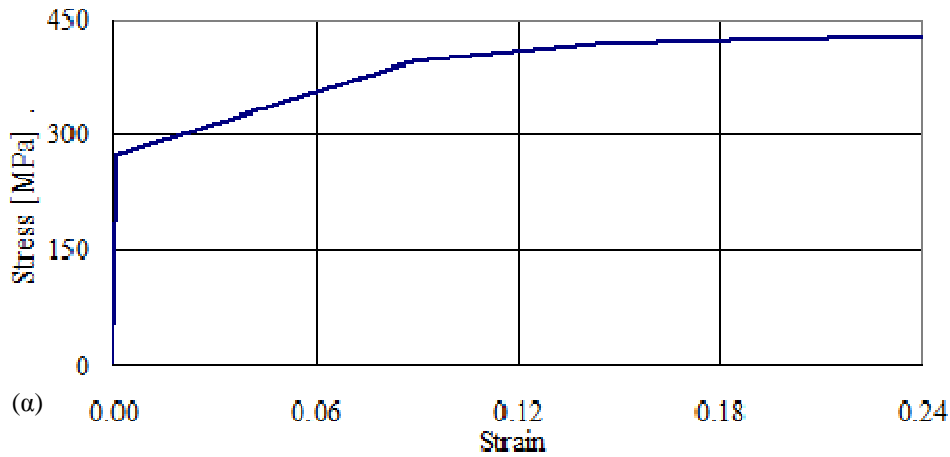
Στη συνέχεια ακολούθησε η διακριτοποίηση του αριθμητικού μοντέλου, η δημιουργία δηλαδή ενός κανάβου πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση των όγκων έγινε με το στοιχείο *SOLID185* που είναι κατάλληλο για τρισδιάστατες κατασκευές και ορίζεται από οκτώ κόμβους με τρεις βαθμούς ελευθερίας για κάθε έναν κατά τις x , y , z διευθύνσεις. Έχει τις ιδιότητες ενός ορθότροπου υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα πλαστικότητας και μεγάλων παραμορφώσεων. Η γεωμετρία και οι θέσεις των κόμβων του στοιχείου φαίνονται στην Εικ. 4.3. Το στοιχείο δεν έχει ενδιάμεσους κόμβους, κάτι που απαιτείται εξαιτίας της μη γραμμικότητας του προβλήματος.

Οι όγκοι των συνδέσμων και του συνδετικού υλικού διακριτοποιήθηκαν με την τεχνική “*Mapped Meshing*”, δηλαδή οι όγκοι περιλαμβάνουν μόνο εξαεδρικά στοιχεία (bricks) που τοποθετούνται σε σειρές δημιουργώντας ένα ομαλό πλέγμα. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει οι όγκοι του μοντέλου να έχουν τη μορφή εξαέδρου (έξι επιφάνειες), σφήνας ή πρίσματος (πέντε επιφάνειες) ή τετραέδρου (τέσσερις επιφάνειες), Εικ. 4.4.

Από την άλλη μεριά, ο όγκος του μαρμάρου διακριτοποιήθηκε με την τεχνική “*Volume Sweeping*” σύμφωνα με την οποία αρχικά διακριτοποιείται μια επιφάνεια κι έπειτα τα στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί προβάλλονται μέχρι την απέναντι επιφάνεια του όγκου.

Το τελικό στάδιο της διακριτοποίησης είναι η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους του στοιχείου αφού από αυτό εξαρτώνται το πλήθος των στοιχείων και η πυκνότητα του κανάβου που δημιουργείται. Είναι προφανές ότι μείωση του μεγέθους του στοιχείου συνεπάγεται αύξηση του πλήθους των στοιχείων και πύκνωση του πλέγματος ενώ αύξησή του συνεπάγεται τα αντίθετα. Επιπρόσθετα, είναι γνωστό ότι ένας πολύ πυκνός κανάβος αυξάνει τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο για την επίλυση του μοντέλου ενώ αντίθετα ένας πολύ αραιός κανάβος μειώνει μεν τον υπολογιστικό χρόνο αλλά δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα. Η βέλτιστη λύση προκύπτει μέσα από μία διαδικασία σύγκλισης των αποτελεσμάτων δηλαδή από μία σειρά διαδοχικών επιλύσεων με διαφορετικό κάθε φορά μέγεθος στοιχείου και τη μελέτη κάποιου μεγέθους συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων.

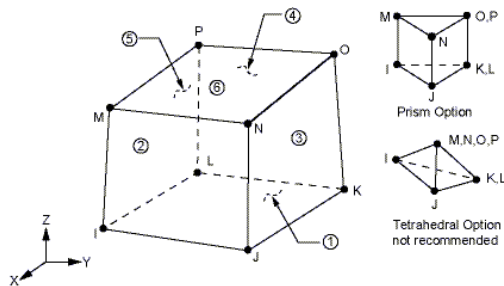
Στην περίπτωση του αρχικού υπολογιστικού προσομοιώματος που μελετάται, η σύγκλιση έγινε βάσει της αξονικής τάσης που αναπτύσσεται στο μάρμαρο κατά μήκος της “Γραμμής 1” (Εικ. 4.5α). Από την Εικ. 4.5β προκύπτει ότι πλήθος περίπου 55,000 στοιχείων είναι ικανοποιητικό όσον αφορά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο κανάβος που τελικά υιοθετήθηκε παρουσιάζεται στην Εικ. 4.6.



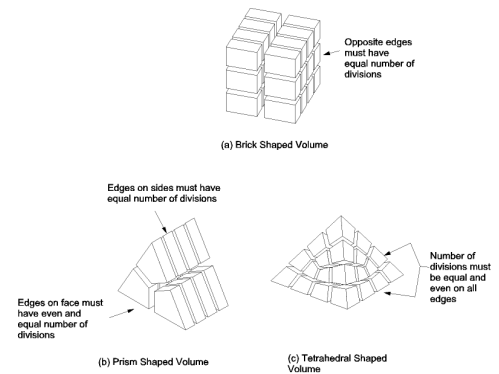
Εικ. 4.2: Οι πολυ-γραμμικοί καταστατικοί νόμοι (α) του σιδήρου και (β) του μολύβδου. (γ) Ο πραγματικός καταστατικός νόμος του μαρμάρου Διονύσου και η προσομοίωσή του ως γραμμικώς ελαστικού υλικού.

| | E [GPa] | ν [-] | σ_y [MPa] | σ_u [MPa] |
|------------------|---------|-----------|------------------|------------------|
| Σίδηρος | 210 | 0.27 | 275 | 430 |
| Μόλυβδος | 14 | 0.43 | 12 | 23 |
| Μάρμαρο Διονύσου | 75.3 | 0.26 | - | - |

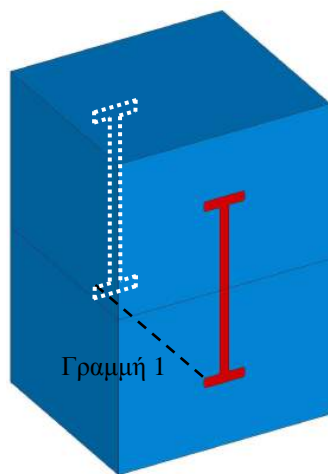
Πίνακας 4.1: Οι μηχανικές ιδιότητες των τριών υλικών του αριθμητικού μοντέλου.



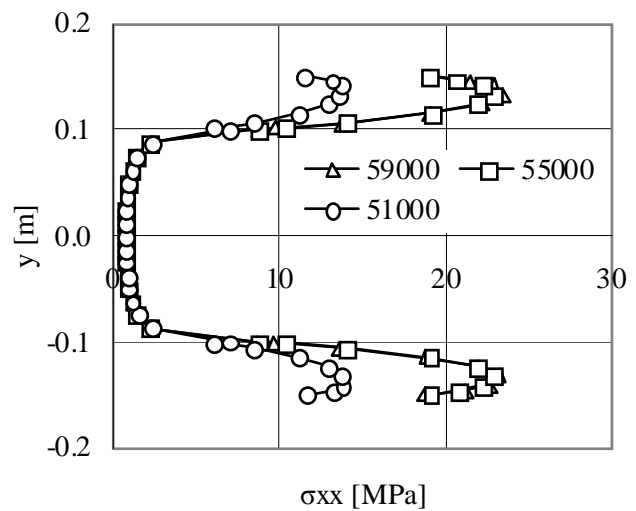
Εικ. 4.3: Το στοιχείο SOLID185.



Εικ. 4.4: Γεωμετρικοί περιορισμοί για την εφαρμογή της τεχνικής “Mapped Meshing”.

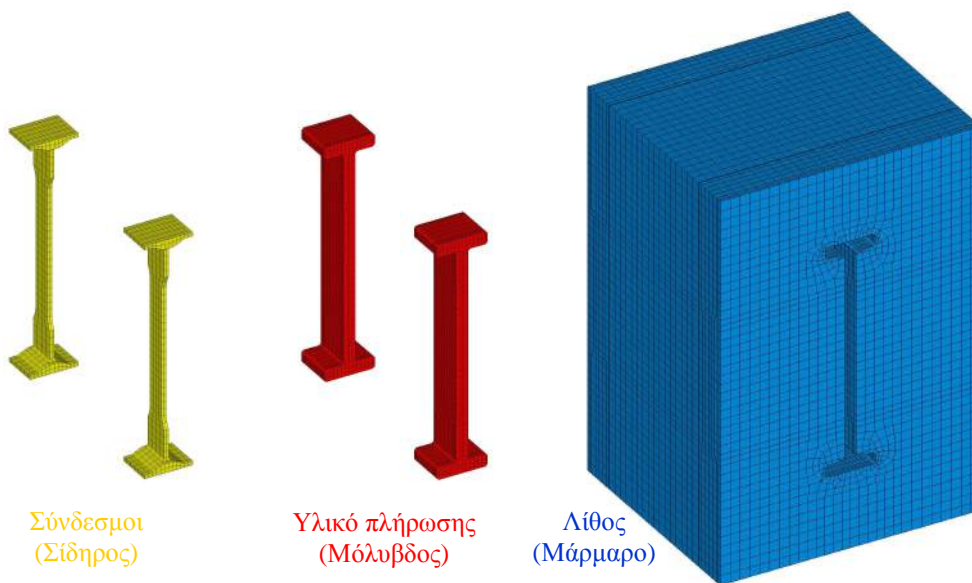


(α)



(β)

Εικ. 4.5: (α) Η ευθεία (εντός της περιοχής στην οποία αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις) κατά μήκος της οποίας έγινε η σύγκλιση των αποτελεσμάτων.
 (β) Η αξονική τάση συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων.



Εικ. 4.6: Ο κάναβος που τελικά υιοθετήθηκε για τους συνδέσμους, το υλικό πλήρωσης των εντορμιών και τους όγκους του μαρμάρου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι κατά την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου λήφθηκαν υπ' όψιν οι δύο διεπιφάνειες που δημιουργούνται από την αλληλουχία των τριών υλικών (Εικ. 4.7):

1. Μεταξύ των συνδέσμων και του συνδετικού υλικού, που έχουν τη γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας των συνδέσμων (Εικ. 4.8).
2. Μεταξύ του συνδετικού υλικού και των εντορμιών, που έχουν τη μορφή των εντορμιών χωρίς την ελεύθερη επιφάνειά τους (Εικ. 4.8).

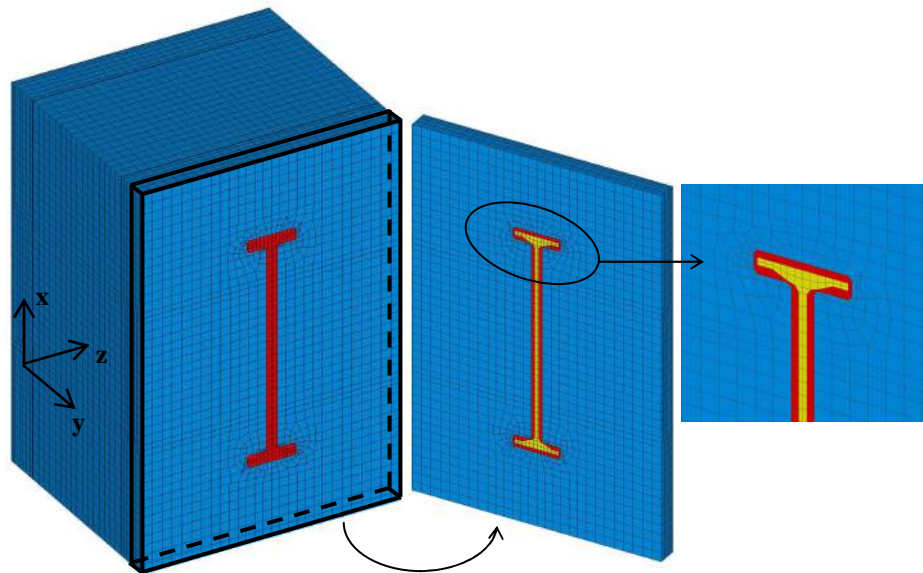
Για την προσομοίωση των διεπιφανειών αυτών χρησιμοποιήθηκαν ζεύγη στοιχείων επαφής (contact elements) που εφάπτονται στα ήδη υπάρχοντα από τη διακριτοποίηση στοιχεία. Τα καινούρια αυτά στοιχεία μεταφέρουν τάσεις μόνο από την εξωτερική στην εσωτερική πλευρά τους και από εκεί στο υπόλοιπο στερεό και η σχετική τους κίνηση μπορεί να ορισθεί με διάφορους τρόπους. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η κατάσταση των διεπιφανειών ορίστηκε ως επαφή με τριβή και ο συντελεστής τριβής τέθηκε ίσος με:

- 0.25 για τη διεπιφάνεια σιδήρου-μολύβδου
- 0.50 για τη διεπιφάνεια μολύβδου-μαρμάρου

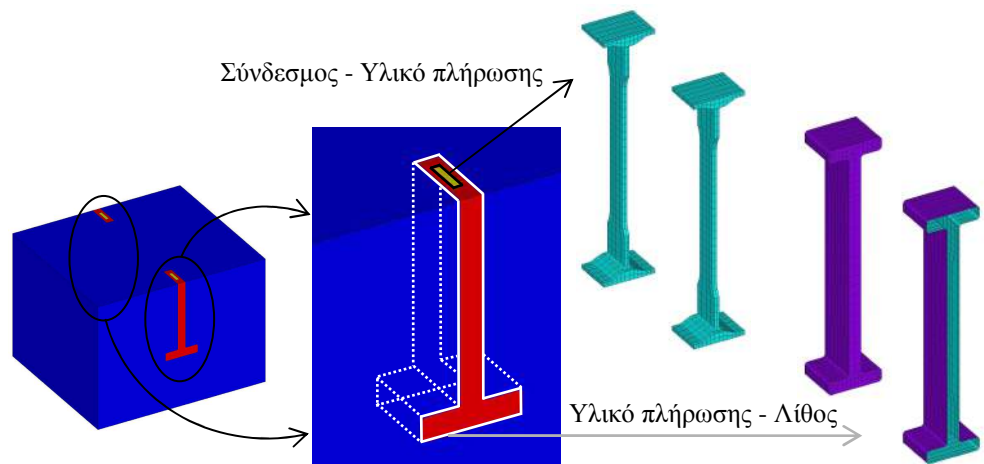
Ένα τυπικό ζεύγος στοιχείων επαφής αποτελείται από τα στοιχεία *target*, που προσομοιώνουν την επιφάνεια επαφής του περισσότερο “άκαμπτου” υλικού, και τα στοιχεία *contact*, που προσομοιώνουν την αντίστοιχη πιο “εύκαμπτη” επιφάνεια. Κάθε επιφάνεια *target* έρχεται σε επαφή με μόνο μία επιφάνεια *contact* και αντίστροφα. Τα στοιχεία επαφής που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο ήταν

το *TARGE170* (Εικ. 4.9α) και το *CONTA173* (Εικ. 4.9β), στοιχεία χωρίς ενδιάμεσους κόμβους λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος (όπως το στοιχείο *SOLID185* που προαναφέρθηκε). Ως *target* ορίστηκαν οι επιφάνειες:

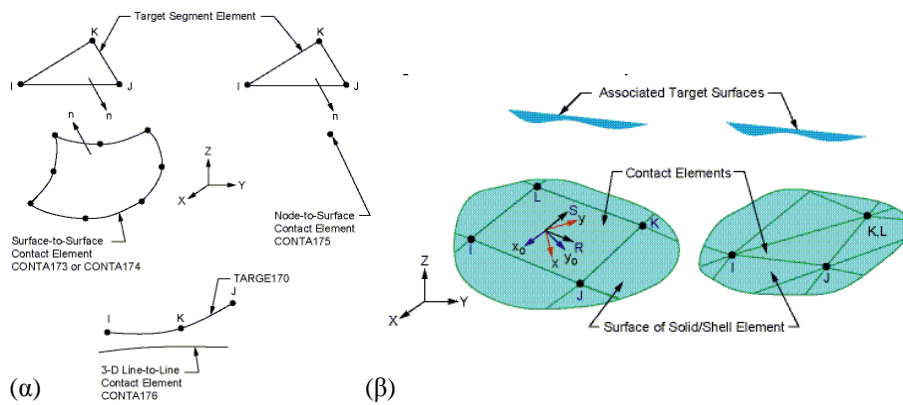
- Των συνδέσμων για τις διεπιφάνειες των συνδέσμων με το συνδετικό υλικό.
- Του μαρμάρου για τις διεπιφάνειες του συνδετικού υλικού με το μάρμαρο.



Εικ. 4.7: Η αλληλουχία των υλικών σε μία τομή παράλληλη στο xz επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο του συνδέσμου.



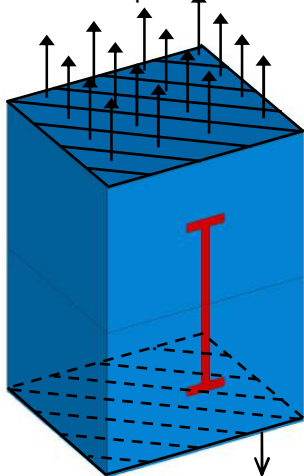
Εικ. 4.8: Οι θέσεις και η μορφή των διεπιφανειών του αριθμητικού προσομοιώματος.



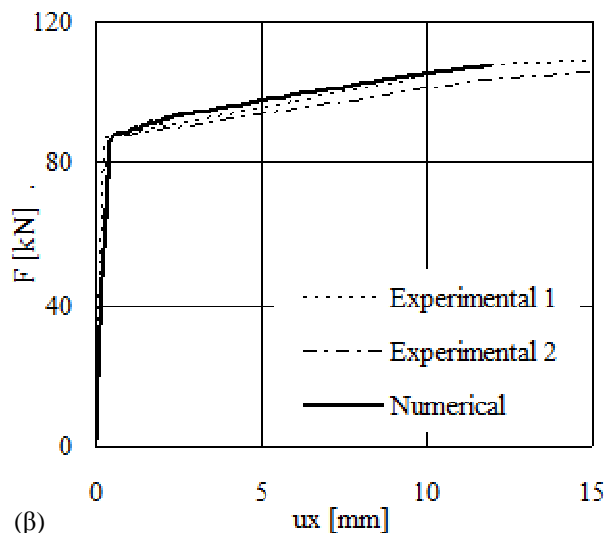
Εικ. 4.9: Το στοιχείο (α) TARGE170 και (β) CONTACTA173.

Για την ακριβή προσομοίωση των δοκιμών εφελκυσμού [6] το αριθμητικό μοντέλο θεωρήθηκε κατακόρυφο, ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και το ίδιο βάρος του μαρμάρου. Όλοι οι κόμβοι της βάσης του προσομοιώματος ακινητοποιήθηκαν περιορίζοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους ενώ στην άνω επιφάνεια του μοντέλου επιβλήθηκε ομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση (κατά μήκος των αξόνων των συνδέσμων), Εικ. 4.10α. Η καμπύλη δύναμης - μετατόπισης που προέκυψε παρουσιάζεται μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες (Εικ. 1.20) [6] στην Εικ. 4.10β. Η συσχέτιση είναι εξαιρετικά ικανοποιητική όχι μόνο από ποιοτική αλλά και από ποσοτική σκοπιά.

Επιβαλλόμενη μετατόπιση κατά μήκος των αξόνων των συνδέσμων



(α) Πάκτωση της βάσης



(β)

Εικ. 4.10: (α) Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.

(β) Επικύρωση του αριθμητικού προσομοιώματος.

4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

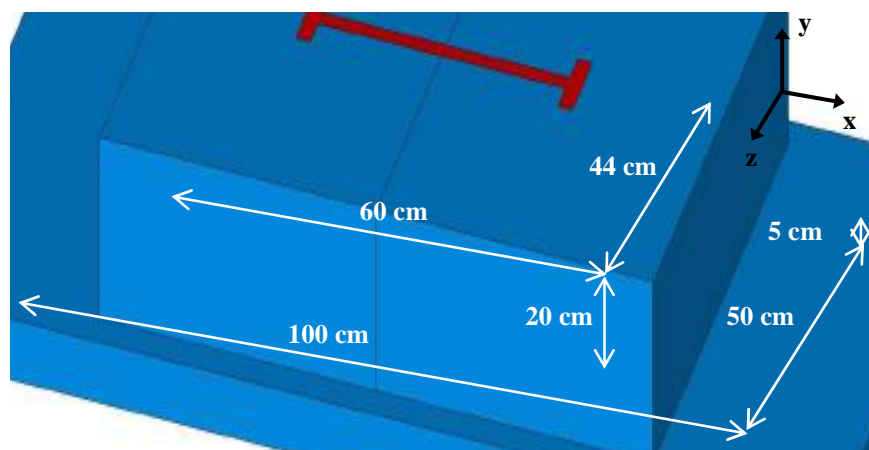
Η πραγματική βέβαια εικόνα της σύνδεσης των επιστυλίων είναι διαφορετική από αυτήν που πειραματικά προσομοιώθηκε και περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα επιστύλια συνδέονται με έναν μεταλλικό σύνδεσμο και τμήμα των επιστυλίων περίξ της εντορμίας εδράζεται στον άβακα ενός κιονοκράνου (Εικ. 4.11).



Εικ. 4.11: Μία τοπική σύνδεση δύο εν σειρά επιστυλίων. Διακρίνεται καθαρά ο άβακας.

Το επικυρωμένο αριθμητικό προσομοίωμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο για την προσομοίωση της κατάστασης αυτής. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα καινούριο προσομοίωμα αξιοποιώντας τη συμμετρία του επικυρωμένου μοντέλου. Το νέο αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από δύο όμοιους όγκους μαρμάρου Διονύσου με διαστάσεις $30 \times 20 \times 44 \text{ cm}^3$ στους οποίους διαμορφώθηκε εντορμία βάθους 5 cm. Οι όγκοι συνδέονται με έναν σύνδεσμο μορφής “Γ” από σίδηρο και το κενό πληρούται με μόλυβδο. Επιπρόσθετα, κατασκευάστηκε έναν νέος μαρμάρινος όγκος, $100 \times 5 \times 50 \text{ cm}^3$, που προσομοιώνει τον άβακα πάνω στον οποίο εδράζεται η σύνδεση (Εικ. 4.12).

Τα υλικά του μοντέλου αναφοράς προσομοιώθηκαν ακριβώς όπως τα υλικά του επικυρωμένου αριθμητικού προσομοιώματος (Εικ. 4.2α-γ, Πίνακας 4.1).



Εικ. 4.12: Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του νέου αριθμητικού μοντέλου αναφοράς, R.

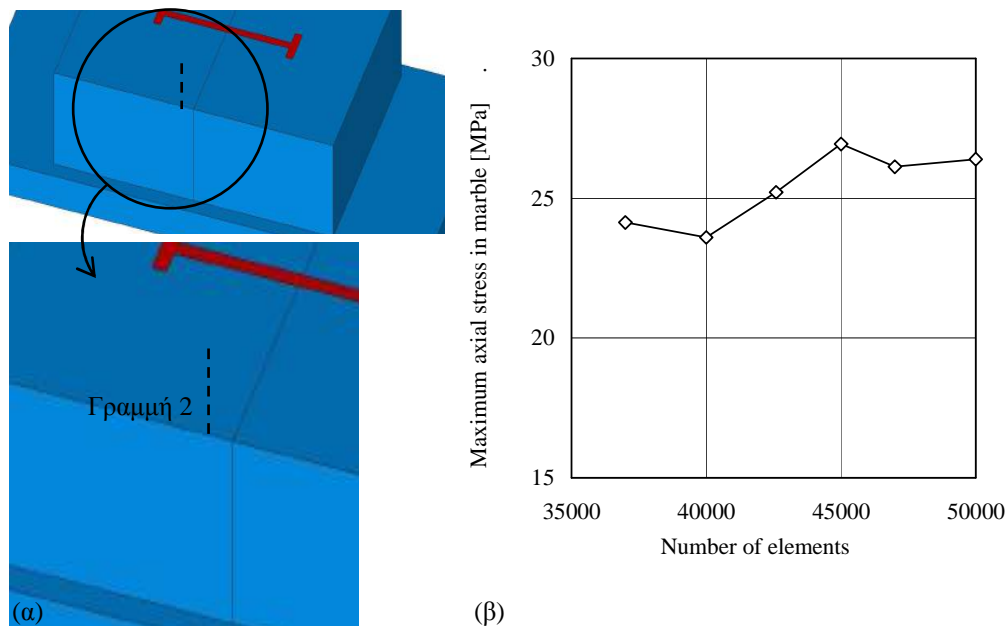
Για τη διακριτοποίηση των όγκων του χρησιμοποιήθηκε το ίδιο στοιχείο (*SOLID185*, Εικ. 4.3) και ακολουθήθηκε νέα διαδικασία σύγκλισης βάσει της μέγιστης αξονικής τάσης που αναπτύσσεται στο μάρμαρο κατά μήκος της “Γραμμής 2” (Εικ. 4.13α). Πλήθος 45,000-50,000 στοιχείων εμφανίζεται να είναι ικανοποιητικό (Εικ. 4.13β). Ο κάναβος του προσομοιώματος αναφοράς παρουσιάζεται στην Εικ. 4.14 και αποτελείται από ~47,000 στοιχεία.

Στο μοντέλο αναφοράς υπάρχουν συνολικά τρεις διεπιφάνειες, οι δύο που προϋπήρχαν (1, 2) και μία νέα (3):

1. Μεταξύ του συνδέσμου και του συνδετικού υλικού, Εικ. 4.15.
2. Μεταξύ του συνδετικού υλικού και της εντορμίας, Εικ. 4.15.
3. Μεταξύ των βάσεων των επιστυλίων και της άνω επιφάνειας του άβακα, Εικ. 4.15.

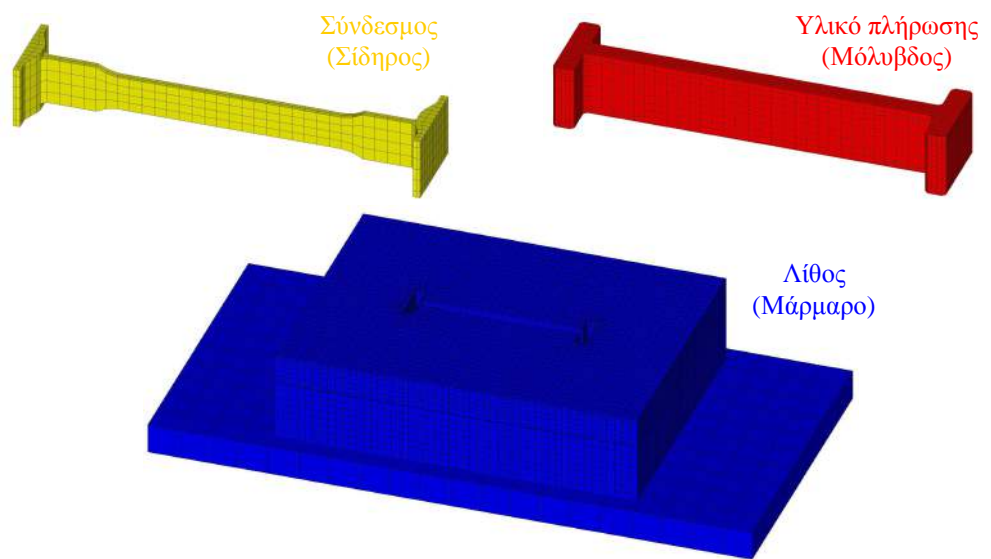
Η προσομοίωσή τους έγινε με ζεύγη στοιχείων επαφής, ήτοι το *TARGE170* (Εικ. 4.9α) και το *CONTA173* (Εικ. 4.9β). Ο συντελεστής τριβής που ορίστηκε για τη νέα διεπιφάνεια μεταξύ των όγκων μαρμάρου ισούται με 0.70.

Για την υλοποίηση εφελκυστικής φόρτισης του συνδέσμου και του μολύβδου, πακτώθηκε η ελεύθερη αριστερή επιφάνεια του αριστερού επιστυλίου ενώ στην ελεύθερη δεξιά επιφάνεια του δεξιού επιστυλίου επιβλήθηκε ομοιόμορφη οριζόντια μετατόπιση, κατά μήκος του άξονα του συνδέσμου, ίση με 1 mm. Επιπλέον, ακινητοποιήθηκε η βάση του κιονοκράνου όπως φαίνεται στην Εικ. 4.16.

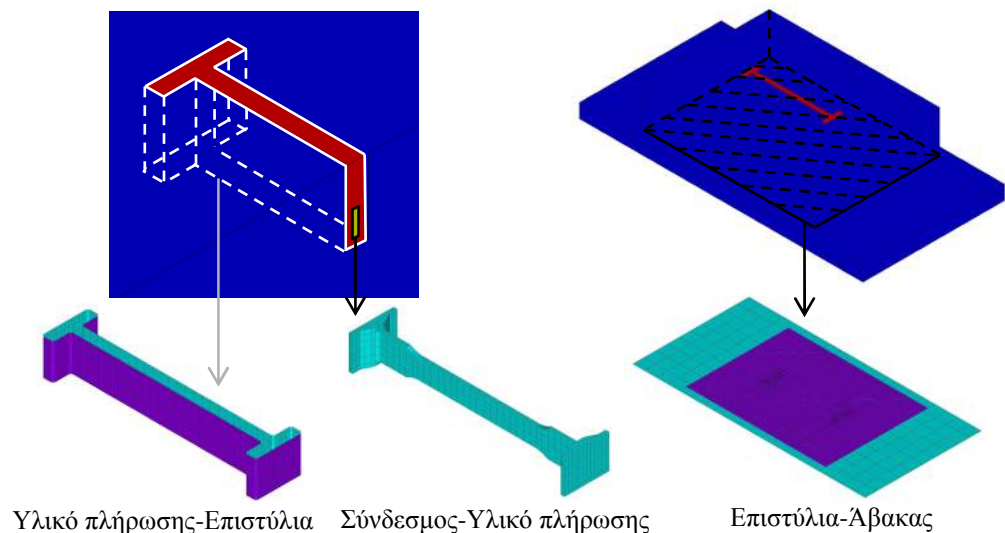


Εικ. 4.13: (α) Η ευθεία σε σημείο της οποίας αναπτύσσεται η μέγιστη αξονική τάση στο επιστύλιο και επιλέχθηκε για τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

(β) Η μέγιστη αξονική τάση του μαρμάρου συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων.

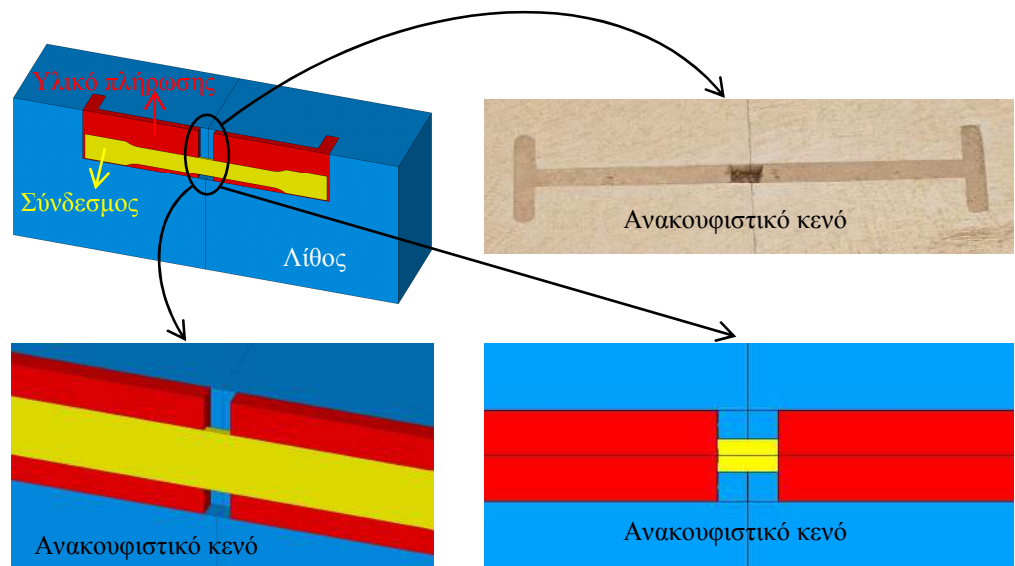


Εικ. 4.14: Ο κάναβος που επιλέχθηκε μετά τη διαδικασία σύγκλισης για τον σύνδεσμο, το συνδετικό υλικό και τους όγκους του μαρμάρου.



Εικ. 4.15: Οι θέσεις και η μορφή των διεπιφανειών του αριθμητικού προσομοιώματος.

Με το πέρας της κατασκευής του μοντέλου αναφοράς ξεκίνησε η παραμετρική ανάλυση με στόχο τη μελέτη της επίδρασης διαφόρων γεωμετρικών παραμέτρων του συνδετηρίου στοιχείου και της εντορμίας (μήκος του συνδέσμου, L , μήκος των πελμάτων του συνδέσμου, B , και βάθος της εντορμίας, D , Εικ. 4.17) στη μηχανική



Εικ. 4.18: Το ανακουφιστικό κενό σε μία τυπική ένωση επιστυλίων και όπως προσομοιώθηκε για τις ανάγκες της παραμετρικής μελέτης.

| | L [cm] | B [cm] | D [cm] | RS [mm] |
|--------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| L29 / B6 / D5 / R | 29 | 6 | 5 | 0 |
| L24 | 24 | | | |
| L36 | 36 | | | |
| B9 | | 9 | | |
| B11 | | 11 | | |
| B13 | | 13 | | |
| D6 | | | 6 | |
| D7 | | | 6 | |
| RS05 | | | | 5 |
| RS10 | | | | 10 |
| RS15 | | | | 15 |

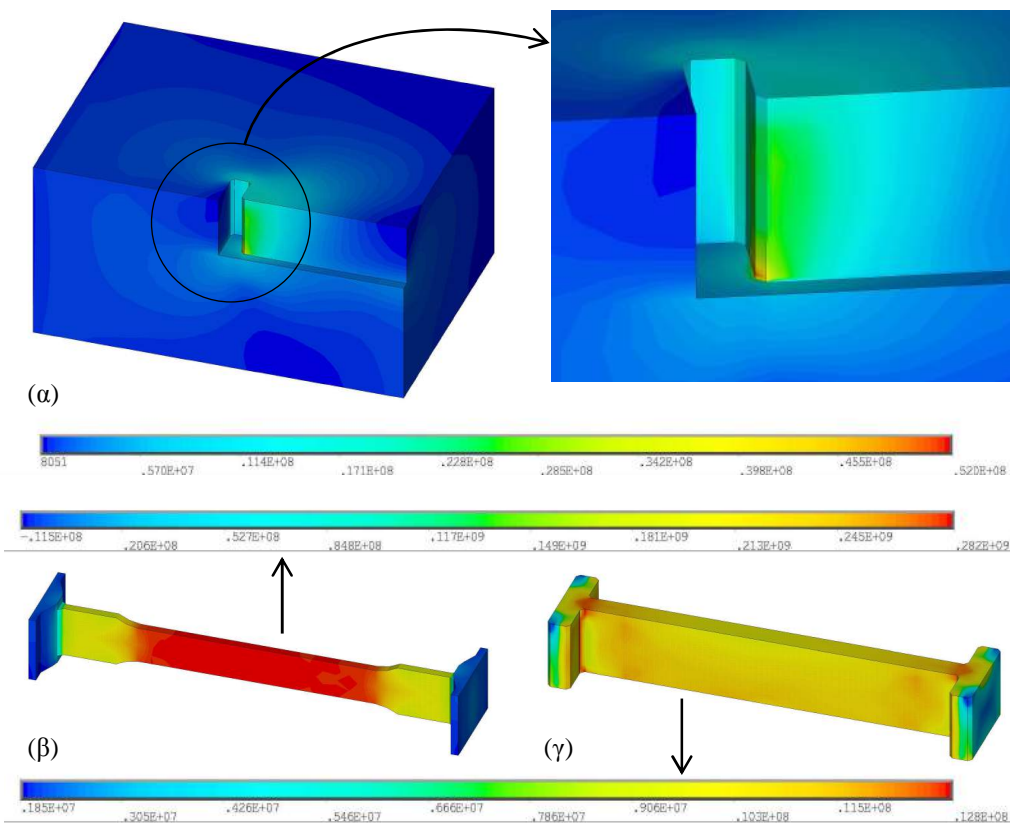
Πίνακας 4.2: Τα προσομοιώματα της παραμετρικής αριθμητικής ανάλυσης.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης. Αρχικά περιγράφεται η μηχανική απόκριση του μοντέλου αναφοράς εστιάζοντας στις αναπτυσσόμενες τάσεις. Ακολουθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου ξεχωριστά σε σύγκριση πάντα με τη συμπεριφορά του μοντέλου αναφοράς. Υπενθυμίζεται ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από την επιβολή ομοιόμορφης μετατόπισης 1 mm κατά μήκος του άξονα του συνδέσμου (άξονας x).

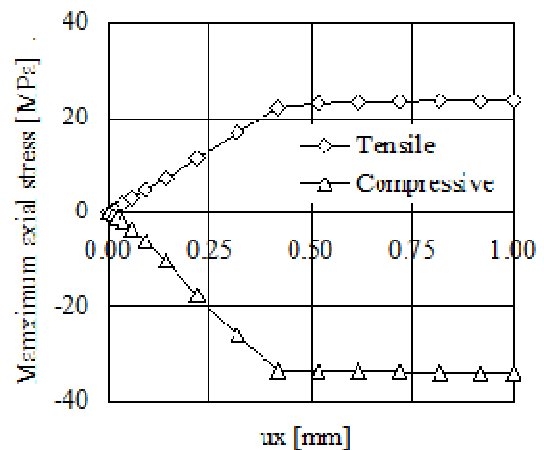
4.4.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η Εικ. 4.19 παρουσιάζει την κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης [Pa] στα τρία υλικά των σωμάτων που αποτελούν το αριθμητικό μοντέλο. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η ισοδύναμη κατά Mises τάση αντιμετωπίζεται στην παρούσα μελέτη μόνο σαν ένα μέγεθος της έντασης του τασικού πεδίου και ως ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των αριθμητικών προσομοιωμάτων και όχι ως κριτήριο αστοχίας.

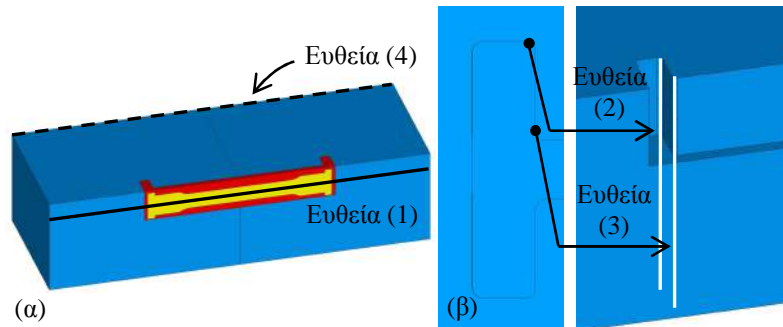


Εικ. 4.19: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης [Pa] στον όγκο (α) του μισού επιστυλίου, (β) του συνδέσμου και (γ) του συνδετικού υλικού.

Για την καλύτερη απεικόνιση των τάσεων στο μάρμαρο, αξιοποιείται η συμμετρία κι έτσι στην Εικ. 4.19α εμφανίζεται το μισό του ενός εκ των δύο επιστυλίων (συγκεκριμένα του επιστυλίου στο οποίο επιβάλλεται η στήριξη). Όπως πιθανόν αναμενόταν, το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο επιστύλιο είναι έντονο μόνο περίξ των πελμάτων του συνδέσμου και της εντορμιάς ενώ στο μεγαλύτερο μέρος του επιστυλίου εμφανίζονται σημαντικά ασθενέστερες τάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τη μικρή μετατόπιση που επιβλήθηκε οι τιμές των τάσεων στο μάρμαρο Διονύσου είναι αρκετά μεγάλες συγκριτικά με την αντοχή του σε εφελκυσμό και θλίψη, οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 10 MPa και τα 80 MPa, αντίστοιχα [63].



Εικ. 4.20: Η μέγιστη αξονική εφελκυστική και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση του μαρμάρου συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

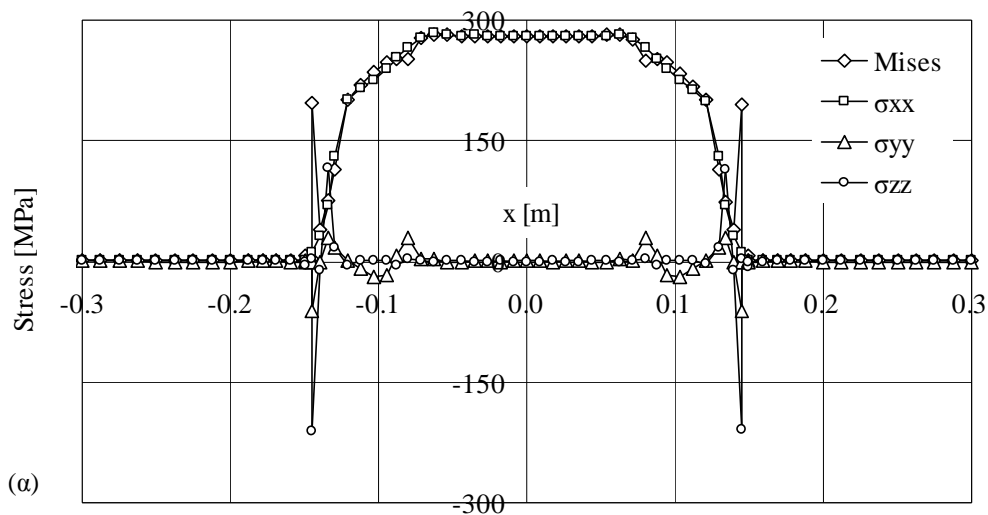


Εικ. 4.21: Χαρακτηριστικές ευθείες κατά μήκος των οποίων παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων.

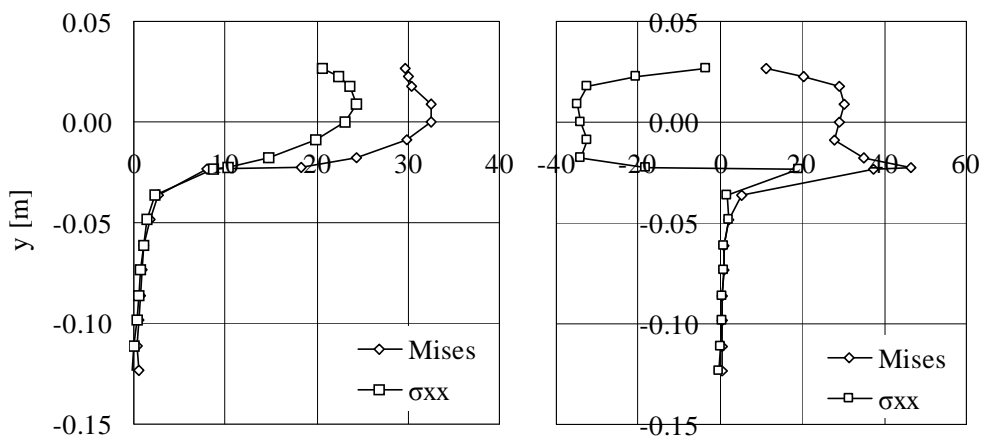
Αναπαριστώντας γραφικά την ανάπτυξη της μέγιστης αξονικής εφελκυστικής και θλιπτικής τάσης στο επιστύλιο συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης (Εικ. 4.20) γίνεται φανερό ότι η εμφάνιση τοπικών ρηγματώσεων στις κρίσιμες περιοχές των επιστυλίων λόγω εφελκυστικών τάσεων είναι αναπόφευκτη ακόμα και όταν η απομάκρυνση των μαρμάρινων όγκων ισούται μόλις με 0.15 mm. Πάντως, τόσο η μέγιστη αξονική εφελκυστική όσο και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση μεταβάλλονται γραμμικά με την απομάκρυνση των επιστυλίων περίπου μέχρι τα 0.40 mm ενώ για μεγαλύτερες μετατοπίσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές (Εικ. 4.20).

Εκτός από την ισοδύναμη κατά Mises τάση, ελέγχθηκαν οι τρεις ορθές συνιστώσες της τάσης (σ_{xx} , σ_{yy} και σ_{zz}) κατά μήκος τριών χαρακτηριστικών ευθειών (1, 2 και 3), Εικ. 4.21α. Η “Ευθεία 1” διέρχεται από το κέντρο του συνδέσμου, διατρέχει όλο το μήκος του αριθμητικού μοντέλου κατά μήκος του άξονα του συνδέσμου και περι-

λαμβάνει και τα τρία υλικά (Εικ. 4.22α). Είναι φανερό ότι οι συνιστώσες της τάσης έχουν μη μηδενικές τιμές μόνο στο σώμα του συνδέσμου. Οι τιμές της σ_{xx} είναι σταθερά θετικές (εφελκυστικές) σε όλο το μήκος της “Ευθείας 1”. Η συνιστώσα σ_{zz} λαμβάνει αρνητική (θλιπτική) τιμή στον μόλυβδο που είναι σε επαφή με το επιστύλιο και θετική τιμή στον μόλυβδο που βρίσκεται σε επαφή με τον σύνδεσμο. Αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό αφού ο μόλυβδος στη συγκεκριμένη θέση βρίσκεται υπό κάμψη. Οι τιμές της σ_{yy} είναι αρκετά μικρότερες συγκριτικά με τις σ_{xx} και σ_{zz} και εμφανίζει διακυμάνσεις περίξ του μηδενός στις περιοχές μετάβασης από τον κορμό στα πέλματα του συνδέσμου.



(α)



(β)

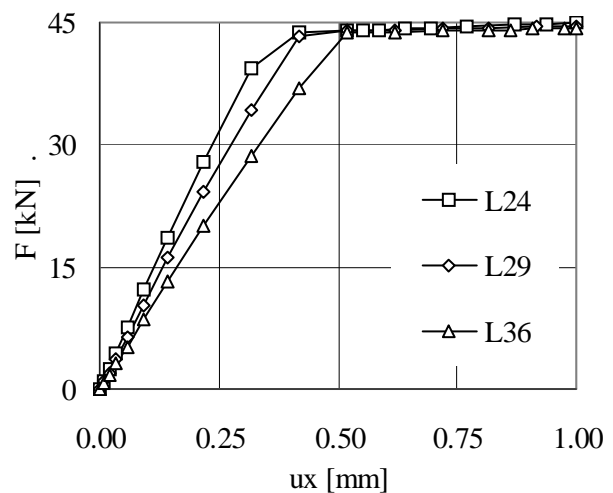
(γ)

Εικ. 4.22: Οι συνιστώσες της τάσης κατά μήκος (α) της “Ευθείας 1” και στα τρία υλικά, (β) της “Ευθείας 2” στο μάρμαρο και (γ) της “Ευθείας 3” στο μάρμαρο.

Οι θέσεις “2” και “3” αναφέρονται στις θέσεις του επιστυλίου όπου η αξονική εφελκυστική και η αξονική θλιπτική τάση λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους, και διατρέχουν το ύψος του επιστυλίου (Εικ. 4.21β). Κατά μήκος των ευθειών αυτών η αξονική τάση σ_{xx} είναι σχεδόν μηδενική στο σώμα του επιστυλίου που βρίσκεται κάτω από την εντορμία. Από την άλλη μεριά, κατά μήκος του βάθους της εντορμίας (όπου υπάρχει ο μόλυβδος και ο σύνδεσμος) η συνιστώσα σ_{xx} λαμβάνει τιμές που δεν μπορούν να αγνοηθούν. Συγκεκριμένα, στην “Ευθεία 2” η σ_{xx} λαμβάνει τη μέγιστη θετική τιμή της περίπου στο ύψος του κεντρικού άξονα του συνδέσμου ενώ ψηλότερα η τιμή της ελαφρώς ελαττώνεται (Εικ. 4.22β). Αντίθετα, στην “Ευθεία 3” η σ_{xx} έχει περίπου σταθερή αρνητική τιμή καθ’ όλο περίπου το ύψος του πέλματος του συνδέσμου ενώ πλησιάζοντας στην ελεύθερη επιφάνεια της εντορμίας η τιμή της σχεδόν μηδενίζεται (Εικ. 4.22γ).

4.4.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ, L

Παρατηρώντας τις καμπύλες της συνολικής δύναμης που αναπτύσσεται κατά τον άξονα του συνδέσμου (άξονας x) συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης, Εικ. 4.23, γίνεται φανερό ότι αυξάνοντας το μήκος του συνδετηρίου στοιχείου, η σύνδεση γίνεται λιγότερο στιβαρή. Η αρχική κλίση της καμπύλης μειώνεται καθώς το μήκος του συνδέσμου αυξάνει υποδηλώνοντας μειωμένη δυσκαμψία του συστήματος. Παραδείγματος χάριν, αύξηση του μήκους L από 29 cm σε 36 cm συνεπάγεται μείωση της κλίσης της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης κατά ~16%. Αντίθετα, το υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης μοιάζει να είναι αναισθητό στις μεταβολές της συγκεκριμένης παραμέτρου.



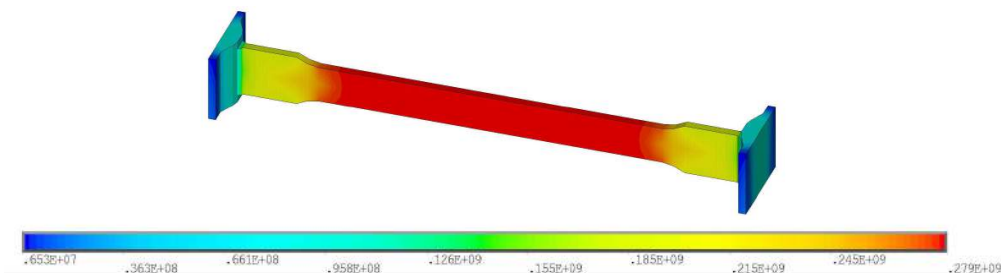
Εικ. 4.23: Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για την παράμετρο L.

Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν ο κορμός του συνδέσμου διαρρέει και το μήκος του συνδετηρίου στοιχείου έχει αμελητέα επίδραση στο τασικό του πεδίο, Εικ. 4.24.

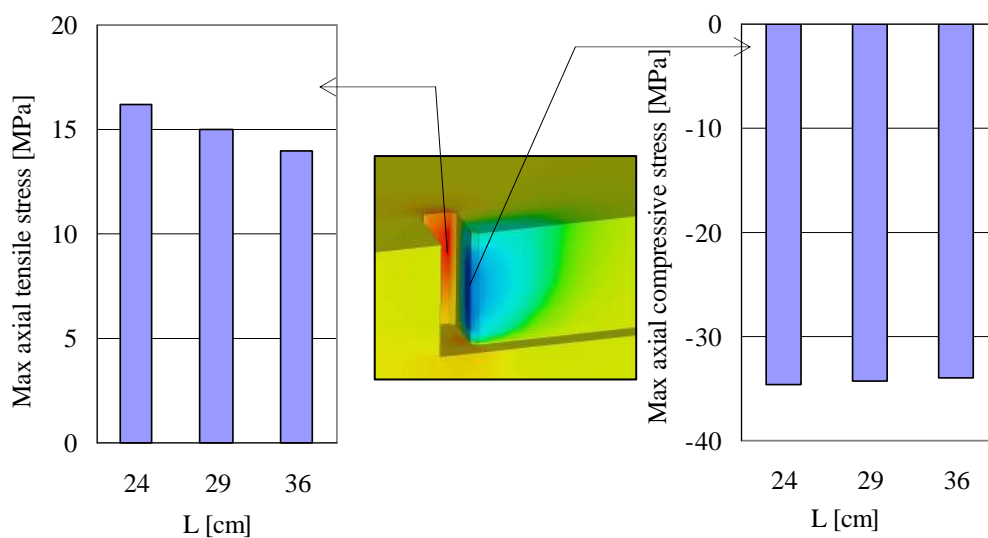
Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο επιστύλιο, είναι σχεδόν αμελητέες σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται στην περιοχή πέριξ των πελμάτων της εντορμίας. Το μέγεθος των τάσεων αυτών δεν μένει ανεπηρέαστο από τις μεταβολές του μήκους του συνδέσμου. Στην Εικ. 4.25 παρουσιάζεται με τη μορφή χρωματο-

κλίμακας η κατανομή των αξονικών τάσεων (κατά τον άξονα του συνδέσμου) στο τμήμα του επιστυλίου που επηρεάζεται. Στην ίδια εικόνα φαίνεται η επίδραση της παραμέτρου L στη μέγιστη αξονική εφελκυστική και στη μέγιστη αξονική θλιπτική τάση του μαρμάρου:

- Μείωση του μήκους του συνδέσμου από 29 cm σε 24 cm (~17% μείωση) οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά ~8% ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση μένει περίπου σταθερή.
- Αύξηση του μήκους του συνδέσμου από 29 cm σε 36 cm (~24% αύξηση) συνεπάγεται μείωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά ~7% ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση διατηρείται πάλι περίπου σταθερή.



Εικ. 4.24: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης [Pa] που αναπτύσσεται στον σύνδεσμο του μοντέλου L36.

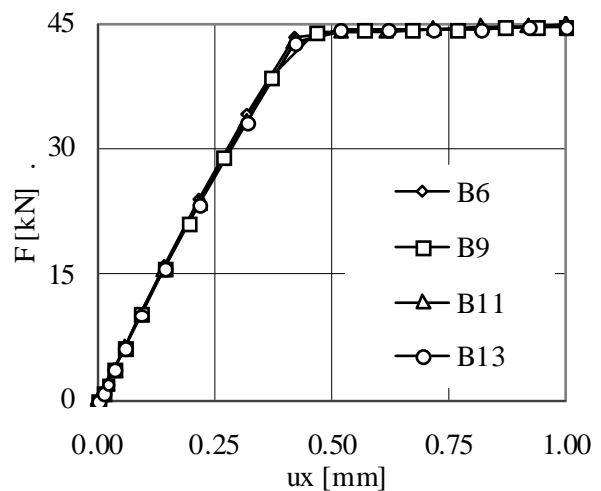


Εικ. 4.25: Η μέγιστη αξονική εφελκυστική και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στο επιστύλιο για τις τιμές της παραμέτρου L που μελετήθηκαν.

4.4.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΩΝ ΠΕΛΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ, B

Η απόκριση της σύνδεσης παραμένει ίδια μεταβάλλοντας το μήκος των πελμάτων του συνδετηρίου στοιχείου όπως φαίνεται από την ταύτιση των καμπύλων δύναμης - επιβαλλόμενης μετατόπισης για τις τιμές της παραμέτρου B που μελετήθηκαν (Εικ. 4.26). Ανεπηρέαστο παραμένει επίσης και το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στο σύνδεσμο (Εικ. 4.27).

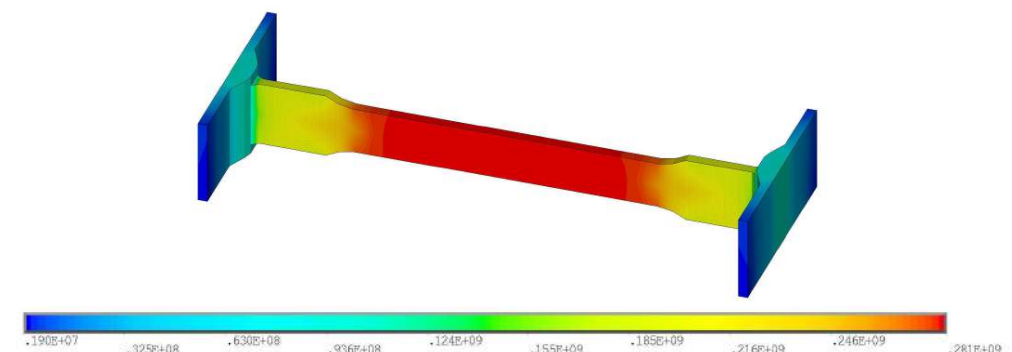
Η επιρροή της παραμέτρου B εντοπίζεται μόνο στις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του επιστυλίου πέριξ των πελμάτων της εντορμίας, Εικ. 4.28. Αύξηση του μήκους



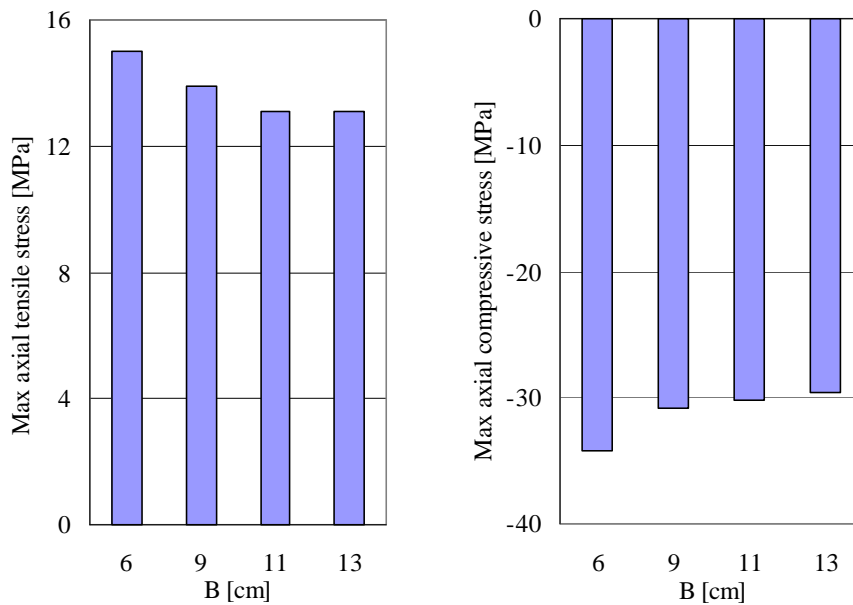
Εικ. 4.26: Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για την παράμετρο B.

των πελμάτων του συνδέσμου οδηγεί σε μείωση τόσο της μέγιστης αξονικής εφελκυστικής τάσης όσο και της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης στο μάρμαρο:

- Αύξηση του μήκους των πελμάτων του συνδέσμου από 6 cm σε 9 cm (50% αύξηση) οδηγεί σε μείωση τόσο της μέγιστης εφελκυστικής όσο και της μέγιστης θλιπτικής τάσης κατά ~9%.
- Αύξηση του μήκους των πελμάτων του συνδέσμου από 6 cm σε 11 cm (~83% αύξηση) συνεπάγεται μείωση της μέγιστης εφελκυστικής και της μέγιστης θλιπτικής τάσης κατά ~12%.
- Αύξηση του μήκους των πελμάτων του συνδέσμου από 6 cm σε 13 cm (~117% αύξηση) οδηγεί σε μείωση της μέγιστης εφελκυστικής και της μέγιστης θλιπτικής τάσης κατά ~13%.



Εικ. 4.27: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης [Pa] που αναπτύσσεται στον σύνδεσμο του μοντέλου B11.

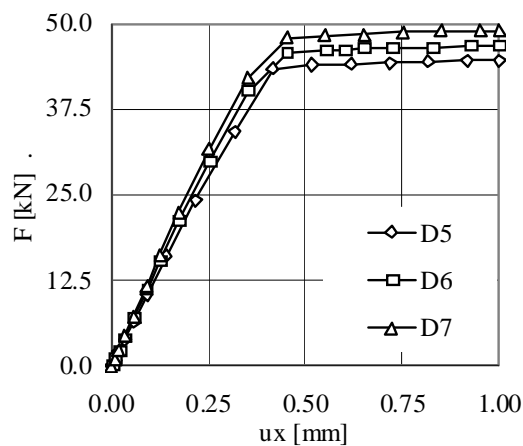


Εικ. 4.28: Η μέγιστη αξονική εφελκυστική και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στο επιστύλιο για τις τιμές της παραμέτρου B που μελετήθηκαν.

4.4.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΗΣ ΕΝΤΟΡΜΙΑΣ, D

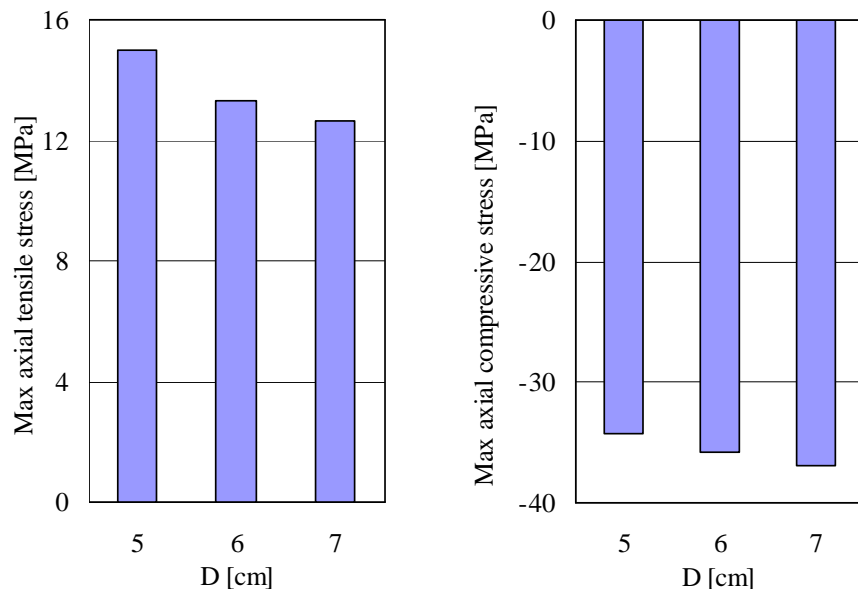
Η αύξηση του βάθους της εντορμίας πραγματοποιείται διατηρώντας το ύψος των επιστυλίων και όλες τις διαστάσεις του συνδέσμου σταθερές. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, το εμβαδό της διατομής του συνδετηρίου στοιχείου στη θέση της ένωσης των δύο επιστυλίων παραμένει ίδιο σε αντίθεση με το εμβαδό της διατομής του μολύβδου, στην ίδια θέση, το οποίο αυξάνεται. Η αύξηση του συνολικού εμβαδού διατομής οδηγεί σε μεγαλύτερη αξονική δύναμη στο μολύβδο καθιστώντας το όλο σύστημα πιο “δύσκαμπτο” τόσο στην ελαστική όσο και στη μεταελαστική περιοχή (Εικ. 4.29). Όσον αφορά το σύνδεσμο, για άλλη μία φορά, δεν παρατηρείται αλλαγή στο τασικό του πεδίο.

Αντίθετα, οι τάσεις στο επιστύλιο μεταβάλλονται αρκετά. Η μέγιστη αξονική εφελκυστική τάση μειώνεται με την αύξηση του βάθους της εντορμίας ενώ η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση αυξάνεται (Εικ. 4.30). Πιο συγκεκριμένα:



Εικ. 4.29: Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για την παράμετρο D .

- Αύξηση του βάθους της εντορμίας από 5 cm σε 6 cm (20% αύξηση) οδηγεί σε μείωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά ~11% ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση αυξάνεται κατά ~5%.
- Αύξηση του βάθους της εντορμίας από 5 cm σε 7 cm (40% αύξηση) συνεπάγεται μείωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά ~16% και αύξηση της μέγιστης θλιπτικής τάσης κατά ~8%.



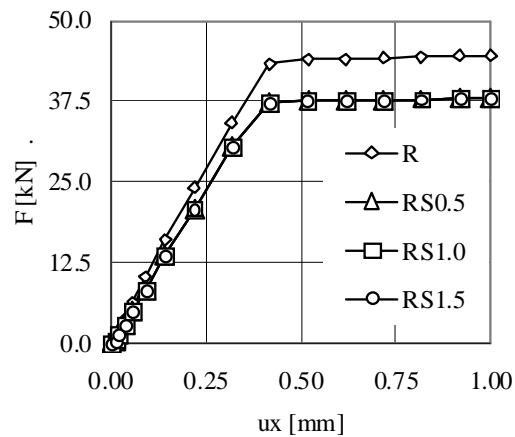
Εικ. 4.30: Η μέγιστη αξονική εφελκυστική και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στο επιστύλιο για τις τιμές της παραμέτρου D που μελετήθηκαν.

4.4.5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΟΥ, RS

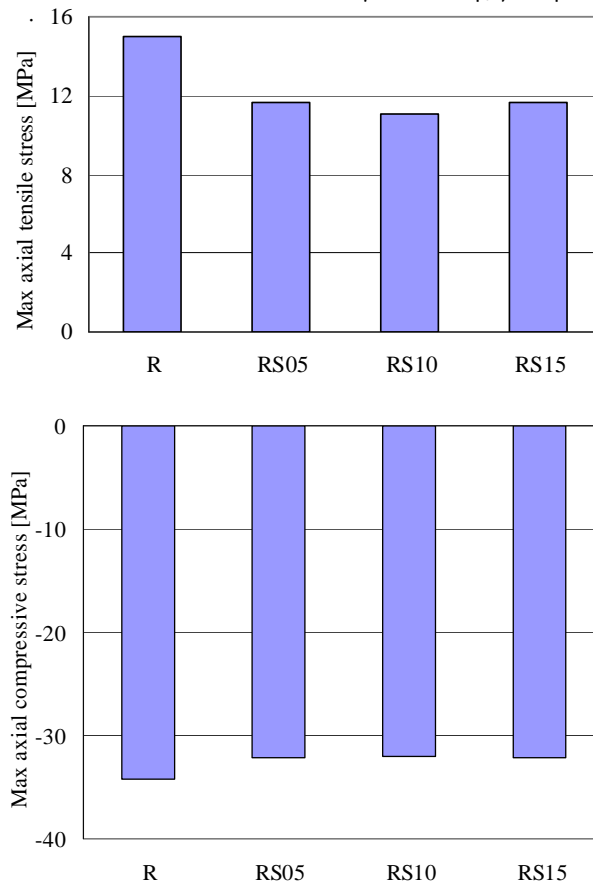
Η ύπαρξη του ανακουφιστικού κενού (Εικ. 4.18) αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευεργετική για το σύστημα. Η μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται όταν το μήκος του ανακουφιστικού κενού ισούται με 1 cm είναι μικρότερη κατά ~15% συγκριτικά με το μοντέλο αναφοράς (πλήρωση της εντορμίας με μόλυβδο καθ' όλο το μήκος της), Εικ. 4.31. Επιπρόσθετα, η σύνδεση συμπεριφέρεται πιο ελαστικά με την κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης να μειώνεται κατά ~10%. Παρ' όλα αυτά, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σύνδεσμο μένουν σχεδόν αμετάβλητες.

Η ευεργετική επίδραση του ανακουφιστικού κενού, όσον αφορά το μέγεθος των αναπτυσσομένων τάσεων, εστιάζεται στο μάρμαρο, Εικ. 4.32. Οι περιοχές του επιστυλίου που καταπονούνται εφελκυστικά ανακουφίζονται σημαντικά (~25%). Μείωση παρατηρείται επίσης στις αξονικές θλιπτικές τάσεις του μαρμάρου όπου η επίδραση του ανακουφιστικού κενού είναι σαφώς μικρότερη (~5%).

Επιπλέον, ελέγχθηκε αν το μήκος του ανακουφιστικού κενού επιδρά στη συμπεριφορά και στο τασικό πεδίο του συστήματος. Όπως πιθανόν αναμενόταν στην περίπτωση του εφελκυσμού, το μήκος του κενού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα (Εικ. 4.31-4.32). Η διαφορά της μέγιστης αξονικής εφελκυστικής τάσης στο μάρμαρο των τριών μοντέλων με το ανακουφιστικό κενό (RS05, RS10 και RS15) δεν ξεπερνά το 4% ενώ το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο του 0.5% για τις θλιπτικές τάσεις.



Εικ. 4.31: Οι καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για την παράμετρο RS.



Εικ. 4.32: Η μέγιστη αξονική εφελκυστική και η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση στο επιστόλιο για τις τιμές της παραμέτρου RS που μελετήθηκαν.

4.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δύο από τις βασικότερες αρχές που υπαγορεύει η “Χάρτα της Βενετίας”, το “Ευαγγέλιο” των αναστηλώσεων - αποκαταστάσεων των μνημείων, είναι η προστασία των αυθεντικών υλικών των μνημείων και η ελάχιστη δυνατή επέμβαση σε αυτά. Στην περίπτωση των συνδέσεων που εδώ μελετάται, το υλικό που πρέπει να προστατευτεί είναι ο αυθεντικός λίθος, δηλαδή το μάρμαρο ενώ το μεταλλικό συνδετήριο στοιχείο είναι αυτό που πρέπει να θυσιαστεί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 1.2.1, όταν η αρχαία εντορμία διατηρείται, γίνεται αντικατάσταση μόνο του αρχαίου συνδέσμου και του υλικού πλήρωσης της εντορμίας. Η γεωμετρία της σύνδεσης είναι εξ αρχής δεδομένη και δεν μπορούν να γίνουν αλλαγές. Σχετική ελευθερία ως προς τις μεταβολές της γεωμετρίας του συνδετηρίου στοιχείου, άρα και της εντορμίας, υπάρχει μόνο όταν η αρχαία σύνδεση είναι κατεστραμμένη και αντικαθίσταται με νέο δομικό υλικό. Επομένως, σ’ αυτή και μόνο την περίπτωση μπορεί, τυπικά, να αξιοποιηθεί η αριθμητική παραμετρική ανάλυση που προηγήθηκε.

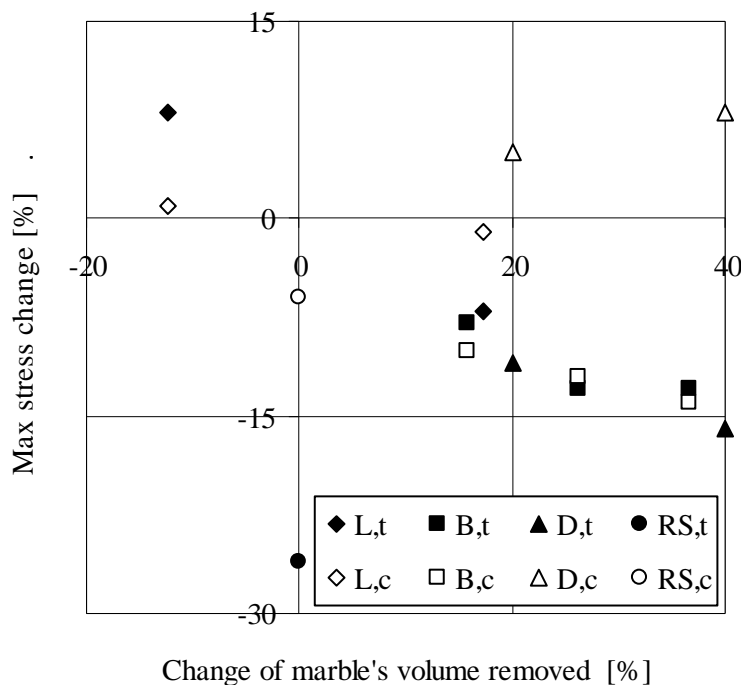
Παρά το γεγονός αυτό, κρίθηκε σκόπιμο να εκφραστεί η θετική και η αρνητική επίδραση που έχει η μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων που μελετήθηκαν συναρτήσει της πρόσθετης “καταστροφής” του μαρμάρου που κάθε φορά απαιτείται. Ο όγκος της “καταστροφής” αυτής ισούται με τον όγκο της εντορμίας. Έτσι, προέκυψε το γράφημα της Εικ. 4.33, στην οποία απεικονίζεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης αξονικής εφελκυστικής και της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης στο μάρμαρο συναρτήσει της ποσοστιαίας μεταβολής του όγκου της εντορμίας. Όλα τα ποσοστά υπολογίστηκαν βάσει των τιμών του προσομοιώματος αναφοράς (L29).

Τα σύμβολα της Εικ. 4.33 με λευκό χρώμα αντιστοιχούν στις θλιπτικές τάσεις ενώ με μαύρο στις εφελκυστικές. Η μόνη από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν η οποία δεν επηρεάζει τον αφαιρούμενο μαρμάρينو όγκο είναι το ανακουφιστικό κενό. Επιπλέον, το ανακουφιστικό κενό είναι αυτό με τη σημαντικότερη ευεργετική επιρροή στο τασικό πεδίο του επιστυλίου. Αντίθετα, οι άλλες παράμετροι (πλην της αύξησης του βάθους της εντορμίας) που σχετίζονται με τη γεωμετρία του συνδετηρίου στοιχείου μπορεί να ανακουφίζουν ελαφρώς τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο μάρμαρο αλλά ο όγκος του λίθου που πρέπει να αφαιρεθεί είναι δυσανάλογα μεγάλος.

Στο σημείο αυτό αξιολογείται ότι όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου αναφέρονται στη σύνδεση των επιστυλίων με έναν σύνδεσμο από σίδηρο και υλικό πλήρωσης της εντορμίας το μόλυβδο. Ο λόγος, όπως προαναφέρθηκε, ήταν να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ένα επικυρωμένο αριθμητικό μοντέλο, που στη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωνε τα δοκίμια εφελκυσμού του Δρα Κ. Ζάμπα [6], έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα.

Ωστόσο, η σημερινή πραγματικότητα είναι διαφορετική. Στα έργα αποκατάστασης των μνημείων της Ακρόπολης οι αρχαίοι σιδηροί σύνδεσμοι αντικαθίστανται με νέους από τιτάνιο και ο μόλυβδος έχει αντικατασταθεί από τιμιεντοκονίαμα. Το μέτρο ελαστικότητας όμως του τιτανίου είναι ίσο με το μισό περίπου του μέτρου ελα-

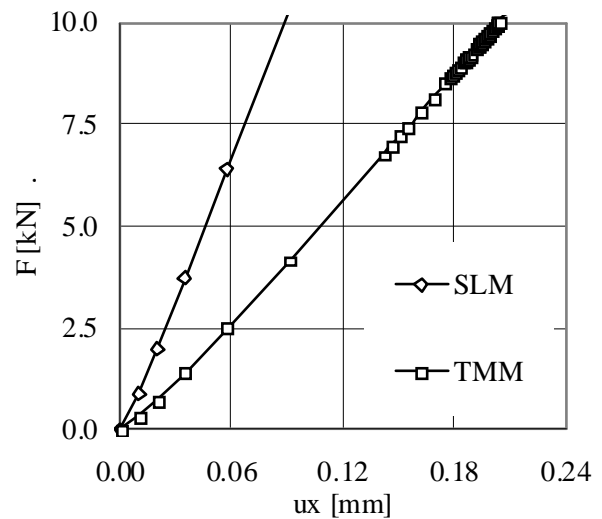
στικότητας του σιδήρου και το τσιμεντοκονίαμα που χρησιμοποιείται σήμερα είναι ένα ψαθυρό υλικό (σε αντίθεση με τον εξαιρετικά όλκιμο μόλυβδο) με αντοχή σε εφελκυσμό περίπου ίση με το ένα δέκατο της αντίστοιχης αντοχής του μολύβδου.



Εικ. 4.33: Η ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης αξονικής εφελκυστικής και της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης του επιστυλίου συναρτήσει της ποσοστιαίας μεταβολής του μαρμάρινου όγκου που πρέπει να αφαιρεθεί.

Παρ' όλο που οι δοκιμές εφελκυσμού του Δρα Κ. Ζάμπα απέδειξαν ότι το υλικό πλήρωσης της εντορμίας δεν επηρεάζει τη μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά του συστήματος (αυτός εξάλλου ήταν ο σκοπός της πειραματικής του μελέτης) [6], Εικ. 1.20, είναι αναμενόμενο να υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στις καμπύλες δύναμης - μετατόπισης όσο και στην ένταση της καταπόνησης του μαρμάρου στην περίπτωση του εφελκυσμού μιας αρχαίας και μιας αποκαταστημένης σύνδεσης. Για λόγους σύγκρισης των δύο περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκε ένα νέο αριθμητικό προσομοίωμα (TMM) του οποίου η γεωμετρία είναι ακριβώς ίδια με αυτή του μοντέλου αναφοράς (L29 ή SLM όπως αναφέρεται στην Εικ. 4.33) αλλά οι μηχανικές ιδιότητες που αποδόθηκαν στο υλικό του συνδετηρίου στοιχείου και του συνδετικού υλικού διαφέρουν. Στην περίπτωση αυτή ο σύνδεσμος είναι κατασκευασμένος από τιτάνιο και το υλικό πλήρωσης της εντορμίας είναι το κονίαμα (Πίνακας 4.3). Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια αντιστοιχούν σε απομάκρυνση των δύο επιστυλίων ίση με μόλις 0.1 mm.

Πράγματι τα δύο συστήματα συμπεριφέρονται διαφορετικά, Εικ. 4.34. Η νέα σύνδεση παρουσιάζει μειωμένη δυσκαμψία, με την κλίση της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης να έχει μειωθεί κατά περίπου 60%, επομένως είναι σαφώς ευνοϊκότερη. Τα επιστύλια μπορούν να απομακρυνθούν μεταξύ τους οδηγώντας στην ανάπτυξη σαφώς μικρότερων δυνάμεων, επομένως και τάσεων οι οποίες αναπτύσσονται στο μάρμαρο. Στην Εικ. 4.35 παρουσιάζεται η κατανομή της αξονικής και της ισοδύναμης κατά Mises τάσης κατά μήκος των ευθειών “2” και “3” του επιστυλίου (Εικ. 4.21). Τόσο οι εφελκυστικές όσο και οι θλιπτικές τάσεις στην πλέον δυσμενώς καταπονούμενη περιοχή του μαρμάρου είναι μειωμένες κατά περίπου 60%.



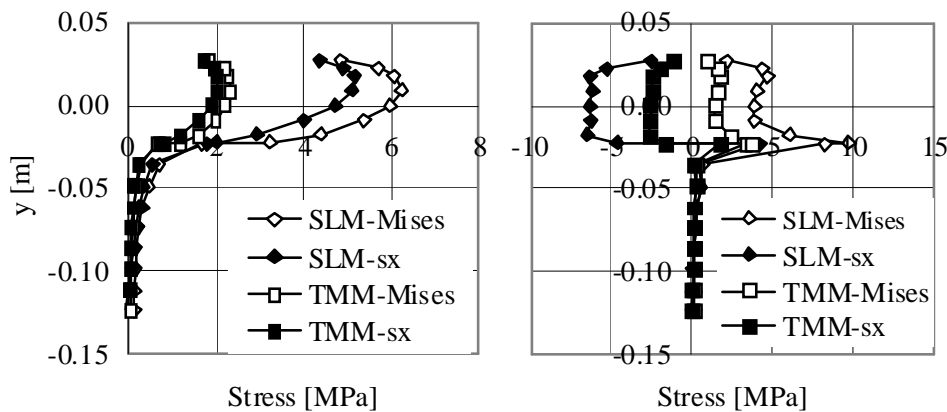
Εικ. 4.34: Το αρχικό τμήμα των καμπύλων δύναμης - μετατόπισης της αρχαίας (SLM) και της αποκαταστημένης (TMM) σύνδεσης.

| | E [GPa] | ν [-] | σ_y [MPa] | σ_u [MPa] |
|------------------|----------------|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| Τιτάνιο | 100 | 0.34 | 270 | 430 |
| Κονίαμα | 10.5 | 0.18 | - | 2.2 (εφελκυσμός) 24 (θλίψη) |
| Μάρμαρο Διονύσου | 75.3 | 0.26 | - | - |

Πίνακας 4.3: Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών μιας αποκαταστημένης σύνδεσης.

Υπογραμμίστηκε νωρίτερα ότι η συγκεκριμένη μελέτη του Δρα Κ. Ζάμπα είναι ανεκτίμητης αξίας για τους επιστήμονες που εργάζονται και έχουν την ευθύνη των έργων αναστήλωσης του Παρθενώνα σήμερα. Οι διαστασιολογήσεις των καινούριων συνδέσμων στηρίζονται κυρίως στο νομογράφημα (Εικ. 1.15) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 1.2.2.1 [6]. Υπενθυμίζεται ότι αυτό προέκυψε από ένα αριθμητικό μοντέλο που προσομοίωσε το ένα τέταρτο της σύνδεσης (δηλ. μισό επιστύλιο) χωρίς να λαμβάνεται υπ’ όψιν ούτε το υλικό του συνδέσμου ούτε το υλικό πλήρωσης της εντορμίας. Στο μισό πέλμα της εντορμίας ασκήθηκε τριγωνικής μορφής φόρτιση που αντιστοιχεί σε δύναμη του συνδέσμου ίση με 20 kN και υπολογίστηκε η μέγιστη αξονική τάση στο άκρο του πέλματος της εντορμίας. Επιλέγοντας τυχαία μία περίπτωση όπου το μήκος, το πέλμα και το βάθος της εντορμίας είναι ίσα με 36

cm, 9 cm και 6 cm, αντίστοιχα, η μέγιστη αξονική τάση που προκύπτει από το νομογράφημα ισούται με 2.85 MPa. Ποια είναι όμως η τιμή της τάσης αυτής όταν χρησιμοποιείται ένα πλήρες αριθμητικό προσομοίωμα (όλα τα υλικά της σύνδεσης και οι μηχανικές τους ιδιότητες);

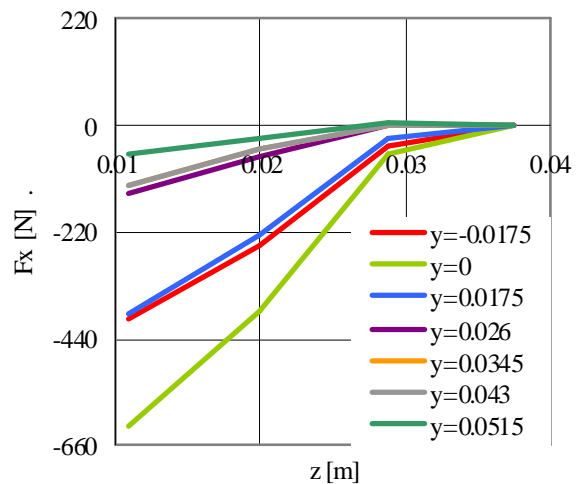


Εικ. 4.35: Οι συνιστώσες της τάσης κατά μήκος (α) της “Ευθείας 2” και (β) της “Ευθείας 3” στο μάρμαρο.

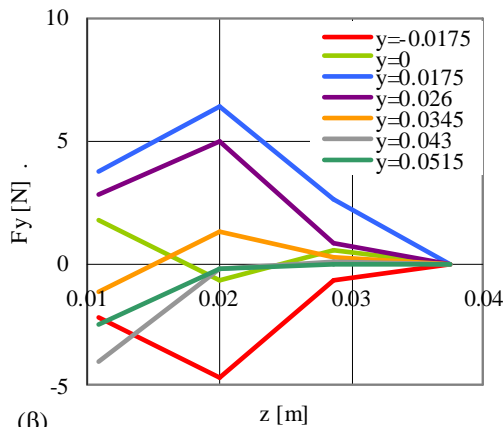
Στην κατεύθυνση αυτή, πραγματοποιήθηκαν δύο πρόσθετες αναλύσεις για τις συγκεκριμένες διαστάσεις της εντορμίας ($L=36$ cm, $B=9$ cm και $D=6$ cm). Οι συνοριακές συνθήκες και ο τρόπος φόρτισης ήταν όπως στην Εικ. 4.16. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε εξωτερική δύναμη (σύνδεσμος και υλικό πλήρωσης της εντορμίας) ίση με 20 kN ώστε να μπορούν να συγκριθούν με τα 2.85 MPa του νομογραφήματος (Εικ. 1.20). Η μέγιστη αξονική τάση στο άκρο του πέλματος της εντορμίας ισούται τώρα με 4.98 MPa, δηλαδή περίπου 75% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση του νομογραφήματος! Η ίδια τιμή λήφθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε τιτάνιο και κονίαμα. Αφού η συνολική δύναμη του συστήματος (δηλαδή η δύναμη που καταπονεί τα πέλματα της εντορμίας) είναι ίδια και ίση με 20 kN, η αναπτυσσόμενη τάση δεν επηρεάστηκε από τα υλικά. Η διαφορά των δύο συστημάτων περιορίζεται στην τιμή της μετατόπισης που οδηγεί στην ανάπτυξη των 20 kN λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας του συστήματος όταν αποτελείται από τιτάνιο και κονίαμα (Εικ. 4.34).

Επιπρόσθετα, το πλήρες μοντέλο της παρούσας μελέτης επέτρεψε τον ακριβή προσδιορισμό της κατανεμημένης στην εντορμία δύναμης. Για μήκος πέλματος της εντορμίας και του συνδέσμου ίσο με 8 cm και 7.5 cm, αντίστοιχα, βάθος εντορμίας ίσο με 7 cm και επιβολή μετατόπισης ίση με 0.1 mm αποδόθηκε γραφικά η κατανομή των δυνάμεων κατά τους άξονες x , y και z κατά μήκος του μισού πέλματος της εντορμίας (Εικ. 4.36α-γ). Λόγω της συμμετρίας της γεωμετρίας και της φόρτισης η επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο ένα τέταρτο του δοκιμίου είναι αποδεκτή. Η δύναμη κατά τον άξονα του συνδετηρίου στοιχείου, F_x , ασκείται μόνο περίπου στο 70% του μήκους του μισού πέλματος της εντορμίας και η κατανομή της είναι πράγματι τριγωνικής μορφής (Εικ. 4.36α). Η μέγιστη τιμή της ασκείται στο ύψος

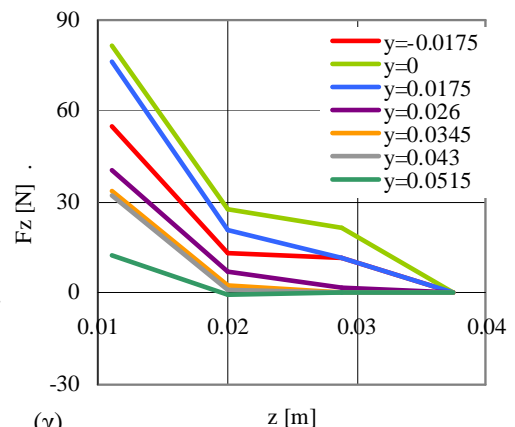
του κέντρου του συνδέσμου ($y=0$) και στη θέση ένωσης του κορμού της εντορμίας με τα πέλατά της ($z=0.011$ m στη συγκεκριμένη περίπτωση που μελετήθηκε). Ωστόσο, όπως αναμενόταν, κατά το βάθος της εντορμίας (άξονας y) εκτείνεται σε μήκος λίγο μεγαλύτερο από το ύψος του πέλατος του συνδέσμου ακολουθώντας μία παραβολική κατανομή (Εικ. 4.36δ). Κατά τον άξονα y δεν αναπτύσσεται δύναμη ενώ αντίθετα εμφανίζεται μικρή συγκριτικά δύναμη F_z (μίας τάξης μεγέθους μικρότερη ως προς την F_x), Εικ. 4.36δ.



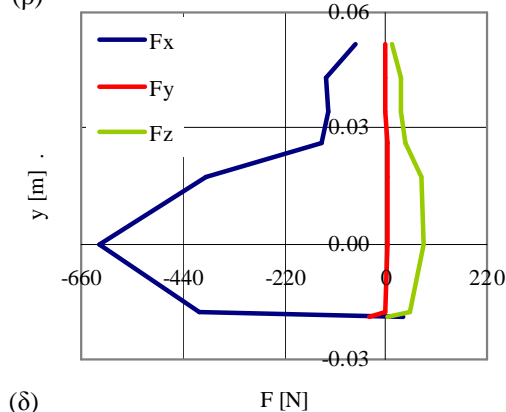
Εικ. 4.36: (α) Η κατανομή της συνιστώσας της δύναμης κατά τον άξονα x (άξονας του συνδέσμου) στο μισό πέλα της εντορμίας.



(β)



(γ)



(δ)

Εικ. 4.36 (συνέχεια): Η κατανομή της συνιστώσας της δύναμης κατά τον άξονα (β) y (παράλληλα με το βάθος της εντορμίας) και (γ) z (άξονας φόρτισης) στο μισό πέλα της εντορμίας. (δ) Η κατανομή όλων των συνιστωσών της δύναμης (στη θέση $z=0.011$ m όπου η F_x λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της) κατά το βάθος της εντορμίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

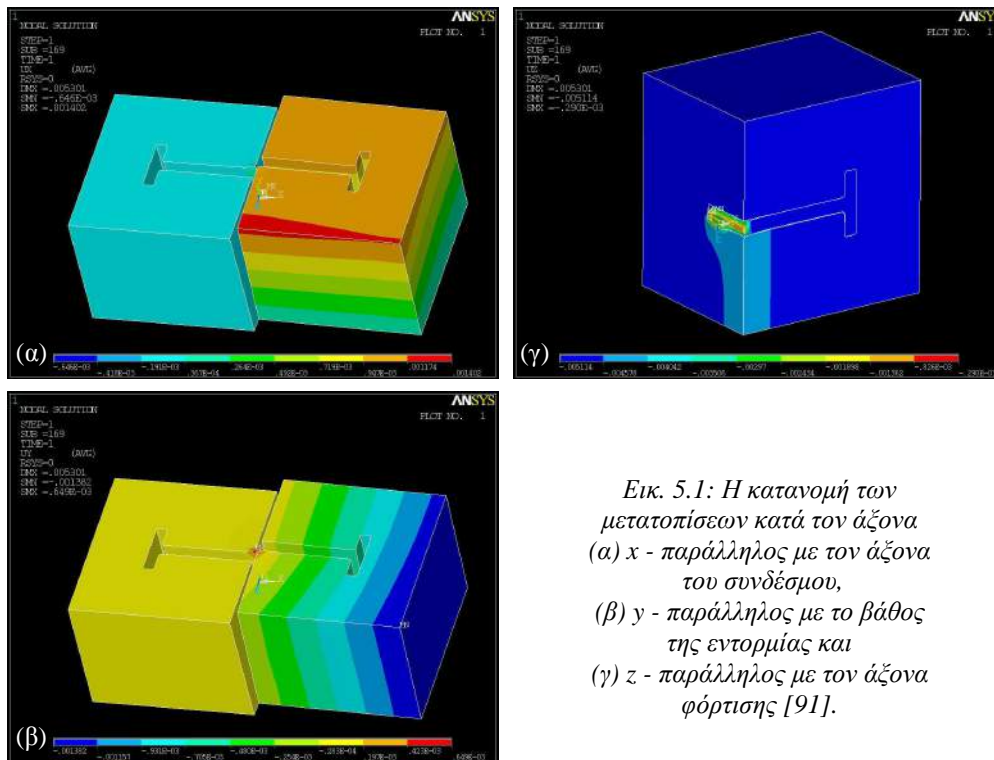
Είναι γνωστό από την Πειραματική Αντοχή των Υλικών και τη Μηχανική του Παραμορφώσιμου Σώματος ότι οι διατμητικές φορτίσεις είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες και σχετίζονται άμεσα με την αστοχία των υλικών και των κατασκευών. Είναι, επίσης, γνωστό ότι η υλοποίηση ενός πειράματος διάτμησης απαιτεί τη χρήση πολύπλοκων διατάξεων τόσο για την επιβολή του φορτίου όσο και για τη μέτρηση των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων.

Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ο τρόπος επιβολής του φορτίου έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία παρασιτικών καταπονήσεων (κυρίως κάμψης). Έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον έλεγχο της αντοχής σε διάτμηση κυρίως σκυροδέματος [88,89] αλλά και γαιωδών υλικών [90] κλπ. Δεν υπάρχει όμως σχετική βιβλιογραφία (με εξαίρεση τη μελέτη της διατμητικής συμπεριφοράς γόμφων στο πλαίσιο των εργασιών αναστήλωσης του Παρθενώνα [6]) για τη μελέτη προβλημάτων διάτμησης παρουσία συνδετηρίων στοιχείων και κονιάματος. Ο λόγος είναι ότι η φύση του συγκεκριμένου προβλήματος (το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία) εισάγει σειρά παρασιτικών φαινομένων (Εικ. 5.1) [91] και απαιτήσεις που καθιστούν σχεδόν αδύνατη την υλοποίηση καθαρής διάτμησης. Συγκεκριμένα εμφανίζονται:

- Καμπτικά ζεύγη η αναίρεση των οποίων απαιτεί περιορισμούς μέσω πρόσθετων στηρίξεων που δεν επιτρέπουν την ορθή μέτρηση της καθαρής δύναμης διάτμησης.
- Στρεπτικές ροπές που οφείλονται στην έλλειψη συμμετρίας λόγω της θέσης του συνδέσμου. Οι ροπές αυτές θα μπορούσαν να αντισταθμιστούν με την ύπαρξη επιπλέον περιορισμών στην εμπρόσθια και οπίσθια παρειά του κινούμενου τμήματος του δοκιμίου. Αυτό όμως δεν είναι επιθυμητό διότι επηρεάζεται ο τρόπος αστοχίας ίσως δε και η θέση έναρξης της διαρροής ή της θραύσης.

Επιπλέον δυσχέρειες εισάγει και η φύση των υλικών, ιδιαίτερα του μαρμάρου, η ψαθυρότητα του οποίου καθιστά απαγορευτική τη χρήση αρπαγών συγκράτησης μέσω τριβής ενώ η ανισοτροπία αυξάνει τον απαιτούμενο αριθμό δοκιμίων.

Τέλος, το γεγονός ότι δεν επιτρέπεται να προσεγγισθεί η περιοχή του δοκιμίου περίξ του συνδέσμου (ούτε για την άσκηση φορτίων ούτε για την επιβολή περιορισμών) ώστε να μην σκιάζεται η μορφή της αστοχίας, οδήγησε στην ανάγκη σχεδίασης και κατασκευής κατάλληλων ιδιοσυσκευών, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια (ενότητα 5.2), ταυτόχρονα δε περιορίσει τη χρήση πλαισίων φόρτισης σε εκείνα τα οποία διαθέτουν ευρεία βάση στήριξης (τράπεζα) (ενότητα 5.3).



Εικ. 5.1: Η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα (α) x - παράλληλος με τον άξονα του συνδέσμου, (β) y - παράλληλος με το βάθος της εντορμίας και (γ) z - παράλληλος με τον άξονα φόρτισης [91].

5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΙΔΙΟΣΥΣΚΕΥΩΝ

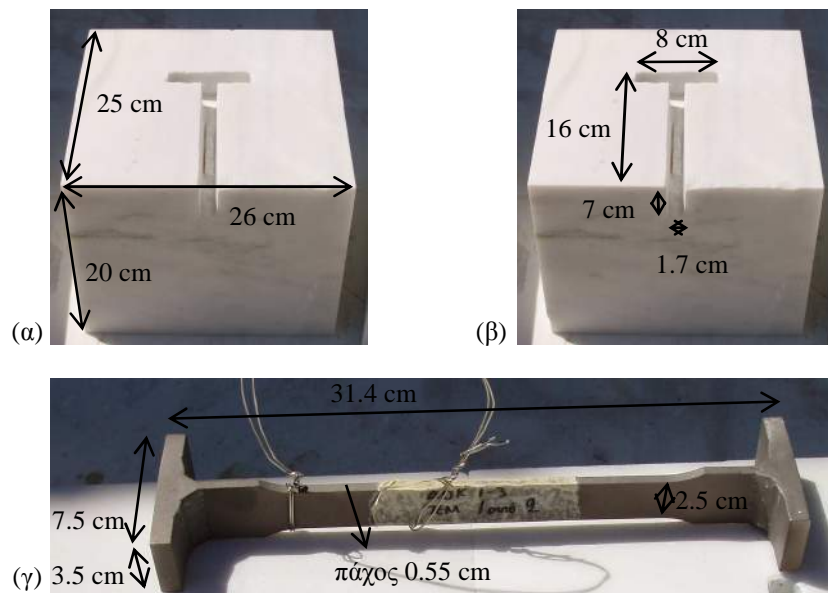
Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη κατασκευάστηκαν από έμπειρους μαρμαροτεχνίτες του εργοταξίου του Παρθενώνα και προσομοίωναν μία τυπική σύνδεση δύο εν σειρά επιστυλίων του μνημείου. Αποτελούνταν από δύο όγκους μαρμάρου Διονύσου, έναν σύνδεσμο τιτανίου μορφής “I” και κατάλληλο κονίαμα πλήρωσης της εντορμίας. Η εντορμία (βάθος 7 cm) και ο σύνδεσμος προσομοιώνουν τις πραγματικές διαστάσεις της σύνδεσης υπό κλίμακα 2:3 ενώ οι διαστάσεις των μαρμάρινων όγκων καθορίστηκαν βάσει της περιοχής επιρροής των συνδετηρίων στοιχείων [92].

Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή των δοκιμίων είναι η ακόλουθη:

1. Διαμόρφωση των όγκων του μαρμάρου στις επιθυμητές διαστάσεις.
2. Διαμόρφωση της κατάλληλης εντορμίας με τη βοήθεια καλεμιού.
3. Διαβροχή του εσωτερικού της εντορμίας.
4. Τοποθέτηση του μεταλλικού συνδέσμου στην εντορμία.
5. Παρασκευή του κονιάματος.
6. Πλήρωση του υπόλοιπου όγκου της εντορμίας με το κονίαμα.
7. Κάλυψη της ελεύθερης επιφάνειας της εντορμίας με λινάτσα και συνεχή διαβροχή της για τουλάχιστον 28 μέρες.

Τέλος, δημιουργούνται δύο οπές στο ένα επιστύλιο, μέσω των οποίων επιβάλλεται η φόρτιση στο σύστημα.

Όπως προαναφέρθηκε, η καθαρή διάτμηση παρόμοιων δοκιμίων δεν είναι μια τυποποιημένη δοκιμή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι δοκιμίων, μέσα από τους οποίους παρουσιάζεται η εξέλιξη της πειραματικής διάταξης στην κατεύθυνση του συνεχώς περιορισμού των παρασιτικών φαινομένων. Σε όλες τις περιπτώσεις οι διαστάσεις του ακινητοποιημένου όγκου, του συνδέσμου και της εντορμίας διατηρούνταν σταθερές (Εικ. 5.2) και η εντορμία πληρωνόταν με κονίαμα.

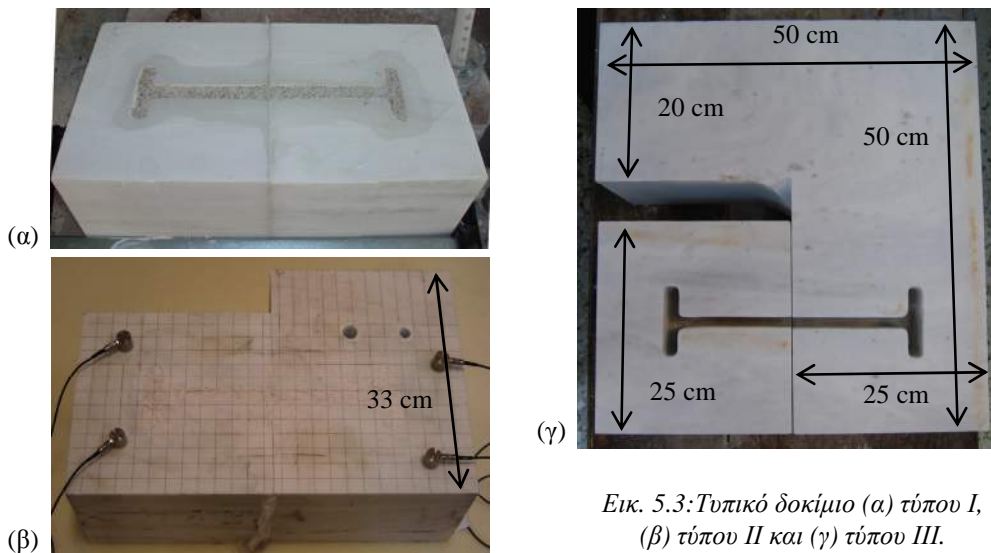


Εικ. 5.2: Η γεωμετρία και οι διαστάσεις (α) του σταθερού επιστυλίου, (β) της μισής εντορμίας και (γ) του συνδέσμου.

1. Δοκίμια τύπου I: Αποτελούνταν από δύο όμοιους όγκους μαρμάρου Διονύσου, Εικ. 5.3α [91] (αναφέρεται συνοπτικά στη συνέχεια για λόγους πληρότητας και δεν αναλύεται).
2. Δοκίμια τύπου II: Ο ένας εκ των δύο όγκων (αυτός στον οποίο επιβάλλεται η φόρτιση) έχει μεγαλύτερη διάσταση κατά τον άξονα της επιβαλλόμενης φόρτισης, Εικ. 5.3β.

