

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ  
ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**



**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ – ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Δρ. Κακαβάς Παναγιώτης**

**Καθηγητής Τ.Ε.Ι.**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ:**

**Δήμητρα Τσιλιμέκη**

**ΠΑΤΡΑ, 2016**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την Πτυχιακή Εργασία μου αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Εισηγητή και Επιβλέπων καθηγητή της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, τον Δρ. Κακαβά Παναγιώτη, Καθηγητή του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, για τη συνεχή καθοδήγησή του και την υπομονή του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου συνολικά για την ξεχωριστή συμβολή του καθενός στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι παρουσίαση και η ανάλυση της αστοχίας (θραύσης) των βασικών υλικών που χρησιμοποιούμε στις κατασκευές μας ως Πολιτικοί Μηχανικοί.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές πληροφορίες και μια ιστορική αναδρομή εξέλιξης των βασικών κατασκευαστικών υλικών.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύω ξεχωριστά το κάθε υλικό, σκυρόδεμα, ξύλο, γυαλί και τοιχοποιία. Παρουσιάζω πληροφορίες για την εφαρμογή τους, τις αντοχές τους σε διάφορες συνθήκες και άλλα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα κατασκευών και καταπόνησης των προαναφερομένων υλικών μέσα όμως από διάφορα ηλεκτρονικά προγράμματα που κυκλοφορούν στην αγορά και χρησιμοποιούνται από πολλούς Πολιτικούς Μηχανικούς.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε.

## **Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας:**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κείμενου, έχω δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

**Η σπουδάστρια:**

**Δήμητρα Τσιλιμέκη**

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	7
1.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	7
1.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ .....	9
1.3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ .....	11
1.4 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ .....	12
1.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΔΡΟΜΗ .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	27
2.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	27
2.2 ΞΥΛΟ .....	35
2.3 ΓΥΑΛΙ .....	54
2.4 ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ .....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΜΠΟΡΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ .....	95
3.1 FRAME 2D EXPRESS LITE .....	95
3.2 ΒΕΤΟΝ EXPRESS .....	98
3.3 WOOD EXPRESS .....	102
3.4 FEDRA .....	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	119

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

## 1.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών<sup>1</sup> ή Μηχανική Μεταλλουργία (σε αντιπαράσταση με την Φυσική Μεταλλουργία) είναι ο τομέας εκείνος της μεταλλουργίας που ασχολείται, κατά κύριο λόγο, με την απόκριση των μεταλλικών υλικών σε εξωτερικές δυνάμεις και, γενικότερα, σε μηχανικά φορτία. Τα φορτία αυτά μπορεί να καταπονούν ένα μέταλλο κατά τη χρήση του σαν δομικό στοιχείο μίας κατασκευής ή κατά τη λειτουργία του σαν εξάρτημα μιας μηχανής, κ.τ.λ. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απολύτως απαραίτητο για τον μηχανικό να γνωρίζει κάποιες χαρακτηριστικές οριακές τιμές, ή “αντοχές”, του μετάλλου, οι οποίες όσο δεν ξεπερνιούνται κατά τη λειτουργία εξασφαλίζουν ότι το δομικό στοιχείο ή εξάρτημα δεν θα υποστεί *αστοχία*. Με τον όρο “αστοχία” (failure) περιγράφεται η αδυναμία ενός δομικού στοιχείου ή στοιχείου μηχανών να συνεχίσει να επιτελεί ομαλά, αποτελεσματικά και με ασφάλεια την λειτουργία του. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να αστοχήσει ένα δομικό στοιχείο ποικίλλουν και θα αναφερθούν λεπτομερέστερα σε επόμενη παράγραφο.

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών δεν είναι ένα αντικείμενο που μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί μεμονωμένα. Πρόκειται για έναν συνδυασμό γνώσεων και μεθόδων από διαφορετικούς κλάδους της επιστήμης του μηχανικού, όπως για παράδειγμα η αντοχή υλικών, η τεχνολογία υλικών και η φυσική μεταλλουργία, καθώς και για ένα συνδυασμό διαφορετικών προσεγγίσεων στο θέμα της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών κάτω από την επίδραση δυνάμεων. Από την μία πλευρά υπάρχει η προσέγγιση της κλασσικής αντοχής των υλικών, η οποία βρίσκει εφαρμογή στις *θεωρίες ελαστικότητας* και *πλαστικότητας*, όπου το μέταλλο θεωρείται σαν ένα ομογενές, συνεχές μέσο, του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια με τη χρήση μερικών μόνο σταθερών του υλικού. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί την επιστημονική βάση για τον υπολογισμό, την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων κατασκευών και στοιχείων μηχανών.