3. Δοκίμια τύπου III (προτεινόμενη γεωμετρία): Ο όγκος στον οποίο επιβάλλεται η φόρτιση έχει μορφή “Γ”, Εικ. 5.3γ.

Τέλος, κατασκευάστηκε και τέταρτος τύπος δοκιμίων (τύπος IV) με την προτεινόμενη γεωμετρία και στόχο την ποσοτικοποίηση του ευεργετικού ρόλου του ανακουφιστικού κενού στη σύνδεση. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζει συγκριτικά με τον τύπο III είναι η απουσία κονιάματος, σε μήκος περίπου ίσο με 2 cm, εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των επιστυλίων.

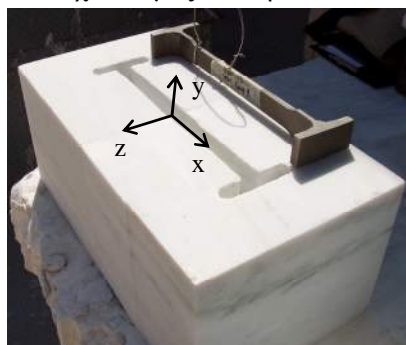


Εικ. 5.3: Τυπικό δοκίμιο (α) τύπου I, (β) τύπου II και (γ) τύπου III.

Πρέπει να υπογραμμιστεί στο σημείο αυτό ότι τα δοκίμια (όπως συμβαίνει και στην πραγματική κατασκευή) δεν είναι συμμετρικά στο xz επίπεδο (Εικ. 5.4) λόγω της θέσης του μεταλλικού συνδέσμου.

Για την υλοποίηση των δοκιμών απαιτήθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή σειράς χαλύβδινων ιδιοσυσκευών. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν:

- Τρεις πλάκες συγκράτησης (Εικ. 5.5α) για την ακινητοποίηση του ενός επιστυλίου. Στην πλάκα διανοίχθηκαν τέσσερις οπές μέσω των οποίων διέρχονται στιβαρές μεταλλικές κοχλιομημένες ράβδοι (ντίζες) που στερεώνονται στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης.
- Μία πλάκα έλξης (μορφή “Γ”) που αποτελείται από τις πλάκες “1” και



Εικ. 5.4: Η ασυμμετρία στο xz επίπεδο λόγω της θέσης του συνδέσμου.

“2” (Εικ. 5.5β). Πρέπει να τονιστεί ότι η πλάκα έλξης κατασκευάστηκε έτσι ώστε το μέσο της στενής πλευράς της πλάκας “1” να ταυτίζεται με τον άξονα του συνδέσμου (Εικ. 5.5γ).

- Δύο τεμάχια σχήματος “Π” που κρατούν σε επαφή την πλάκα έλξης με τον κινούμενο όγκο στα άκρα των οποίων έχουν διανοιχθεί οπές (Εικ. 5.5δ).
- Μία μεταλλική κατασκευή που περιλαμβάνει τη δοκό που συνδέει τα δύο τεμάχια σχήματος “Π” που προαναφέρθηκαν και μία πλάκα έλξης (Εικ. 5.5ε)
- Δύο ράβδοι χάλυβα υψηλής αντοχής (Εικ. 5.5στ).



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

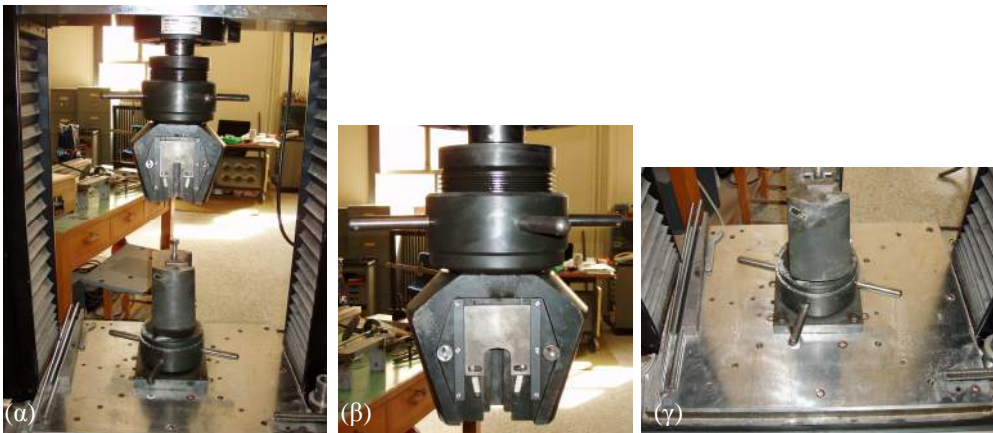
Εικ. 5.5: Οι μεταλλικές ιδιοσυσκευές.

5.3 ΠΛΑΙΣΙΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ

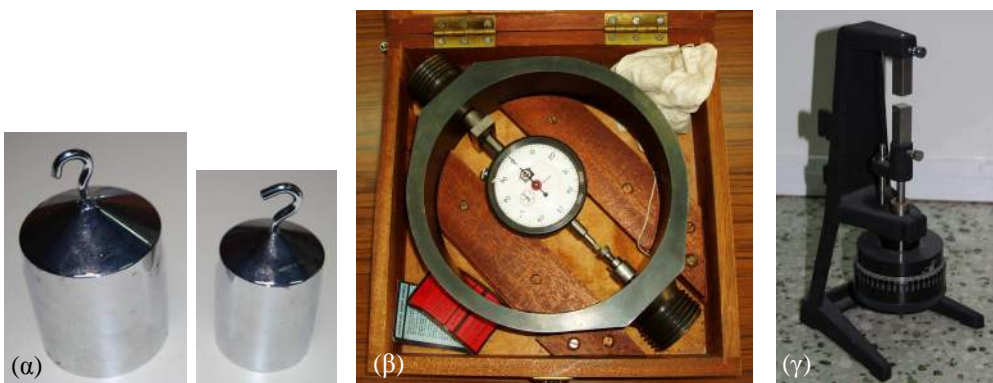
Όλες οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο φόρτισης INSTRON (Model 1126) (Εικ. 5.6), με μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ίσο με 250 kN, λόγω της τράπεζας που διαθέτει και της δυνατότητας που αυτή προσέφερε για τη στήριξη των δοκιμών μέσω των κοχλιοτομημένων οπών της. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι ένα ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης που έχει τη δυνατότητα επιβολής φορτίων τόσο με έλεγχο της μετατόπισης (*displacement control*) όσο και με έλεγχο της δύναμης (*load control*).

Πριν από κάθε δοκιμή προηγούνταν:

- Βαθμονόμηση του πλαισίου φόρτισης ως προς τα επιβαλλόμενα φορτία με τη χρήση τόσο αναρτημένων βαρών (Εικ. 5.7α) για τις χαμηλές κλίμακες όσο και δακτυλίων βαθμονόμησης (Εικ. 5.7β) για τις υψηλές κλίμακες.
- Βαθμονόμηση του πλαισίου φόρτισης ως προς τις μετατοπίσεις με τη χρήση μικρομετρικού κοχλίου (Εικ. 5.7γ).



Εικ. 5.6: (α) Το πλαίσιο φόρτισης INSTRON Model 1126, (β) Η αρπάγη και (γ) η τράπεζα του πλαισίου φόρτισης.



Εικ. 5.7: (α) Βάρη και (β) Δακτύλιος βαθμονόμησης, (γ) Μικρομετρικός κοχλίας.

5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το σκεπτικό για την υλοποίηση καθαρής διάτμησης είναι η ακινητοποίηση πάνω στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης του ενός εκ των δύο όγκων μαρμάρου και η επιβολή κατακόρυφης μετατόπισης (παράλληλης ως προς το ακινητοποιημένο επιστύλιο) στο δεύτερο όγκο. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε σειρά πειραματικών τεχνικών, παραδοσιακών (π.χ. ηλεκτρομηκυνσιόμετρα - strain gauges) και πλέον σύγχρονων (π.χ. η τεχνική των ηλεκτρικών σημάτων τα οποία διεγείρονται από τη μηχανική φόρτιση - PSC).

5.4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Δοκίμια τύπου I

Οι δοκιμές της κατηγορίας αυτής υλοποιήθηκαν με κύριο στόχο τον έλεγχο της πειραματικής διάταξης. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν πολλές πειραματικές τεχνικές παρά μόνο αριθμός ηλεκτρομηκυνσιόμετρων στις περιοχές ενδιαφέροντος του δοκιμίου (Εικ. 5.8).

Αφού το δοκίμιο τοποθετείται στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης, προσαρμόζεται πάνω στον ένα όγκο του μία ορθογωνική πλάκα συγκράτησης έτσι ώστε να βρίσκεται στο όριο της διεπιφάνειας των δύο επιστυλίων. Η πλάκα διαθέτει οπές και συγκρατείται στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης με τη βοήθεια τεσσάρων κοχλιοτομημένων ράβδων (ντίτζες) που διέρχονται από τις οπές της. Οι βάσεις τους καταλήγουν και στερεώνονται σε κοχλιωτές οπές της τράπεζας και η άλλη άκρη τους στερεώνεται πάνω στην πλάκα στήριξης μέσω περικοχλίων (παξιμαδιών).

Στη συνέχεια, τοποθετείται η πλάκα έλξης πάνω στο δεύτερο όγκο μαρμάρου (στον οποίο επρόκειτο να επιβληθεί η μετατόπιση) έτσι ώστε ο άξονας της πλάκας έλξης να ταυτίζεται με το κέντρο του συνδέσμου (Εικ. 5.5γ). Τα δύο τεμάχια σχήματος “Π” προσαρμόζονται πάνω στην πλάκα έλξης έτσι ώστε οι οπές στα άκρα τους να συμπίπτουν με τις οπές που έχουν διανοιχθεί ήδη στο μάρμαρο



Εικ. 5.8: Δοκίμιο τύπου I τοποθετημένο στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης πριν την έναρξη της δοκιμής.

και οι δύο μεταλλικές ράβδοι διέρχονται από τις οπές των τεμαχίων “Π” και του μαρμάρου (Εικ. 5.8). Τέλος, η πλάκα “1” (Εικ. 5.5β) συγκρατείται στην αρπάγη του πλαισίου φόρτισης.

Δοκίμια τύπου II

Στα πειράματα με δοκίμια του τύπου αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι κάτωθι πειραματικές τεχνικές:

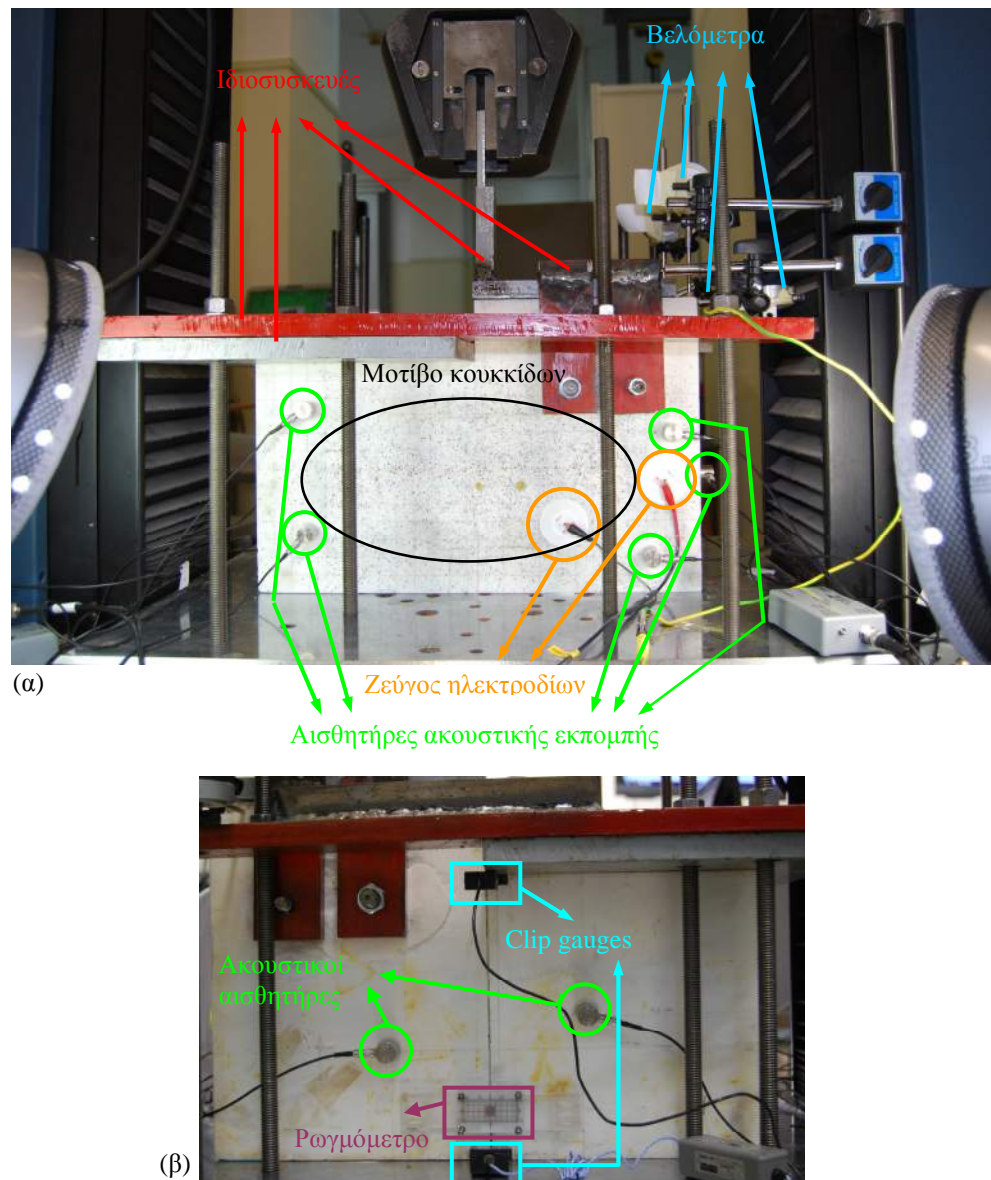
- Ακουστικής εκπομπής (ΑΕ).
- Ηλεκτρικών σημάτων διεγειρομένων από μηχανική φόρτιση (PSC).
- Συσχέτισης ψηφιακής εικόνας σε τρεις διαστάσεις (3D DIC).

Παράλληλα προσαρμόστηκαν στο δοκίμιο παραδοσιακά μηκυνσιόμετρα μέτρησης της απόστασης (clip gauges) μεταξύ δύο σημείων, παραδοσιακά βελόμετρα (dial gauges) και ένα ρωγμόμετρο.

Αρχικά, προσαρμόστηκαν πάνω στο δοκίμιο οκτώ αισθητήρες ακουστικής εκπομπής με τη βοήθεια σιλικόνης (Εικ. 5.9α) και πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό σειράς παραμέτρων του συστήματος όσον αφορά στα κύματα που δημιουργούνται από κάποιο ακουστικό γεγονός και επιπρόσθετα τον υπολογισμό - προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων αυτών στο δοκίμιο. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου ένας βοηθητικός δομημένος κάναβος (ο οποίος είναι επίσης χρήσιμος για τη μέθοδο 3D DIC). Στόχος αυτών ήταν να γίνει η κατά το δυνατόν σωστότερη καταγραφή των ακουστικών κυμάτων και ο σωστότερος εντοπισμός - προσδιορισμός της θέσης των γεγονότων ακουστικής εκπομπής κατά τη διάρκεια φόρτισης του δοκιμίου.

Για την εφαρμογή της τεχνικής ηλεκτρικών σημάτων προσαρμόστηκαν κατάλληλα στην επιφάνεια του δοκιμίου, συγκεκριμένα στην περιοχή που αναμενόταν η αστοχία, δύο αισθητήρες ηλεκτρικού ρεύματος (Εικ. 5.9α) για την καταγραφή της διαφοροποίησης των ηλεκτρικών σημάτων που συσχετίζεται με το μέγεθος της μηχανικής καταπόνησης του δοκιμίου. Μεταξύ του δοκιμίου και των ηλεκτροδίων παρεμβάλλεται μια λεπτή στρώση υγρού αργύρου λόγω της αγωγιμότητάς του.

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετείται στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης. Ο ένας μαρμάρινος όγκος ακινητοποιείται με τη βοήθεια τριών πλακών συγκράτησης (της ορθογωνικής πλάκας, που χρησιμοποιήθηκε και στα δοκίμια τύπου I, και δύο πρόσθετων μεταλλικών πλακών σχήματος “Γ”). Όλες οι πλάκες συγκράτησης διαθέτουν οπές σε κατάλληλες θέσεις, που ταυτίζονται με τη θέση των οπών που υπάρχουν στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης και είναι προκαθορισμένες. Οκτώ κοχλιοτομημένες ράβδοι διέρχονται από τις οπές των πλακών συγκράτησης και στερεώνονται στις οπές της τράπεζας ενώ η άλλη άκρη τους στερεώνεται στις πλάκες στήριξης μέσω περικοχλίων (παξιμαδιών). Πάνω στο δεύτερο όγκο μαρμάρου προσαρμόζονται η πλάκα έλξης και τα δύο τεμάχια σχήματος “Π”, και δύο μεταλλικές ράβδοι διέρχονται από τις οπές των τεμαχίων “Π” και του επιστυλίου. Τέλος, η πλάκα “1” συγκρατείται στην αρπάγη του πλαισίου φόρτισης (Εικ. 5.9α).



Εικ. 5.9: (α) Δοκίμο τύπου II πάνω στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής. Διακρίνονται οι ιδιοσκευές, πέντε αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, το μοτίβο των κουκκίδων για τη μέθοδο της ψηφιακής συσχέτισης εικόνας, οι αισθητήρες ηλεκτρικού ρεύματος και τα ωρολογιακά βελόμετρα.
(β) Η πίσω όψη του δοκιμίου. Διακρίνονται τα δύο μηχανοστάσια (clip gauges), δύο ακουστικοί αισθητήρες και το ρωγμόμετρο.

Αφού το δοκίμιο τοποθετηθεί στην τελική του θέση, δημιουργήθηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου με τη βοήθεια αερογράφου ένα μοτίβο κουκκίδων (Εικ. 5.9α), το μέγεθος των οποίων υπολογίζεται ύστερα από κατάλληλους υπολογισμούς βάσει των διαστάσεων του οπτικού παραθύρου. Έπειτα προσαρμόστηκαν κατάλληλα στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου δύο μηκυσιόμετρα (clip gauges) μέτρησης της απόστασης μεταξύ των δύο επιστυλίων, ένα στην ανώτατη στάθμη της διεπιφάνειας των όγκων μαρμάρου και ένα στην κατώτατη (Εικ. 5.9β). Τέλος, στην επάνω επιφάνεια του κινούμενου όγκου τοποθετήθηκαν τρία ωρολογιακά βελόμετρα (dial gauges), Εικ. 5.9α.

Δοκίμια τύπου III

Στα πειράματα με δοκίμια του τύπου αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι κάτωθι πειραματικές τεχνικές:

- Ακουστικής εκπομπής (AE).
- Ηλεκτρικών σημάτων που διεγείρονται από μηχανική φόρτιση (PSC).
- Συσχέτισης ψηφιακής εικόνας σε τρεις διαστάσεις (3D DIC).

Ταυτοχρόνως, χρησιμοποιήθηκαν παραδοσιακά ηλεκτρομηκυσιόμετρα (strain gauges), παραδοσιακά μηκυσιόμετρα μέτρησης της απόστασης (clip gauges) μεταξύ δύο σημείων και ένα ρωγμόμετρο.

Η προετοιμασία των δοκιμίων ξεκινά με την προσαρμογή τριών ηλεκτρομηκυσιομέτρων πάνω στο σύνδεσμο τιτανίου: ένα στο μέσο του μήκους του και από ένα εκατέρωθεν του μέσου, Εικ. 5.10α. Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα επικαλύπτονται με σιλικόνη για την προστασία τους από την υγρασία του ρευστού κονιάματος που περιβάλλει το σύνδεσμο και πληροί την εντορμία. Όσον αφορά στις υπόλοιπες πειραματικές τεχνικές (που χρησιμοποιήθηκαν και στα δοκίμια τύπου II) ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία.

Η ακινητοποίηση του ενός όγκου του δοκιμίου στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης γίνεται όπως έχει ήδη περιγραφεί στα δοκίμια τύπου II (τρεις πλάκες συγκράτησης με σπές, έξι κοχλιοτομημένες ράβδοι και περικόχλια). Διαφοροποιήσεις υπάρχουν σχετικά με τον τρόπο επιβολής της φόρτισης. Η νέα γεωμετρία του κινούμενου επιστυλίου, μορφής “Γ”, εξυπηρετεί τη διάνοιξη των δύο οπών (μέσω των οποίων επιβάλλεται η φόρτιση) σε ίσες αποστάσεις εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των μαρμάρινων όγκων (Εικ. 5.10β,γ). Αυτός εξάλλου ήταν ο λόγος αλλαγής της γεωμετρίας του κινούμενου όγκου. Η φόρτιση τώρα επιβάλλεται μέσω της μεταλλικής κατασκευής (Εικ. 5.5ε) που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2 και δύο άκαμπτων μεταλλικών ράβδων που διαπερνούν τον κινούμενο όγκο. Τέλος, η νέα πλάκα έλξης συγκρατείται στην αρπάγη του πλαισίου φόρτισης.

Δοκίμια τύπου IV

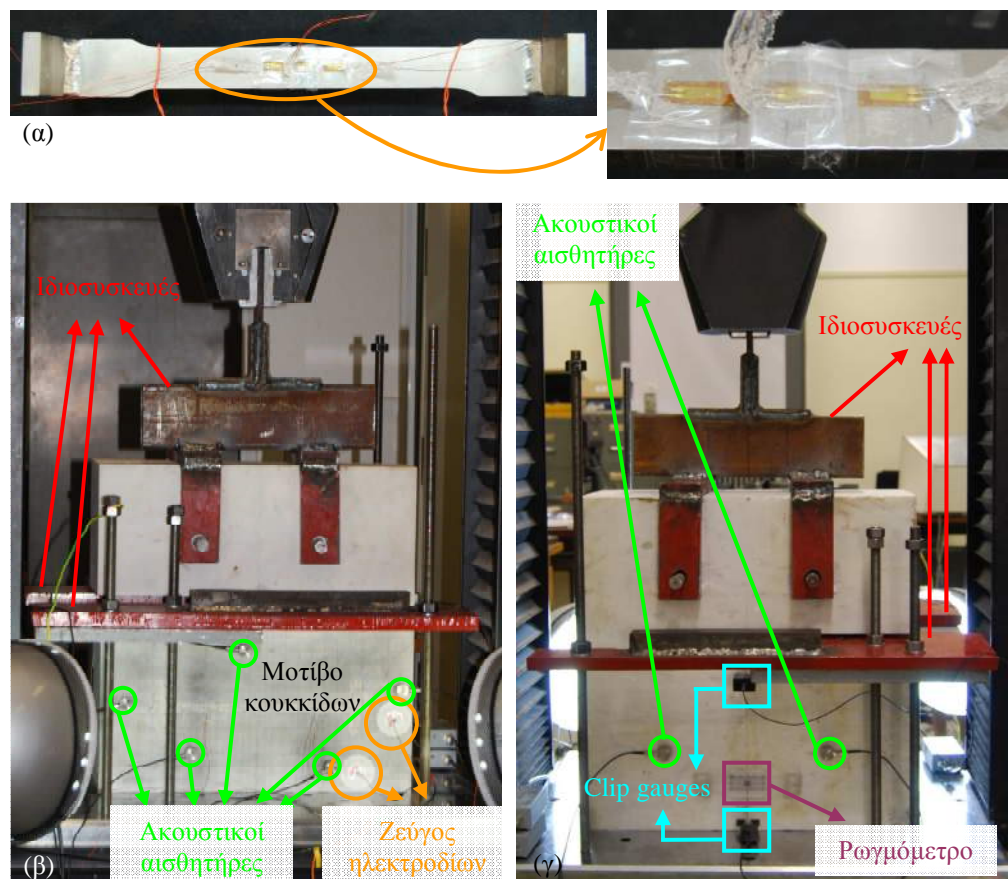
Στα πειράματα με δοκίμια του τύπου αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι κάτωθι πειραματικές τεχνικές:

- Ακουστικής εκπομπής (AE).
- Ηλεκτρικών σημάτων διεγερμένων από μηχανική φόρτιση (PSC).
- Συσχέτισης ψηφιακής εικόνας σε τρεις διαστάσεις (3D DIC).

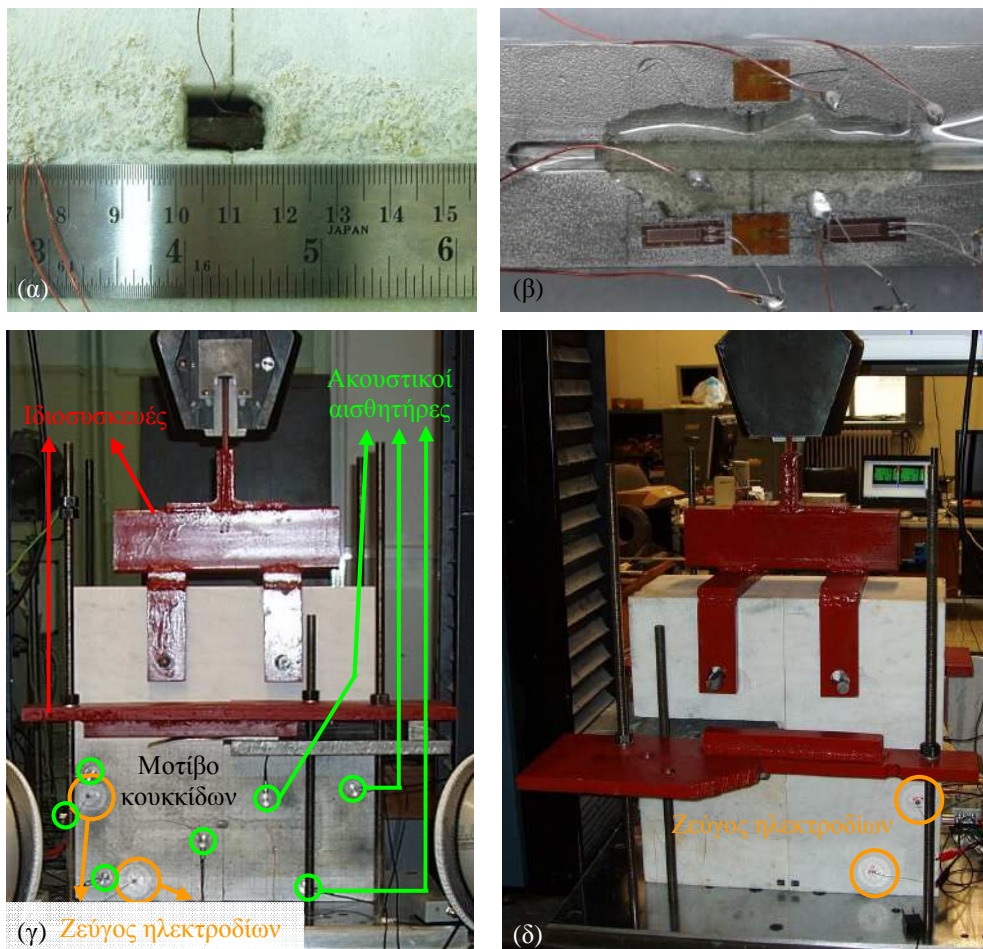
Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν παραδοσιακά ηλεκτρομηκυσιόμετρα και παραδοσιακά μηκυσιόμετρα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δύο σημείων.

Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια αυτά διαφοροποιούνται συγκριτικά με αυτά του τύπου III μόνο ως προς την ύπαρξη ανακουφιστικού κενού μήκους ~2 cm (Εικ. 5.11α).

Η προετοιμασία τους είναι γενικά ίδια με αυτή των δοκιμίων τύπου III, μόνο που στην περίπτωση αυτή κολλήθηκαν τέσσερα ηλεκτρομηκυσιόμετρα (strain gauges) στο σύνδεσμο τιτανίου: δύο στο μέσο του μήκους του (πλησίον των ορίων του ύψους του κορμού, και από ένα εκατέρωθεν του μέσου) Εικ. 5.11β. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δύο ζεύγη ηλεκτροδίων, ένα στην μπροστινή και ένα στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στις Εικ. 5.11γ,δ.



Εικ. 5.10: (α) Ηλεκτρομηκυσιόμετρα στον κορμό του μεταλλικού συνδέσμου. (β) Δοκίμιο τύπου III πάνω στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής. Διακρίνονται οι ιδιοσκευές, πέντε αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, το μοτίβο των κουκκίδων για τη μέθοδο ψηφιακής συσχέτισης εικόνας και οι αισθητήρες ηλεκτρικού ρεύματος. (γ) Η πίσω όψη του δοκιμίου. Διακρίνονται τα δύο μηκυσιόμετρα (clip gauges), δύο ακουστικοί αισθητήρες και το ρωγμόμετρο.



Εικ. 5.11: (α) Το ανακουφιστικό κενό. (β) Ηλεκτρομηκυσιόμετρα στον κορμό του συνδέσμου τιτανίου. (γ) Δοκίμιο τύπου IV πάνω στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής. Διακρίνονται οι ιδιοσυσκευές, επτά αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, το μοτίβο των κουκκίδων για τη μέθοδο της ψηφιακής συσχέτισης εικόνας και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων. (δ) Η πίσω όψη του δοκιμίου.

5.4.2 ΚΥΡΙΩΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν με έλεγχο του ρυθμού επιβολής μετατόπισης, ο οποίος ήταν 0.2 mm/min έτσι ώστε να προσομοιώνονται “οιονεί” στατικές (quasi-static) συνθήκες.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγράφονται:

- Οι ενδείξεις του φορτίου.
- Οι ενδείξεις της μετατόπισης της τραβέρσας του πλαισίου φόρτισης.
- Οι ανηγμένες παραμορφώσεις από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα.

- Οι ενδείξεις των ωρολογιακών βελομέτρων.
- Οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων μέτρησης της απόστασης μεταξύ των επιστυλίων.
- Η θέση και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών γεγονότων.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της δοκιμής λαμβάνονταν φωτογραφίες της μπροστινής επιφάνειας του δοκιμίου σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα από τις δύο κάμερες της μεθόδου DIC. Τα μετρητικά όργανα ξεκινούν την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων με την έναρξη της δοκιμής.

5.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Δοκίμια τύπου I

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι δοκιμές αυτές ήταν προκαταρκτικές, κυρίως για τον έλεγχο της πειραματικής διάταξης. Πράγματι, η υλοποίησή τους έφερε στο φως δύο αδυναμίες της διάταξης.

Ο στόχος της ακινητοποίησης του ενός όγκου του δοκιμίου επιτεύχθηκε εν μέρει. Η διάταξη των θέσεων των οπών της ορθογωνικής πλάκας συγκράτησης του μαρμάρινου όγκου (που ορίστηκαν βάσει των θέσεων των οπών που προϋπάρχουν στην τράπεζα του πλαισίου φόρτισης) κάλυπτε ένα μόνο μέρος του επιστυλίου και αυτό τελικά ακινητοποιήθηκε. Η πλάκα συγκράτησης από μόνη της δεν μπόρεσε να περιορίσει πλήρως το “ελεύθερο” τμήμα του συγκεκριμένου επιστυλίου (Εικ. 5.12).

Η απόσταση των οπών από την άνω ελεύθερη έδρα του κινούμενου επιστυλίου δεν ήταν επαρκής με αποτέλεσμα να υπάρξουν ρηγματώσεις στην περιοχή πέριξ των οπών (Εικ. 5.12).

Η αστοχία του συστήματος επήλθε με κωνικής μορφής θραύση του κινούμενου επιστυλίου που ξεκίνησε από το πέγμα στις εντορμίας (Εικ. 5.13α,β) ενώ ο σύνδεσμος τιτανίου εμφάνισε πλαστικές παραμορφώσεις (Εικ. 5.13γ).

Δοκίμια τύπου II

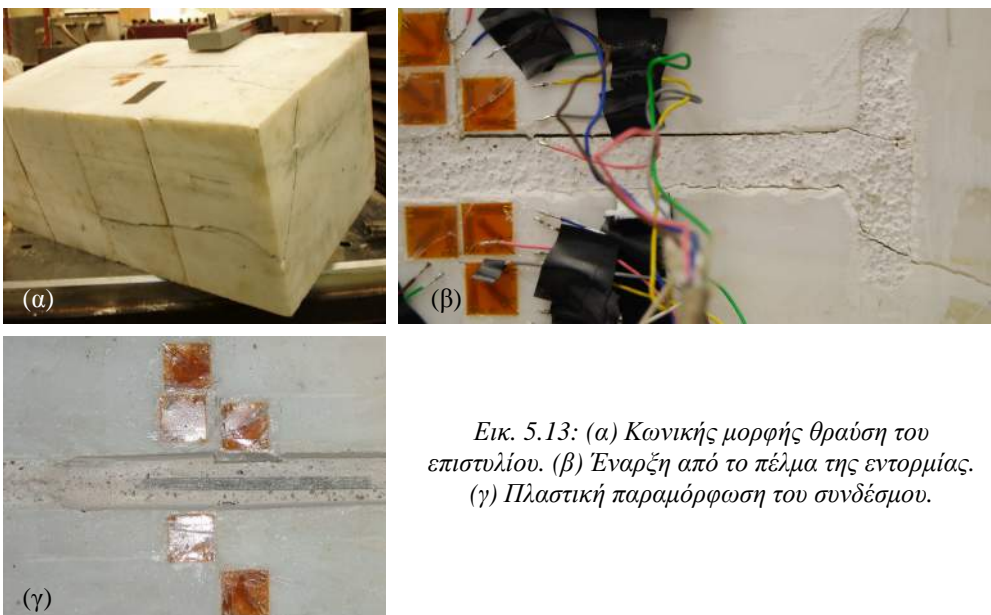
Οι δύο, λοιπόν, αδυναμίες των δοκιμών τύπου I οδήγησαν στην πρώτη τροποποίηση της γεωμετρίας των δοκιμών (μεγαλύτερος κινούμενος όγκος) και στη συμπλήρωση της πειραματικής διάταξης (δύο νέες πλάκες συγκράτησης και τέσσερις νέες κοχλιοτομημένες ράβδοι).

Μακροσκοπικά μπορούν να γίνουν τέσσερις παρατηρήσεις:

- Οι ρηγματώσεις πέριξ των οπών του μαρμάρινου όγκου αποφεύχθηκαν (Εικ. 5.14).
- Ο αριστερός όγκος μοιάζει να έχει ακινητοποιηθεί πλήρως.
- Η αστοχία του συστήματος επήλθε με την κωνικής μορφής θραύση του κινούμενου όγκου, η οποία ξεκίνησε από το πέγμα της εντορμίας (Εικ. 5.14).
- Η αποκάλυψη του συνδέσμου μετά το πέρας των δοκιμών καταδεικνύει την πλαστική παραμόρφωση που έχει υποστεί (Εικ. 5.15).



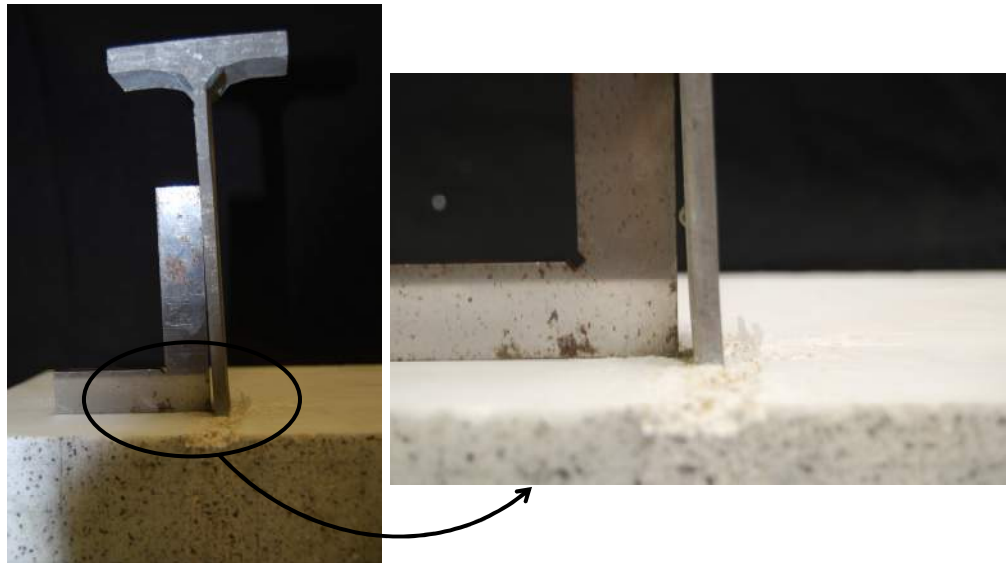
Εικ. 5.12: Αδυναμίες της πρώτης πειραματικής διάταξης.



Εικ. 5.13: (α) Κωνικής μορφής θραύση του επιστρώματος. (β) Έναρξη από το πέγμα της εντορμίας. (γ) Πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου.



Εικ. 5.14: Κωνικής μορφής θραύση του επιστυλίου.



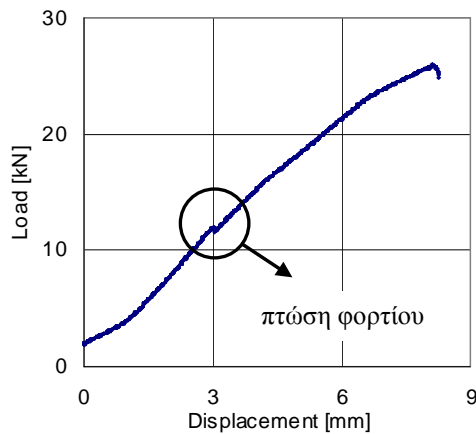
Εικ. 5.15: Πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου.

Το φορτίο που οδηγεί στη θραύση του επιστυλίου κυμαίνεται περίξ των 26.0 kN και η τυπική πλήρης καμπύλη δύναμης - χρόνου φαίνεται στην Εικ. 5.16. Αρχικά εμφανίζει μια μικρή περιοχή κατά την οποία εξαλείφονται τα σφάλματα έδρασης - συγκράτησης της πειραματικής διάταξης και στη συνέχεια η δύναμη παραλαμβάνεται μόνο από το σύστημα. Όταν το φορτίο φτάσει περίπου στο 45% του μέγιστου φορτίου (~12.0 kN) παρατηρείται μία πτώση της δύναμης και περίπου στο 90% του φορτίου θραύσης (~24.0 kN) εμφανίζεται σαφής αλλαγή στην κλίση της καμπύλης. Μία δεύτερη αλλαγή κλίσης, που δεν γίνεται αντιληπτή με την πρώτη ματιά, υπάρχει όταν το φορτίο ισούται με περίπου 65% της μέγιστης δύναμης (~17.0 kN).

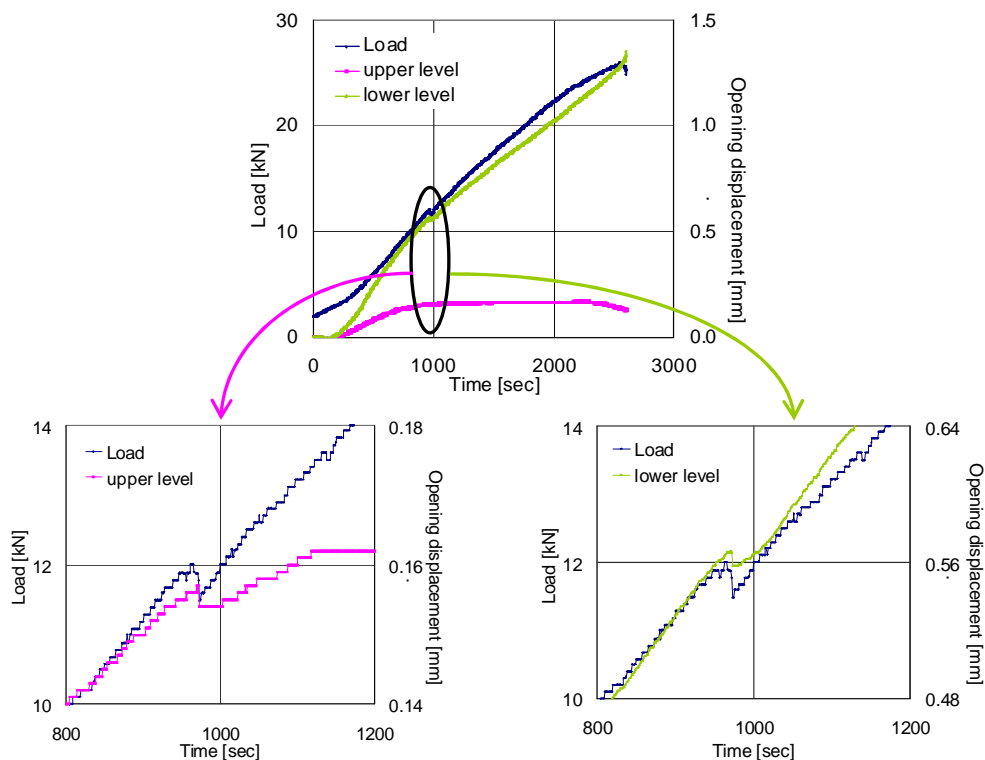
Ο έλεγχος του τρόπου φόρτισης έγινε κατ' αρχήν βάσει των δεδομένων των παραδοσιακών μηχανομητρών και των ωρολογιακών βελομέτρων. Η απομάκρυνση των δύο επιστυλίων συναρτήσε του χρόνου (Εικ. 5.17) όπως καταγράφηκε από τα

μηκυνσιόμετρα στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου υποδεικνύουν μια παρασιτική κάμψη στο xy επίπεδο. Εστιάζοντας περίξ της χρονικής στιγμής πτώσης της δύναμης, εμφανίζεται μία σχεδόν στιγμιαία “διαταραχή” στις καταγραφές των δύο μηκυνσιόμετρων. Οι ενδείξεις των ωρολογιακών βελομέτρων (dial gauges) επιβεβαίωσαν την ύπαρξη της κάμψης και επιπλέον φανέρωσαν μια στρεπτική ροπή στο yz επίπεδο.

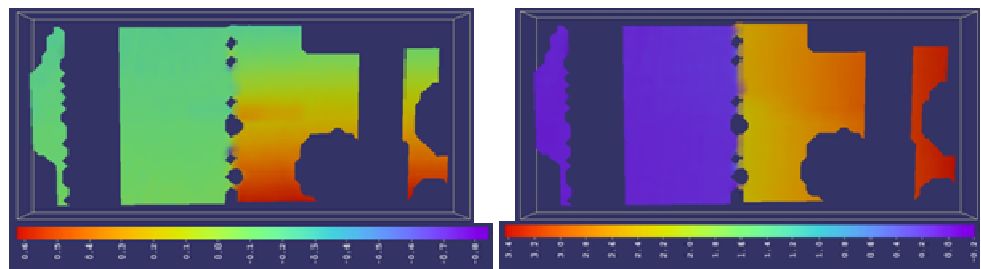
Από την επεξεργασία των φωτογραφιών της μεθόδου 3D DIC προσδιορίστηκε το πεδίο των μετατοπίσεων στην μπροστινή επιφάνεια του δοκιμίου. Οι κατανομές των συνιστωσών της μετατόπισης κατά τους άξονες x (άξονας του συνδέσμου) και y (άξονας φόρτισης), όπως παρουσιάζονται στις χρωματοκλίμακες της Εικ. 5.18α,β, αποδεικνύουν την καλή ακινητοποίηση του αριστερού επιστυλίου. Οι ίδιες χρωματοκλίμακες επιβεβαιώνουν την ύπαρξη της παρασιτικής κάμψης του κινούμενου επιστυλίου στο xy .



Εικ. 5.16: Τυπική καμπύλη δύναμης - μετατόπισης.



Εικ. 5.17: Το “άνοιγμα” των επιστυλίων συναρτήσει του χρόνου.



Εικ. 5.18: Το πεδίο των μετατοπίσεων κατά τον άξονα (α) x και (β) y .

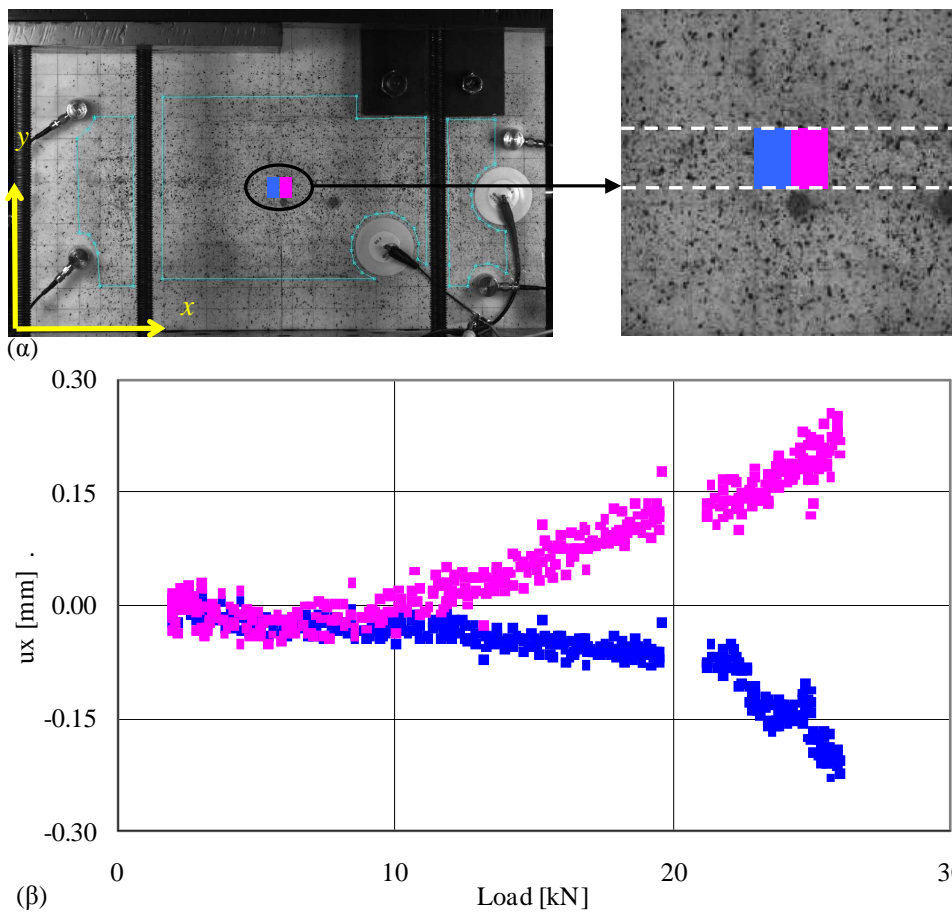
Έπειτα, απομονώθηκαν δύο μικρές περιοχές του κονιάματος πλήρωσης της εντορμίας (εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των μαρμάρινων όγκων), Εικ. 5.19α, και αποδόθηκαν γραφικά οι μετατοπίσεις τους κατά μήκος του άξονα x (Εικ. 5.19β) συναρτήσει του φορτίου. Η τεχνική 3D DIC αποδείχθηκε εξαιρετικά χρήσιμη αφού απέδειξε όχι μόνο τη ρηγματώση του κονιάματος στην μπροστινή επιφάνεια του δοκιμίου αλλά και το διαχωρισμό του σε δύο μέρη.

Η καταπόνηση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισής του αναπαραστάθηκε σε πραγματικό χρόνο με τη βοήθεια της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής. Τα ακουστικά γεγονότα αρχικά εντοπίστηκαν, όπως αναμενόταν, κοντά στη διεπιφάνεια των μαρμάρινων όγκων και συγκεκριμένα στις περιοχές ενδιαφέροντος (Εικ. 5.20α). Με την πάροδο του χρόνου, ο αριθμός των ακουστικών γεγονότων στις περιοχές αυτές αυξανόταν ενώ παράλληλα νέα ακουστικά γεγονότα άρχισαν σταδιακά να εμφανίζονται προς τα πέλματα της εντορμίας (Εικ. 5.20α).

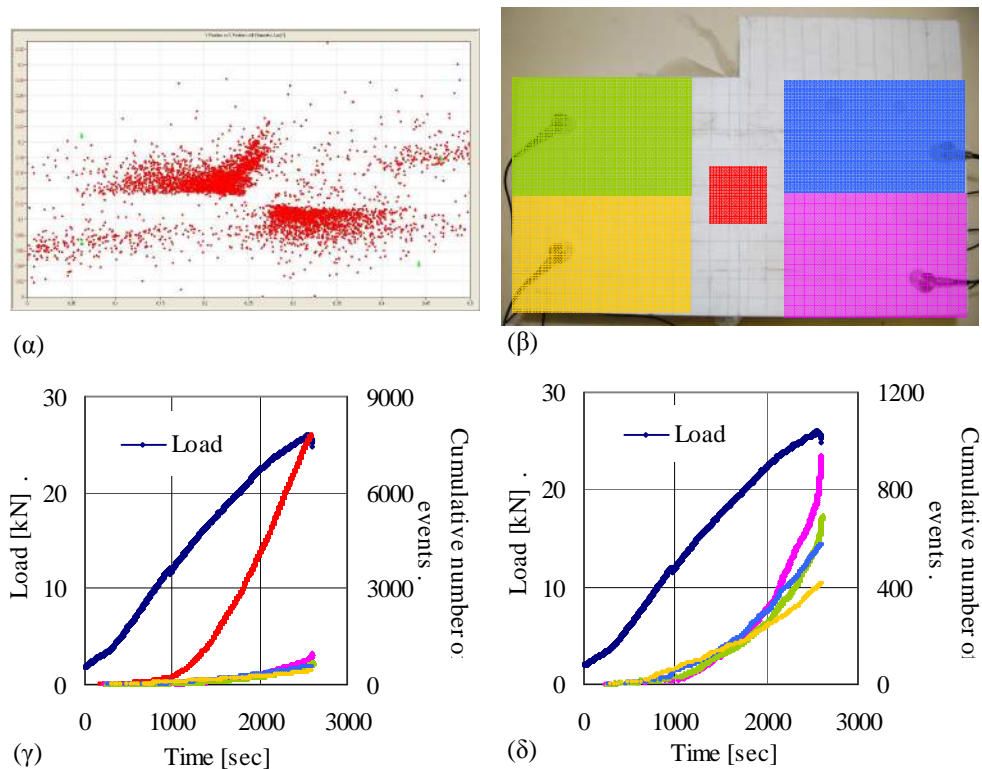
Για την καλύτερη αναπαράσταση της εξέλιξης της γέννησης των ακουστικών γεγονότων, το δοκίμιο χωρίστηκε σε πέντε (5) βοηθητικούς υπο-όγκους (γύρω από το κέντρο του συνδέσμου και περίξ των άκρων κάθε πέλματος του συνδέσμου), Εικ. 5. 20β, και εντοπίστηκαν τα ακουστικά γεγονότα που είχαν την πηγή τους σε κάθε έναν από αυτούς. Ο αθροιστικός αριθμός των γεγονότων αυτών και το φορτίο αποδόθηκαν γραφικά συναρτήσει του χρόνου, Εικ. 5.20γ,δ. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθούν τα εξής: (α) Ο ρυθμός γέννησης των ακουστικών γεγονότων στο κεντρικό υπο-όγκο αυξήθηκε σημαντικά από τη στιγμή της πτώσης του φορτίου περί τα 12.0 kN, (β) Μέχρι περίπου το 90% της μέγιστης δύναμης, που αντιστοιχεί στο σημείο της έντονης αλλαγής κλίσης του γραφήματος δύναμης - χρόνου, ο ρυθμός παραγωγής των ακουστικών γεγονότων στους τέσσερεις υπο-όγκους περίξ των πελμάτων της εντορμίας ήταν περίπου ίδιος. Από τη στιγμή αυτή και έπειτα, τόσο ο ρυθμός γέννησης των γεγονότων στον υπο-όγκο του κινούμενου επιστυλίου που τελικά εμφανίστηκε η θραύση όσο και ο απόλυτος αριθμός τους αυξάνεται σημαντικά συγκριτικά με τους υπόλοιπους τρεις υπο-όγκους.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, παρακολούθηθηκε έμμεσα σε πραγματικό χρόνο η δημιουργία μικρορηγματώσεων και θραύσεων μέσω του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (μέθοδος των ηλεκτρικών σημάτων), Εικ. 5.21. Οι πρώτες καταγραφές που ξεπέρασαν το “θόρυβο” εμφανίστηκαν με το τέλος της αρχικής φάσης

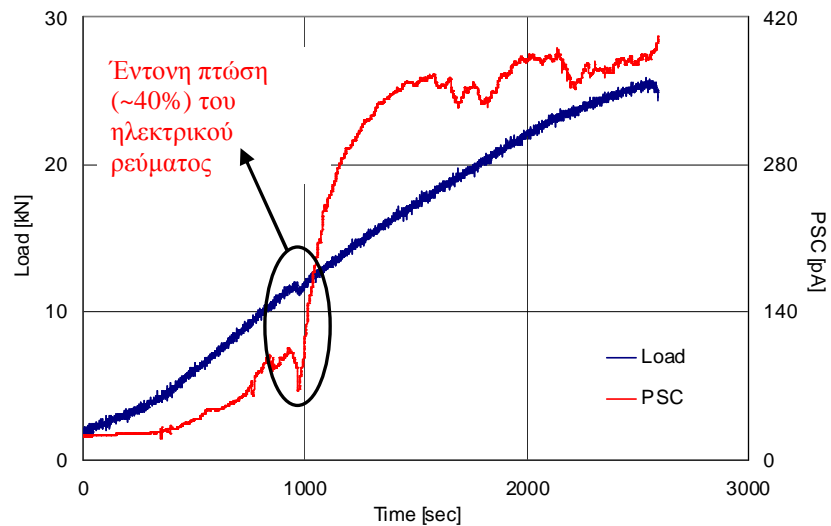
της φόρτισης. Περίπου στο 40% του φορτίου θραύσης, το ηλεκτρικό ρεύμα αρχίζει να παρουσιάζει διακυμάνσεις που προμηνύουν τη γέννηση “έντονων” μικρορηγματώσεων και λίγο αργότερα (όταν το φορτίο ισούται περίπου με το 45% της μέγιστης δύναμης) καταγράφεται μία έντονη πτώση της τιμής του, περίπου κατά 40%. Αμέσως μετά την πτώση αυτή, το ηλεκτρικό ρεύμα αυξάνεται θεαματικά (από 45% έως περίπου 65% του μέγιστου φορτίου) και η απόλυτη τιμή του σχεδόν πενταπλασιάζεται. Τέλος, φαίνεται να ακολουθούν δύο φάσεις διακυμάνσεων, μία από 65% έως περίπου 90% της δύναμης θραύσης και μία δεύτερη από 90% του μέγιστου φορτίου μέχρι τη μέγιστη δύναμη των περίπου 26.0 kN.



Εικ. 5.19: (α) Οι περιοχές του κονιάματος εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των μαρμάρων για τις οποίες αποδίδεται γραφικά (β) η μετατόπισή τους κατά τον άξονα x συναρτήσει του φορτίου.



Εικ. 5.20: (α) Η κατανομή των ακουστικών γεγονότων. (β) Οι βοηθητικοί υπο-όγκοι. (γ,δ) Ο αθροιστικός αριθμός των ακουστικών γεγονότων και το φορτίο συναρτήσει του χρόνου στους πέντε υπο-όγκους (γ) και στους τέσσερις υπο-όγκους περίξ των πελμάτων της εντορμίας (δ).



Εικ. 5.21: Η μεταβολή του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και το φορτίο συναρτήσει του χρόνου.

Δοκίμια τύπου III

Στα δοκίμια αυτά, το κινούμενο επιστύλιο έχει μορφή “Γ” και οι οπές μέσω των οποίων επιβάλλεται η φόρτιση έχουν διανοιχθεί σε ίσες αποστάσεις εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των επιστυλίων έτσι ώστε να εξαλειφθεί η παρασιτική κάμψη η οποία καταγράφηκε στις προηγούμενες δοκιμές. Η μετατόπιση επιβλήθηκε χρησιμοποιώντας μια πιο σύνθετη μεταλλική κατασκευή (συγκριτικά με την απλή πλάκα έλξης), δίνοντας πάλι ιδιαίτερη προσοχή ώστε η φόρτιση να επιβάλλεται ακριβώς πάνω από τη θέση του συνδέσμου προς αποφυγή των στρεπτικών ροπών.

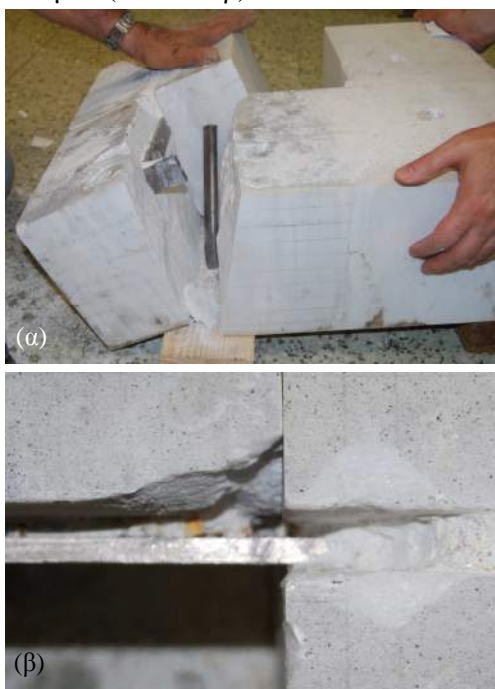
Μακροσκοπικά παρατηρούνται:

- Θραύση του κινούμενου επιστυλίου που ξεκινά από το μέσο του πέλματος της εντορμιάς (Εικ. 5.22α).
- Πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου (Εικ. 5.22β).

Η δύναμη που οδήγησε στη θραύση του επιστυλίου είναι ίση με περίπου 27.5 kN, όπως φαίνεται από την τυπική καμπύλη δύναμης - χρόνου στην Εικ. 5.23. Στο ίδιο γράφημα υπάρχουν πάλι δύο αλλαγές κλίσης: μία όταν το φορτίο ισούται περίπου με το 60% της μέγιστης δύναμης (17.0 kN) και μία λιγότερο διακριτή όταν η δύναμη φτάσει περίπου στο 85% του φορτίου θραύσης (23.0 kN).

Τα παραδοσιακά μηχανοστάθμετρα (clip gauges) κατέγραψαν τη σχετική θέση των δύο επιστυλίων συναρτήσει του χρόνου (Εικ. 5.24). Το μηχανοστάθμετρο της άνω στάθμης παρουσίασε μια διαρκή αύξηση καθ’ όλη τη διάρκεια της δοκιμής και η μέγιστη ένδειξη που κατέγραψε άγγιξε το 1 mm. Αντίθετα, το μηχανοστάθμετρο της κάτω στάθμης μοιάζει να “ταλαντώνεται” πέριξ της αρχικής θέσης του με ενδείξεις που ισούνται μόλις με 0.016 mm. Ο στόχος, λοιπόν, της παράλληλης μετατόπισης του ενός επιστυλίου ως προς το άλλο χωρίς τη συνύπαρξη καμπτικής ροπής επιτεύχθηκε απολύτως.

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στο σύνδεσμο κατά τη φόρτιση του καταγράφηκαν από τα τρία παραδοσιακά ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (strain gauges) που είχαν προσαρμοστεί στον κορμό του, Εικ. 5.25. Το ηλεκτρομηκυσσιόμετρο που βρισκόταν στην πλευρά του ακίνητου όγκου (SG-f) εμφανίστηκε να είναι σχεδόν αναίσθητο στις μεταβολές του φορτίου μέχρι περίπου το 60% του φορτίου

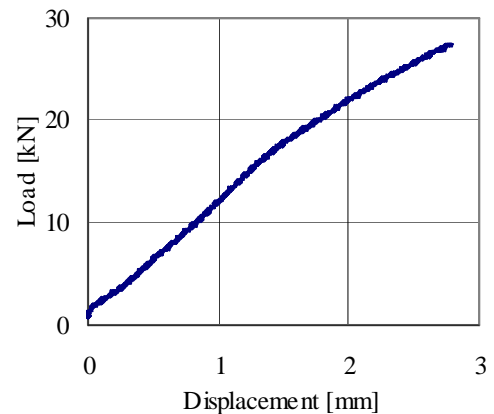


Εικ. 5.22: (α) Το επίπεδο θραύσης.
(β) Ο σύνδεσμος μετά το τέλος της δοκιμής.

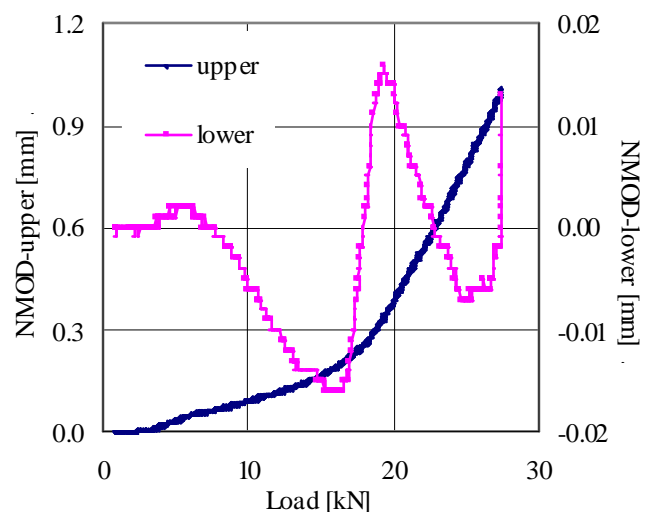
θραύσης του επιστυλίου (17.0 kN). Έπειτα, το τμήμα του συνδέσμου που περιγράφεται από το συγκεκριμένο ηλεκτρομηκυνσιόμετρο “εφελκύεται” μέχρι το 70% της μέγιστης δύναμης (~19.0 kN), όπου το SG-f κατέγραψε τη μέγιστη “εφελκυστική” τιμή του. Από τα 19.0 kN μέχρι περίπου τα 22.0 kN (80% της μέγιστης δύναμης) το SG-f αποφορτίστηκε ευρισκόμενο υπό “εφελκυσμό” ενώ από το σημείο αυτό και μέχρι το τέλος της δοκιμής κατέγραψε “θλιπτικές” τιμές.

Από την άλλη πλευρά της διεπιφάνειας των επιστυλίων, στον κινούμενο όγκο, το τμήμα του συνδέσμου πλησίον του κέντρου του συνδέσμου βρισκόταν υπό “θλίψη” από την αρχή μέχρι και το τέλος της φόρτισης. Η “θλιπτική” ανηγμένη παραμόρφωση στο τμήμα αυτό, όπως καταγράφηκε από το SG-k, αυξάνονταν διαρκώς μέχρι περίπου το 60% του μέγιστου φορτίου (~17.0 kN) όπου συνέχισε μεν να αυξάνεται μέχρι τα 20 kN (~77% του φορτίου θραύσης του επιστυλίου) αλλά στο διάστημα αυτό τα κοίλα του γραφήματος έχουν αλλάξει. Ακολούθησε μία μείωση της τάξης του 10% στην ένδειξη του SG-k (που εμφανίστηκε με κάποιες διαταραχές) μέχρι το 80% της μέγιστης δύναμης (22 kN) και έπειτα η “θλίψη” αυξήθηκε μέχρι τη στιγμή της αστοχίας του συστήματος, όπου το SG-k κατέγραψε τη μέγιστη τιμή του.

Η συμπεριφορά του κεντρικού τμήματος του μεταλλικού συνδέσμου περιγράφεται βάσει των ανηγμένων παραμορφώσεων που κατέγραψε το κεντρικό ηλεκτρομηκυνσιόμετρο, SG-c. Μέχρι περίπου το 35% του μέγιστου φορτίου (μεταξύ 9.0 kN και 11.0 kN) το κέντρο του συνδέσμου “θλίβεται” και οι ενδείξεις του SG-c ταυτίζονται με αυτές του SG-k. Ακολούθησε ένα διάστημα (μέχρι περίπου το 60% του φορτίου θραύσης του επιστυλίου στα 17.0 kN)



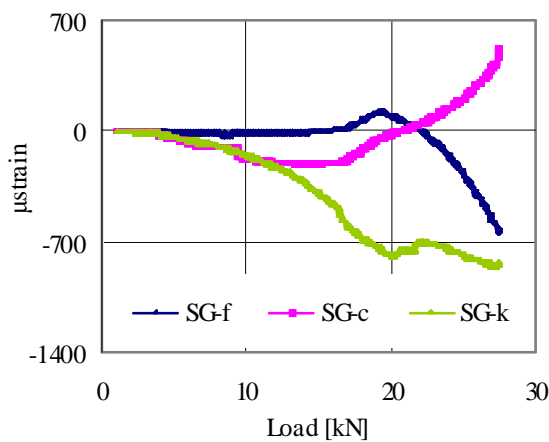
Εικ. 5.23: Χαρακτηριστική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης.



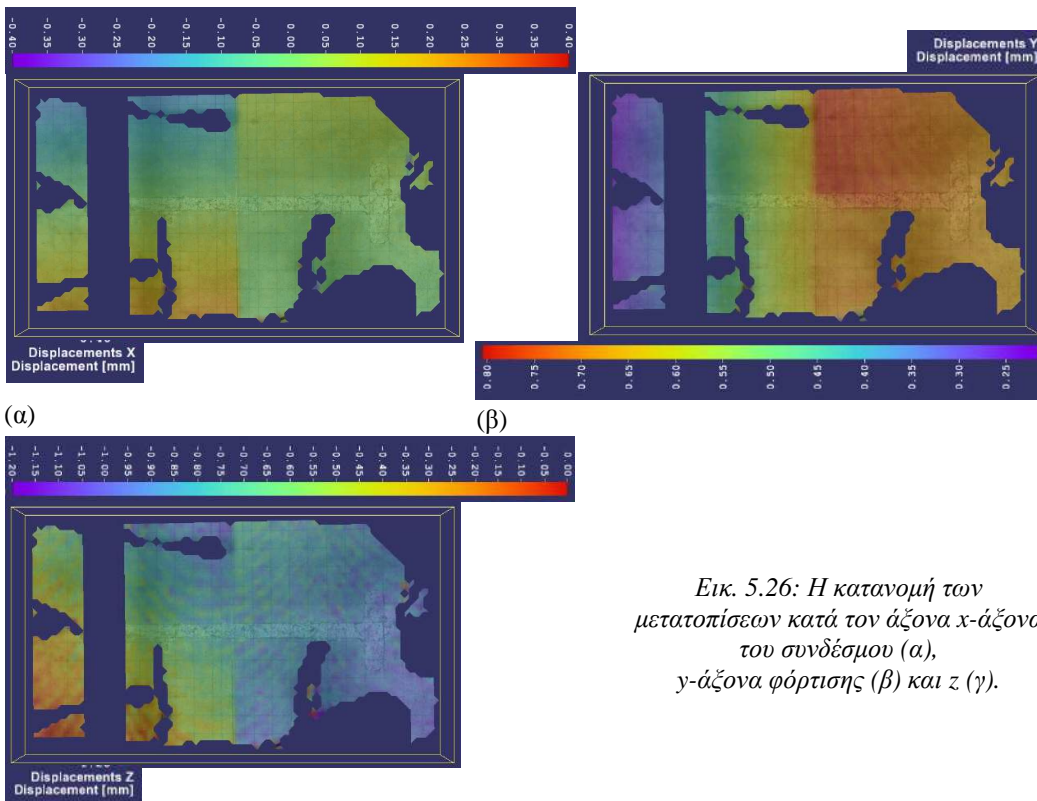
Εικ. 5.24: Η σχετική θέση των επιστυλίων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

που το SG-c κατέγραφε σχεδόν μία σταθερή τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης και αμέσως μετά ξεκίνησε η αποφόρτίσή του. Στο 77% της μέγιστης δύναμης (21 kN) η κεντρική περιοχή του συνδέσμου αποφορτίστηκε πλήρως και βρέθηκε σε κατάσταση “εφελκυσμού” μέχρι το τέλος της δοκιμής.

Η επιτυχία της πειραματικής διάταξης όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της καμπτικής αλλά και της στρεπτικής ροπής του συστήματος επιβεβαιώθηκε επίσης με τη βοήθεια των φωτογραφιών που ελήφθησαν από τις κάμερες της μεθόδου 3D DIC. Οι χρωματοκλίμακες της Εικ. 5.26 απεικονίζουν τις κατανομές του πεδίου των μετατοπίσεων και αποδεικνύουν την υλοποίηση πρακτικά καθαρής διάτμησης.

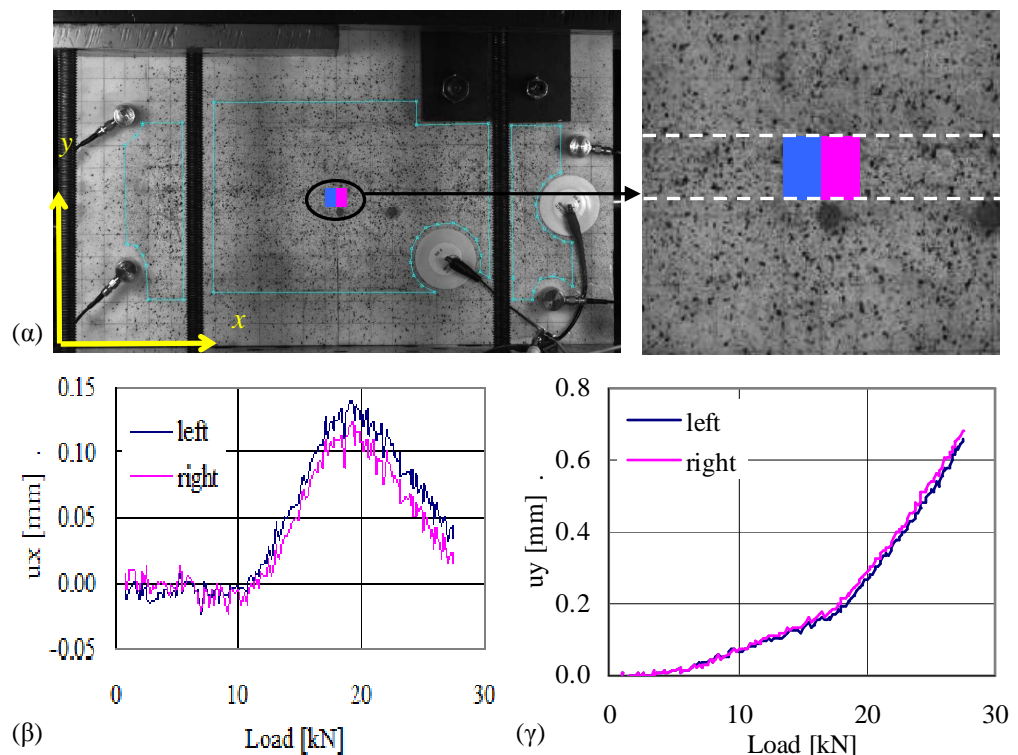


Εικ. 5.25: Οι παραμορφώσεις του συνδέσμου στην περιοχή γύρω από το μέσο του μήκους του.



Εικ. 5.26: Η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα x-άξονα του συνδέσμου (α), γ-άξονα φόρτισης (β) και z (γ).

(γ)



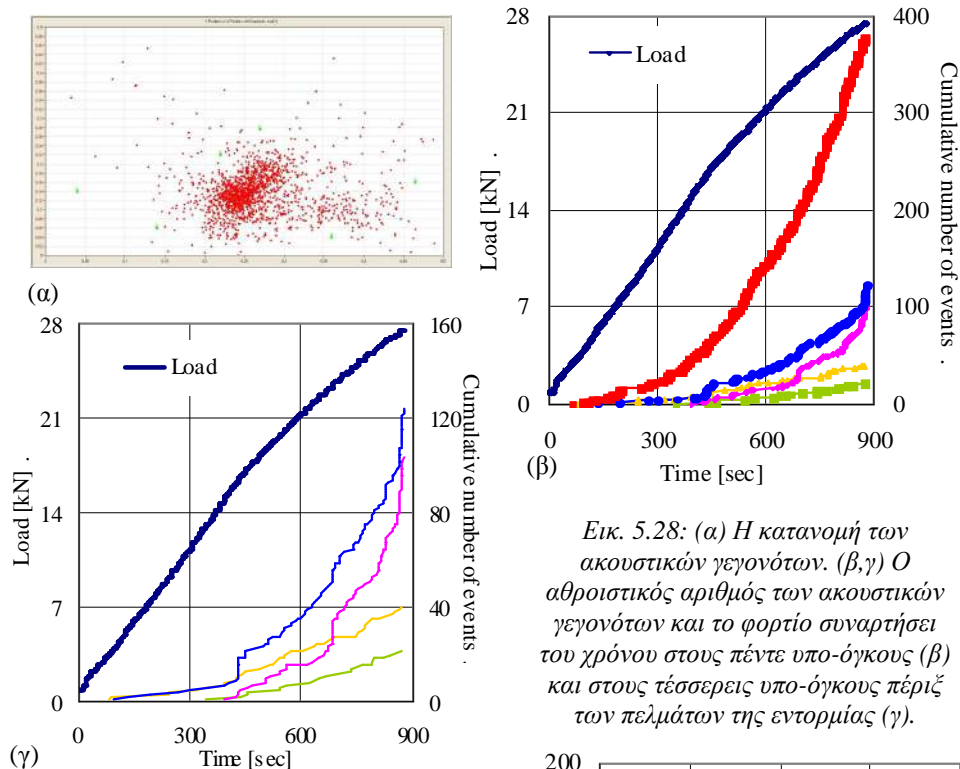
Εικ. 5.27: (α) Οι δύο υπό μελέτη περιοχές του κονιάματος εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των επιστυλίων. (β, γ) Η μετατόπιση των προαναφερθουσών περιοχών του κονιάματος κατά τον άξονα x (β) και y (γ).

Με την ίδια μέθοδο μελετήθηκαν δύο μικρές περιοχές του κονιάματος εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των επιστυλίων (Εικ. 5.27α) και προσδιορίστηκαν οι μετατοπίσεις τους κατά μήκος των αξόνων x (Εικ. 5.27β) και y (Εικ. 5.27γ) συναρτήσει του φορτίου. Στα δοκίμια του τύπου III το κονίαμα πλήρωσης αποτελεί συνδετικό υλικό για τα δύο επιστύλια (μαζί με το σύνδεσμο τιτανίου φυσικά) μέχρι το τέλος των δοκιμών, χωρίς να θραύεται ολοσχερώς. Αυτό αφορά την εξωτερική ελεύθερη επιφάνεια του κονιάματος. Φυσικά, τοπικές αστοχίες του λόγω σύνθλιψης στο εσωτερικό της εντορμίας δεν μπορούν να αποκλειστούν.

Τα πρώτα ακουστικά γεγονότα, όπως και στην περίπτωση των δοκιμών του προηγούμενου τύπου, αρχικά εντοπίστηκαν στο κέντρο του δοκιμίου κοντά στη διεπιφάνεια των μαρμαρινών όγκων, Εικ. 5.28α. Το πλήθος των ακουστικών γεγονότων στην κεντρική περιοχή συνέχισε να αυξάνεται ενώ νέα ακουστικά γεγονότα άρχισαν σταδιακά να εμφανίζονται στον κινούμενο όγκο και να είναι εστιασμένα περίπου στο μέσο του πέλματος στις εντορμίας, Εικ. 5.28α.

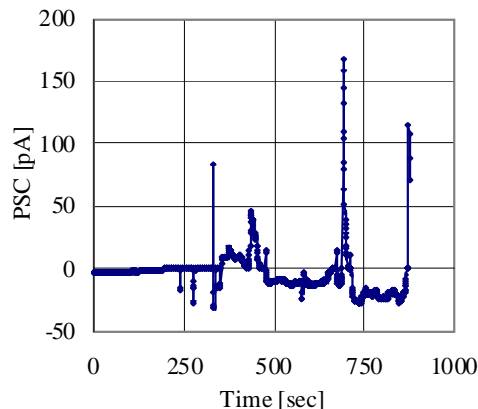
Επιπρόσθετα, το δοκίμιο χωρίστηκε σε πέντε (5) βοηθητικούς υπο-όγκους (γύρω από το κέντρο του συνδέσμου και περίξ των άκρων κάθε πέλματος του συνδέσμου), Εικ. 5.20β, και ο αθροιστικός αριθμός των ακουστικών γεγονότων σε κάθε

έναν από αυτούς αποδόθηκαν γραφικά μαζί με το φορτίο συναρτήσει του χρόνου, Εικ. 5.28β,γ. Εάν ληφθεί υπ' όψιν ότι το επίπεδο θραύσης του επιστυλίου είναι περίπου στο μέσο του πέλματος της εντορμίας, τα ακουστικά γεγονότα που προμηνύουν τη θραύση δικαιολογημένα άρχισαν να συγκεντρώνονται ταυτόχρονα στους δύο υπο-όγκους του κινούμενου επιστυλίου όταν το εξωτερικό φορτίο ήταν ίσο περίπου με το 85% της μέγιστης δύναμης (περίπου 23.0 kN).



Εικ. 5.28: (α) Η κατανομή των ακουστικών γεγονότων. (β,γ) Ο αθροιστικός αριθμός των ακουστικών γεγονότων και το φορτίο συναρτήσει του χρόνου στους πέντε υπο-όγκους (β) και στους τέσσερις υπο-όγκους περίξ των πελμάτων της εντορμίας (γ).

Τέλος, καταγράφηκε το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του ζεύγους των ηλεκτροδίων στην επιφάνεια των δοκιμίων για όλη τη διάρκεια της φόρτισης, Εικ. 5.29. Οι πρώτες σημαντικές ηλεκτρικές εκπομπές ανιχνεύθηκαν όταν η δύναμη ξεπέρασε περίπου το 45% του φορτίου θραύσης (~12.0 kN) ενώ περίπου στο 85% της μέγιστης δύναμης (23.0 kN) η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος εμφανίζει μία στιγμιαία εκτίναξη. Η απότομη αυτή αύξηση καταδεικνύει σοβαρές βλάβες (ρηγματώ-



Εικ. 5.29: Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα όπως καταγράφηκε από τα ηλεκτρόδια.

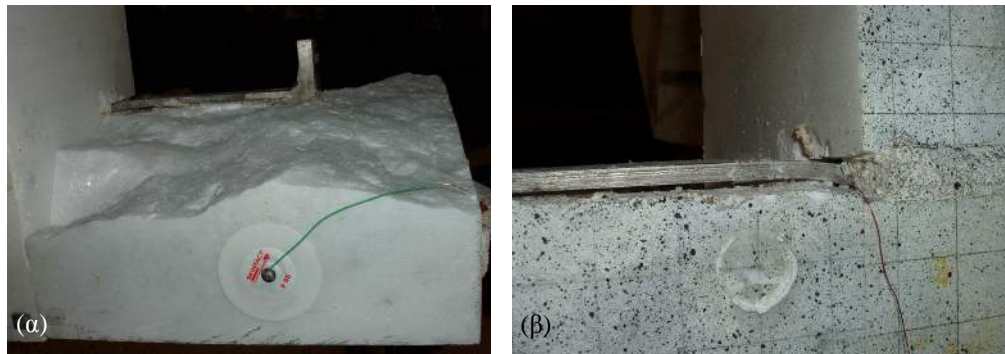
σεις) στο σύστημα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός της καταγραφής ηλεκτρικών εκπομπών διαφορετικής πολικότητας που πιθανότατα υποδεικνύει την αλλαγή της κατεύθυνσης της διάδοσης των ρηγματώσεων.

Δοκίμα τύπου IV

Στα δοκίμια του τύπου αυτού (που είναι γεωμετρικά όμοια με τα δοκίμια του τύπου III) απουσίαζε το κονίαμα στο κέντρο τους, σε μία ζώνη συνολικού μήκους περίπου 1.5 cm. Η μετατόπιση επιβλήθηκε χρησιμοποιώντας τη σύνθετη μεταλλική κατασκευή (συγκριτικά με την απλή πλάκα έλξης), δίνοντας πάλι ιδιαίτερη προσοχή ώστε η φόρτιση να επιβάλλεται ακριβώς πάνω από τη θέση του συνδέσμου προς αποφυγή των στρεπτικών ροπών.

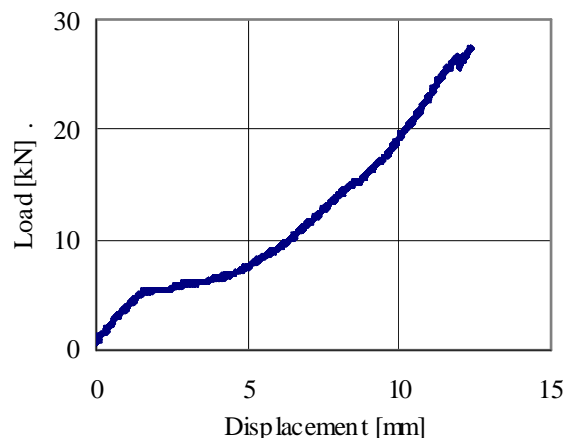
Μακροσκοπικά παρατηρούνται:

- Θραύση του κινούμενου επιστυλίου στο μέσο περίπου του πέλματος της εντορμίας (Εικ. 5.30α).
- Πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου (Εικ. 5.30β).



Εικ. 5.30: (α) Το επίπεδο θραύσης. (β) Η πλαστική παραμόρφωση του συνδέσμου.

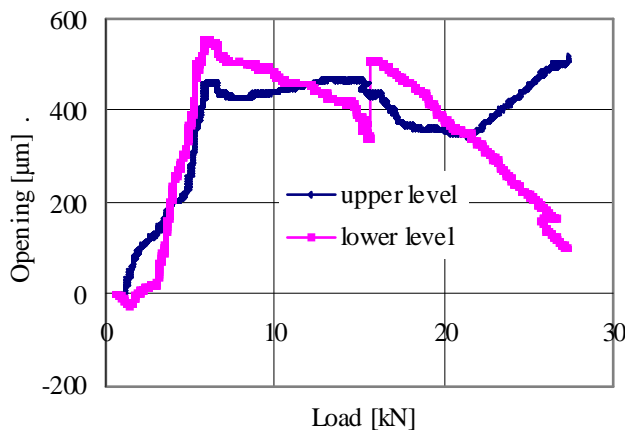
Η αστοχία του συστήματος επέρχεται περίπου στο ίδιο όπως και πριν φορτίο (~27.5 kN) και η ιστορία της φόρτισης παρουσιάζεται μέσω της τυπικής καμπύλης δύναμης - μετατόπισης (Εικ. 5.31). Αρχεται με ένα γραμμικό τμήμα μέχρι περίπου το 20% του μέγιστου φορτίου (~5.0 kN) και ακολούθησε ένα δεύτερο γραμμικό τμήμα με πολύ μικρότερη κλίση μέχρι περίπου το 25% του φορτίου θραύσης (7.0 kN). Στην καμπύλη δύναμης - μετατόπισης εντοπίστη-



Εικ. 5.31: Τυπική καμπύλη δύναμης - μετατόπισης.

κε μία αλλαγή κλίσης περίπου στο 40% της μέγιστη δύναμης (11.0 kN) και μία δεύτερη στο 65% του φορτίου θραύσης (17.5 kN). Μεταξύ των δύο αυτών χαρακτηριστικών σημείων και συγκεκριμένα σε φορτίο ίσο περίπου με το 57% του μέγιστου φορτίου (15.5 kN) υπήρξε μία μικρή πτώση φορτίου. Ωστόσο η κλίση της καμπύλης παρέμεινε σχεδόν ίδια. Τέλος, λίγο πριν τη θραύση του επιστυλίου, δηλαδή στο 97% της μέγιστης δύναμης (26.5 kN), παρατηρήθηκε μία δεύτερη πτώση φορτίου.

Η σχετική θέση των επιστυλίων όπως κατεγράφη από τα παραδοσιακά μηχανοστάσια (clip gauges) στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου παρουσιάζεται στην Εικ. 5.32 συναρτήσει του χρόνου. Οι μαρμάρινοι όγκοι στην άνω στάθμη της διεπιφάνειάς τους απομακρύνθηκαν μέχρι περίπου το 23% της μέγιστης δύναμης (6.0 kN) και η μεταξύ τους απόσταση διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή μέχρι περίπου το 57% του φορτίου θραύσης (15.5 kN). Στη συ-



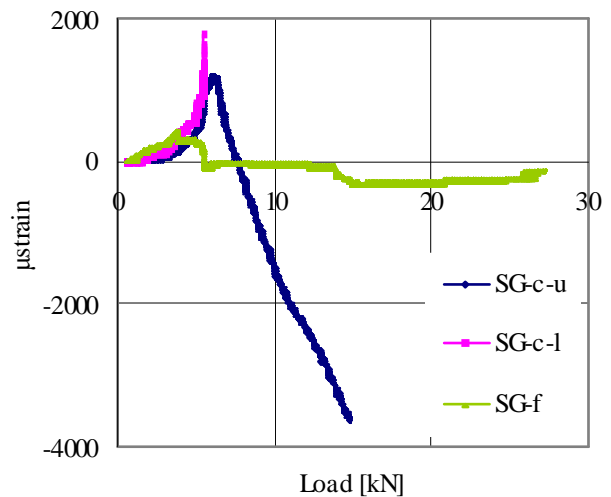
Εικ. 5.32: Η σχετική θέση των επιστυλίων.

νήχεια πλησίασαν ελαφρώς μεταξύ τους (65% του μέγιστου φορτίου, 17.5 kN) και έμειναν στην ίδια περίπου σχετική θέση μέχρι σχεδόν το 80% της μέγιστης δύναμης (21.5 kN), όπου άρχισαν και πάλι να απομακρύνονται μέχρι τη θραύση του κινούμενου επιστυλίου. Η αρχική απομάκρυνση των δύο όγκων μέχρι περίπου το 23% της μέγιστης δύναμης (6.0 kN) κατεγράφη και στην κατώτατη στάθμη της διεπιφάνειάς τους. Έπειτα, μέχρι το τέλος της δοκιμής, τα επιστύλια πλησίαζαν συνεχώς μεταξύ τους (από το 53% του φορτίου θραύσης στα 14.5 kN με μεγαλύτερο ρυθμό) χωρίς να έρθουν ξανά σε επαφή με εξαίρεση στα 15.5 kN οπότε το μηχανοστάσιο της κατώτατης στάθμης κατέγραψε μια στιγμιαία αύξηση. Ας υπογραμμιστεί ότι οι μέγιστες τιμές που κατέγραψαν τα μηχανοστάσια ήταν της τάξης των 550 μm (!) δηλαδή ουσιαστικά υλοποιήθηκε και πάλι σχεδόν καθαρή διάτμηση.

Το τμήμα του συνδέσμου στον ακίνητο όγκο, πλησίον του κέντρου, “εφελκύνεται” μέχρι περίπου το 15% του φορτίου θραύσης (~4.0 kN) όπως φαίνεται από τις καταγραφές του ηλεκτρομηκυσιομέτρου (SG-f) σε εκείνη την περιοχή, Εικ. 5.33. Αμέσως μετά καταγράφηκε μία έντονη στιγμιαία αποφόρτιση, η οποία συνεχίστηκε μέχρι περίπου το 20% της μέγιστης δύναμης (5.5 kN). Την ίδια στιγμή η φόρτιση της συγκεκριμένης περιοχής του συνδέσμου αλλάζει από “εφελκυστική” σε “θλιπτική” και η “θλιπτική” καταπόνηση διαρκεί μέχρι το τέλος της δοκιμής. Πιο συγκεκριμένα, από περίπου 20% έως 50% της μέγιστης δύναμης (~6.0 kN έως ~14.0 kN) η καταγραφή του SG-f παραμένει σχεδόν σταθερή με μικρές διακυμάνσεις. Ακολου-

θησε πιο έντονη “θλιπτική” καταπόνηση της συγκεκριμένης περιοχής του συνδέσμου μέχρι περίπου το 55% του φορτίου θραύσης (~15.0 kN) όπου παρατηρήθηκε και η μέγιστη “θλιπτική” τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης. Μέχρι το 97% της μέγιστης δύναμης (26.5 kN) υπήρξε μια μικρή αποφόρτιση που έλαβε χώρα με μικρή κλίση και έγινε φανερά πιο έντονη ακριβώς πριν τη θραύση του επιστυλίου.

Το ένα εκ των δύο ηλεκτρομηκυσιομέτρων στο κέντρο του κορμού του συνδέσμου (SG-c-1) κατέγραψε την κατάσταση στην περιοχή αυτή μόνο μέχρι περίπου το 20% της μέγιστης δύναμης (~6.0 kN). Όλες οι καταγραφές είναι “εφελκυστικές” και αυξάνονται με διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό (Εικ. 5.33). Το δεύτερο ηλεκτρομηκυσιόμετρο της κεντρικής περιοχής (SG-c-u) περιγράφει την καταπόνηση της περιοχής του συνδέσμου στην οποία είναι προσαρμοσμένο μέχρι περίπου το 50% του φορτίου



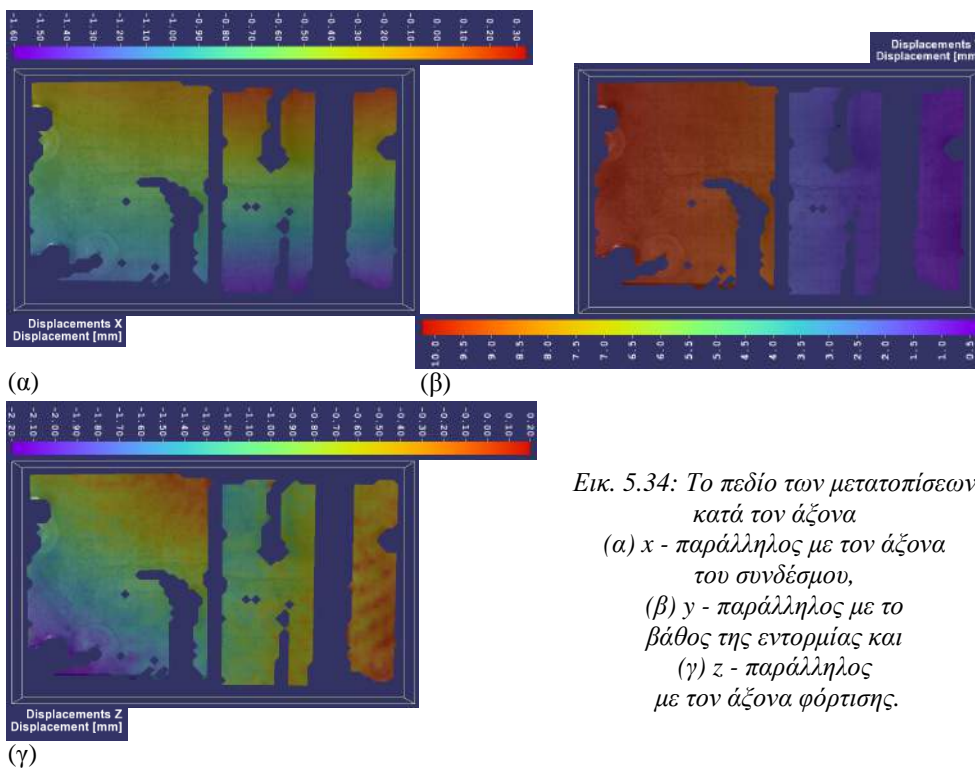
Εικ. 5.33: Οι ανηγμένες παραμορφώσεις του συνδέσμου όπως καταγράφηκαν από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα.

θραύσης (~14.0 kN). Το κέντρο του συνδέσμου λοιπόν αρχικά “εφελκύεται” μέχρι περίπου το 25% του φορτίου θραύσης (~6.5 kN), όπου και το SG-c-u καταγράφει τη μέγιστη “εφελκυστική” τιμή του. Έπειτα αποφορτίζεται (περίπου στο 28.0% της μέγιστης δύναμης, ~7.5 kN) και στη συνέχεια “θλίβεται” μέχρι το τέλος του πειράματος.

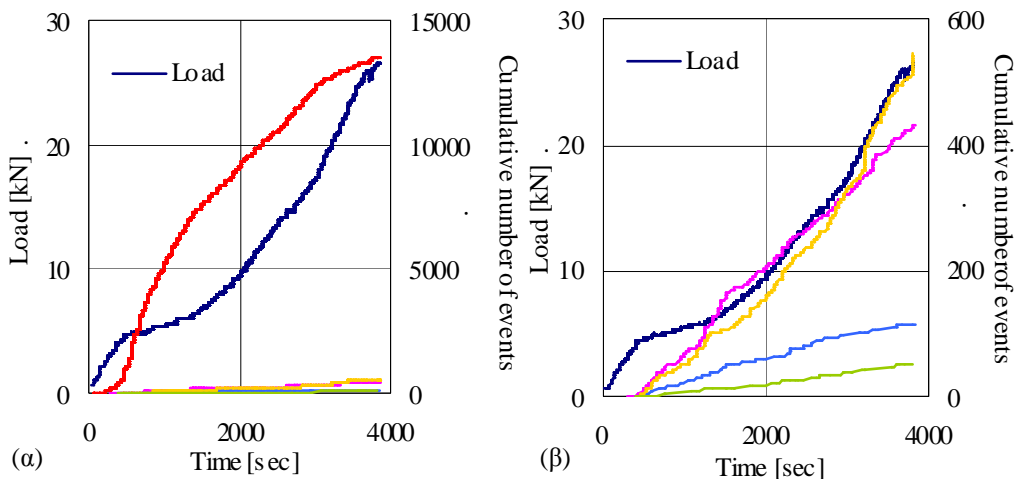
Η επεξεργασία των φωτογραφιών που ελήφθησαν από τις κάμερες της μεθόδου DIC επέτρεψαν τον προσδιορισμό του πεδίου των μετατοπίσεων στην μπροστινή επιφάνεια του δοκιμίου (Εικ. 5.34). Η επιτυχία της πειραματικής διάταξης όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της καμπτικής και της στρεπτικής ροπής του συστήματος επιβεβαιώθηκε επίσης με τη βοήθεια των φωτογραφιών που ελήφθησαν από τις κάμερες της μεθόδου 3D DIC. Οι χρωματοκλίμακες της Εικ. 5.34 απεικονίζουν τις κατανομές του πεδίου των μετατοπίσεων και αποδεικνύουν την υλοποίηση καθαρής διάτμησης.

Όσον αφορά τα ακουστικά γεγονότα, ο αθροιστικός αριθμός τους για κάθε έναν από τους πέντε (5) βοηθητικούς υπο-όγκους (γύρω από το κέντρο του συνδέσμου και περίξ των άκρων κάθε πέλατος του συνδέσμου) που φαίνονται στην Εικ. 5.20β αποδόθηκε γραφικά (μαζί με το φορτίο) συναρτήσε του χρόνου, Εικ. 5.35α,β. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο μεγαλύτερος αριθμός των ακουστικών γεγονότων εντοπίστηκε στο κέντρο του δοκιμίου (Εικ. 5.35α) αφού εκεί ασκούνται άμεσα οι δυνάμεις από το σύνδεσμο και το κονίαμα. Εστιάζοντας περίξ των πελμάτων της εντορμίας, ο ρυθμός γέννησης των ακουστικών γεγονότων στον υπο-όγκο που τελικά έλαβε χώ-

ρα η θραύση του κινούμενου επιστυλίου αυξάνεται συγκριτικά με τους άλλους τρεις υπο-όγκους (Εικ. 5.35β) όταν το εξωτερικό φορτίο ήταν ίσο περίπου με το 75% της μέγιστης δύναμης (περίπου 20.0 kN).

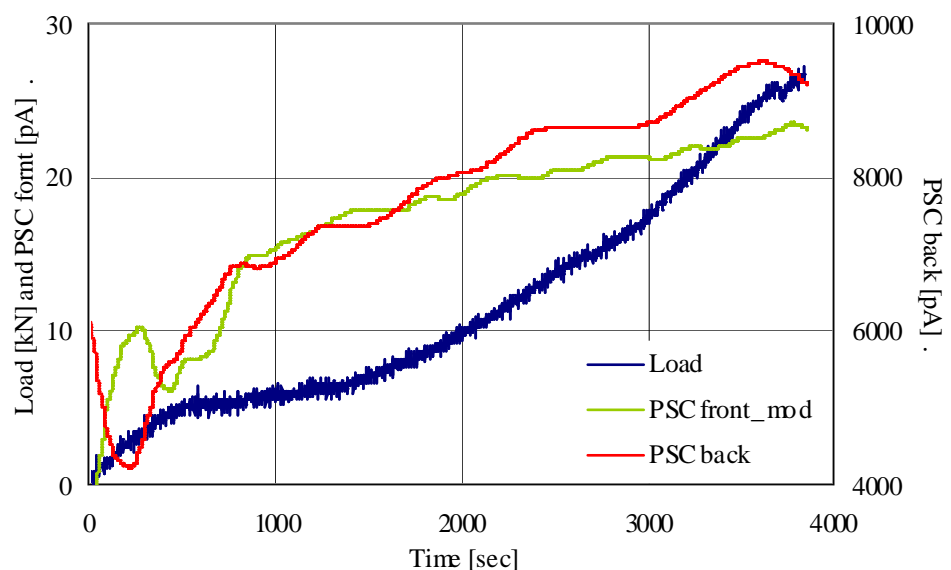


Εικ. 5.34: Το πεδίο των μετατοπίσεων κατά τον άξονα
 (α) x - παράλληλος με τον άξονα του συνδέσμου,
 (β) y - παράλληλος με το βάθος της εντορμίας και
 (γ) z - παράλληλος με τον άξονα φόρτισης.



Εικ. 5.35: Ο αθροιστικός αριθμός των ακουστικών γεγονότων και το φορτίο συναρτήσει του χρόνου στους πέντε υπο-όγκους (α) και στους τέσσερις υπο-όγκους περίξ των πελμάτων της εντορμίας (β).

Τέλος, στην Εικ. 5.36 φαίνεται το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και το φορτίο συναρτήσει του χρόνου. Μεταξύ περίπου του 12%-20% του μέγιστου φορτίου (~3.0 kN έως ~5.0 kN) το ηλεκτρικό ρεύμα στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου παρουσίασε μεγάλη άνοδο της τιμής του. Αντίστοιχη αύξηση κατέγραψαν τα ηλεκτρόδια στην μπροστινή επιφάνεια του δοκιμίου από περίπου το 17% έως το 20% του φορτίου θραύσης (~4.5 kN έως 5.0 kN). Έπειτα και μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, και τα δύο ζεύγη ηλεκτροδίων κατέγραψαν μία διαρκώς αυξανόμενη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, τα ηλεκτρόδια στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου παρουσίασαν ένα “πλατό” στην καταγραφή τους που διήρκησε από περίπου το 50% (~14 kN) έως περίπου το 60% (~17.0 kN) του φορτίου θραύσης.



Εικ. 5.36: Η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος μαζί το φορτίο συναρτήσει του χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

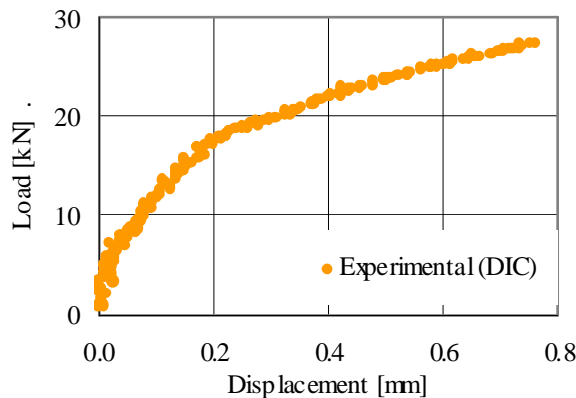
ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

6.1 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Η επικύρωση του αριθμητικού μοντέλου της διάτμησης στηρίχθηκε στην καμπύλη δύναμης - μετατόπισης των δοκιμίων τύπου III (όπου ο ένας μαρμάρινος όγκος έχει μορφή “Γ”). Η πειραματική αυτή καμπύλη (Εικ. 6.1) προέκυψε από το φορτίο του πλαισίου φόρτισης και τη μετατόπιση του κινούμενου όγκου κατά τον άξονα φόρτισης όπως αυτή προσδιορίστηκε με τη βοήθεια της τεχνικής Digital Image Correlation.