Οι θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας, που εφαρμόζονται από την σκοπιά της αντοχής των υλικών, παύουν να ισχύουν σε μεγάλο βαθμό όταν αρχίσει να γίνεται σημαντική η επίδραση της *μικροδομής* (microstructure) του μετάλλου, οπότε

<sup>1</sup> [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/mhx\\_symp\\_ylik\\_1.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_1.pdf)

το υλικό δεν μπορεί πλέον να θεωρείται σαν ομογενές. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μηχανική συμπεριφορά των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου εκεί είναι δυνατόν η μικροδομή του υλικού να μεταβάλλεται διαρκώς με το χρόνο. Μία άλλη τέτοια περίπτωση είναι η μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση, που παρατηρείται στους απλούς ανθρακοχάλυβες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο καθορισμός της εξάρτησης της μηχανικής συμπεριφοράς από τη μικροδομή αποτελεί το κατεξοχήν αντικείμενο ενασχόλησης της φυσικής μεταλλουργίας. Όταν η μηχανική συμπεριφορά των μετάλλων εξετάζεται υπό το πρίσμα της μικροδομής τους, τότε γίνεται εφικτή η *βελτιστοποίηση* (optimization) ή, τουλάχιστον, ο *έλεγχος* (control) των *μηχανικών ιδιοτήτων* τους.

Η απόκτηση βασικών δεδομένων σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και η πραγματοποίηση μετρήσεων για τον έλεγχο της αντοχής τους, μπορούν να υλοποιηθούν με έναν σχετικά περιορισμένο αριθμό τυποποιημένων *μηχανικών δοκιμών* (mechanical tests). Η πιο γνωστή από τις δοκιμές αυτές είναι η *δοκιμή εφελκυσμού* (tensile test). Ωστόσο, δεν είναι η μοναδική. Δοκιμές όπως η *δοκιμή κρούσης* (impact test), η *σκληρομέτρηση* (hardness test) και άλλες, έχουν εξίσου μεγάλη σημασία. Στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών εξετάζονται, πέραν των όσων ήδη αναφέρθηκαν, οι περισσότερες από τις συνήθεις μηχανικές δοκιμές, όχι τόσο από την οπτική γωνία της τεχνικής με την οποία πραγματοποιούνται, όσο από το είδος των πληροφοριών που παρέχουν στον μηχανικό σχετικά με την απόδοση των μετάλλων κατά τη λειτουργία τους, καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο οι διάφορες μεταλλουργικές παράμετροι επηρεάζουν το αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών. Για τον σκοπό αυτό είναι πάντοτε απαραίτητη η εξοικείωση με τις συνηθέστερες μηχανικές δοκιμές σε επίπεδο εργαστηριακής εξάσκησης. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο ότι πολλές φορές η έννοια της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών θεωρείται ισοδύναμη, σε γενικές γραμμές, με αυτό που παλαιότερα αναφερόταν και σαν "*πειραματική αντοχή υλικών*".

Για την καλύτερη κατανόηση των θεμάτων που εξετάζει η μηχανική συμπεριφορά υλικών, θεωρείται σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνει μία ανασκόπηση ορισμένων βασικών γνώσεων, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο της αντοχής υλικών, της τεχνολογίας υλικών και της φυσικής μεταλλουργίας. Επειδή οι γνώσεις αυτές θεωρείται ότι έχουν ήδη αποκτηθεί, στο πλαίσιο των αντίστοιχων μαθημάτων σε προηγούμενα εξάμηνα, δεν αναλύονται εδώ σε μεγάλη λεπτομέρεια. Ωστόσο, εάν ο αναγνώστης επιθυμεί μεγαλύτερη εμβάθυνση, θα πρέπει να ανατρέξει στη βιβλιογραφία των μαθημάτων εκείνων.