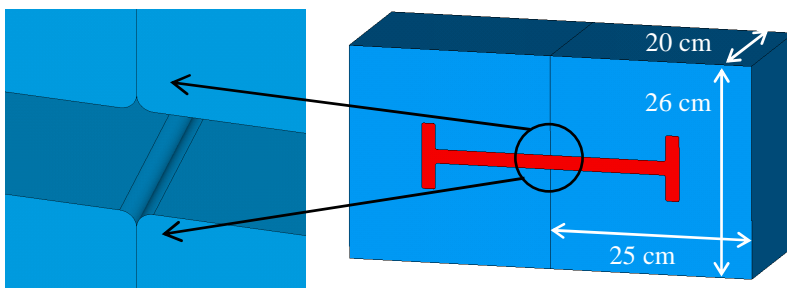
Το αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε προσομοιώνει ακριβώς τη γεωμετρία του συνδέσμου και της εντορμίας των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε διάτμηση (Εικ. 5.2β,γ) στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Επειδή η περιοχή των επιστυλίων που επηρεάζεται ουσιαστικά από την ύπαρξη του συνδετηρίου στοιχείου περιορίζεται περίξ της εντορμίας [92], αποφασίστηκε (μεταξύ άλλων και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου) τα δύο επιστύλια να προσομοιωθούν με δύο όμοιους πρισματικούς όγκους. Έτσι, οι μαρμάρινοι όγκοι κατασκευάστηκαν με εξωτερικές διαστάσεις $25 \times 26 \times 20 \text{ cm}^3$ και ολόκληρο το μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικ. 6.2. Σημειώνεται, ότι οι ακμές των επιστυλίων στη διεπιφάνειά τους κατασκευάστηκαν με μικρή ακτίνα καμπυλότητας προς αποφυγή τοπικών συγκεντρώσεων τάσεων.

Το τιτάνιο του συνδέσμου προσομοιώθηκε με τη βοήθεια μιας πολυ-γραμμικής καμπύλης (Εικ. 6.3α) η οποία ήταν ίδια για τον εφελκυσμό και τη θλίψη του. Η εφελκυστική και η θλιπτική συμπεριφορά του κονιάματος περιγράφηκε με τις δι-γραμμι-

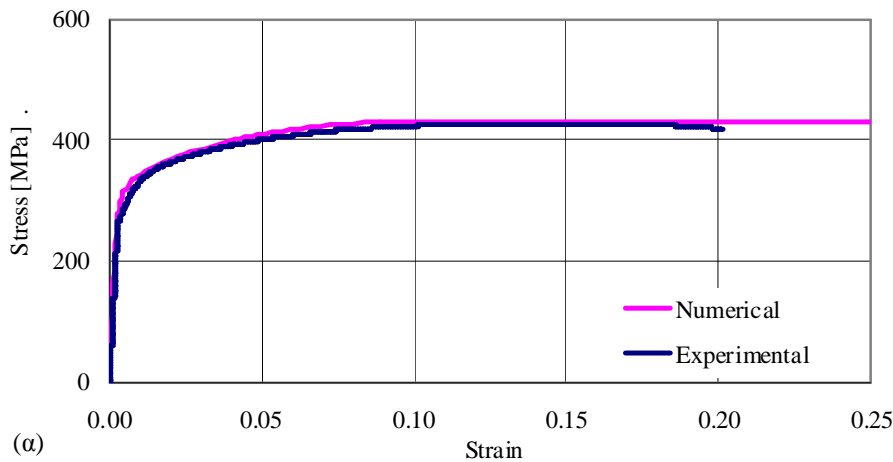


Εικ. 6.1: Τυπική καμπύλη δύναμης - μετατόπισης όπως προέκυψε βάσει της μεθόδου DIC.

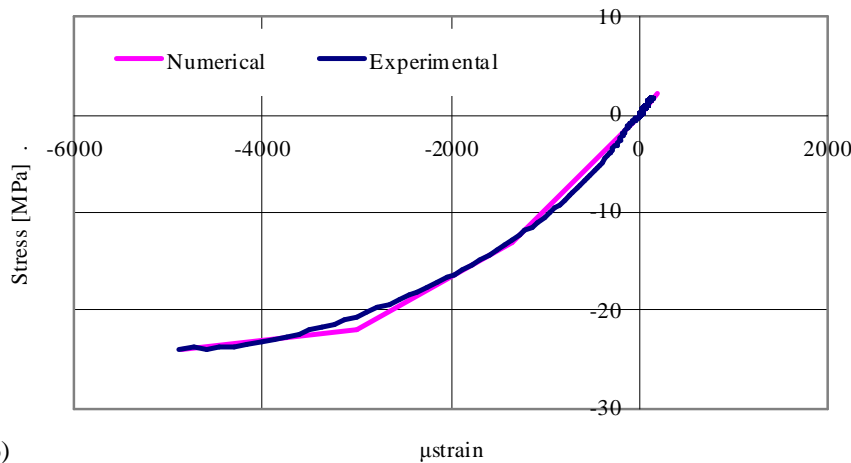
κές καμπύλες της Εικ. 6.3β. Τέλος, το μάρμαρο προσομοιώθηκε ως γραμμικώς ελαστικό υλικό (Εικ. 3.2γ). Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 6.1.



Εικ. 6.2: Οι εξωτερικές διαστάσεις του προς επικύρωση αριθμητικού μοντέλου και κατασκευαστική λεπτομέρεια στη θέση της διεπιφάνειας των δύο επιστυλίων.



(α)



(β)

Εικ. 6.3: Προσομοίωση του καταστατικού νόμου του (α) τιτανίου και του (β) κονιάματος.

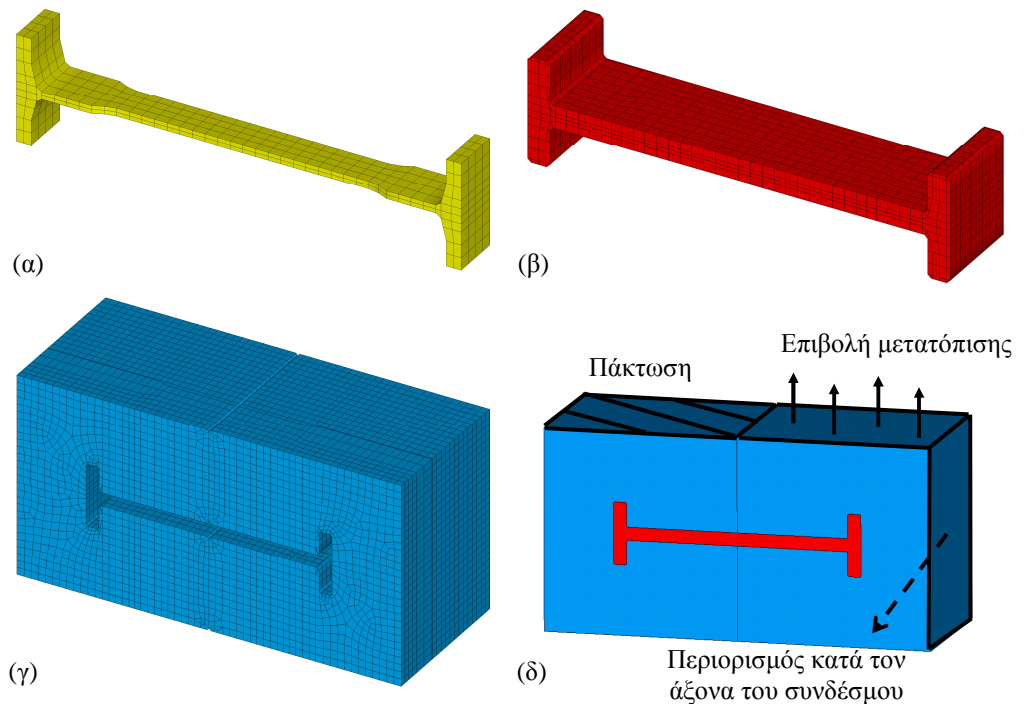
Για τη διακριτοποίηση των όγκων του αριθμητικού προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο *SOLID185* (Εικ. 4.3) ενώ οι διεπιφάνειες μεταξύ των τριών υλικών (τιτάνιο-κονίαμα, κονίαμα-μάρμαρο και μάρμαρο-μάρμαρο) προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια των στοιχείων επαφής *TARGE170* (Εικ. 4.9α) και *CONTA173* (Εικ. 4.9β). Η κατάσταση των διεπιφανειών ορίστηκε πάλι ως επαφή με τριβή με συντελεστή τριβής ίσο με:

- 0.25 για τη διεπιφάνεια τιτανίου-κονιάματος
- 0.50 για τη διεπιφάνεια κονιάματος-μαρμάρου
- 0.70 για τη διεπιφάνεια μαρμάρου-μαρμάρου

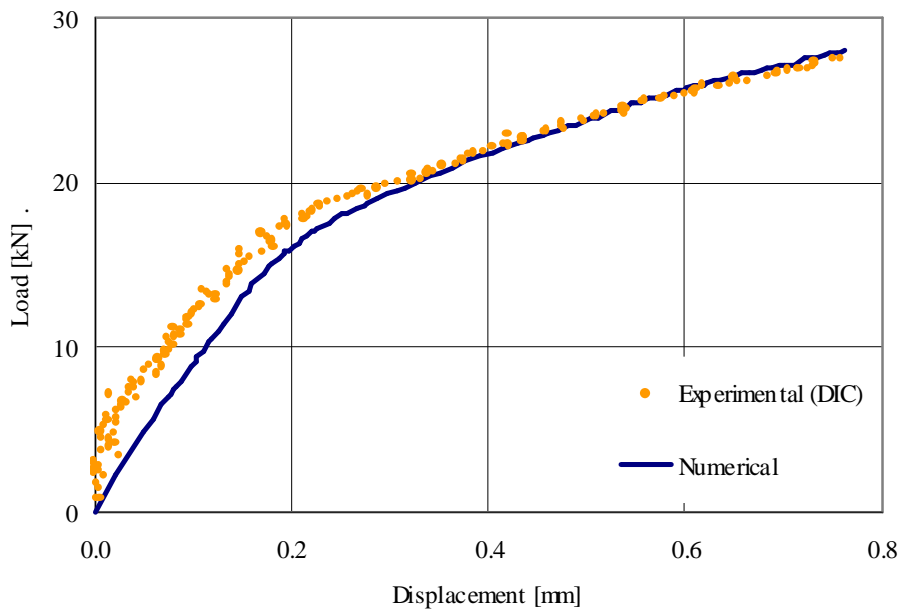
Τα ανωτέρω στοιχεία της μελέτης έχουν ήδη περιγραφεί στην ενότητα 4.2. Ο τελικός κάναβος των όγκων του αριθμητικού μοντέλου παρουσιάζεται στην Εικ. 6.4α-γ.

| | E [GPa] | ν [-] | σ_y [MPa] | σ_u [MPa] |
|------------------|---------|-----------|------------------|------------------|
| Τιτάνιο | 100 | 0.34 | 270 | 430 |
| Κονίαμα | 10 | 0.18 | - / 13 | 2.2 / 24 |
| Μάρμαρο Διονύσου | 75.3 | 0.26 | - | - |

Πίνακας 6.1: Οι μηχανικές ιδιότητες των τριών υλικών του αριθμητικού μοντέλου. Οι δύο τιμές που αναγράφονται στον πίνακα για το κονίαμα αφορούν τον εφελκυσμό / θλίψη του.



Εικ. 6.4: (α)-(γ) Ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων για κάθε υλικό ξεχωριστά.
 (δ) Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.



Εικ. 6.5: Επικύρωση του αριθμητικού προσομοιώματος.

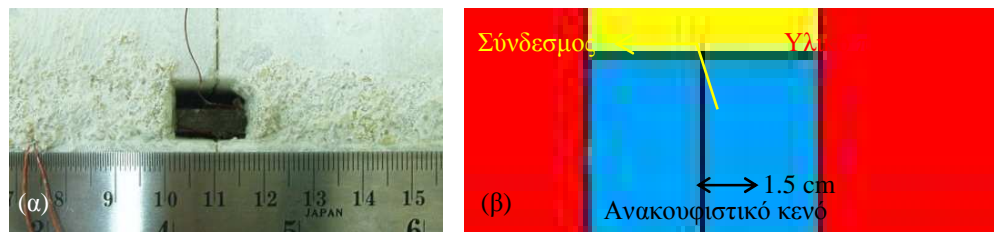
Για την ακριβή προσομοίωση των δοκιμών καθαρής διάτμησης το αριθμητικό μοντέλο τοποθετήθηκε όπως ήταν το πραγματικό δοκίμιο των πειραμάτων (δηλ. στραμμένο κατά 90° σε σχέση με τη θέση που έχει στην πραγματική του θέση), ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και το ίδιο βάρος των όγκων μαρμάρου. Οι κόμβοι της άνω επιφάνειας του αριστερού επιστυλίου ακινητοποιήθηκαν περιορίζοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας ενώ στους κόμβους της ελεύθερης πλάγιας επιφάνειας του κινούμενου επιστυλίου (δεξιού επιστυλίου) επιβλήθηκε περιορισμός κατά τον άξονα x (κατά τον άξονα του συνδέσμου). Τέλος, στην άνω επιφάνεια του κινούμενου επιστυλίου επιβλήθηκε ομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση (Εικ. 6.4δ). Η τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης ήταν ίση με 0.76 mm , όπως προέκυψε από τη μέθοδο DIC των δοκιμών τύπου III. Οι δύο καμπύλες δύναμης - μετατόπισης, η πειραματική και η αριθμητική, παρουσιάζονται στην Εικ. 6.5.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής μελέτης αναλύονται στην επόμενη παράγραφο σε αντιδιαστολή με τα αντίστοιχα ενός αριθμητικού προσομοιώματος με ανακουφιστικό κενό.

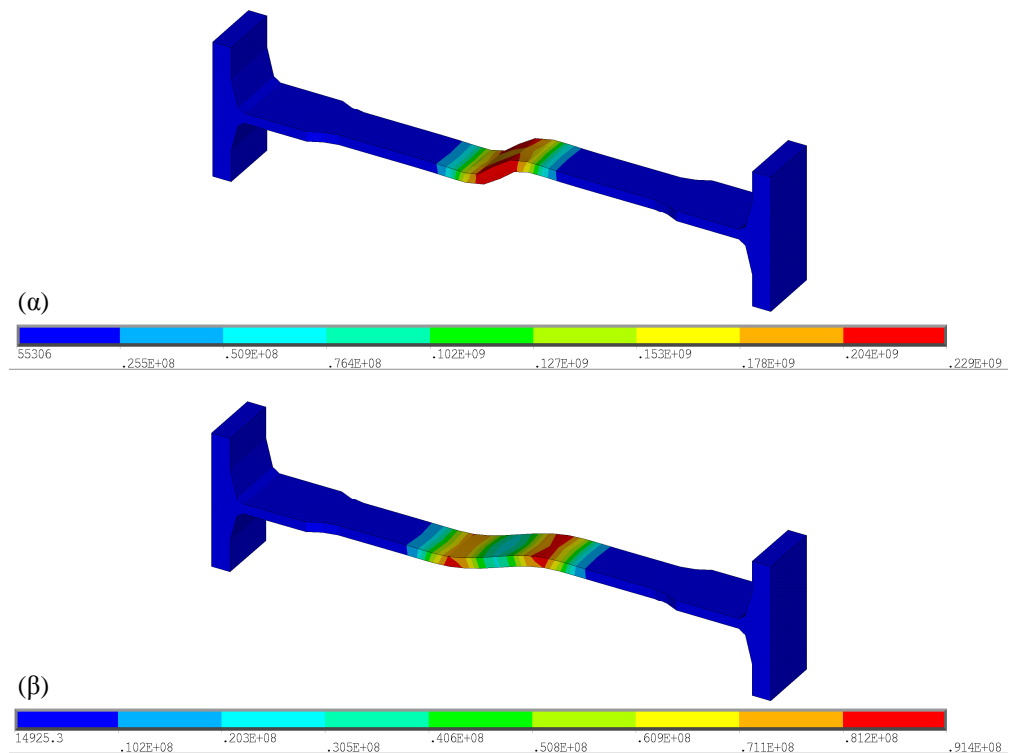
6.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΟ VS. ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΟ

Το μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να προσομοιώνει την περίπτωση της σύνδεσης δύο γραμμικών επιστυλίων με την ύπαρξη ανακουφιστικού κενού. Σύμφωνα με τη μορφή των δοκιμών τύπου IV της πειραματικής μελέτης (Κεφάλαιο 5), το ανακουφιστικό κενό που δημι-

ουργήθηκε είχε μήκος 1.5 cm (Εικ. 6.6). Επιπρόσθετα, αφαιρέθηκε ο περιορισμός στην πλαϊνή επιφάνεια του κινούμενου επιστυλίου κατά τον άξονα του συνδέσμου αφού αποτελούσε ένα πρόσθετο μη αναγκαίο περιορισμό. Καμία άλλη αλλαγή (γεωμετρία, υλικά, διακριτοποίηση) δεν έγινε στο αριθμητικό προσομοίωμα. Για να μπορέσουν τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών μοντέλων να είναι συγκρίσιμα, η μετατόπιση που επιβλήθηκε σε αυτό με το ανακουφιστικό κενό ήταν ίση με 0.76 mm (όπως και στην περίπτωση του αριθμητικού μοντέλου χωρίς το ανακουφιστικό κενό).



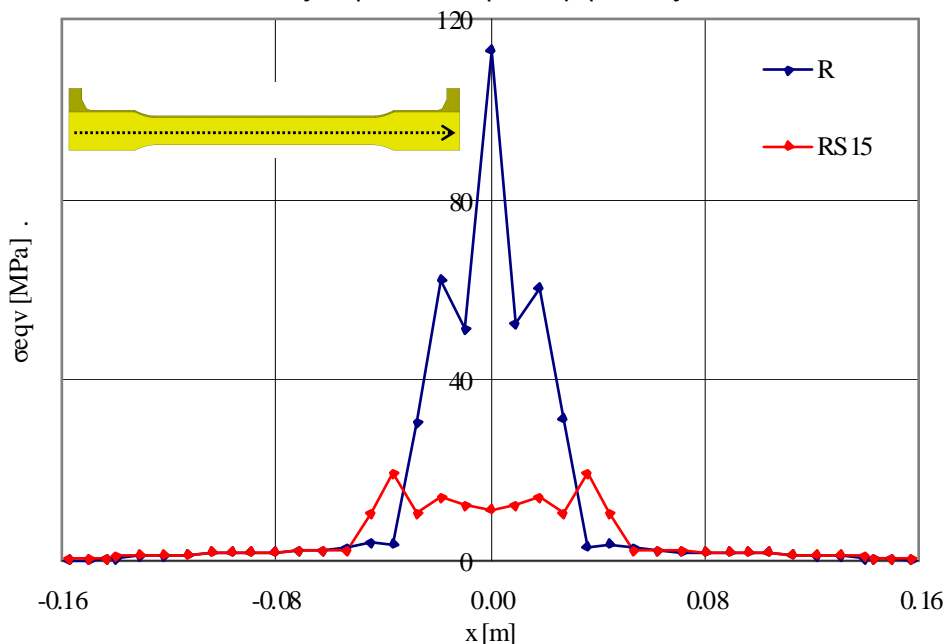
Εικ. 6.6: Το ανακουφιστικό κενό (α) ενός τυπικού δοκιμίου και (β) του αριθμητικού προσομοιώματος.



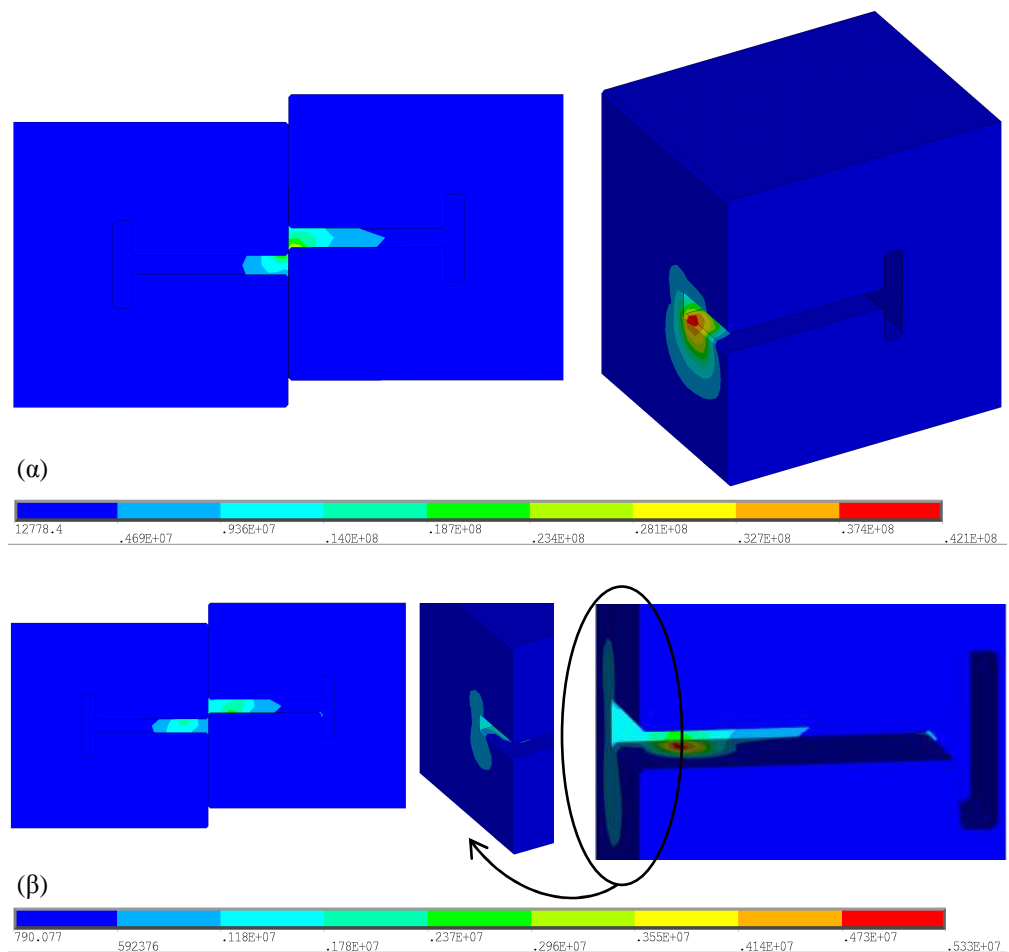
Εικ. 6.7: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο σύνδεσμο για την περίπτωση της σύνδεσης (α) χωρίς και (β) με ανακουφιστικό κενό.

Ο σύνδεσμος που περιβάλλεται εξ ολοκλήρου από κονίαμα αλλά και αυτός που στο κέντρο του είναι ελεύθερος είναι σχεδόν αφόρτιστοι στο μεγαλύτερο τμήμα τους (Εικ. 6.7). Η ισοδύναμη κατά Mises τάση κατά μήκος της κεντρικής τους γραμμής είναι σχεδόν μηδενική εκτός από μία ζώνη στο κέντρο τους. Το μήκος της ζώνης αυτής είναι η πρώτη διαφορά που εντοπίστηκε μεταξύ των δύο περιπτώσεων (Εικ. 6.8). Όταν το κονίαμα περιέβαλε το σύνδεσμο στο κέντρο του, η ζώνη αυτή είχε συνολικό εύρος περίπου 7 cm (ισομοιρασμένη εκατέρωθεν του κέντρου) με τη μέγιστη τιμή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης να αναπτύσσεται στο κέντρο του μήκους του συνδέσμου. Αντίθετα, όταν το κέντρο του συνδέσμου ήταν ελεύθερο να παραμορφωθεί η ζώνη έντονης καταπόνησης ήταν πιο διευρυμένη (περίπου 10.5 cm) αλλά οι τιμές της τάσης ήταν θεαματικά μικρότερες (μόλις 18% (!) της μέγιστης τάσης της πρώτης περίπτωσης) και μάλιστα αρκετά ομοιόμορφα κατανεμημένες στη ζώνη αυτή.

Παρόμοια αποτελέσματα ισχύουν για τις τάσεις στα επιστύλια, που εμφανίστηκαν αφόρτιστα στο μεγαλύτερο όγκο τους. Το τασικό τους πεδίο ήταν έντονο μόνο περίξ της κεντρικής περιοχής των επιστυλίων (Εικ. 6.9-6.11). Όταν υπήρχε κονίαμα στο κέντρο της σύνδεσης, η πλέον καταπονημένη περιοχή του κινούμενου επιστυλίου εντοπίστηκε στη διεπιφάνεια των δύο όγκων, όπως ήταν αναμενόμενο αφού από την αρχή κιάλας της φόρτισης οι δυνάμεις μεταφέρονται μέσω του κονιάματος στο μάρμαρο. Από την άλλη πλευρά, η απουσία κονιάματος στο κέντρο του συστήματος επέτρεψε την παραμόρφωση του συνδέσμου χωρίς αυτό να έρθει σε επαφή με το επιστύλιο οπότε οι τάσεις στην ίδια θέση είναι μηδενικές.



Εικ. 6.8: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στην κεντρική γραμμή του συνδέσμου για την περίπτωση της σύνδεσης (α) χωρίς και (β) με ανακουφιστικό κενό.

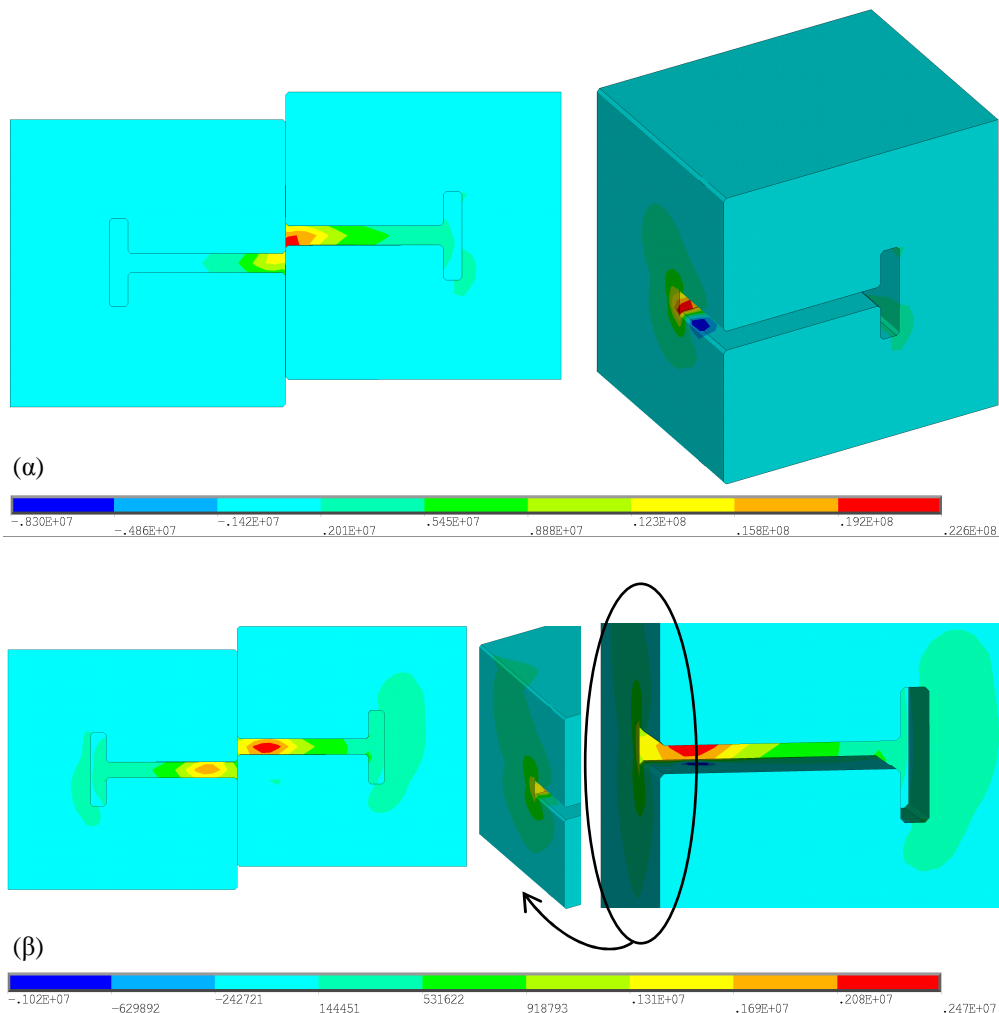


Εικ. 6.9: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση της σύνδεσης (α) χωρίς και (β) με ανακουφιστικό κενό.

Εκτός από τη γενική αυτή παρατήρηση, η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης (Εικ. 6.10) παρουσίασε μία επιπλέον διαφορά. Όταν το αριθμητικό προσομοίωμα υποβλήθηκε σε καθαρή διάτμηση εντοπίστηκε μία πολύ μικρή ζώνη μη μηδενικής τάσης στην “άνω” ακμή του πέλματος της εντορμίας που βρίσκεται στο κινούμενο επιστύλιο και μια ευρύτερη ζώνη στην “κάτω” ακμή του ίδιου πέλματος (Εικ. 6.10α). Το μη μηδενικό αυτό τασικό πεδίο εμφανίστηκε σαφώς μεγαλύτερο αλλά πιο ομοιόμορφο καθ’ όλο το μήκος του πέλματος στην περίπτωση ύπαρξης του ανακουφιστικού κενού (Εικ. 6.10β).

Για να μπορέσει να ποσοτικοποιηθεί η θετική επιρροή του ανακουφιστικού κενού στο τασικό πεδίο του μαρμάρου, αναπαραστάθηκε γραφικά η μεταβολή των συνιστωσών της τάσης κατά μήκος των ευθειών που καταπονούνται περισσότερο. Η

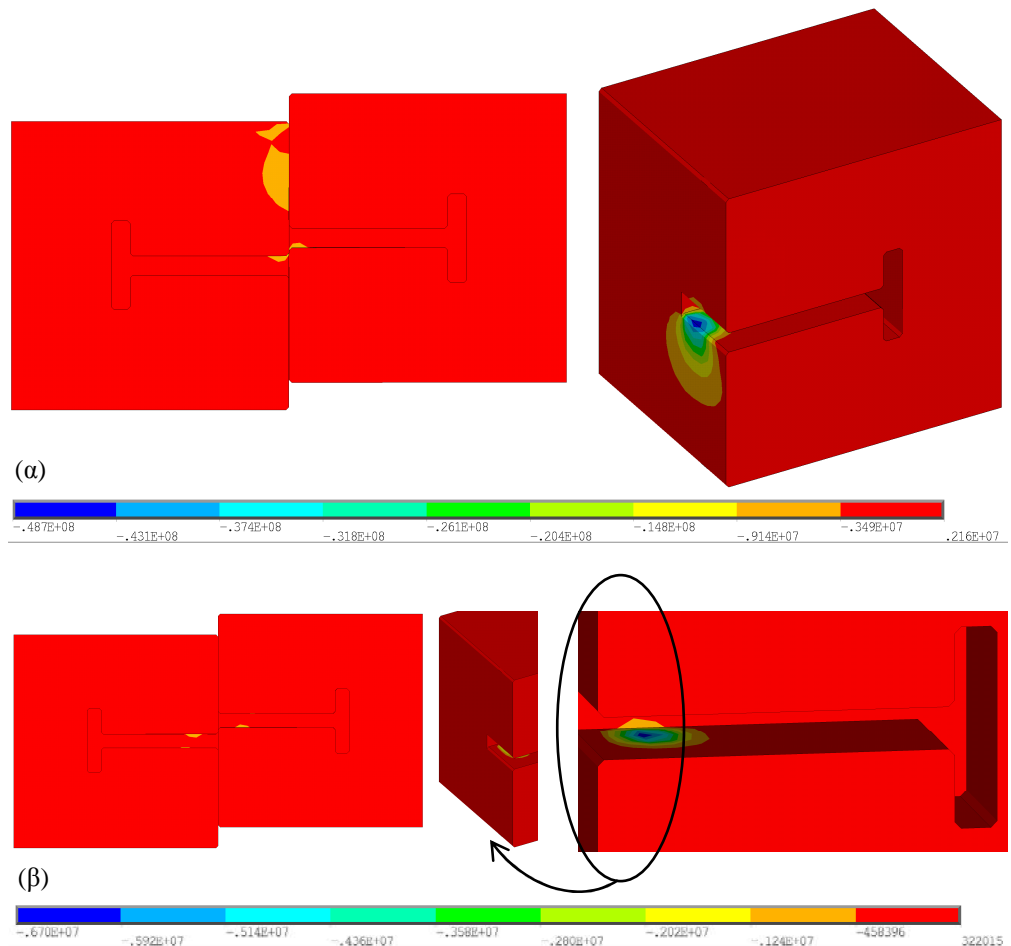
Εικ. 6.12α περιγράφει τις τάσεις που αναπτύχθηκαν κατά μήκος της ευθείας (5), δηλαδή στο κινούμενο επιστύλιο στη θέση ένωσης των δύο μαρμάρινων όγκων όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες τάσεις όταν η εντορμία της σύνδεσης είναι πλήρως καλυμμένη με κονίαμα. Οι τάσεις στη θέση αυτή απουσιάζουν στην περίπτωση του ανακουφιστικού κενού.



Εικ. 6.10: Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση της σύνδεσης (α) χωρίς και (β) με ανακουφιστικό κενό.

Στην Εικ. 6.12β φαίνεται η μεταβολή των τάσεων κατά μήκος εκείνων των ευθειών (διαφορετική θέση για κάθε περίπτωση) όπου λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση στο μάρμαρο όταν υπάρχει το ανακουφιστικό κενό είναι ίση με μόλις 18% της αντίστοιχης τάσης όταν το ανακουφιστικό

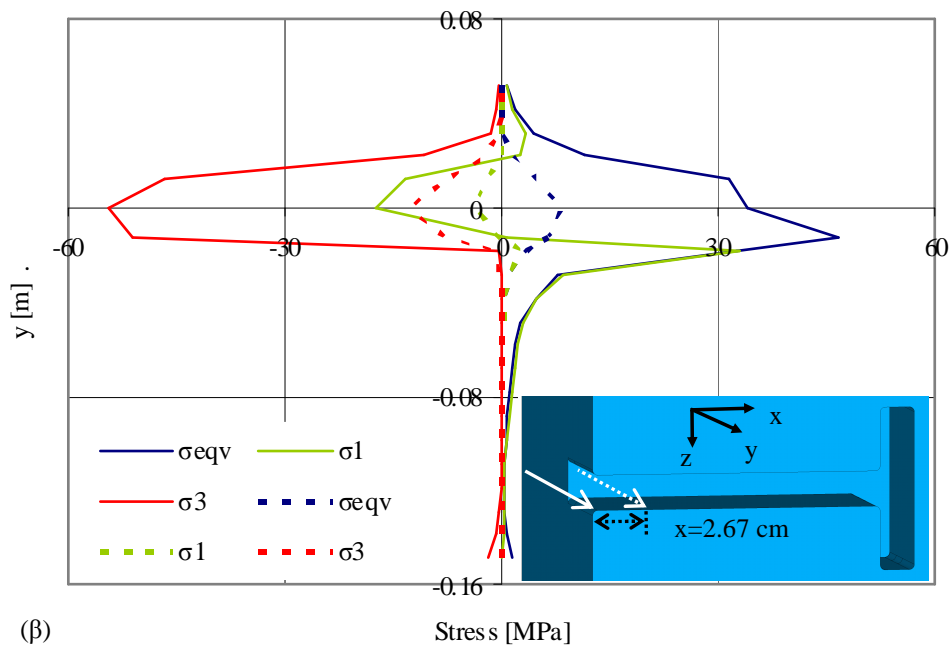
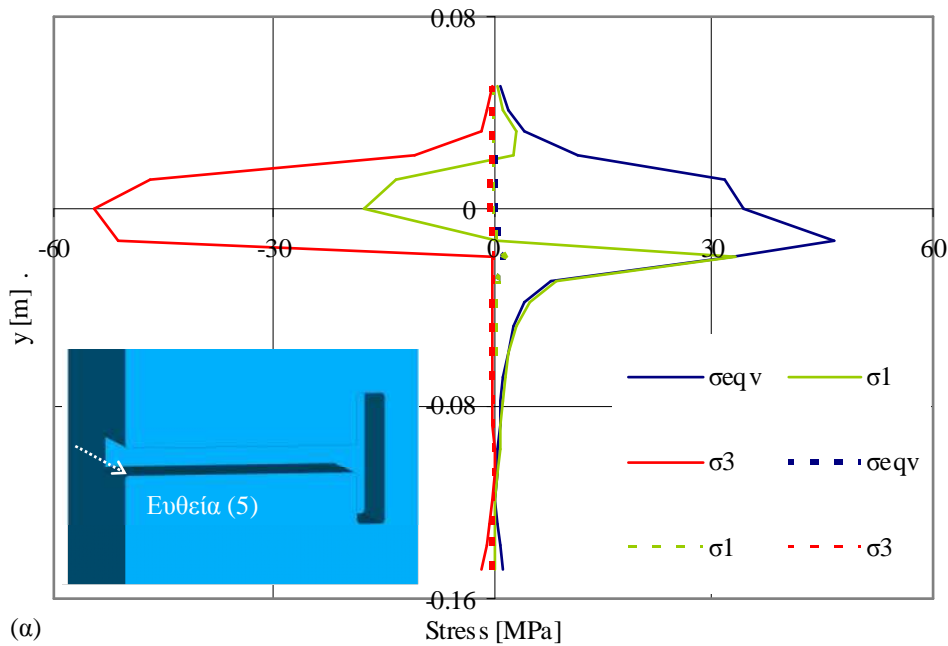
κενό απουσιάζει. Κατά περίπου 80% μειώθηκε και η μέγιστη θλιπτική κύρια τάση στην περίπτωση της πλήρους κάλυψης της εντορμίας από κονίαμα. Η “επικίνδυνη” θετική τιμή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης μειώθηκε περίπου στο 9.5% της αντίστοιχης όταν δεν υπάρχει το ανακουφιστικό κενό.



Εικ. 6.11: Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση της σύνδεσης (α) χωρίς και (β) με ανακουφιστικό κενό.

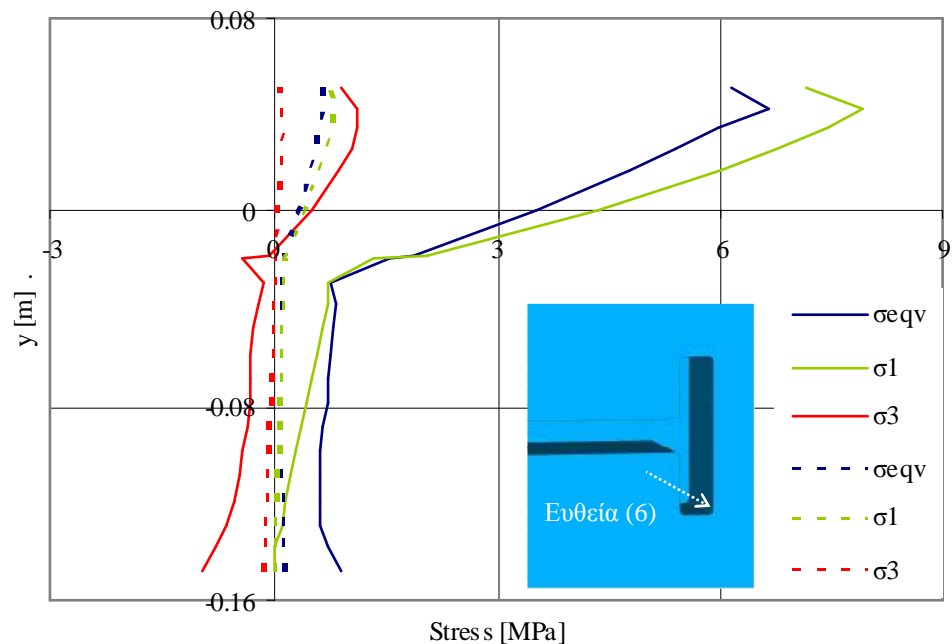
Εξίσου θεαματική είναι η μείωση των τάσεων όταν στη σύνδεση υπάρχει ανακουφιστικό κενό. Κατά μήκος της ευθείας (6), δηλαδή στην “κάτω” ακμή του πέλαματος του κινούμενου επιστυλίου (Εικ. 6.13) οι μέγιστες τιμές των τάσεων έλαβαν τιμή που ισούται μόλις με το 10% των αντίστοιχων τάσεων όταν δεν υπάρχει το ανακουφιστικό κενό.

Εκτός από τις τάσεις κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν και οι δυνάμεις που ασκούνται στην εντορμιά. Αρχικά, παρουσιάζεται στην Εικ. 6.14 η κατανομή των τριών



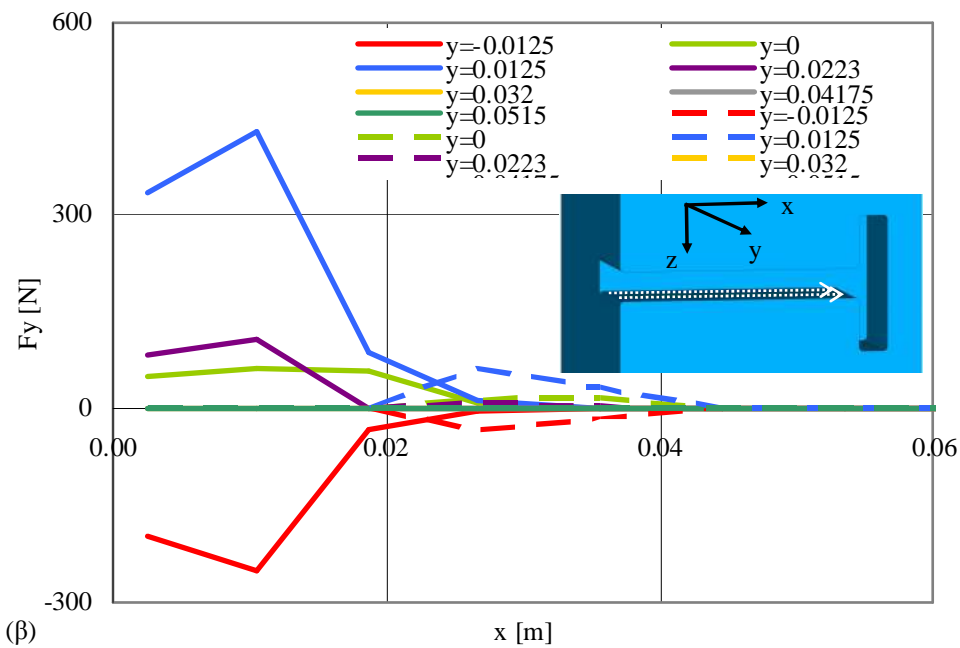
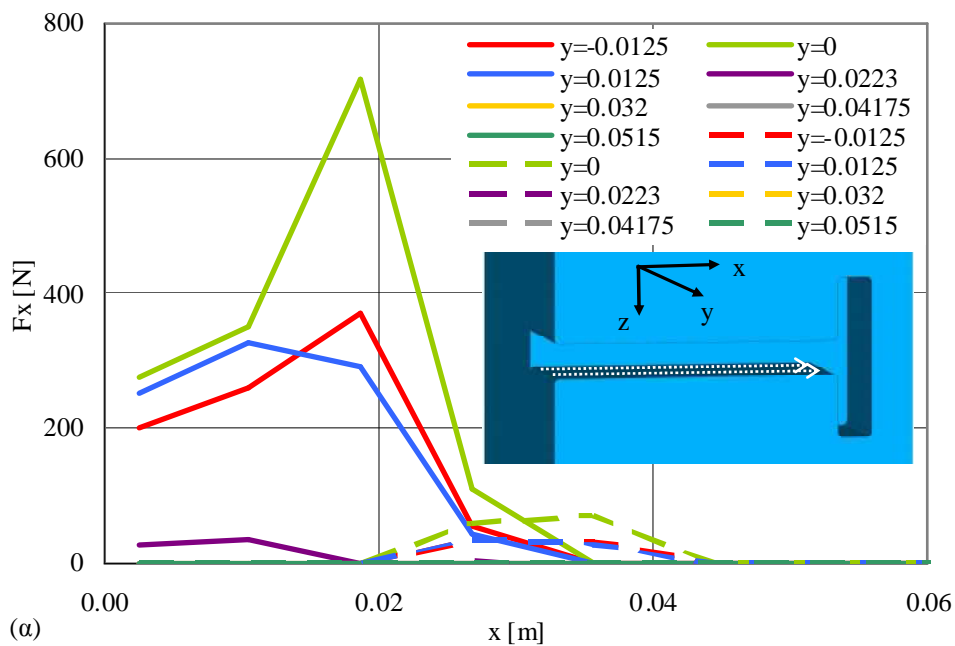
Εικ. 6.12: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης καθώς και της μέγιστης εφελκυστικής και θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστύλια κατά μήκος (α) της ευθείας (5) και (β) των ευθειών όπου αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις.

Η συνεχόμενη και η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στη σύνδεση χωρίς και με ανακουφιστικό κενό, αντίστοιχα.

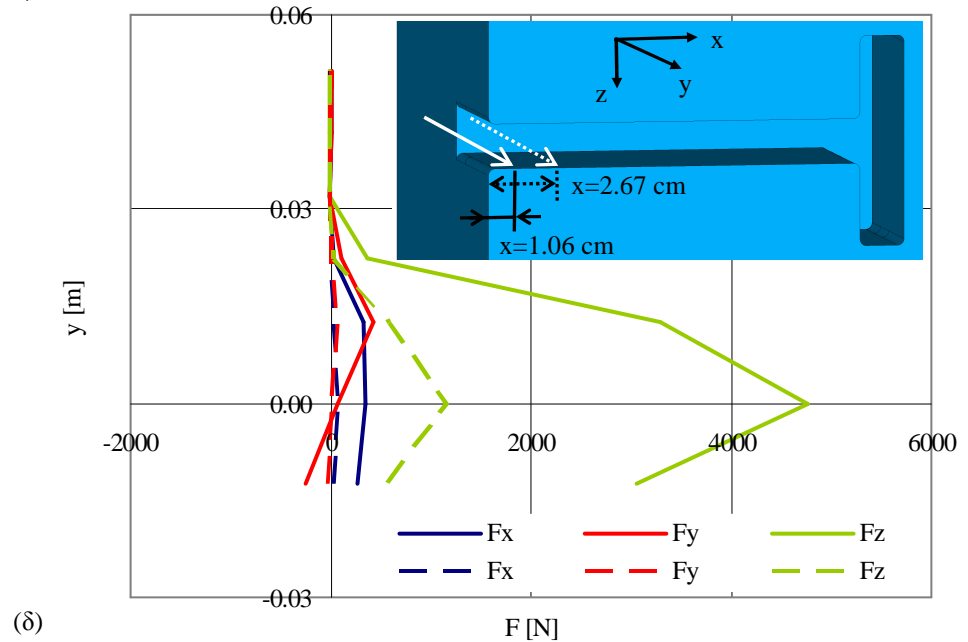
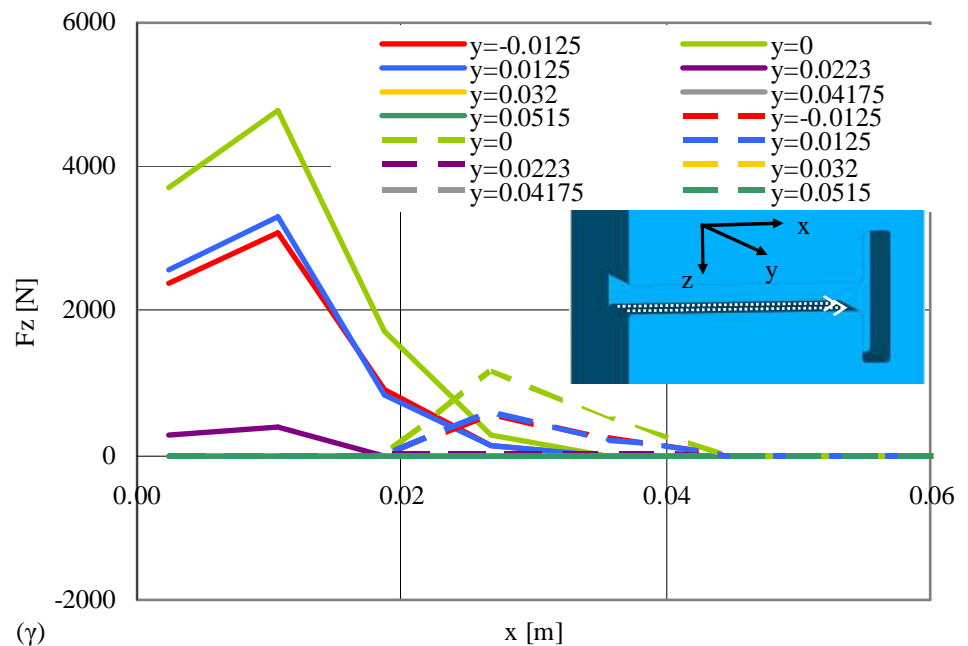


Εικ. 6.13: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης καθώς και της μέγιστης εφελκυστικής και θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστυλία κατά μήκος της ευθείας (6). Η συνεχόμενη και η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στη σύνδεση χωρίς και με ανακουφιστικό κενό, αντίστοιχα.

συνιστωσών της δύναμης ως προς τον άξονα x (άξονας συνδέσμου) για όλο το βάθος της εντορμίας και για τις δύο περιπτώσεις που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο. Στην περιοχή αυτή, η συνιστώσα της δύναμης κατά τον άξονα φόρτισης (Εικ. 6.14γ) ξεπερνά κατά μία τάξη μεγέθους τη δύναμη που ασκείται στο μάρμαρο στις δύο άλλες διευθύνσεις (Εικ. 6.14α,β) είτε υπάρχει το ανακουφιστικό κενό είτε όχι. Μελετώντας όμως τις απόλυτες τιμές των δυνάμεων γίνεται φανερή η σημασία του κενού στο κέντρο της σύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα και εστιάζοντας στις μέγιστες τιμές των δυνάμεων, παρατηρήθηκε μείωση κατά 75% στη δύναμη κατά τον άξονα z (παράλληλα με την επιβαλλόμενη μετατόπιση) και περίπου 85% - 90% κατά τους άξονες x (άξονας του συνδέσμου) και y (άξονας του βάθους της εντορμίας). Στη θέση της μέγιστης δύναμης κατά τον άξονα φόρτισης (F_z), προσδιορίστηκε η κατανομή της δύναμης κατά μήκος του βάθους της εντορμίας (Εικ. 6.14δ) η οποία είναι παραβολικής μορφής και επιβάλλεται στη ζώνη του ύψους του συνδετηρίου στοιχείου.



Εικ. 6.14: Η κατανομή της (α) F_x και (β) F_y κατά μήκος του κορμού της εντορμίας. Η συνεχόμενη και η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στη σύνδεση χωρίς και με ανακουφιστικό κενό, αντίστοιχα.



Εικ. 6.14 (συνέχεια): (γ) Η κατανομή της F_z κατά μήκος του κορμού της εντορμίας.
 (δ) Η κατανομή των συνιστωσών της δύναμης κατά μήκος του άξονα y στη θέση που η F_z λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η συνεχόμενη και η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στη σύνδεση χωρίς και με ανακουφιστικό κενό, αντίστοιχα.

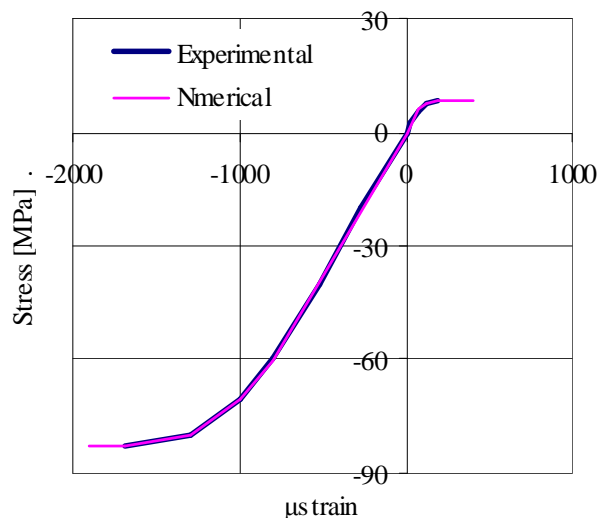
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΕΤΗ ΚΑΤΑΠΙΟΝΗΣΗ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ύπαρξη ενός αριθμητικού προσομοιώματος επικυρωμένου σε εφελκυσμό και διάτμηση, επιτρέπει την αριθμητική μελέτη της σύνθετης καταπόνησης της σύνδεσης. Ο καταστατικός νόμος του μαρμάρου προσομοιώθηκε με τη βοήθεια των πολυγραμμικών καμπύλων που φαίνονται στην Εικ. 7.1. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις φόρτισης η πρώτη αστοχία του συστήματος παρατηρείται στο ψαθυρό κονίαμα (δεδομένης της ιδιαίτερα μικρής εφελκυστικής αντοχής του), η περιγραφή της καμπύλης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης με τη βοήθεια του μοντέλου “cast iron” που διαθέτει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (χωρίς την προσομοίωση της αστοχίας) θα σταματούσε την ανάλυση βάσει του κριτηρίου Rankine αρκετά νωρίς. Για το λόγο αυτό, στη μελέτη του παρόντος κεφαλαίου αποφασίστηκε το κονίαμα να περιγραφεί με το γραμμικώς ελαστικό μοντέλο.

Η μελέτη αναφέρεται στη σύνδεση τόσο δύο γραμμικών όσο και δύο γωνιακών επιστυλίων. Στην πρώτη περίπτωση (γραμμικά επιστύλια), το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική ανάλυση ήταν αυτό που επικυρώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη μελέτη της σύνδεσης των γωνιακών επιστυλίων έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις ως προς τη γεωμετρία των μαρμάρινων όγκων.



Εικ. 7.1: Ο πραγματικός καταστατικός νόμος του μαρμάρου Διονύσου [74] και η προσομοίωσή του με πολυ-γραμμικές καμπύλες.

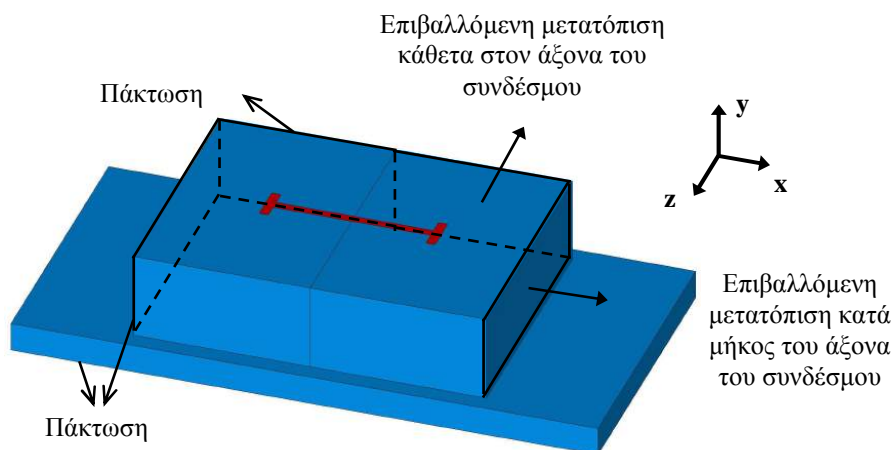
7.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ

Για την προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης, αξιοποιήθηκε το επικυρωμένο μοντέλο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6. Το αριθμητικό προσομοίωμα τοποθετήθηκε οριζόντια (όπως είναι η πραγματική θέση των επιστυλίων στο μνημείο) και επιπλέον κατασκευάστηκε ένας νέος μαρμάρινος όγκος (που προσομοιώνει τον άβρακα του κιονοκράνου) με διαστάσεις $100 \times 5 \times 50 \text{ cm}^3$ πάνω στον οποίο εδράζεται η σύνδεση. Έτσι, δημιουργήθηκε μία νέα διεπιφάνεια μεταξύ της βάσης των επιστυλίων και του άβρακα όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3 και φαίνεται στην Εικ. 4.15.

Όσον αφορά τις διεπιφάνειες και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση των όγκων, ισχύει ό,τι έχει ήδη αναφερθεί και στα προηγούμενα αριθμητικά μοντέλα.

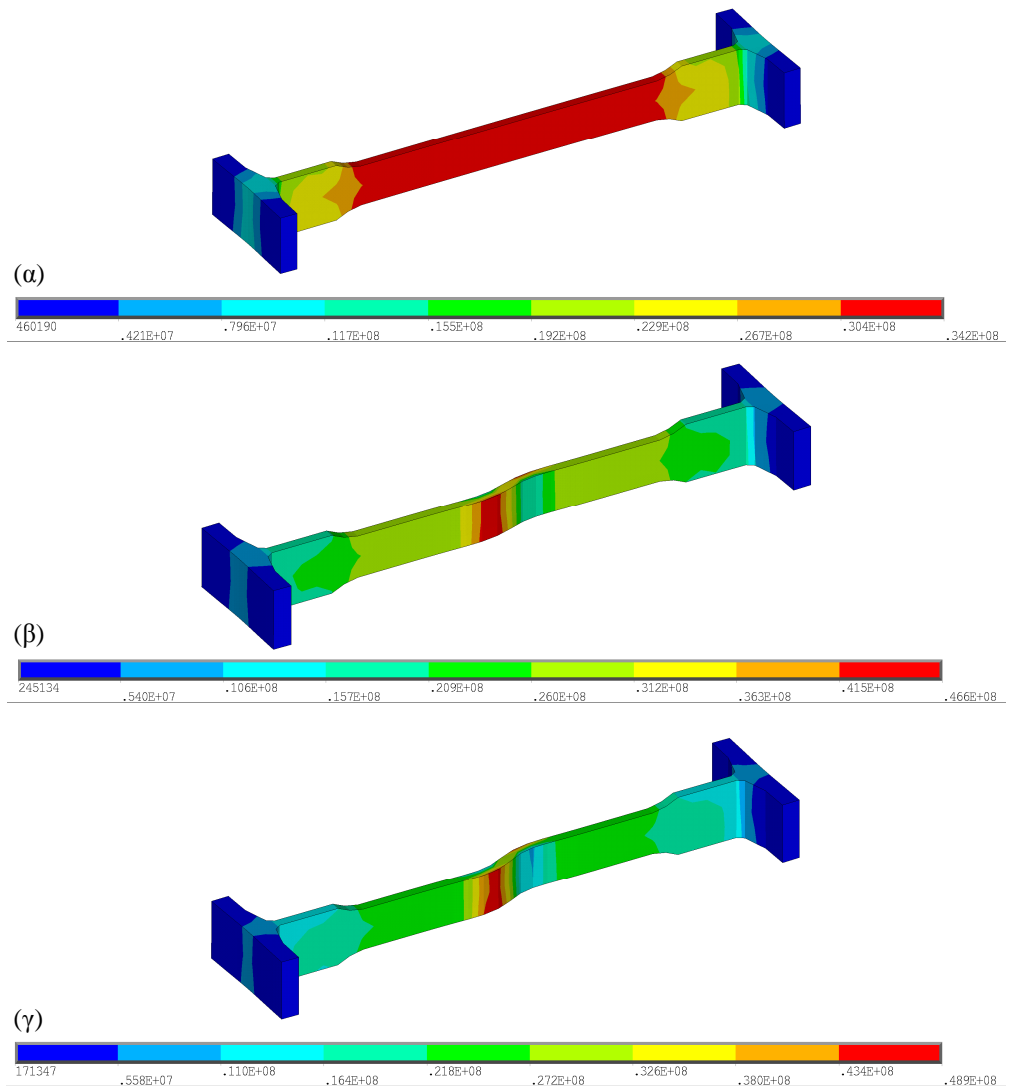
Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, οι κόμβοι της “πίσω” επιφάνειας και της ελεύθερης πλαϊνής αριστερής επιφάνειας του αριστερού επιστυλίου ακινητοποιήθηκαν περιορίζοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους (Εικ. 7.2). Για την προσομοίωση του εφελκυσμού και της καθαρής διάτμησης, η συνολική μετατόπιση (ίση με 0.1 mm) επιβλήθηκε στην ελεύθερη πλαϊνή δεξιά επιφάνεια (κάθετα δηλαδή στον άξονα του συνδέσμου) και στην “πίσω” επιφάνεια (κατά τον άξονα δηλαδή του συνδέσμου), αντίστοιχα, του δεξιού επιστυλίου. Στις περιπτώσεις της σύνθετης καταπόνησης (συνύπαρξη εφελκυσμού και διάτμησης), η μετατόπιση “μοιράστηκε” στις προαναφερθείσες επιφάνειες του δεξιού επιστυλίου ανάλογα με τη γωνία, ως προς το άξονα του συνδέσμου, υπό την οποία επιβλήθηκε (Εικ. 7.2). Συνολικά μελετήθηκαν οι κάτωθι φορτίσεις:

- α. 0° (T)
- β. 30° (TS30)
- γ. 45° (TS45)
- δ. 60° (TS60)
- ε. 90° (S)

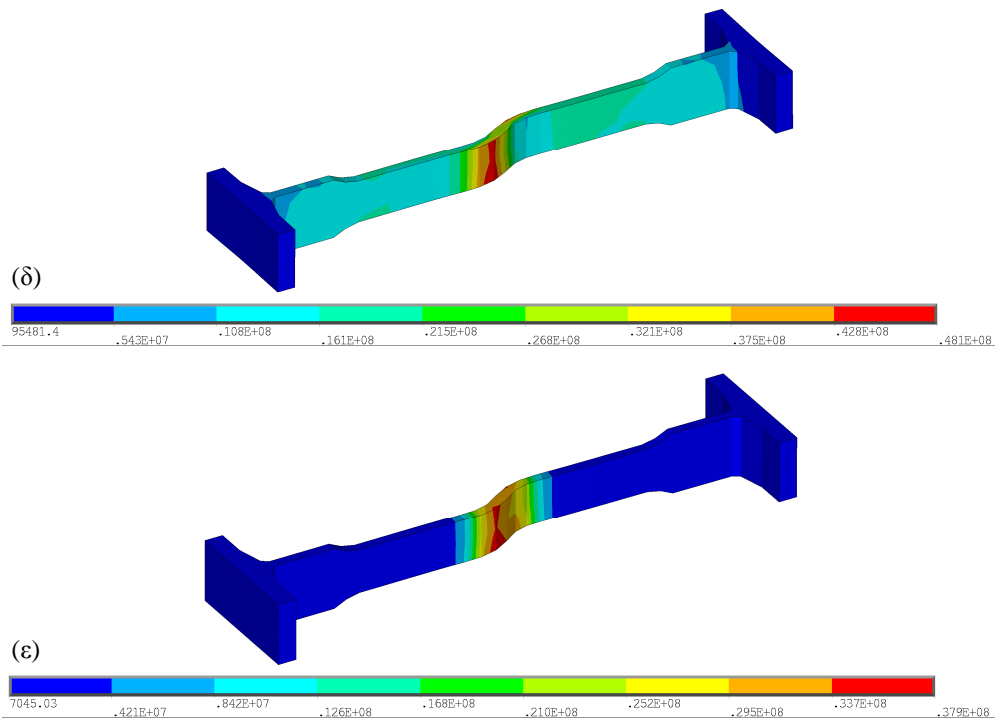


Εικ. 7.2: Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.

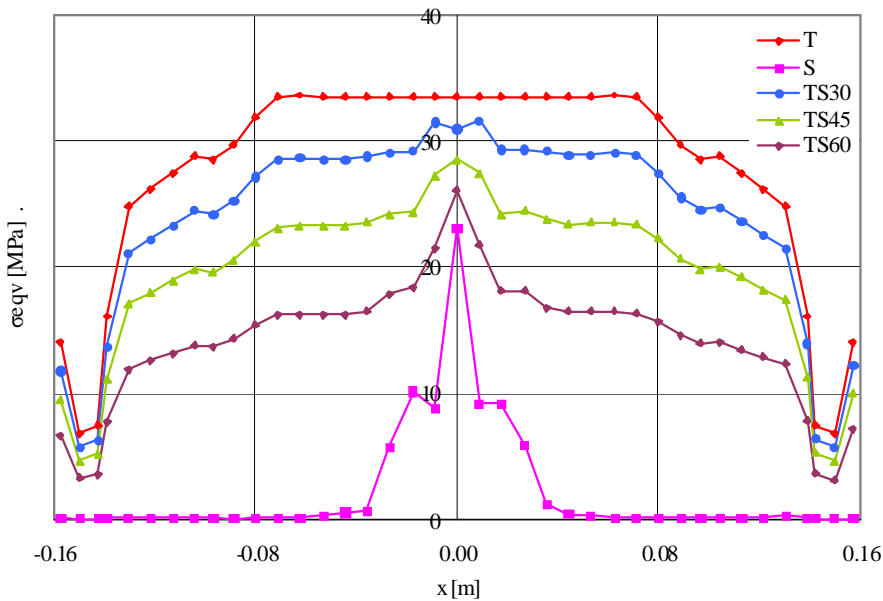
Στην περίπτωση του εφελκυσμού ο σύνδεσμος καταπονήθηκε περισσότερο σε όλο το μήκος του κορμού του (Εικ. 7.3α). Στις υπόλοιπες περιπτώσεις φόρτισης, η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης (Εικ. 7.3β-ε) αποδεικνύει ότι το τασικό πεδίο είναι εντονότερο μόνο στην κεντρική περιοχή του μεταλλικού συνδετηρίου στοιχείου.



Εικ. 7.3: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο σύνδεσμο τιτανίου για την περίπτωση (α) T, (β) TS30 και (γ) TS45.

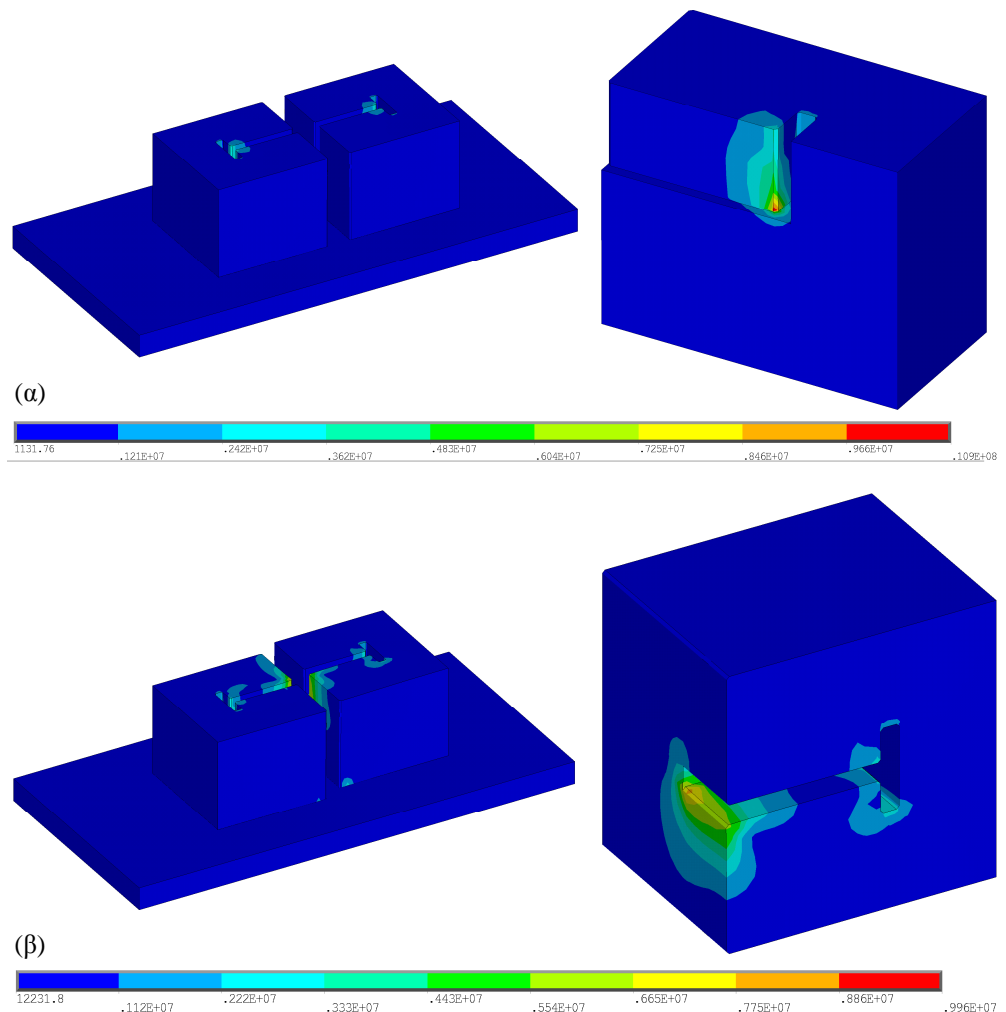


Εικ. 7.3 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο σύνδεσμο τιτανίου για την περίπτωση (δ) TS60 και (ε) S.



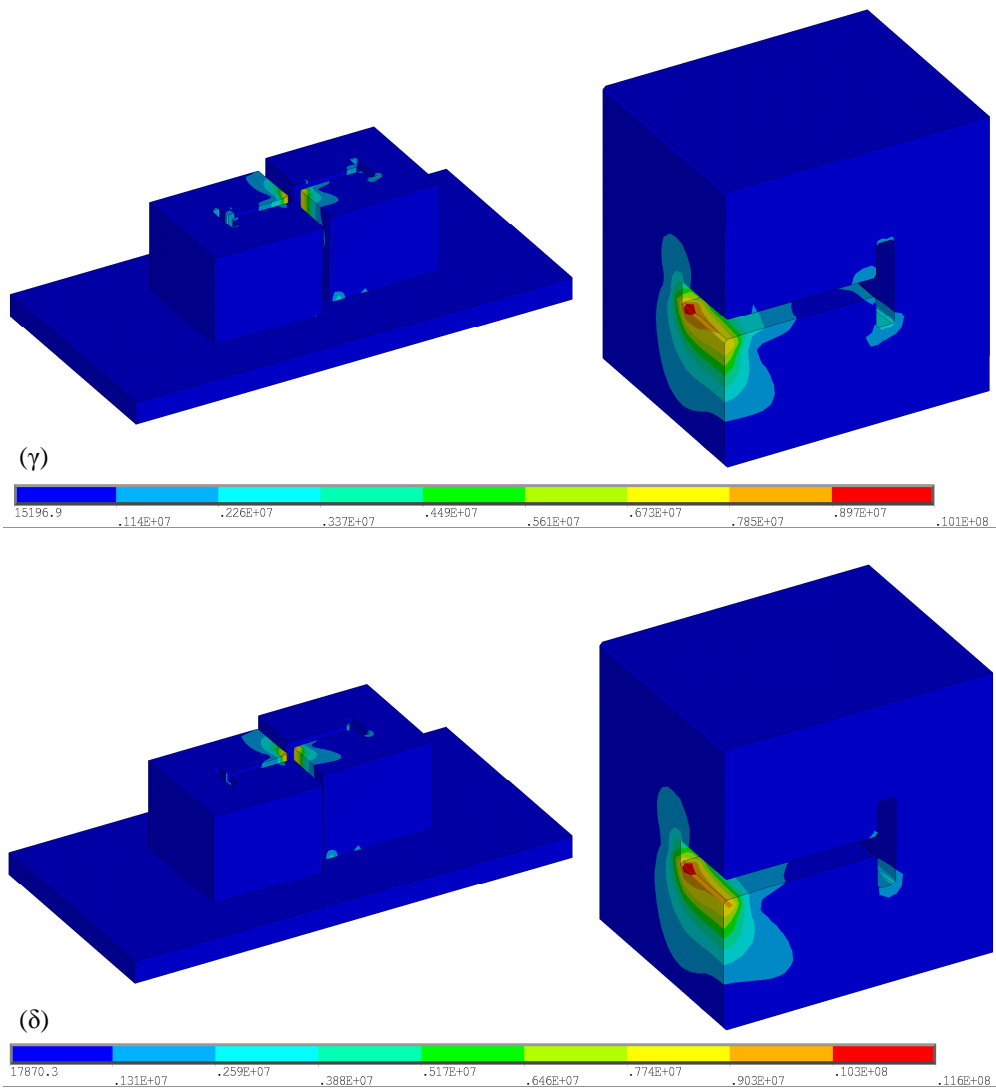
Εικ. 7.4: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του συνδέσμου τιτανίου.

Καθώς η φόρτιση αλλάζει από εφελκυστική σε σύνθετη, η απόλυτη τιμή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης μειώνεται μεν σε όλο το μήκος του συνδέσμου αλλά στο κέντρο του, περίπου 1.8 cm εκατέρωθεν του κέντρου του, παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά από τον υπόλοιπο σύνδεσμο καθώς η διατμητική φόρτιση “υπερισχύει” έναντι της εφελκυστικής, δηλ. για γωνίες μεγαλύτερες των 45° ως προς τον άξονα του συνδέσμου (Εικ. 7.4). Τέλος, στην περίπτωση της καθαρής διάτμησης το συνδετήριο στοιχείο ήταν σχεδόν αφόρτιστο στο μεγαλύτερο μήκος του, πλην μιας ζώνης περίπου 3.5 cm εκατέρωθεν του κέντρου του συνδέσμου, Εικ. 7.4, (μεγαλύτερη συγκριτικά με τη ζώνη των μεγαλύτερων τάσεων στη σύνθετη καταπόνηση).

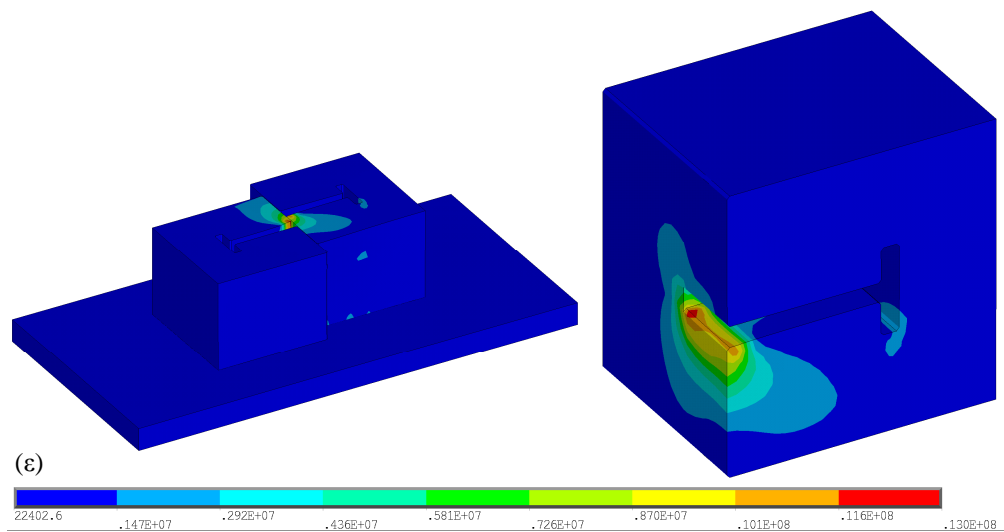


Εικ. 7.5: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (α) T και (β) TS30.

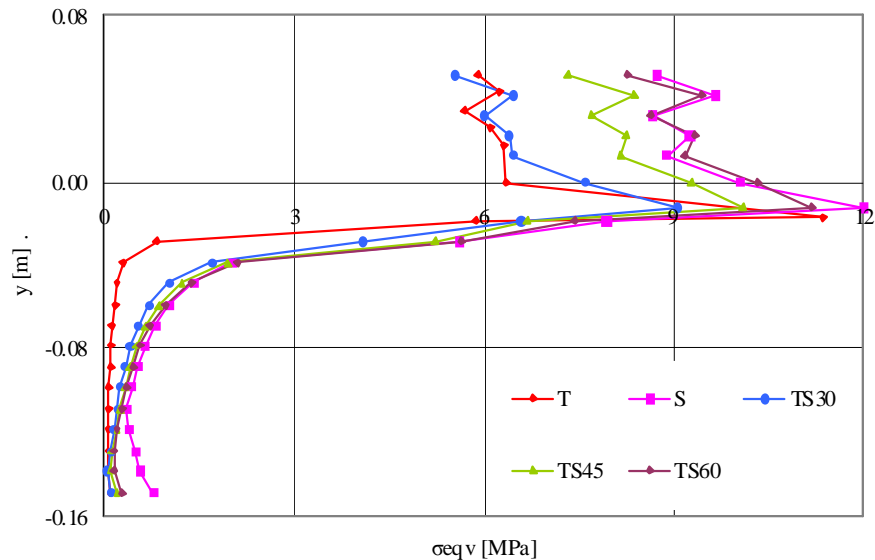
Όσον αφορά το μάρμαρο των επιστυλίων, όταν ασκήθηκε εφελκυστική φόρτιση η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση εντοπίστηκε στην ένωση του πέλματος της εντορμίας με τον κορμό της (Εικ. 7.5α). Αντίθετα, τόσο στην περίπτωση της σύνθετης καταπόνησης όσο και της καθαρά διατμητικής η έντονη καταπόνηση παρατηρήθηκε στον κινούμενο όγκο στη διεπιφάνεια των δύο επιστυλίων (Εικ. 7.5β-ε).



Εικ. 7.5 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (γ) TS45 και (δ) TS60.



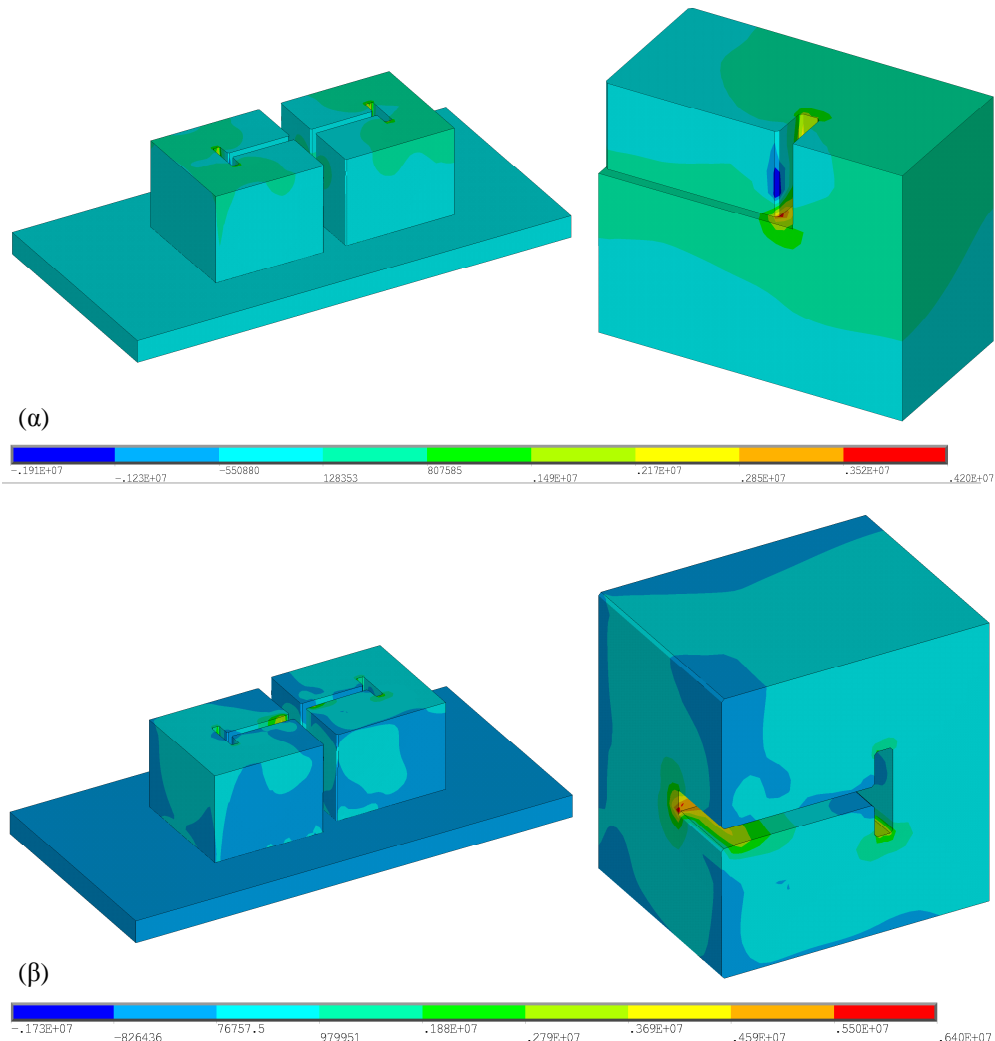
Εικ. 7.5 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστυλία για την περίπτωση (ε) S.



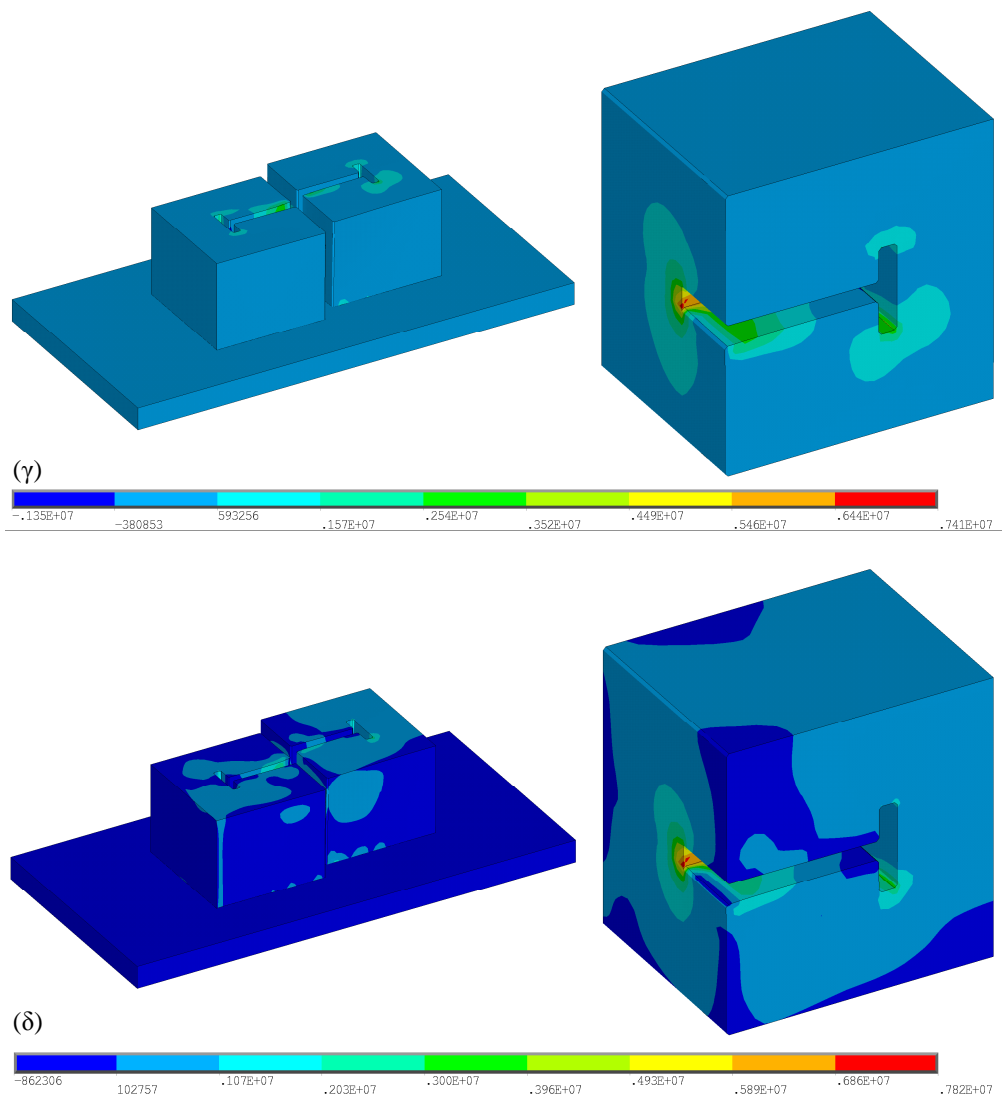
Εικ. 7.6: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστυλίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης συναρτήσει του ύψους του επιστυλίου, ανεξαρτήτως της θέσης στην οποία εντοπίζεται (Εικ. 7.6) παρουσιάζει την ίδια μορφή για όλες τις περιπτώσεις. Από τη θέση της μέγιστης ισοδύναμης κατά Mises τάσης και ψηλότερα (προς την ελεύθερη επιφάνεια του επιστυλίου) η τάση μειώνεται με τον ίδιο περίπου ρυθμό για όλες τις φορτίσεις που μελετήθηκαν.

Αντίθετα, με τη μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση, η θέση εντοπισμού της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση φόρτισης. Στον εφελκυσμό η θέση αυτή εντοπίστηκε στην ένωση του πέλματος της εντορμίας με τον κορμό της (Εικ. 7.7α) ενώ όταν η μετατόπιση επιβλήθηκε υπό γωνία 30° ή 60° ως προς τον άξονα του συνδέσμου, η μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση αναπτύχθηκε μεν στην περιοχή του πέλματος της εντορμίας αλλά προς την “εξωτερική” της πλευρά (Εικ. 7.7β,δ). Αντίθετα, εκτός της περιοχής του πέλματος της εντορμίας (δηλαδή στον κινούμενο όγκο στη διεπιφάνεια των δύο επιστυλίων), Εικ. 7.7γ,ε, καταγράφηκε η μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση όταν η γωνία επιβολής της μετατόπισης ισούταν με 45° ή όταν η φόρτιση ήταν διατμητική.



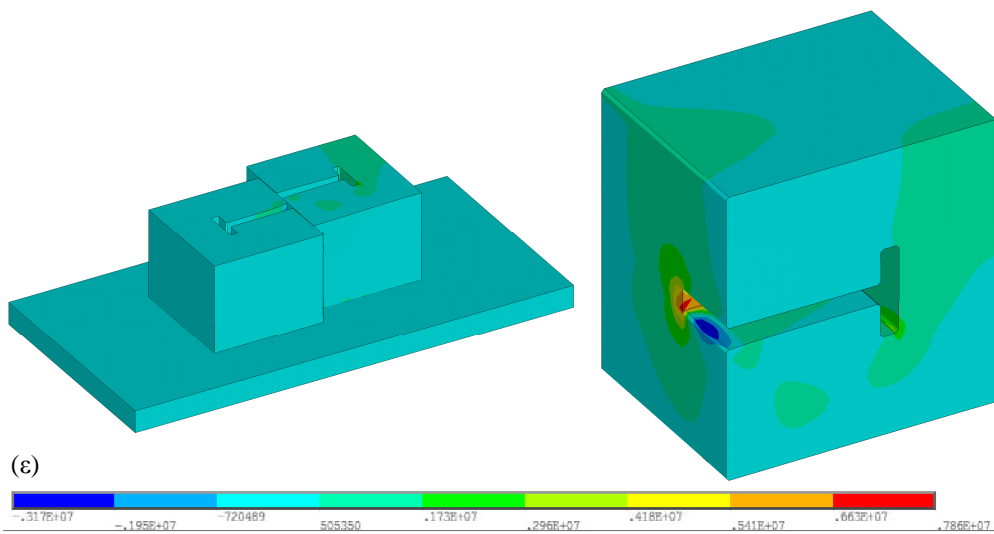
Εικ. 7.7: Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστυλία για την περίπτωση (α) T και (β) TS30.



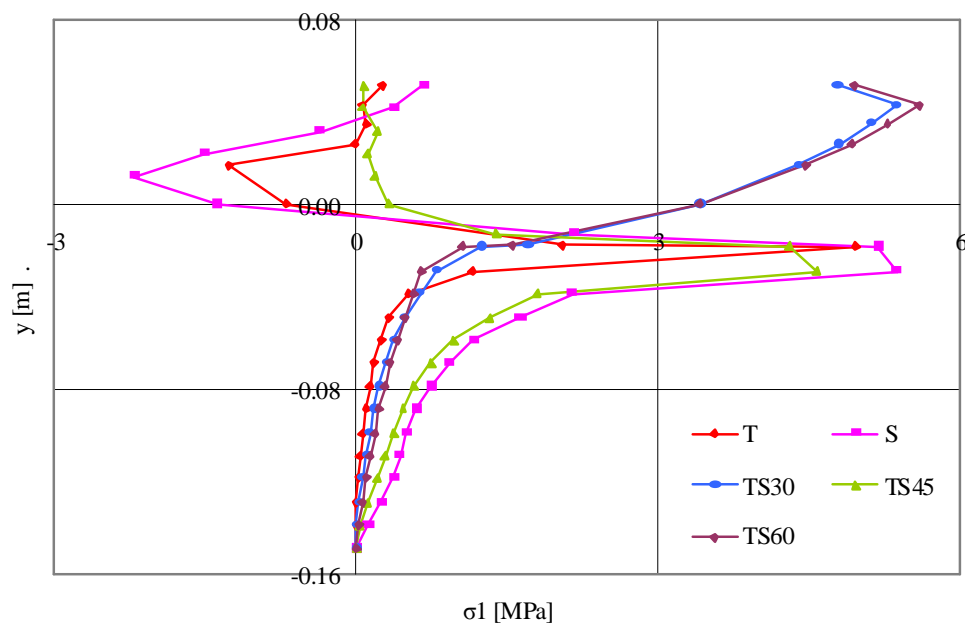
Εικ. 7.7 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστυλία για την περίπτωση (γ) TS45 και (δ) TS60.

Η μέγιστη τιμή που κατεγράφη σε όλες τις περιπτώσεις δεν διαφέρει σημαντικά, σε αντίθεση με τη μεταβολή της κατά το ύψος του επιστυλίου (Εικ. 7.8). Όταν η μετατόπιση επιβλήθηκε υπό 30° ή 60° ως προς τον άξονα του συνδέσμου, η μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση είναι θετική καθ' όλο το ύψος του επιστυλίου και έλαβε τη μέγιστη τιμή της αρκετά κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του επιστυλίου. Αντίθετα, στις άλλες καταπονήσεις που μελετήθηκαν η μέγιστη τιμή της τάσης παρατηρήθηκε στη βάση της εντορμίας ενώ σε υψηλότερες θέσεις η τιμή της εφελκυστικής κύριας

τάσης μειώνεται. Είναι αξιοσημείωτο ότι στις περιπτώσεις του εφελκυσμού και της διάτμησης η τάση αυτή λαμβάνει ακόμα και αρνητικές τιμές.



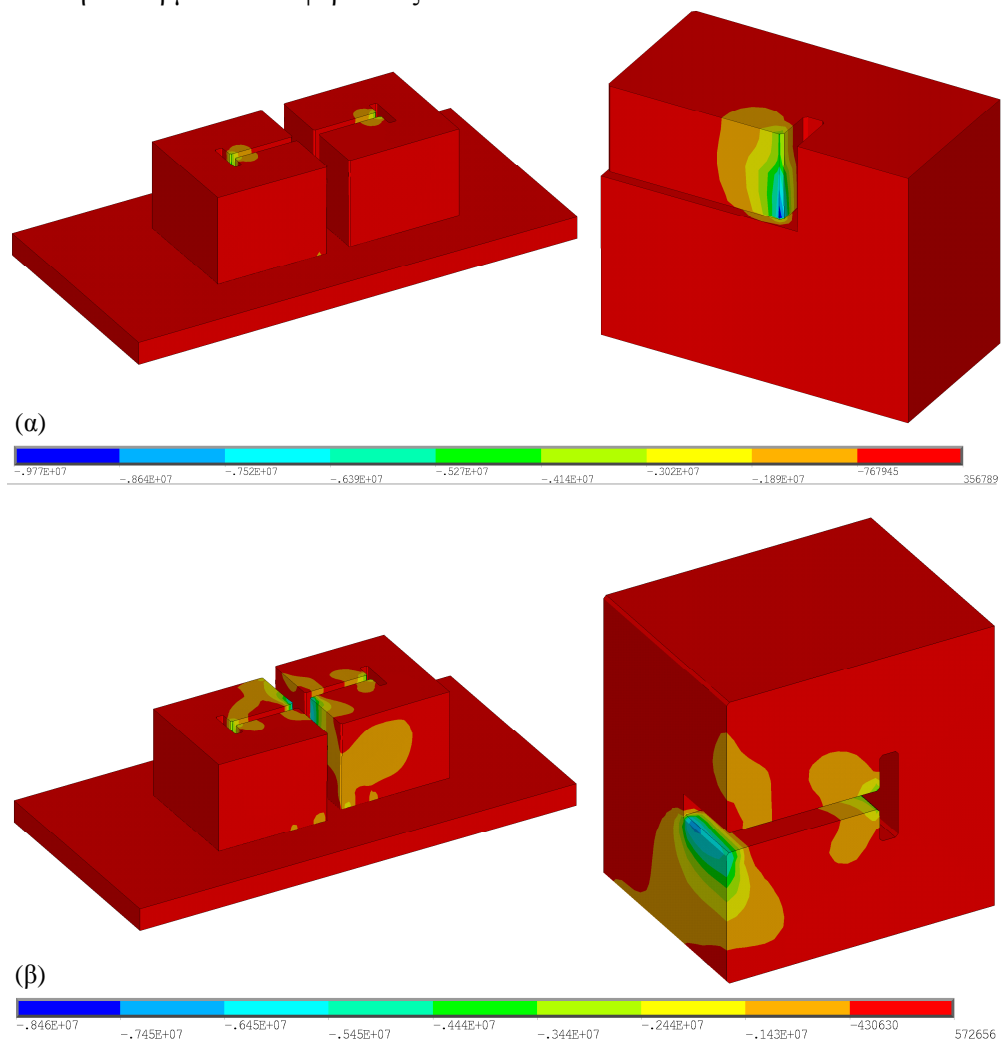
Εικ. 7.7 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (ε) S.



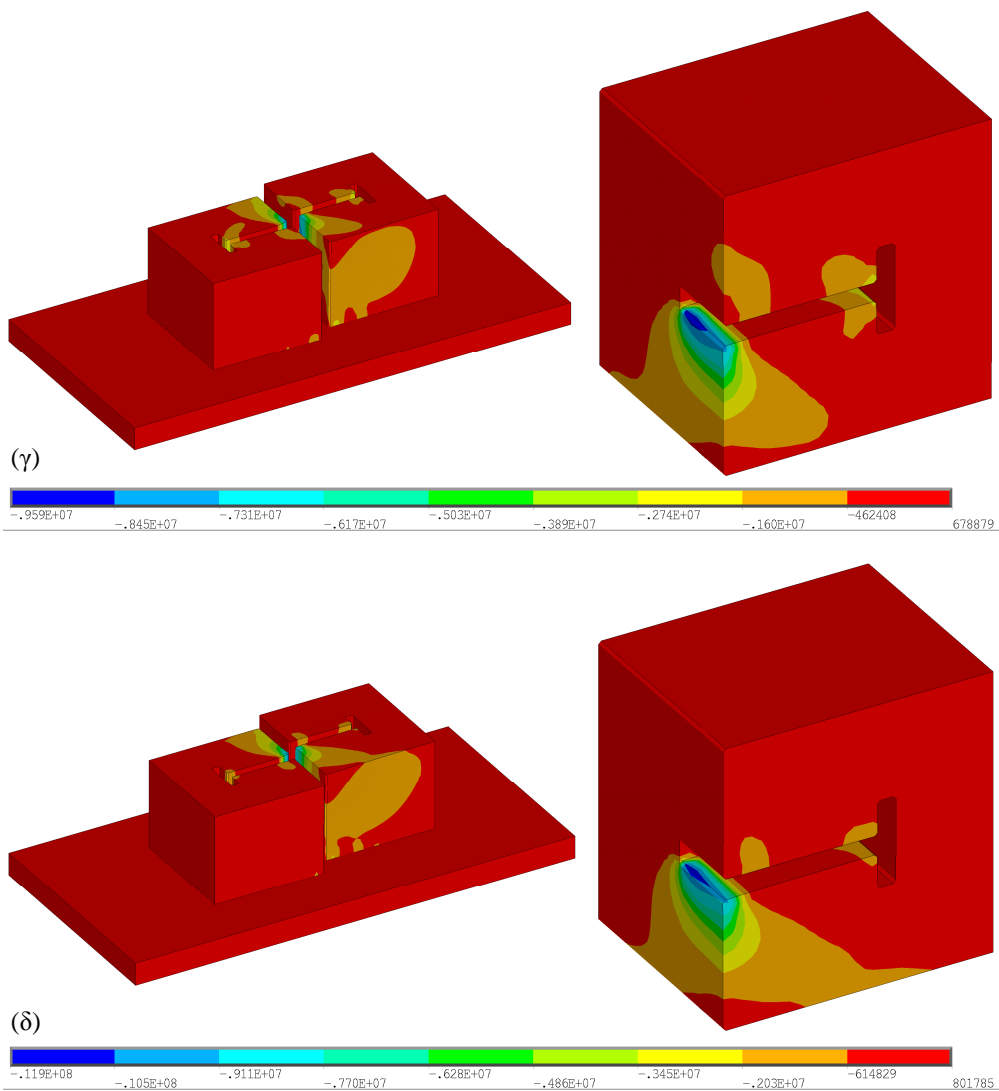
Εικ. 7.8: Η μεταβολή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστυλίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Όσον αφορά τη μέγιστη θλιπτική κύρια τάση αυτή παρατηρήθηκε στην ένωση του πέλματος της εντορμίας με τον κορμό της (Εικ. 7.9α,β) όταν η εφελκυστική φόρτιση “υπερίσχυε” της διατμητικής, δηλαδή για γωνίες επιβολής της μετατόπισης ίσες με 0° και 30° ως προς τον άξονα του συνδέσμου. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, το θλιπτικό τασικό πεδίο είναι εντονότερο στο κινούμενο επιστύλιο στη διεπιφάνεια των δύο όγκων (Εικ. 7.9γ-ε).

Ο εφελκυσμός και η καθαρή διάτμηση οδηγούν στη μεγιστοποίηση των τιμών της θλιπτικής κύριας τάσης (Εικ. 7.10) παρ’ όλο που αναπτύσσονται σε διαφορετικές θέσεις της εντορμίας ενώ σε όλες τις περιπτώσεις ο όγκος του μαρμάρου κάτω από την εντορμία είναι αφόρτιστος.

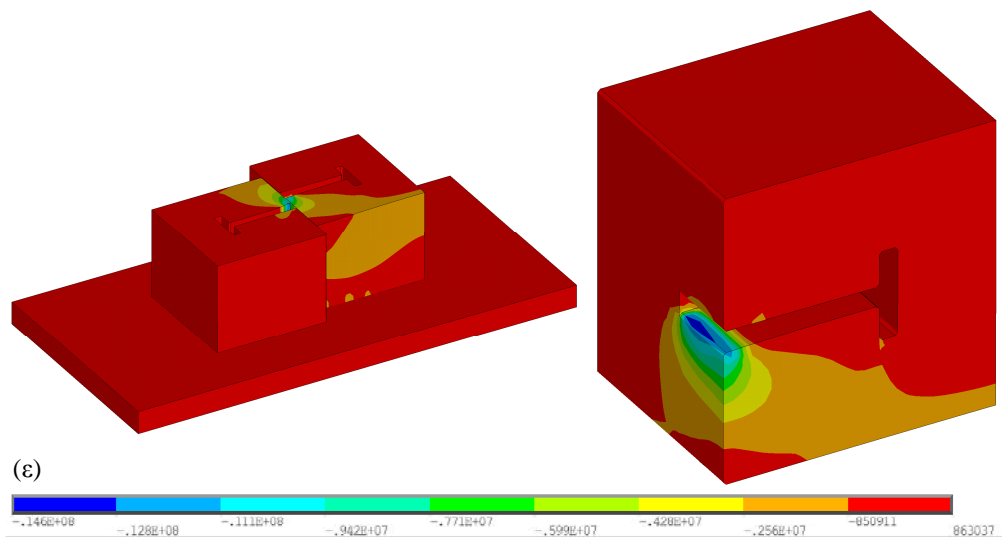


Εικ. 7.9: Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (α) T και (β) TS30.

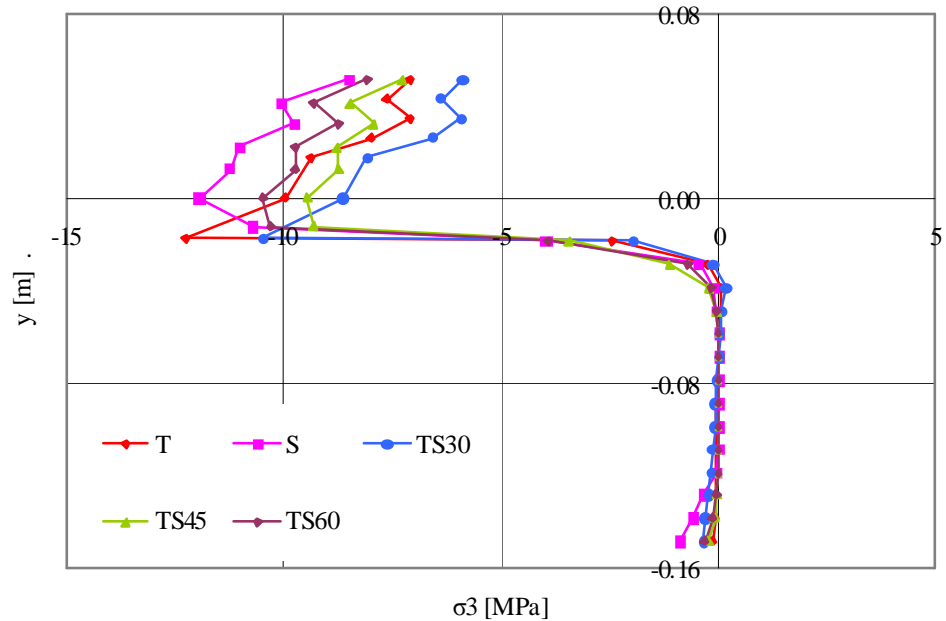


Εικ. 7.9 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (γ) TS45 και (δ) TS60.

Τα αποτελέσματα (μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση στο σύνδεσμο, μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση και μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση στην περιοχή πέριξ της εντορμίας των επιστυλίων) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7.1. Εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η επιβολή μιας τόσο μικρής μετατόπισης, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσής της, οδηγεί σε μέγιστη εφελκυστική κύρια τάση (όχι πάντα στην ίδια περιοχή του επιστυλίου) που πλησιάζει επικίνδυνα την εφελκυστική αντοχή του μαρμάρου.



Εικ. 7.9 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστόλια για την περίπτωση (ε) S.



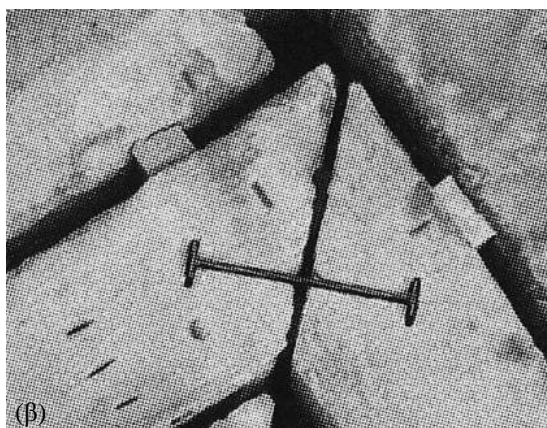
Εικ. 7.10: Η μεταβολή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστυλίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

| | Μέγιστη κατά Mises τάση στο σύνδεσμο [MPa] | Μέγιστη κατά Mises τάση στο μάρμαρο [MPa] | Μέγιστη σ_1 στο μάρμαρο [MPa] | Μέγιστη σ_3 στο μάρμαρο [MPa] |
|------|--|---|--|--|
| T | 34.62 | 17.05 | 8.04 | -9.77 |
| TS30 | 49.41 | 15.28 | 7.86 | -8.46 |
| TS45 | 51.93 | 13.72 | 7.93 | -9.59 |
| TS60 | 51.09 | 12.24 | 7.96 | -11.9 |
| S | 39.20 | 14.06 | 8.08 | -14.6 |

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη σύνδεση δύο εν σειρά επιστυλίων.

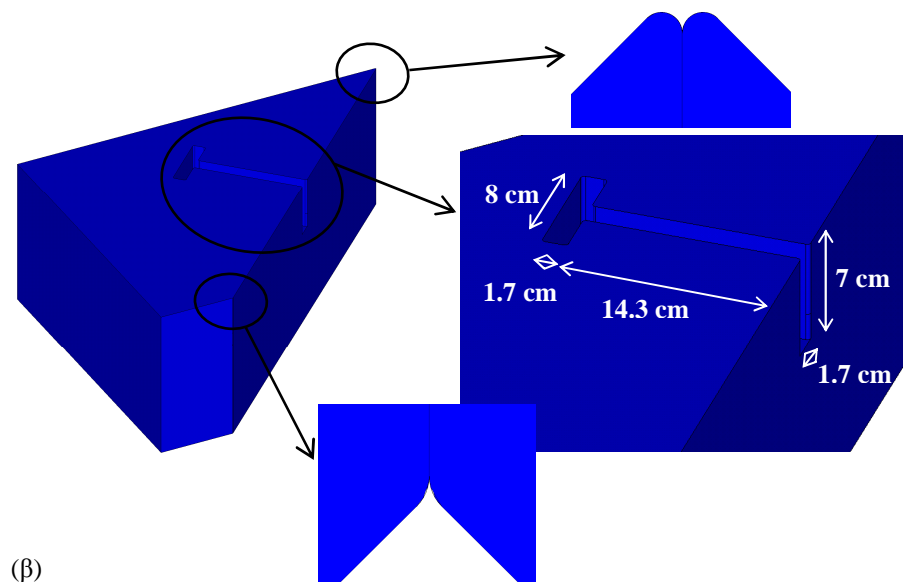
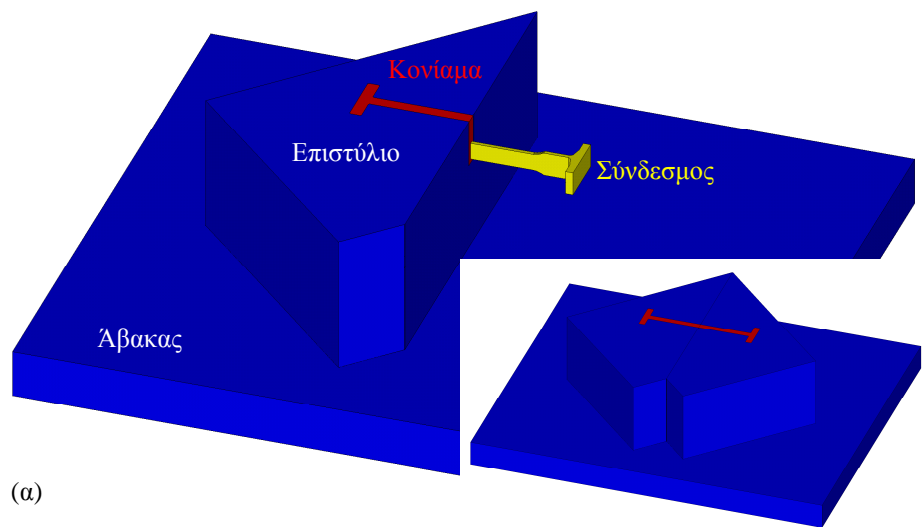
7.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΥΟ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΕΠΙΣΤΥΛΙΩΝ

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο (σύνδεσμος και υλικό πλήρωσης της εντορμίας) πραγματοποιείται η σύνδεση των γωνιακών επιστυλίων του ναού (Εικ. 7.11). Το νέο αριθμητικό μοντέλο διαφοροποιείται συγκριτικά με το προαναφερθέν στην ενότητα 7.2 ως προς τη γεωμετρία των μαρμαρίνων όγκων (Εικ. 7.12α). Εκτός από τη μορφή των επιστυλίων, οι ακμές τους (εκατέρωθεν της διεπιφάνειας των επιστυλίων) διαμορφώθηκαν με μικρή καμπυλότητα ώστε να αποτραπεί η συγκέντρωση τάσεων στα σημεία αυτά (Εικ. 7.12β).



Εικ. 7.11: (α) Η νοτιοανατολική γωνία του Ναού. (β) Τοπική σύνδεση γωνιακών επιστυλίων.

Στην περίπτωση των γωνιακών επιστυλίων, η “νέα” διεπιφάνεια μεταξύ της βάσης των επιστυλίων και του άβακα έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικ. 7.13γ. Ο κάναβος των όγκων δημιουργήθηκε με το στοιχείο *SOLID185* (Εικ. 3.3) και απεικονίζεται στην Εικ. 7.14.

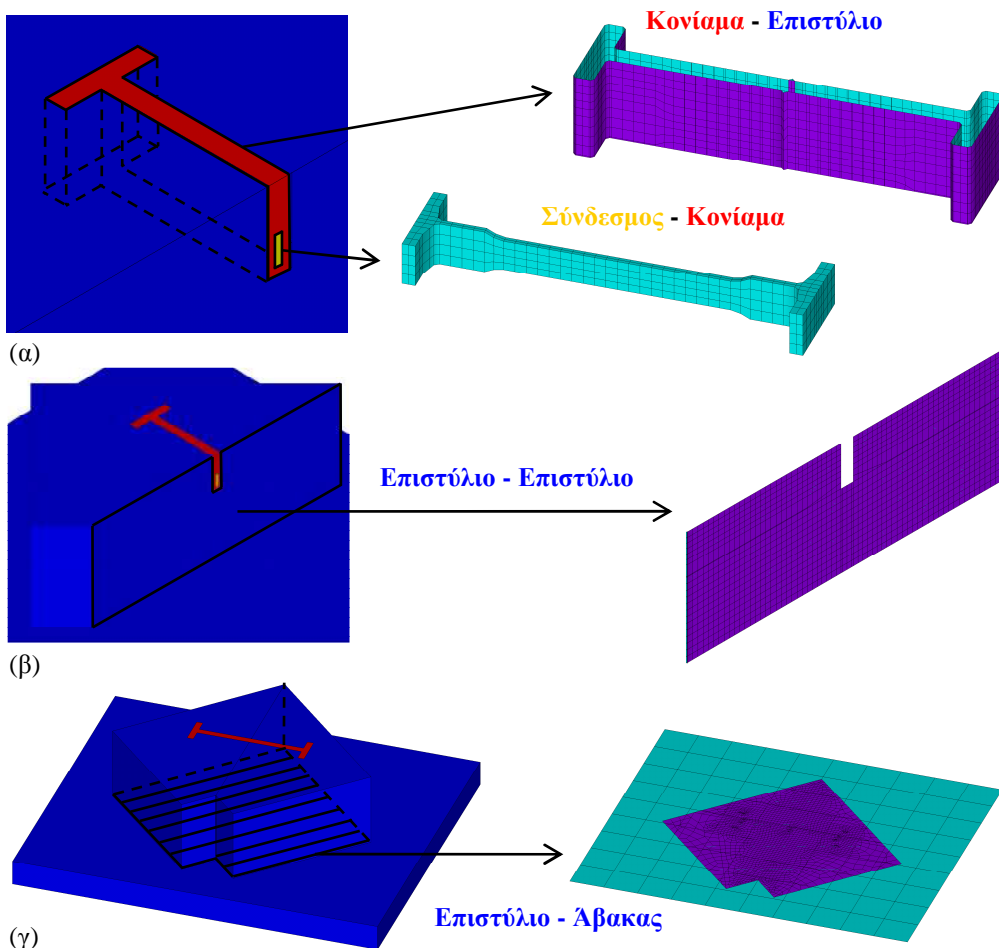


Εικ. 7.12: (α) Το αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης γωνιακών επιστυλίων.
(β) Λεπτομέρειες του αριθμητικού προσομοιώματος.

Στο νέο αριθμητικό προσομοίωμα η ελεύθερη επιφάνεια (κάθετα στον άξονα του επιστυλίου) καθώς και η βάση του άβακα πακτώθηκαν ενώ στο δεξί επιστύλιο επιβλήθηκε:

- “Εφελκυστική” μετατόπιση κατά τον άξονα του συνδέσμου (άξονας x), C0 (Εικ. 7.15α).

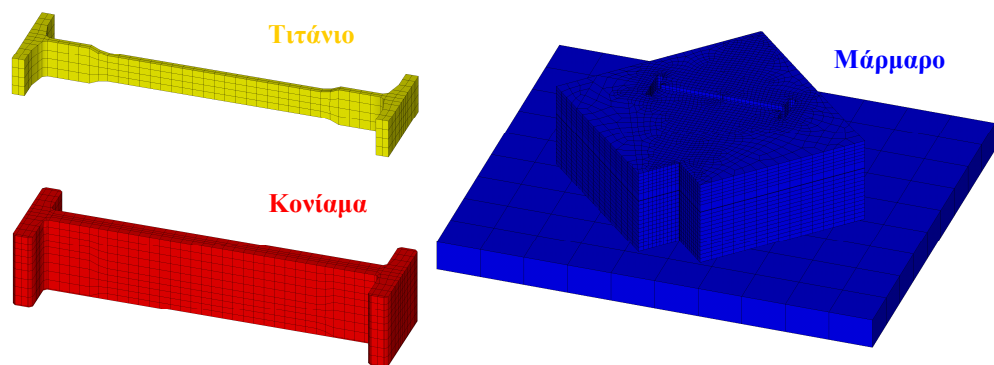
- β. “Εφελκυστική” μετατόπιση κατά τον άξονα του επιστυλίου, C1 (Εικ. 7.15β).
- γ. “Θλιπτική” μετατόπιση κατά τον άξονα του επιστυλίου, C2 (Εικ. 7.15γ).
- δ. “Εφελκυστική” μετατόπιση κάθετα στον άξονα του επιστυλίου, C3 (Εικ. 7.15δ).
- ε. “Θλιπτική” μετατόπιση κάθετα στον άξονα του επιστυλίου, C4 (Εικ. 7.15ε).
- στ. Μετατόπιση παράλληλα με τη διεπιφάνεια των επιστυλίων (κατά τον άξονα -z), C5 (Εικ. 7.15στ).



Εικ. 7.13: Οι διεπιφάνειες του αριθμητικού μοντέλου της σύνδεσης γωνιακών επιστυλίων.

Η καταπόνηση του συνδέσμου στην περίπτωση επιβολής της μετατόπισης παράλληλα με τον άξονά του (C0) είναι μεγαλύτερη καθ' όλο το μήκος του κορμού του (Εικ. 7.16α). Στις υπόλοιπες περιπτώσεις φόρτισης, πλην της “θλιπτικής” φόρτισης κατά τον άξονα του επιστυλίου (C2), οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης κατά

Mises τάσης αναπτύχθηκαν στην κεντρική περιοχή του συνδέσμου (Εικ. 7.16β, 7.16δ-στ) ενώ το μισό πέλμα του (που βρίσκεται στο “σταθερό” μαρμάρινο όγκο) καταπονείται περισσότερο στην περίπτωση της φόρτισης C2.

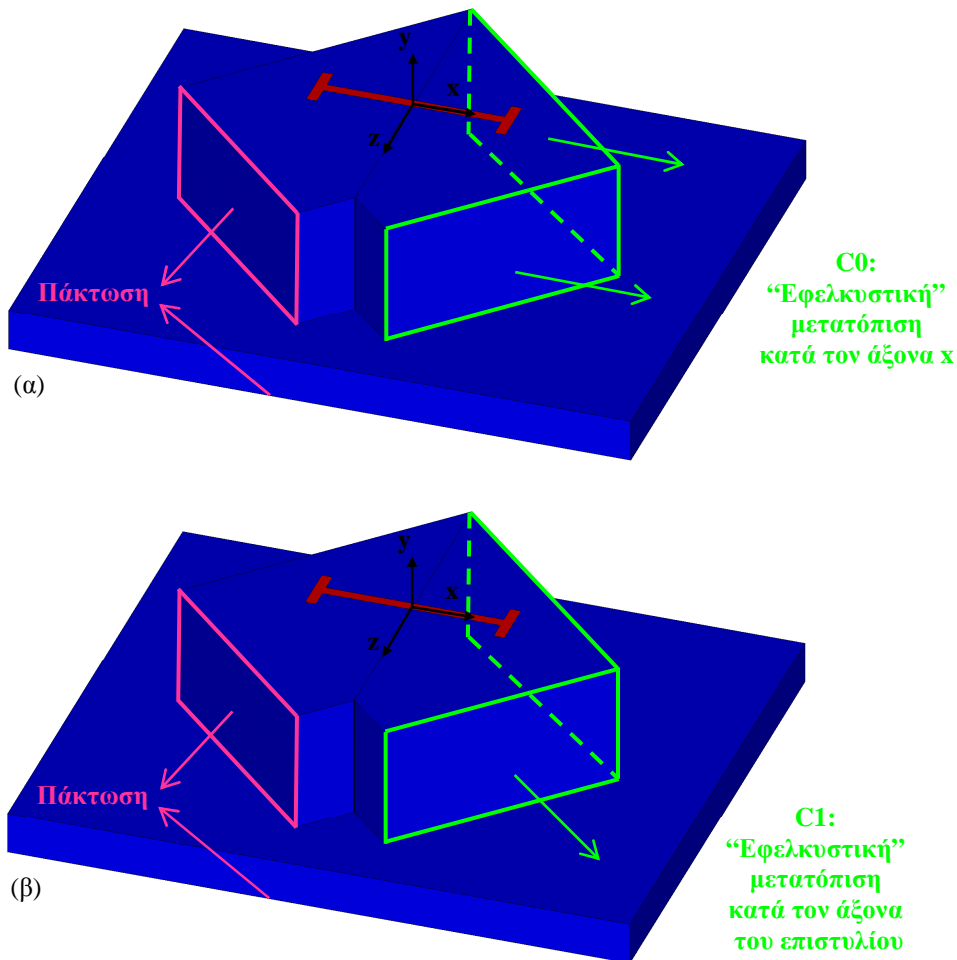


Εικ. 7.14: Ο κάναβος των όγκων του αριθμητικού προσομοιώματος.

Οι “εφελκυστικές” φορτίσεις (C1 και C3) δημιούργησαν το ίδιο τασικό πεδίο (ισοδύναμη κατά Mises τάση) στο σύνδεσμο και τον επηρεάζουν σημαντικά σε μία ζώνη εύρους περίπου 1.8 cm εκατέρωθεν του κέντρου του (Εικ. 7.17). Βέβαια, η απόλυτη τιμή της τάσης είναι μικρότερη συγκριτικά με τις τάσεις που αναπτύχθηκαν λόγω του εφελκυστικού φορτίου (C0). Η διατμητική καταπόνηση (C5) επηρέασε το κέντρο του συνδέσμου σε μια ζώνη μήκους περίπου 3.5 cm εκατέρωθεν του κέντρου του με μεγάλη μάλιστα διαφορά σε σύγκριση με την τάση στο υπόλοιπο τμήμα του συνδέσμου. Οι “θλιπτικές” φορτίσεις (C2 και C4) και ιδιαίτερα η C2 (μετατόπιση κατά τον άξονα του επιστυλίου) είναι αυτή που καταπονεί λιγότερο το σύνδεσμο με τάσεις που σχεδόν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες της διάτμησης (εκτός της περιοχής του κέντρου φυσικά).

Η ένταση του τασικού πεδίου (όπως αυτή πιστοποιείται μέσω της ισοδύναμης κατά Mises τάσης) στα επιστύλια παρουσιάζεται στην Εικ. 7.18. Η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση στην περίπτωση της εφελκυστικής φόρτισης κατά τον άξονα του συνδέσμου (C0) εμφανίστηκε στην ένωση του πέλματος της εντορμίας με τον κορμό της (Εικ. 7.18α), όπως ακριβώς και κατά τον εφελκυσμό των γραμμικών επιστυλίων. Όταν η “εφελκυστική” φόρτιση επιβλήθηκε υπό γωνία 45° ως προς τον άξονα του συνδετηρίου στοιχείου (C1 και C3) η ισοδύναμη κατά Mises τάση μεγιστοποιήθηκε στον κινούμενο και στον “σταθερό” μαρμάρινο όγκο στη διεπιφάνεια των επιστυλίων, αντίστοιχα (Εικ. 7.18β,δ). Στην ίδια θέση (στον κινούμενο όγκο στη διεπιφάνεια των επιστυλίων) αναπτύχθηκε η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση στην περίπτωση C5 (Εικ. 7.18στ) όπου η επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν κάθετη στον άξονα του συνδέσμου. Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν, η επιβολή “θλιπτικής” μετατόπισης στο σύστημα (C2 και C4) οδήγησε όπως αναμενόταν στην ανάπτυξη τάσεων σε μεγάλο τμήμα των επιστυλίων (όχι μόνο πέριξ της εντορμίας) και στην εμφάνιση έντονης καταπόνησης στις γωνίες της σύνδεσης (Εικ.

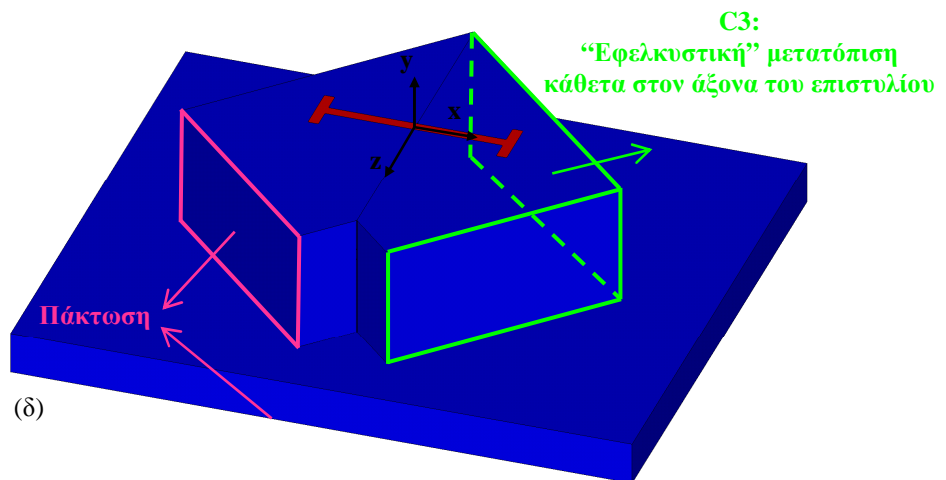
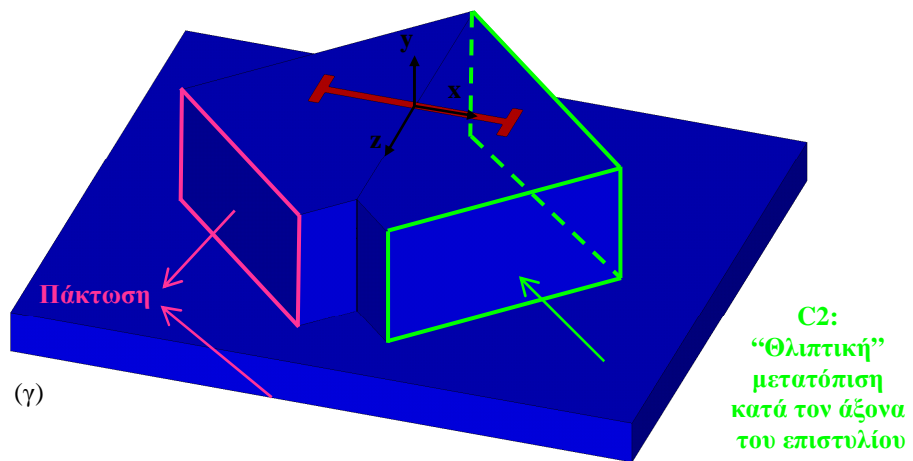
7.18γ,ε) είτε στην εσωτερική είτε στην εξωτερική γωνία. Εστιάζοντας, όμως, μόνο στην περιοχή της εντορμίας, η μεγαλύτερη τάση παρατηρήθηκε στην ακμή του πέλματος που βρίσκεται στον “σταθερό” όγκο προς την εξωτερική πλευρά, όπως φαίνεται καθαρά στην Εικ. 7.18ε.



Εικ. 7.15: Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.

Η Εικ. 7.19 παρουσιάζει τη μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης κατά το ύψος του επιστυλίου στη θέση γύρω από την εντορμιά που αυτή έλαβε τη μέγιστη τιμή της. Είναι φανερό ότι τόσο στις περιπτώσεις “εφελκυστικής” φόρτισης (C0, C1, C3) όσο και στην περίπτωση της διάτμησης (C5) δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση ως προς τη μέγιστη τιμή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης που αναπτύχθηκε στο μάρμαρο. Ωστόσο, όταν η μετατόπιση επιβλήθηκε κατά τον άξονα του συνδέσμου (C0) η ένταση του τασικού πεδίου περιορίστηκε σε μια μικρή περιο-

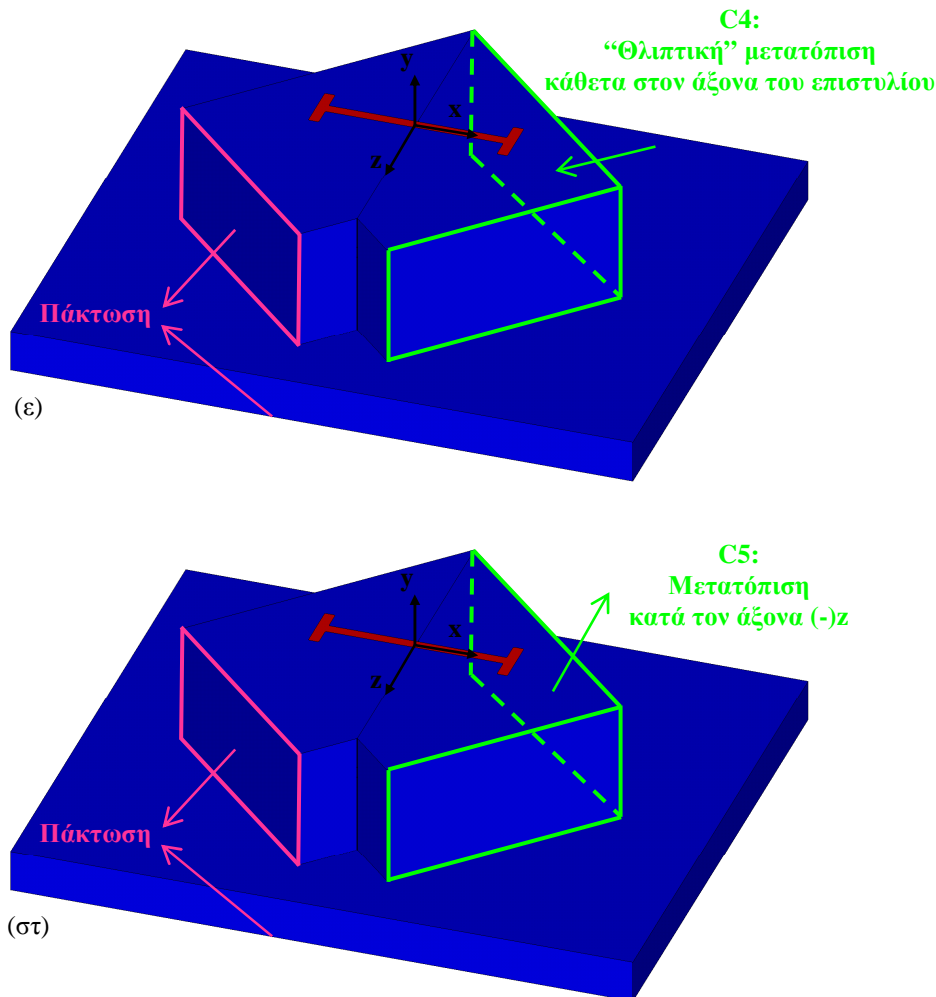
χή κοντά στη βάση της εντορμίας και όχι σε όλο το βάθος της. Ο όγκος του επιστυλίου κάτω από την εντορμία είναι αφόρτιστος. Αντίθετα, οι “θλιπτικές” φορτίσεις του συστήματος (C2 και C4) καταπόνησαν το επιστύλιο σε όλο το ύψος του οδηγώντας παράλληλα σε μεγαλύτερες τιμές της ισοδύναμης κατά Mises τάσης.



Εικ. 7.15 (συνέχεια): Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.

Όσον αφορά τη θέση ανάπτυξης της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης του μαρμάρου, αυτή εντοπίστηκε στην ένωση του κορμού της εντορμίας με το πέλαμα της στην περίπτωση φόρτισης C0 (Εικ. 7.20α). Οι άλλες δύο “εφελκυστικές” καταπονήσεις (C1 και C3) καθώς και η διατμητική φόρτιση (C5) οδήγησαν στην ανάπτυξη της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης κοντά στη βάση της εντορμίας στη διεπιφάνεια των δύο μαρμάρινων όγκων, είτε στο κινούμενο (C1, Εικ. 7.20β και C5,

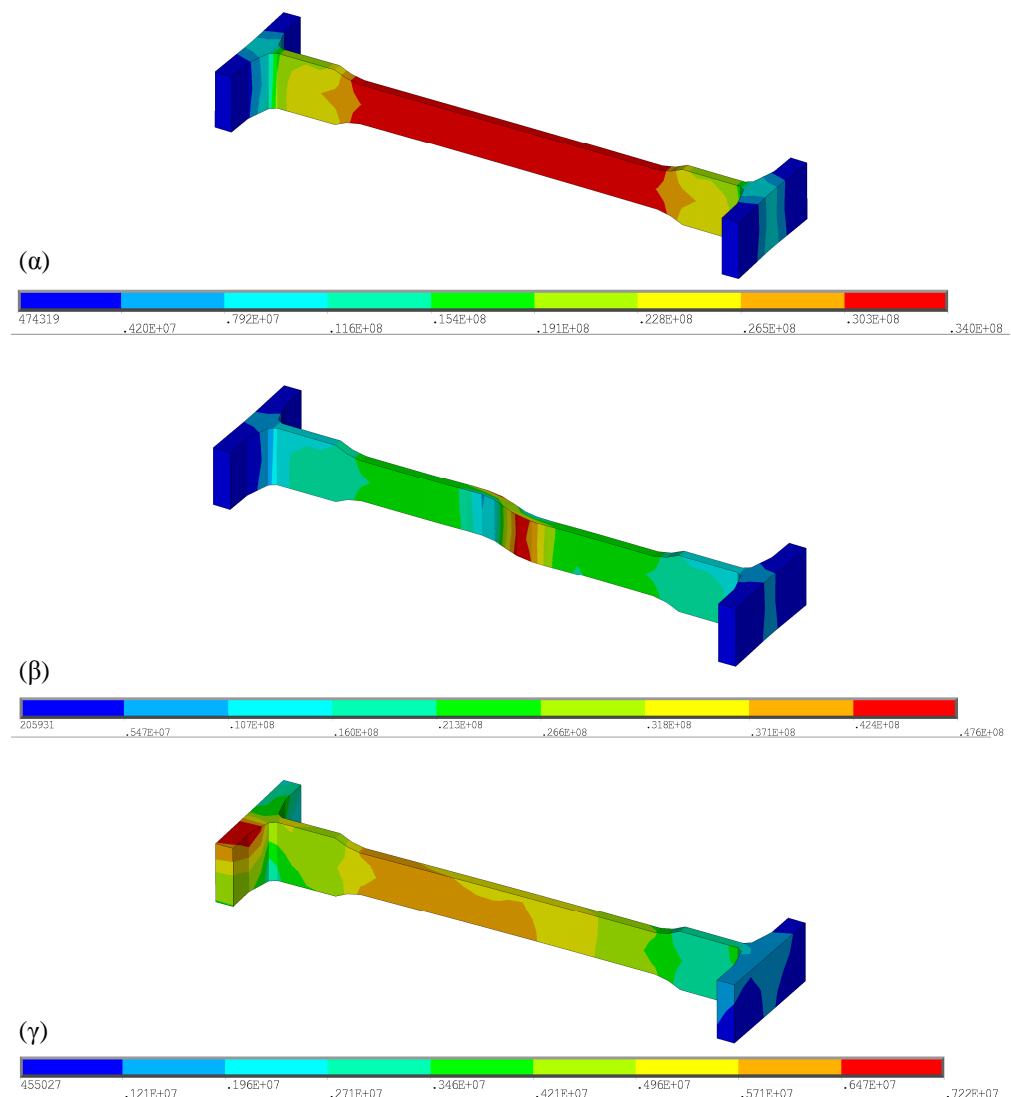
Εικ. 7.20στ) είτε στο “σταθερό” επιστύλιο (C3, Εικ. 7.20δ). Η “θλιπτική” φόρτιση (C2 και C4) προκάλεσε πιο έντονο εφελκυστικό τασικό πεδίο στην ακμή του πέλματος που βρίσκεται στον “σταθερό” όγκο προς την εξωτερική πλευρά (Εικ. 7.20γ,ε).



Εικ. 7.15 (συνέχεια): Συνοριακές συνθήκες και τρόπος φόρτισης.

Παρατηρώντας τη μεταβολή της τάσης αυτής κατά το ύψος του επιστυλίου (Εικ. 7.21) φαίνεται ότι οι “εφελκυστικές” φορτίσεις (C1 και C3) και η διατμητική καταπόνηση (C5) οδήγησαν στις ίδιες τιμές τάσης με την ίδια σχεδόν κατανομή. Η μόνη φόρτιση που προκάλεσε μη μηδενικές εφελκυστικές κύριες τάσεις στον όγκο του επιστυλίου κάτω από την εντορμία είναι η επιβολή “θλιπτικής” μετατόπισης κατά τον άξονα του επιστυλίου (C2). Μάλιστα καθ’ όλο το ύψος της εντορμίας η μέγιστη τάση ήταν “θλιπτική”. Όταν ο ίδιος τύπος φόρτισης επιβλήθηκε κάθετα στον

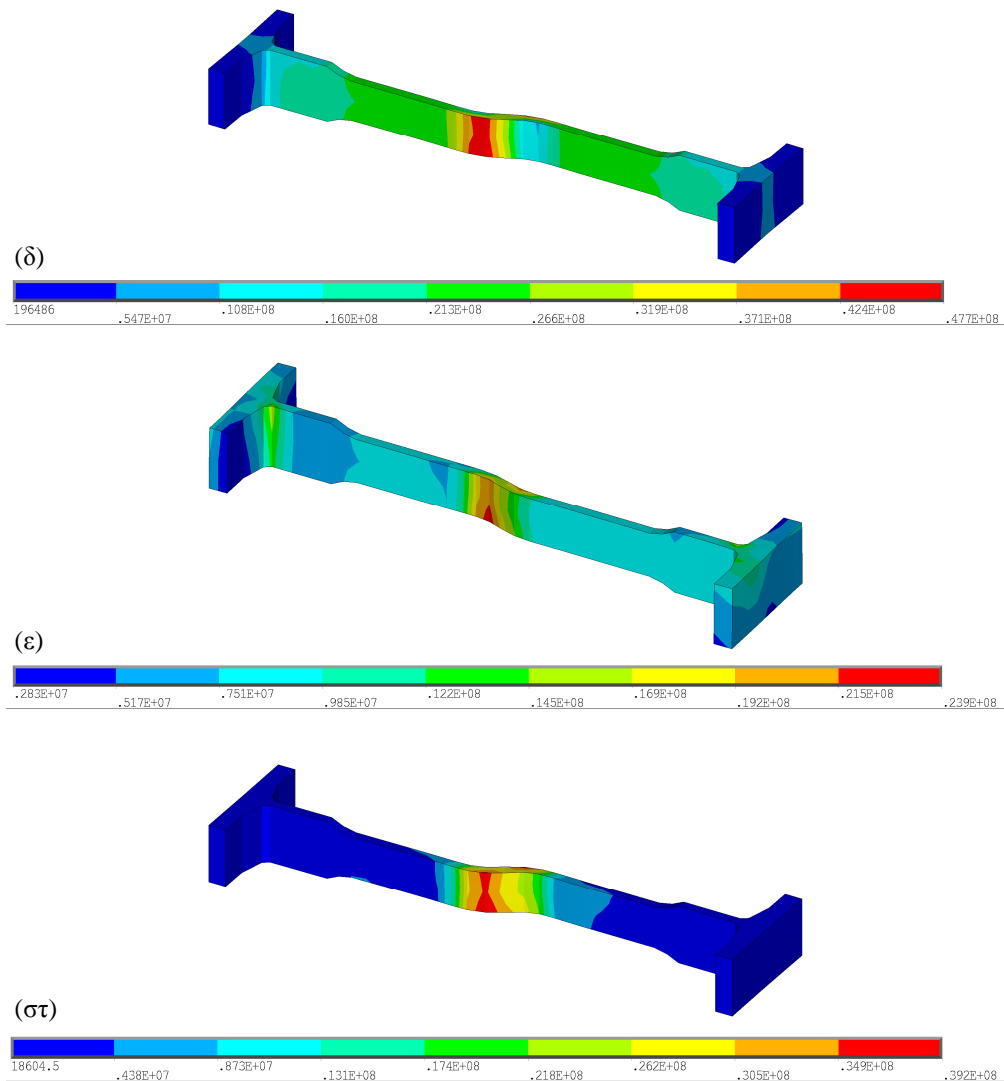
άξονα του επιστυλίου (C4) η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης αυξήθηκε και σε αντίθεση με την περίπτωση C2 καθ' όλο το ύψος της εντορμίας αναπτύχθηκε εφελκυστική τάση.



Εικ. 7.16: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο σύνδεσμο τιτανίου για την περίπτωση (α) C0, (β) C1 και (γ) C2.

Η κατάσταση είναι παρόμοια αν μελετηθεί η μέγιστη θλιπτική κύρια τάση του μαρμάρου. Το σημείο της ένωσης του κορμού της εντορμίας με το πέλιμα της καταπονείται περισσότερο στην περίπτωση C0 (Εικ. 7.22α) ενώ οι δύο “εφελκυστικές” (C1 και C3) και η διατμητική (C5) καταπόνηση του συστήματος οδήγησαν στην

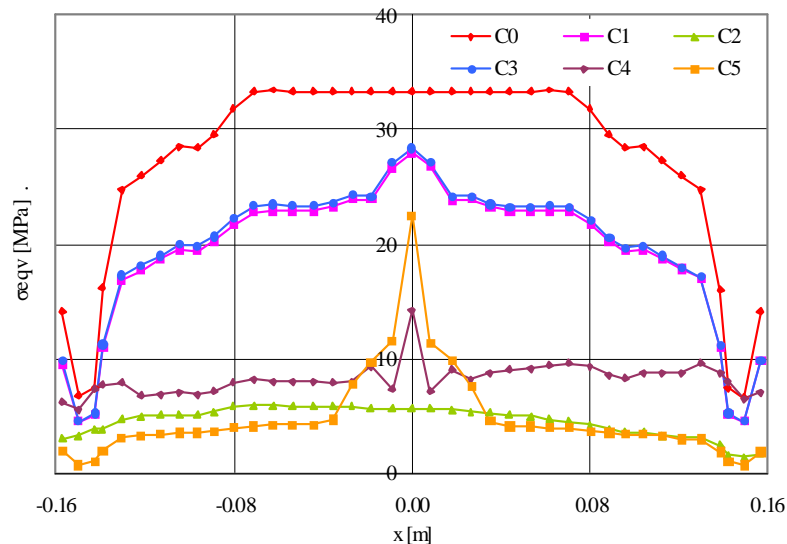
ανάπτυξη των μεγαλύτερων τάσεων στο κινούμενο (C1, Εικ. 7.22β και C5, Εικ. 7.22στ) και στο ακίνητο (C3, Εικ. 7.22δ) επιστύλιο. Οι “θλιπτικές” καταπονήσεις του συστήματος (C2 και C4) καταπόνησαν περισσότερο την ακμή του πέλματος της εντορμίας του “σταθερού” όγκου (Εικ. 7.22γ,ε).



Εικ. 7.16 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στο σύνδεσμο τιτανίου για την περίπτωση (δ) C3, (ε) C4 και (στ) C5.

Οι περιπτώσεις φόρτισης που ξεχώρισαν βάσει της μεταβολής της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης κατά το ύψος του επιστυλίου (Εικ. 7.23) είναι οι “θλιπτικές” καταπονήσεις (C2 και C4). Αντίθετα με όλες τις υπόλοιπες φορτίσεις που μελετήθη-

καν, αυτές καταπόνησαν τα επιστύλια σε όλο το ύψος τους και οδήγησαν στην ανάπτυξη των μεγαλύτερων τιμών της συγκεκριμένης τάσης. Επιπρόσθετα, όταν επιβάλλεται “θλιπτική” μετατόπιση κατά τον άξονα του επιστυλίου (C2) η μέγιστη θλιπτική κύρια τάση έλαβε τη μέγιστη τιμή της πολύ κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του επιστυλίου ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίστηκαν κοντά στη βάση της εντορμιάς.

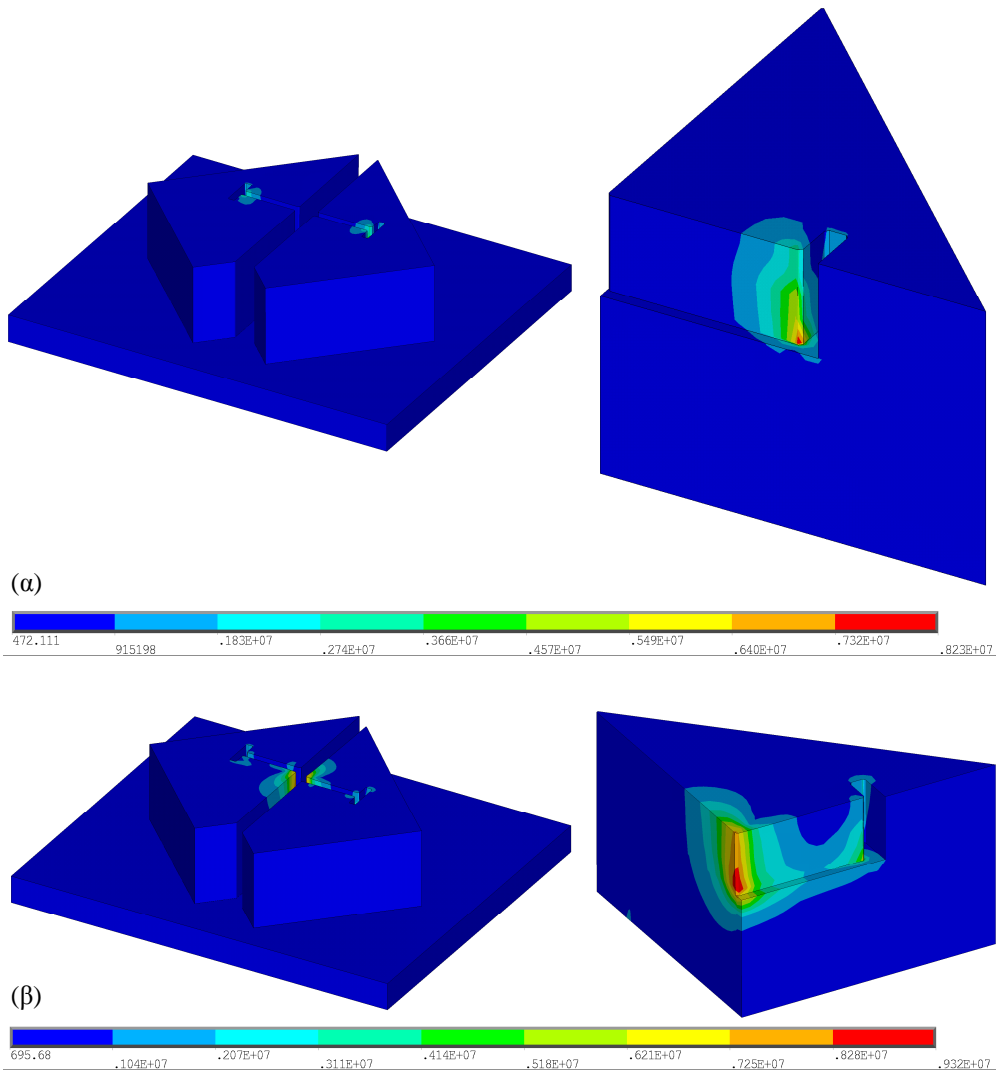


Εικ. 7.17: Η μεταβολή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του συνδέσμου τιτανίου.

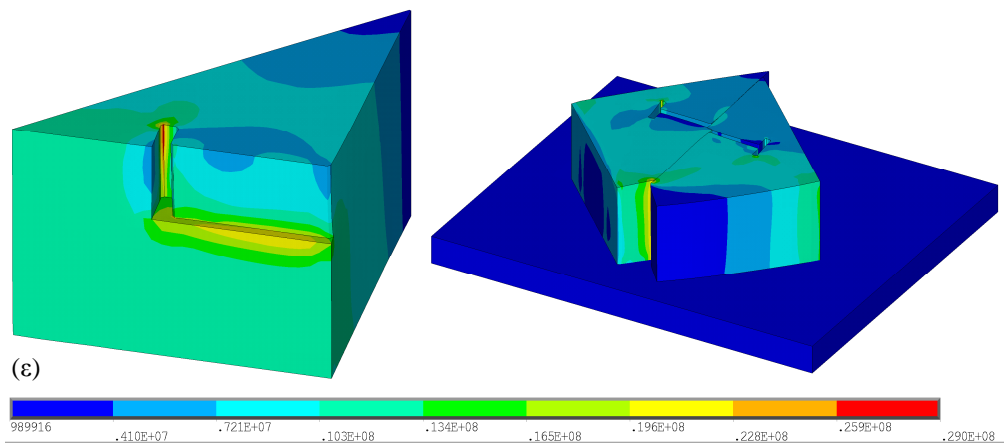
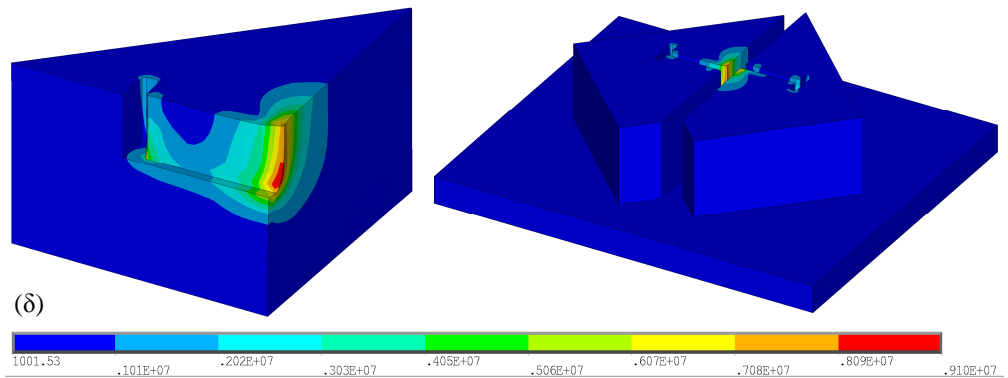
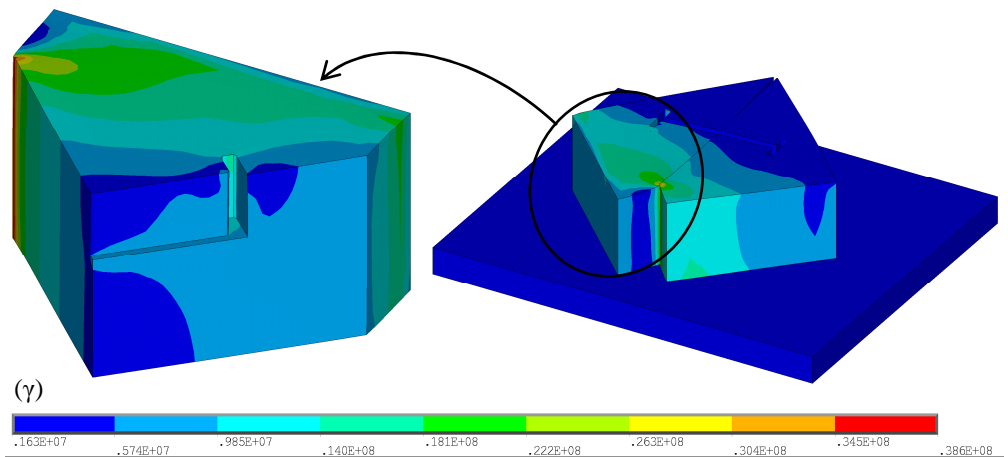
Η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση στο σύνδεσμο και στο μάρμαρο καθώς και η μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική κύρια τάση στο μάρμαρο στην περιοχή πέριξ της εντορμιάς των επιστυλίων φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

| | Μέγιστη κατά Mises τάση στο σύνδεσμο [MPa] | Μέγιστη κατά Mises τάση στο μάρμαρο [MPa] | Μέγιστη σ_1 στο μάρμαρο [MPa] | Μέγιστη σ_3 στο μάρμαρο [MPa] |
|----|--|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| C0 | 34.38 | 14.66 | 7.24 | -7.20 |
| C1 | 50.72 | 11.51 | 7.63 | -9.00 |
| C2 | 7.37 | 14.75 | 4.82 | -16.68 |
| C3 | 50.94 | 12.13 | 7.35 | -8.69 |
| C4 | 24.67 | 30.26 | 8.49 | -35.04 |
| C5 | 41.52 | 12.58 | 7.95 | -13.00 |

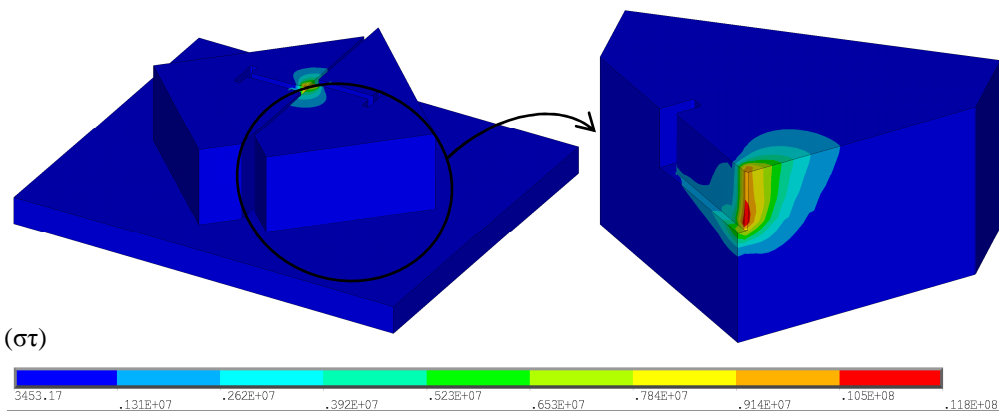
Πίνακας 7.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη σύνδεση δύο γωνιακών επιστυλίων.



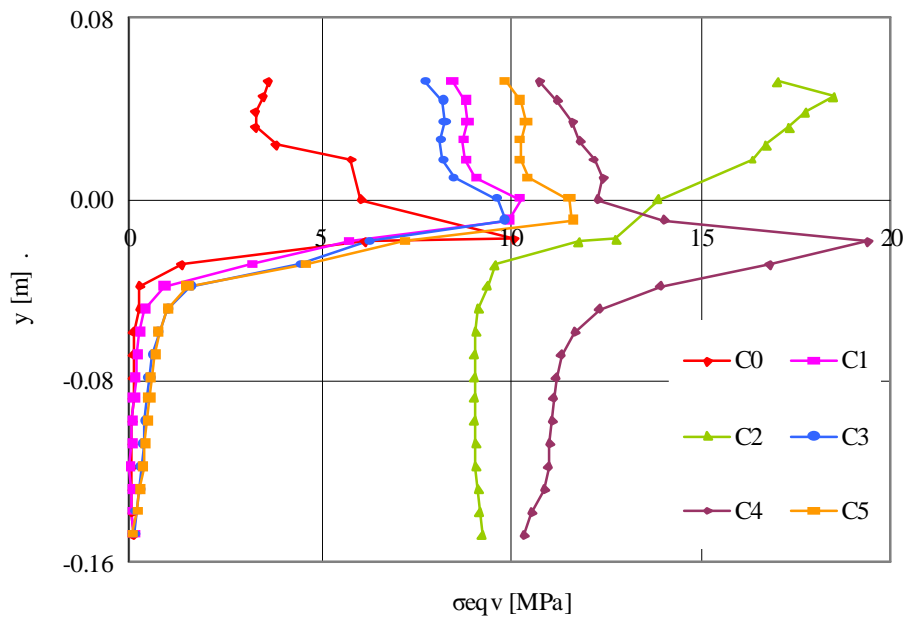
Εικ. 7.18: Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστόλια για την περίπτωση (α) C0 και (β) C1.



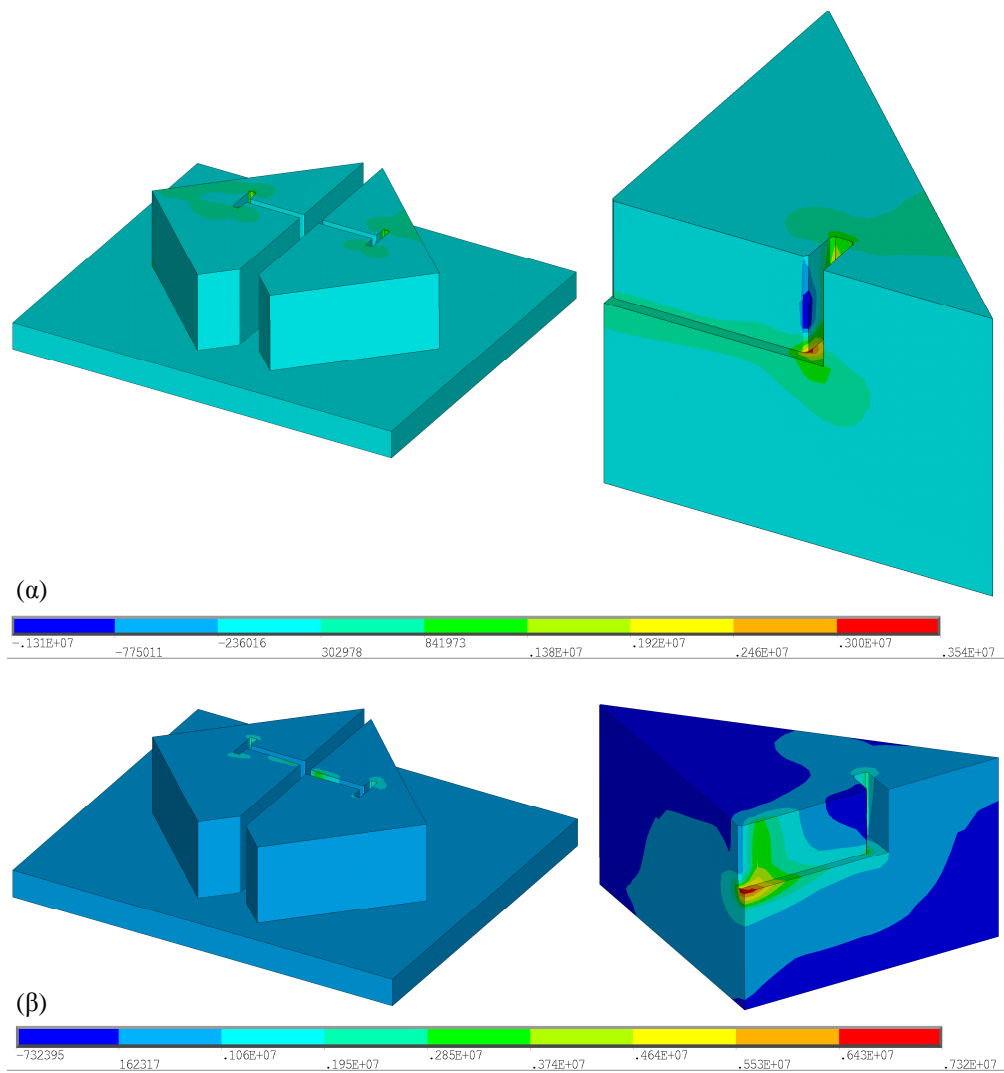
Εικ. 7.18 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (γ) C2, (δ) C3 και (ε) C4.



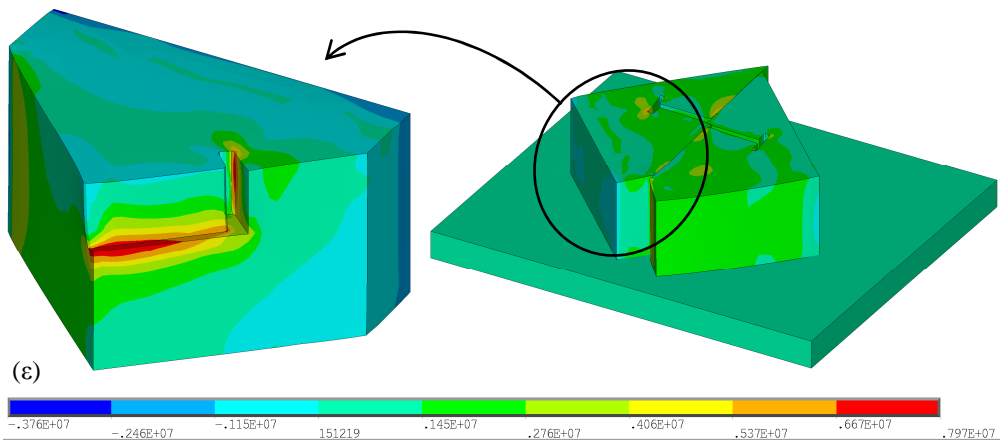
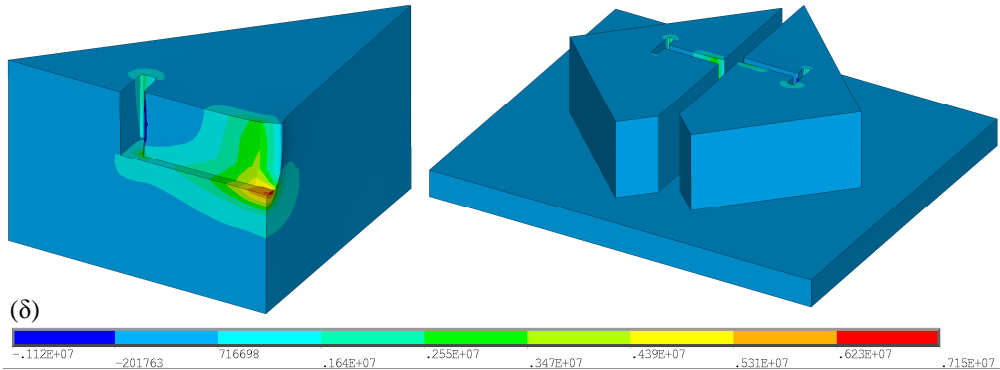
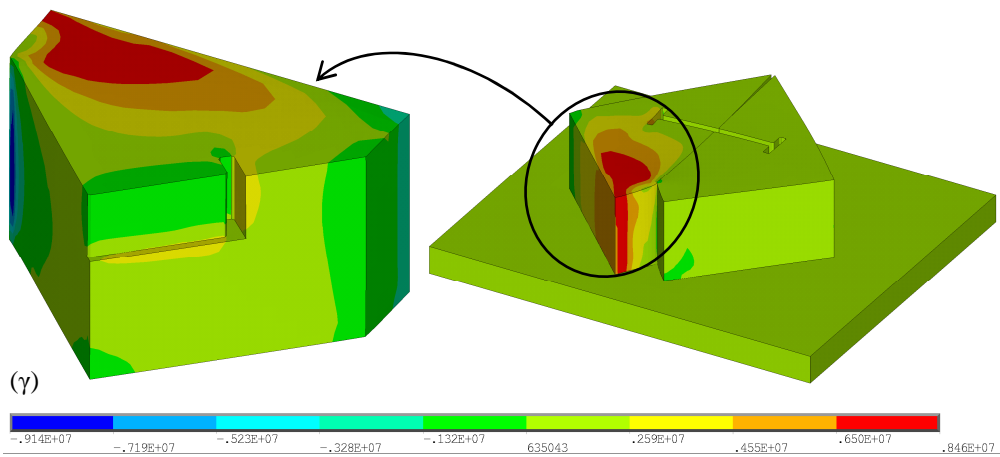
Εικ. 7.18 (συνέχεια): Η κατανομή της ισοδύναμης κατά Mises τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (στ) C5.



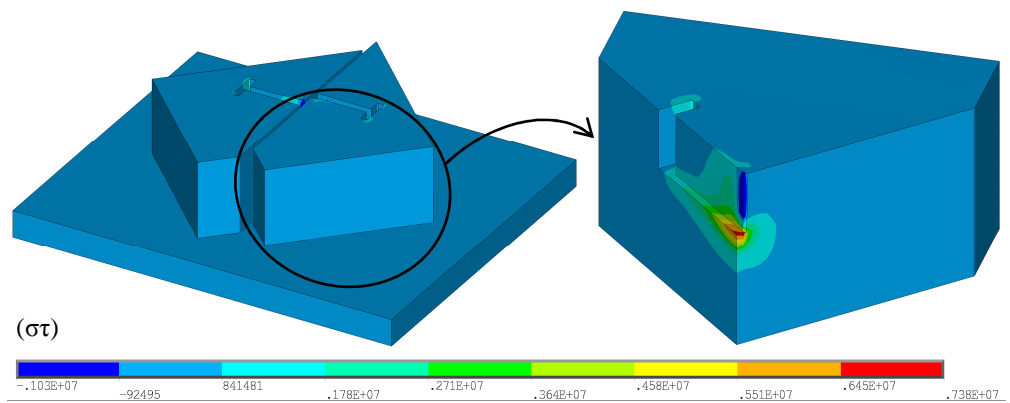
Εικ. 7.19: Η μεταβολή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστυλίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.



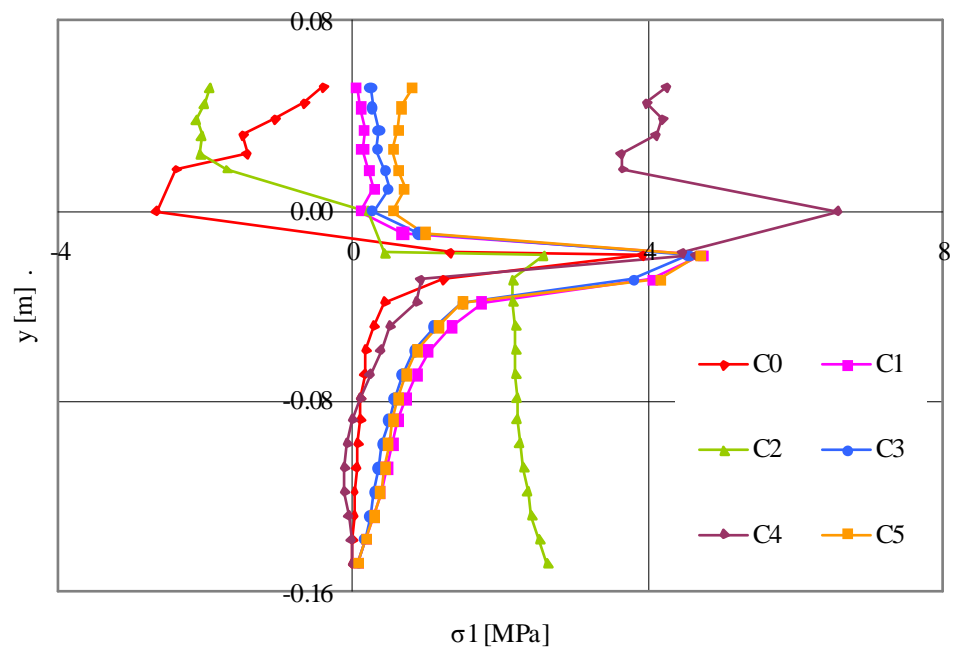
Εικ. 7.20: Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (α) C0 και (β) C1.



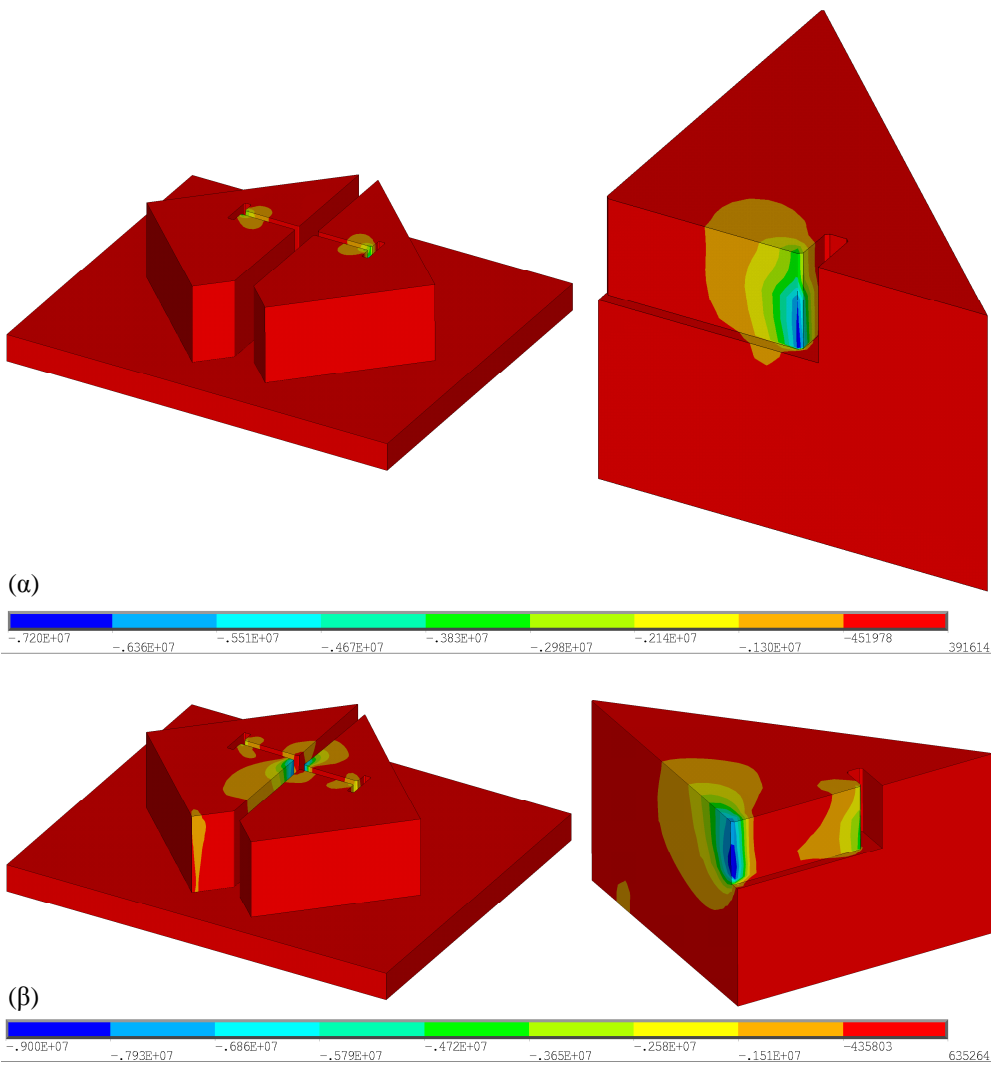
Εικ. 7.20 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστόλια για την περίπτωση (γ) C2, (δ) C3 και (ε) C4.



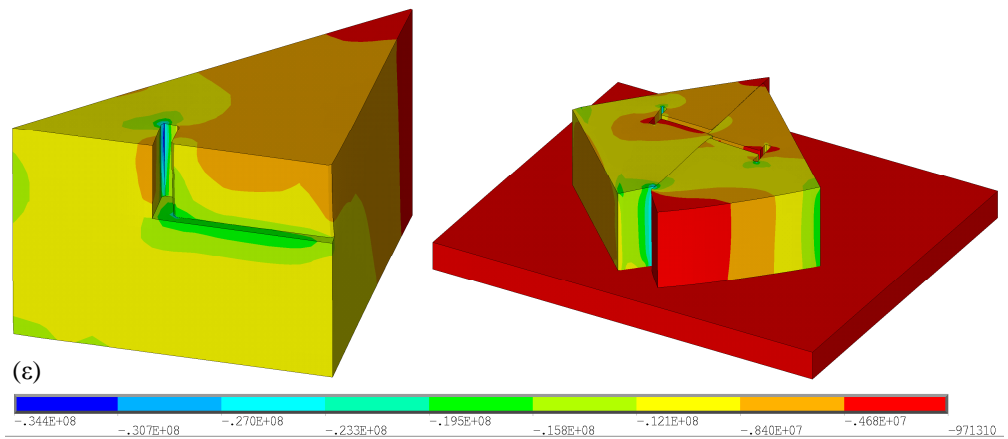
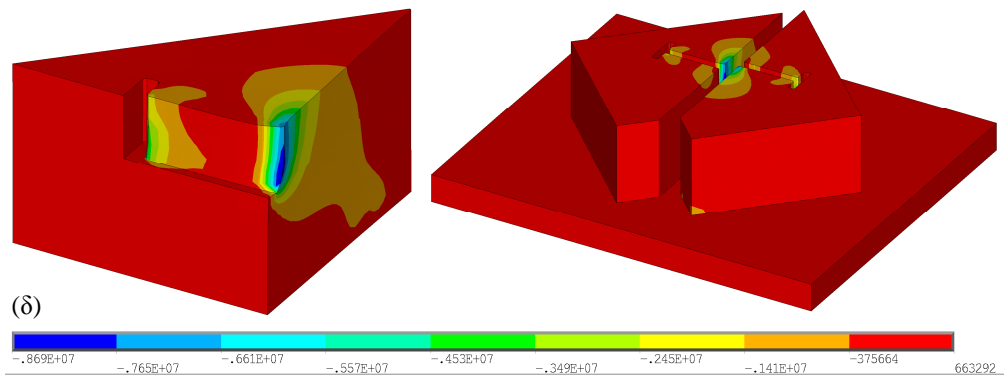
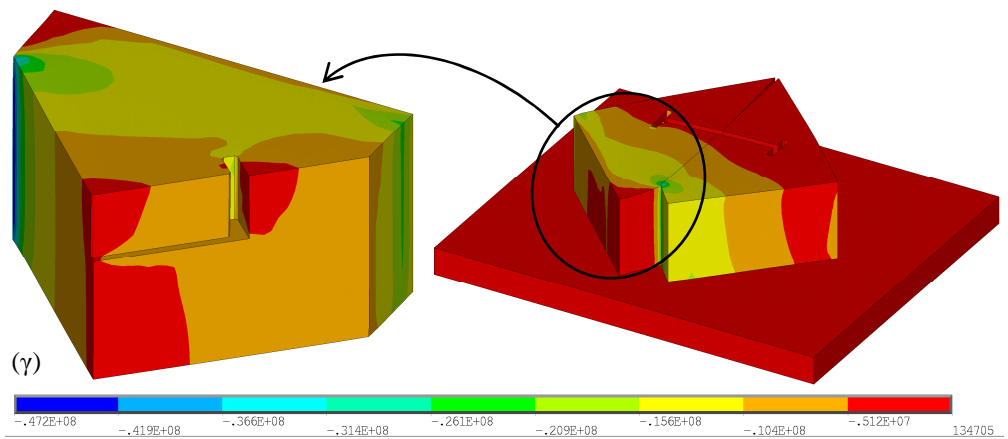
Εικ. 7.20 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στα επιστυλία για την περίπτωση (σ) C5.



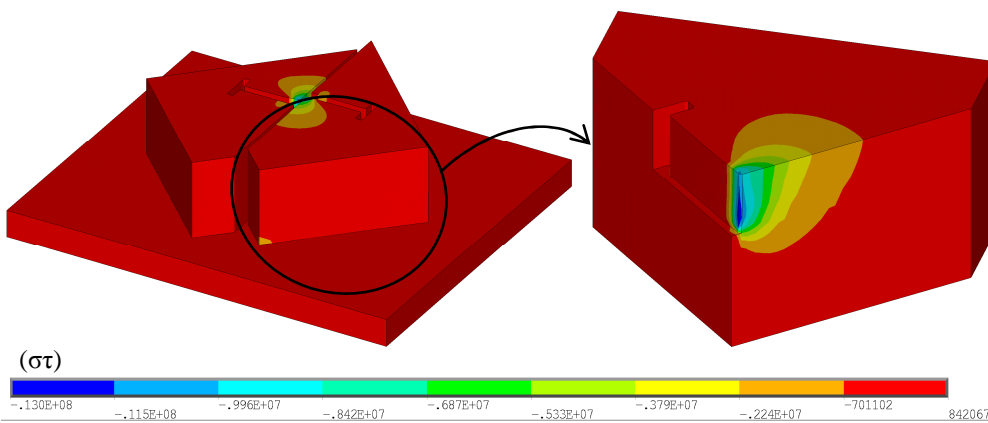
Εικ. 7.21: Η μεταβολή της μέγιστης εφελκυστικής κύριας τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστυλίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.



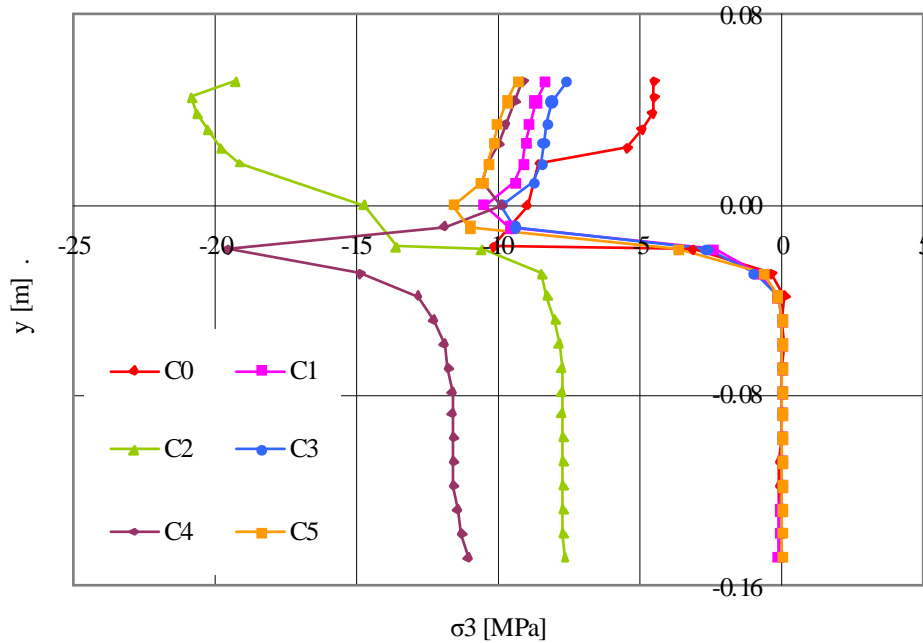
Εικ. 7.22: Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστόλια για την περίπτωση (α) C0 και (β) C1.



Εικ. 7.22 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστύλια για την περίπτωση (γ) C2, (δ) C3 και (ε) C4.



Εικ. 7.22 (συνέχεια): Η κατανομή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στα επιστόλια για την περίπτωση (ε) C4 και (στ) C5.



Εικ. 7.23: Η μεταβολή της μέγιστης θλιπτικής κύριας τάσης στο μάρμαρο κατά μήκος του ύψους των επιστολίων στη θέση που λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις πρώτες σελίδες της παρούσας διατριβής, αντί για την περιγραφή των στόχων, τέθηκε εναλλακτικά μία σειρά ερωτημάτων. Φτάνοντας στο τέλος και έχοντας πια μια ολοκληρωμένη εικόνα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε μπορούν να δοθούν οι αντίστοιχες απαντήσεις. Συγκεκριμένα:

1. *Υπάρχει συσχέτιση των νέων πειραματικών τεχνικών με τις παραδοσιακές μεθόδους αλλά και μεταξύ τους;*

Ο συνδυασμός νέων και παραδοσιακών πειραματικών τεχνικών χρησιμοποιήθηκε σε “απλά” δοκίμια (μορφής “dogbone” με δύο συμμετρικές εγκοπές και πρισματικά με μία εγκοπή στο μέσο τους) αλλά και σε σύνθετα δοκίμια (σύνδεση επιστυλίων υπό διάτμηση). Σε όλες τις περιπτώσεις βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων, σε άλλες περιπτώσεις εξαιρετική και σε άλλες ικανοποιητική. Η γενική εικόνα μπορεί να κριθεί ως άκρως ενθαρρυντική.

2. *Μπορούν οι νέες πειραματικές τεχνικές να αντιληφθούν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των δοκιμίων και κατ’ επέκταση να λειτουργήσουν ως προάγγελοι αστοχιών;*

Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από τις τεχνικές των ηλεκτρικών σημάτων και των ακουστικών εκπομπών, η αστοχία μπορεί να γίνει αντιληπτή πριν κάνει την καταστροφική εμφάνισή της. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, το θέμα της πρόβλεψης μιας αστοχίας *in situ* και σε πραγματικό χρόνο είναι εξαιρετικά κρίσιμο στην περίπτωση των μνημείων αφού επιτρέπει την έγκαιρη σωστική επέμβαση.

3. *Πως μπορεί να υλοποιηθεί ένα πείραμα καθαρής διάτμησης στην περίπτωση της σύνδεσης δύο επιστυλίων;*

Παρά τις γεωμετρικές ασυμμετρίες μιας τυπικής σύνδεσης, η υλοποίηση δοκιμών καθαρής ή “σχεδόν” καθαρής διάτμησης είναι εφικτή. Συνοπτικά, αυτά που απαιτούνται είναι:

- Η προσομοίωση του ενός εκ των δύο επιστυλίων με έναν όγκο μαρμάρου μορφής “Γ”.
- Η διάνοιξη δύο διαμπερών οπών κατά το πάχος του κινούμενου όγκου έτσι ώστε να ισαπέχουν από τη διεπιφάνεια των δύο επιστυλίων. Μέσω των οπών αυτών επιβάλλεται η φόρτιση για την ελαχιστοποίηση των καμπτικών φαινομένων.

- Επιπρόσθετα, η επιβολή της φόρτισης να γίνεται στη θέση του συνδέσμου για την ελαχιστοποίηση των στρεπτικών φαινομένων.
- Η καλή συγκράτηση του δεύτερου μαρμάρινου όγκου.

4. *Πόσο θετικά επηρεάζεται η συμπεριφορά της σύνδεσης από το ανακουφιστικό κενό;*

Η απάντηση μπορεί να συνοψιστεί σε τρεις μόνο αριθμούς: Η μέγιστη ισοδύναμη κατά Mises τάση, η μέγιστη εφελκυστική καθώς και η μέγιστη θλιπτική κύρια τάση στην περίπτωση ύπαρξης του ανακουφιστικού κενού ισούνται με μόλις 18.0%, 9.5% και 20.0% των αντίστοιχων τιμών όταν το κονίαμα πληροί την εντορμία.

5. *Αξίζει τελικά να χρησιμοποιείται στις μελέτες ένα σύνθετο αριθμητικό προσομοίωμα;*

Παρόλο που είναι απόλυτα κατανοητό το πρόβλημα του χρόνου επίλυσης που απαιτεί ένα σύνθετο αριθμητικό μοντέλο και του όγκου των αρχείων που δημιουργούνται, δεν μπορεί παρά να δοθεί θετική απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα. Οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ των αριθμητικών προσομοιωμάτων της διατριβής και των αντίστοιχων από απλοποιητικά αριθμητικά μοντέλα της βιβλιογραφίας είναι σημαντικές. Αναλογιζόμενοι επιπλέον την ιδιαιτερότητα και τη σημασία των μνημείων, η απάντηση γίνεται κατηγορηματικώς θετική.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ

Η ανά χείρας διατριβή πιστεύεται ότι προσθέτει κάποια σημαντικά στοιχεία στο πεδίο της έρευνας που έχει άμεση εφαρμογή σε έργα αναστήλωσης μνημείων. Έχει ήδη αναφερθεί ότι δεν νοείται αριθμητική μελέτη ενός προβλήματος χωρίς τη συσχέτιση με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Έτσι, η συνδυασμένη αντιμετώπιση του προβλήματος της σύνδεσης δύο επιστυλίων που παρουσιάστηκε επιτρέπει την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής μελέτης με ασφάλεια αφού τα χρησιμοποιούμενα αριθμητικά προσομοιώματα είναι επικυρωμένα.

Επιπρόσθετα, υπενθυμίζεται ότι τα αριθμητικά μοντέλα της διατριβής προσομοιώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πραγματική κατάσταση αφού λαμβάνονται υπ' όψιν τόσο όλα τα υλικά που συνυπάρχουν στη σύνδεση όσο και οι μεταξύ τους διεπιφάνειες. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται στα τρία υλικά και ιδίως στο μάρμαρο, το οποίο πρέπει να προστατευθεί. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα για τη μελέτη της εφελκυστικής συμπεριφοράς της σύνδεσης μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατασκευή ενός νέου πιο ακριβούς νομογραφήματος με άμεση εφαρμογή στη διαστασιολόγηση των συνδέσμων μορφής "Γ".

Από το πειραματικό μέρος της διατριβής προέκυψε μια νέα πειραματική διάταξη που επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμών καθαρής ή "σχεδόν" καθαρής διάτμησης, κάτι που δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία για παρόμοια δοκίμια. Επιπλέον, κατέστη σαφές ότι οι πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και επί τόπου για την παρακολούθηση των δομικών μελών των μνημείων για τον έγκαιρο εντοπισμό νέων καθώς και την εξέλιξη προϋπαρχουσών αστοχιών.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μπορεί η παρούσα διατριβή να προσφέρει τα νέα στοιχεία που προαναφέρθηκαν, ωστόσο πάντα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και νέες ιδέες. Στην αριθμητική μελέτη, μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού του συνδέσμου και του κονιάματος και να ακολουθήσει μια βελτιστοποίηση του συνδυασμού των μηχανικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται ώστε η σύνδεση να μπορεί να λειτουργήσει υπέρ της προστασίας του μαρμάρου. Εκτός φυσικά από τα υλικά, θα μπορούσαν να δοκιμαστούν σύνδεσμοι άλλου σχήματος και να μελετηθεί η επίδρασή τους στο τασικό πεδίο του μαρμάρου. Επιπλέον, η προσομοίωση της αστοχίας του μαρμάρου θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα.

Η χρήση οπτικών ινών είναι μια ιδέα που αφορά το πειραματικό κομμάτι της έρευνας για τη μέτρηση των παραμορφώσεων στο εσωτερικό των δοκιμίων. Μία πιο “ριζοσπαστική” ιδέα αποτελεί η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα στη μάζα του κονιάματος. Στόχος είναι να ελεγχθεί εάν το νέο κονίαμα μπορεί να μετατραπεί από απλό υλικό πλήρωσης που είναι σήμερα σε ένα αισθητήριο μέτρησης των παραμορφώσεων. Δοκιμές προσδιορισμού των πιθανών διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών του κονιάματος είναι απαραίτητες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Μ. Κορρές, *Ο Πρόναος του Παρθενώνα*, Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος 2^α, ΥΠΠΟ-ΕΣΜΑ, Αθήνα, 1989.
- [2] Χ. Θ. Μπούρας, *Σημειώσεις του μαθήματος «Αποκαταστάσεως των Μνημείων Ι»*, Αθήνα 1983.
- [3] Παναγιώτης Τουρκινιώτης (επιστημονική επιμέλεια και συντονισμός), *Ο Παρθενώνας και η ακτινοβολία του στα νεότερα χρόνια*, Εκδοτικός οίκος «Μέλισσα».
- [4] Χ. Μπούρας - Κ. Ζάμπας, *Τα Έργα της Επιτροπής Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως στην Αθηναϊκή Ακρόπολη*, Υπουργείο Πολιτισμού, Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων.
- [5] Μ. Κορρές - Χ. Μπούρας, *Μελέτη αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, Υπουργείο Πολιτισμού και Επιστημών, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 1983.
- [6] Κ. Ζάμπας, *Μελέτη Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, Τόμος 3β, Υπουργείο Πολιτισμού, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 1994.
- [7] Ε.-Ε. Τουμπακάρη, *Μελέτη Δομικής Αποκαταστάσεως Ορθοστατών Βορείου Τοίχου Σηκού Παρθενώνος*, Τόμος 1: Τεκμηρίωση Φέροντος Οργανισμού, Ανάλυση & Ερμηνεία Δομικής Παθολογίας, Μέθοδοι Ελέγχου-Σχεδιασμός Επεμβάσεων, Συσχετισμός Δομικής Παθολογίας με τη Δράση των Συνδετήριων Στοιχείων, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Τεχνικό Γραφείο Έργου Αποκαταστάσεως Παρθενώνος, Δεκέμβριος 2004/Ιούλιος 2006.
- [8] Α. Βρούβα, *Διερεύνηση Συνδεσμολογίας Επιστυλίων Βόρειας Κιονοστοιχίας Παρθενώνα*, Υπουργείο Πολιτισμού, Επιτροπή Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, 2007.
- [9] Ι. Στεφάνου και Α. Βρούβα, *Πρόταση Νέας Πειραματικής Διερεύνησης για τη Δομική Αποκατάσταση των Μελών του Παρθενώνα*, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, 2009.
- [10] *Ενημερωτικές ειδήσεις από την αναστήλωση των μνημείων της Ακρόπολης*, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Αθήνα 6 Ιουλίου 2006.
- [11] *Ημερίδα για τα αναστηλωτικά έργα στην Αθηναϊκή Ακρόπολη*, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπηρεσία Συντηρήσεως Μνημείων Ακροπόλεως, Θεσσαλονίκη 16 Μαρτίου 2007.
- [12] Κ. Ζάμπας, *Δομικά Προβλήματα της Αποκαταστάσεως του Παρθενώνος*, Μελέτη Αποκατάστασης του Παρθενώνος 2α, ΥΠΠΟ-ΕΣΜΑ, 162-180, Αθήνα, 1989.

- [13] Ε.-Ε. Τουμπακάρη, *Δομική Παθολογία των Κινοκράνων & του Θριγκού του Οπισθονάου του Παρθενώνα και ο Ρόλος των Συνδετηρίων Στοιχείων*, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου 2008, Αθήνα, 2008.
- [14] Ε.-Ε. Toumbakari, *Analysis and Interpretation of the Structural Pathology of the Northern Wall of the Cella of the Athens Parthenon & Implications for the Design of the Anastylis*, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστήλωσεων, Εταιρεία Έρευνας και Προώθησης της Επιστημονικής Αναστήλωσης των Μνημείων, 1-3 Νοεμβρίου 2012, Αθήνα, 2012.
- [15] K. A. Papadopoulos, *The Restoration Study of the Connections Between the Stone Blocks in the Steps of the Temple of Apollo Epikourios*, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 2006.
- [16] L. Pavlovčič, P. Kozlevčar, F. Sinur and D. Beg, *Architrave Connection Tests*, Report in the frame of PROHITECH, 2008.
- [17] L. Pavlovčič, P. Kozlevčar, F. Sinur and D. Beg, *Analysis of Architrave Connection*, PROHITECH, 2009.
- [18] M. A. Sutton, W. J. Walters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeill, *Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method*, Image and Vision Computing, Vol. 1 (3), Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1983.
- [19] T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton and W. H. Peters, *Application of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics*, Experimental Mechanics, Vol. 25, pp. 232-244, 1985.
- [20] A. Mendelson, *Plasticity: Theory and Application*, Krieger Publishing Company Malabar, Florida, USA.
- [21] D. S. Dawicke and M. A. Sutton, *CTOA and Crack Tunneling Measurements in Thin Sheet 2043-T3 Aluminum Alloy*, Experimental Mechanics, Vol. 34, p. 357, 1994.
- [22] G. Han, M. A. Sutton and Y. J. Chao, *A Study of Stable Crack Growth in Thin SEC Specimens of 304 Stainless Steel*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 52 (525), 1995.
- [23] S. R. McNeill and M. Paquette, *Initial Studies of Stereo Vision for Use in 3-D Deformation Measurements*, unpublished internal report, University of South Carolina, SC, 1988.
- [24] . Skar złyński, E. Syroka and J. Tejchman, *Measurements and Calculations of the Width of the Fracture Process Zones on the Surface of Notched Concrete Beams*, Strain, Vol. 47, e319-e332, 2011.
- [25] Z. M. Wua, H. Rong, J. J. Zheng, F. Xu and W. Dong, *An Experimental Investigation on the FPZ Properties in Concrete Using Digital Image Correlation Technique*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, pp. 2978-2990, 2011.

- [26] L. C. S. Nunes and J. M. L. Reis, *Estimation of Crack-tip-opening Displacement and Crack Extension of Glass Fiber Reinforced Polymer Mortars Using Digital Image Correlation Method*, Materials and Design, Vol. 33, pp. 248-253, 2012.
- [27] Q. Lin and J. F. Labuz, *Fracture of Sandstone Characterized by Digital Image Correlation*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 60, pp. 235-245, 2013.
- [28] A. Stirling, D. J. Simpson and C. T. Davie, *The Application of Digital Image Correlation to Brazilian Testing of Sandstone*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 60, pp. 1-11, 2013.
- [29] Μ. Κορρές, *Από το λατομείο στον Παρθενώνα*, Μέλισσα, 2000.
- [30] R. K. Miller and P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook*, ASNT 1987.
- [31] ASTM, *Standard Definition of Terms Relating to Acoustic Emission*, E610 Philadelphia, 1982.
- [32] F. Fahy, *Sound and Structural Vibration Radiation, Transmission and Response*, Academic Press INC. London, 1985.
- [33] P. P. Gillis and M. A. Hamstad, *Some Fundamental Aspects of the Theory of Acoustic Emission*, Elsevier, 1973.
- [34] A. G. Evans, *Acoustic Emission Sources in Brittle Solids - Fundamental of Acoustic Emission*, 1978.
- [35] A. Rotem and E. Altus, *Fracture Mode and Acoustic Emission of Composite Materials*, Testing and Evaluation, Vol. 1, pp. 33-40, 1979.
- [36] *Acoustic Emission Testing, Basics for Research - Applications in Civil Engineering*, C. U. Grosse and M. Ohtsu (Eds.), Springer, 2008.
- [37] L. Obert and W. Duvall, *Use of Subaudible Noise for Prediction of Rock Bursts - Part II*, U.S. Bureau of Mines, RI 3654, 1942.
- [38] J. Kaiser, *Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch*, PhD Thesis, Technische Hochschule, Munich, 1950.
- [39] Α. Ι. Σοφιανός, *Μη Καταστροφικές Δοκιμές*, Σημειώσεις του μαθήματος “Προχωρημένη Μηχανική των πετρωμάτων” για το ΔΠΜΣ ΕΜΠ “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων”.
- [40] D. Lockner, *The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 30 (7), pp. 883-899, 1993.
- [41] L. M. Suarez del Rio and J. Norin, *Bending tests and acoustic emission for heated Avesta-gneiss*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22 (1), pp. 47-50, 1985.
- [42] T. Hashida and H. Takahashi, *Significance of AE crack monitoring in fracture toughness evaluation and non-linear rock fracture mechanics*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 30 (1), pp. 47-60, 1993.

- [43] J. F. Labuz and L. Biolzi, *Characteristic strength of quasi-brittle materials*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 35 (31-32), pp. 4191-4203, 1998.
- [44] Z. P. Ba ant, Z. P. and G. Pijaudier-Cabot, *Measurement of characteristic length of nonlocal continuum*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE115, pp. 755-767, 1989.
- [45] J. C. Anderson and K. D. Leaver, *Materials Science*, Nelson, 1969.
- [46] Β. Θ. Ζασπάλης, Σημειώσεις “Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών Γ” για το “Τμήμα Χημικών Μηχανικών” του ΑΠΘ.
- [47] Π. Ματζινός, Σημειώσεις “Τεχνολογίας Υλικών Οχημάτων”, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης.
- [48] F. Vallianatos and A. Tzani, *A Model for the Generation of Precursory Electric and Magnetic Fields Associated with the Deformation Rate of the Earthquake Focus*, in Hayakawa (Ed.), Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes, Terra Scientific Publishing Co., Tokyo, pp. 287-305, 1999.
- [49] F. Vallianatos and A. Tzani, *Electric Current Generation Associated with the Deformation Rate of a Solid: Preseismic and coseismic signals*, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 23, pp. 933-938, 1998.
- [50] J. Enomoto, and H. Hashimoto, *Emission of Charged Particles from Indentation Fracture of Rocks*”, Nature, Vol. 346, pp. 641-643, 1990.
- [51] D. Eccles, P. R. Sammonds and O. C. Clint, *Laboratory Studies of Electrical Potential During Rock Failure*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 42, pp. 933-949, 2005.
- [52] F. Vallianatos, D. Triantis, A. Tzani, C. Anastasiadis, and I. Stavrakas, *Electric Earthquake Precursors: from Laboratory Results to Field Observations*, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 29, pp. 339-351, 2004.
- [53] L. Slifkin, *Seismic Electric Signals from Displacement of Charged Dislocations*, Tectonophysics, Vol. 224, pp. 149-152, 1993.
- [54] I. Stavrakas, D. Triantis, Z. Agioutantis, S. Maurigiannakis, V. Saltas, F. Vallianatos and M. Clarke, *Pressure Stimulated Currents in Rocks and their Correlation with Mechanical Properties*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 4, pp. 563-567, 2004.
- [55] I. Stavrakas, C. Anastasiadis, D. Triantis and F. Vallianatos, *Piezo Stimulated Currents in Marble Samples: Precursory and Concurrent – with – Failure Signals*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 3, pp. 243-247, 2003.
- [56] D. Triantis, I. Stavrakas, C. Anastasiadis, A. Kyriazopoulos and F. Vallianatos, *An Analysis of Pressure Stimulated Currents (PSC) in Marble Samples under Mechanical Stress*, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 31, pp. 234-239, 2006.

- [57] C. Anastasiadis, I. Stavrakas, D. Triantis and F. Vallianatos, *Correlation of Pressure Stimulated Currents in Rocks with the Damage Variable*, Annals of Geophysics, Vol. 50, pp. 1-6, 2007.
- [58] C. Anastasiadis, D. Triantis and C. A. Hogarth, *Comments on the Phenomena Underlying Pressure Stimulated Currents (PSC) in Dielectric Rock Materials*, Journal of Materials Science, Vol. 42, pp. 2538-2542, 2007.
- [59] D. Triantis, C. Anastasiadis and I. Stavrakas, *The Correlation of Electrical Charge with Strain on Stressed Rock Samples*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 8, pp. 1243-1248, 2008.
- [60] D. Triantis, C. Anastasiadis, F. Vallianatos, P. Kyriazis and G. Nover, *Electric Signal Emissions During Repeated Abrupt Uniaxial Compressional Stress Steps in Amphibolite from KTB Drilling*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 7, pp. 149-154, 2007.
- [61] A. Kyriazopoulos, C. Anastasiadis, D. Triantis and J. C. Brown, *Non-Destructive Evaluation of Cement-Based Materials from Pressure-Stimulated Electrical Emission - Preliminary Results*, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 1980-1990, 2011.
- [62] D. Triantis, I. Stavrakas, A. Kyriazopoulos, G. Hloupis and Z. Agioutantis, *Pressure Stimulated Electrical Emissions from Cement Mortar Used as Failure Predictors*, International Journal of Fracture, Vol. 175, pp. 53-61, 2012.
- [63] C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis and F. Vallianatos, *Electrical and Acoustic Emissions in Cement Mortar Beams Subjected to Mechanical Loading up to Fracture*, Engineering Failure Analysis, Vol. 35, pp. 454-461, 2013.
- [64] P. Kyriazis, C. Anastasiadis, I. Stavrakas, D. Triantis and J. Stonham, *Modelling of Electric Signals Stimulated by Bending of Rock Beams*, International Journal of Microstructure and Materials Properties, Vol. 4, pp. 5-18, 2009.
- [65] A. V. Byakov, S. V. Panin, V. V. Grenke, I. V. Shakirov and S. A. Yussif, *Study of Localized Strain at micro-, meso- and macrolevels in AA2024 Alloy by Data of Acoustic Emission, Surface Strain Mapping and Strain Gauging*, Procedia Engineering, Vol. 1, pp. 71-71, 2009.
- [66] D. G. Aggelis, S. Verbruggen, E. Tsangouri, T. Tysmans and D. Van Hemelrijck, *Characterization of Mechanical Performance of Concrete Beams with External Reinforcement by Acoustic Emission and Digital Image Correlation*, Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1037-1045, 2013.
- [67] S. Rouchier, G. Foray, N. Godin, M. Woloszyn and J.-J. Roux, *Damage Monitoring in Fibre Reinforced Mortar by Combined Digital Image Correlation and Acoustic Emission*, Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 371-380, 2013.
- [68] C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, A. Kyriazopoulos and D. Triantis, *Acoustic Emission and Electrical Signal Recordings during Three Point*

- Bending Tests on Cement Mortar Samples*, 5th International Conference on NDT of HSNT- IC MINDT 2013, 20-22 May 2013, Athens, Greece, 2013.
- [69] C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, A. Kyriazopoulos, D. Triantis, C. Anastasiadis and J. Stonham, *Monitoring Acoustic Emissions and Electrical Signals During Three-Point Bending Tests Performed on Cement Mortar Specimens*, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8, J. G. M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R. C. Yu and X. X. Zhang (Eds), 11-14 March 2013, Toledo, Spain, 2013.
- [70] I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis and F. Vallianatos, *Concurrent Recordings of Electrical Current Emissions and Acoustic Emissions Detected from Marble Specimens Subjected to Mechanical Stress up to Fracture*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-8194, 2012, EGU General Assembly 2012.
- [71] D. Triantis, I. Stavrakas, G. Hloupis, K. Ninos and F. Vallianatos, *Acoustic and Electrical Signal Emission Recordings when Marble Specimens are Subjected to Compressional Mechanical Stress*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-11507, 2013, EGU General Assembly 2013.
- [72] Θ. Ν. Σκουλικίδης, *Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2000.
- [73] Β. Ν. Λαμπρόπουλος, *Διάβρωση και Συντήρηση της Πέτρας*, Αθήνα.
- [74] Ι. Βαρδουλάκης, Σ. Κουρκουλής, Γ. Εξαδάκτυλος και Α. Ροζάκης, *Μηχανικές Ιδιότητες και Συμβατότητα Φυσικών Δομικών Λίθων στα Αρχαία Μνημεία: το Διονυσιακό Μάρμαρο*, Διεπιστημονική Ημερίδα: «Ο δομικός λίθος στα μνημεία», ICOMOS-ΙΓΜΕ, Αθήνα, 9 Νοεμβρίου 2001.
- [75] Κ. Κονοφάγος, Γ. Παπαδημητρίου, *Οι χαλύβδινοι σύνδεσμοι του Ερεχθείου κατασκευάστηκαν με τεχνική που ξαναβρίσκεται στο Μεσαίωνα στα “Δαμασκηνά Σπαθιά”*, Πρακτικά της Ακαδημίας Αθηνών, Τ. 56, σσ. 173-190, 1981.
- [76] C. J. Livadefs, *The structural Iron of the Parthenon*, Journal of the Iron and Steel Institute, Vol. 182, pp. 49-66, 1956.
- [77] G. J. Varoufakis, *The iron clamps and dowels from the Parthenon and Erechthion*, The Journal of the Historical Metallurgy Society, Vol. 26, pp. 1-18, 1992.
- [78] C. Zambas, *Structural repairs to the monuments of the Acropolis-the Parthenon*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering, V. 92, November 1992, pp. 166-176.
- [79] I. Vardoulakis and S. K. Kourkoulis, *Mechanical Properties of Dionysos Marble*, Final Report: Environment Project EV5V-CT93-0300: Monuments under Seismic Action, National Technical University of Athens, Greece. 1997.
- [80] S. G. Lekhnitskii, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Mir, Moscow, 1977.
- [81] I. Vardoulakis and G. Exadaktylos, *Final Report, Contract No: SMT-CT96-2130. Proposal No: Pl 953102*. Brussels: EU DG-XII, 1998.

- [82] G. Exadaktylos, I. Vardoulakis and S. K. Kourkoulis, *Influence of Nonlinearity and Double Elasticity on Flexure of Rock Beams - I. Technical Theory*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 4091-4117, 2001.
- [83] G. Exadaktylos, I. Vardoulakis and S. K. Kourkoulis, *Influence of Nonlinearity and Double Elasticity on Flexure of Rock Beams - II. Characterization of Dionysos Marble*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 4119-4145, 2001.
- [84] I. Vardoulakis, G. Exadaktylos and S. K. Kourkoulis, *Bending on Marble with Intrinsic Length scales; Experiment and Modeling*, 2nd European Mechanics of Materials Conference, Magdeburg, Germany, A. Bertam, S. Forest and F. Sidoroff (Eds.), pp. 401-408, 1997.
- [85] S. K. Kourkoulis, M. C. Stavropoulou, I. Vardoulakis and G. E. Exadaktylos, *Local Strains due to Punch Effect in Three Point Bending of Marble Beams*, 9th International Congress on Rock Mechanics, G. Vouille and P. Berest (Eds.), Paris, France, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 1, pp. 623-626, 1999.
- [86] I. Vayas, A. Marinelli, S. K. Kourkoulis and S.-A. Papanicolopoulos, *Investigating the Fracture Behavior of Dionysos Marble: An Experimental Study*, Protection of Historical Buildings, PROHITECH09, Mazzolani (Ed.), pp. 1699-1704, Taylor & Francis Group, London, 2009.
- [87] A. Marinelli, S.-A. Papanicolopoulos, S. Kourkoulis and I. Vayas, *The Pull-out Problem in Restoring Marble Fragments: A Design Criterion Based on Experimental Results*, Strain, Vol. 45 (5), pp. 433-444, 2009.
- [88] I. Ray, J. F. Davalos and S. Luo, *Interface Evaluations of Overlay-Concrete Bilayer Composites by a Direct Shear Test Method*, Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp. 339-347, 2005.
- [89] R. C. K. Wong, S. K.Y. Ma, R. H. C. Wong and K. T. Chau, *Shear Strength Components of Concrete under Direct Shearing*, Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 1248-1256, 2007.
- [90] H. Q. Zhang, Z. Y. Zhao, C. A. Tang and L. Song, *Numerical Study of Shear Behaviour of Intermittent Rock Joints with Different Geometrical Parameters*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, pp. 802-816, 2006.
- [91] Ε. Δ. Πάσιου, *Πειραματική και Αριθμητική Μελέτη Συνδέσμων Τιτανίου μορφής Διπλού "T" και του περιβάλλοντος μαρμάρου υπό Διάτμηση*, Master Thesis στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ του ΕΜΠ "Προστασία Μνημείων: Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης", 2008.
- [92] Ε. Ε. Τουμπακάρη, *Μελέτη Φέροντος Οργανισμού και Απόδοση Έργου Δομικής Αποκατάστασης Οπισθονάου (6 τόμοι)*, ΥΣΜΑ, Υπουργείο Πολιτισμού, 2007.

Αριθ. 86
Εισπ. 86
Δεσμ. 10

ΕΙΣΙΤΗΡΙΟΝ

νυκτερινῆς ἐπισκέψεως τῆς Ἀρχιεπισκοπῆς
κατὰ Πανοβλήθιον

Δραχ. δέκα 10