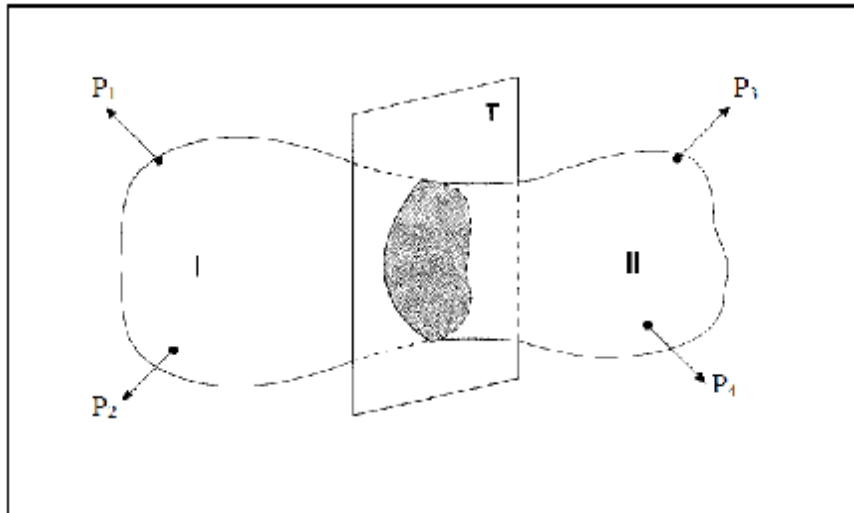


## 1.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Όπως είναι γνωστό, ο κλάδος της μηχανικής που ονομάζεται *στατική* ασχολείται με τις σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων που δρουν σε ένα στερεό σώμα και διερευνά τις συνθήκες ισορροπίας του. Εάν πληρούνται οι συνθήκες ισορροπίας, τότε το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση *στατικής ισορροπίας* (δηλαδή σε ηρεμία ή ομαλή κίνηση), μια κατάσταση που συναντάται συνήθως στις περισσότερες κατασκευές. Αν δεν πληρούνται συνθήκες στατικής ισορροπίας, δηλαδή εάν το σώμα βρίσκεται σε μη ομαλή κίνηση (π.χ. επιταχυνόμενη κίνηση), τότε στις δυνάμεις που το καταπονούν πρέπει να προστεθούν και οι δυνάμεις αδράνειας. Στις περιπτώσεις αυτές το σώμα λέγεται ότι βρίσκεται σε κατάσταση *δυναμικής ισορροπίας*, αντικείμενο με το οποίο ασχολείται ο κλάδος της μηχανικής που ονομάζεται *δυναμική*.

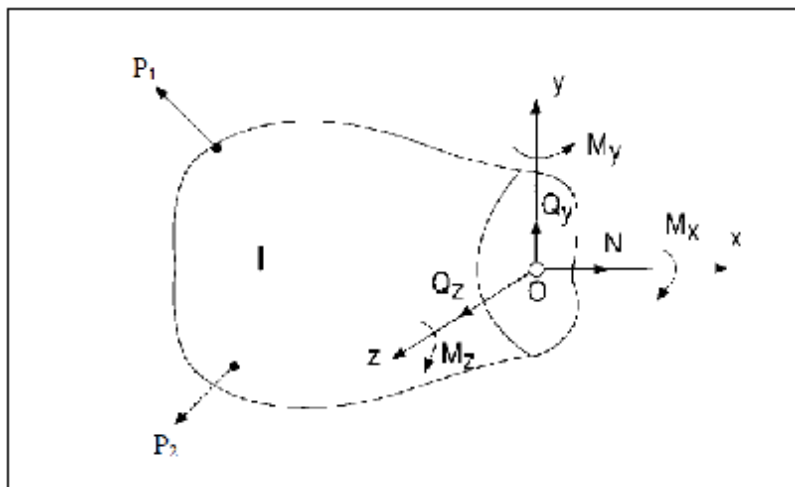
Σε οποιοδήποτε στερεό σώμα που καταπονείται από εξωτερικές δυνάμεις, είτε βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας είτε όχι, αναπτύσσονται *εσωτερικές δυνάμεις*. Ο υπολογισμός των εσωτερικών δυνάμεων αποτελεί το πρώτο βήμα για τον καθορισμό και τον έλεγχο της απόκρισής τους στα εξωτερικά φορτία. Στη μηχανική ο προσδιορισμός των εσωτερικών δυνάμεων πραγματοποιείται με τη μέθοδο των τομών, η οποία θα περιγραφεί σύντομα στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

Έστω ότι το σώμα της εικόνας 1, που καταπονείται από τις εξωτερικές δυνάμεις  $P_1$ ,  $P_2$ , κ.τ.λ., βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας. Ας υποθεθεί τώρα ότι το σώμα χωρίζεται σε δύο τμήματα, I και II, μέσω μίας τυχαίας νοητής τομής, που γίνεται σε αυτό με το επίπεδο T που φαίνεται στο σχήμα. Σύμφωνα με την *αρχή των τομών*, όταν ένα σώμα ισορροπεί τότε ισορροπεί και κάθε νοητό του τμήμα. Επομένως, τα τμήματα I και II του σώματος βρίσκονται επίσης σε κατάσταση στατικής ισορροπίας. Για να εξασφαλιστεί η ισορροπία του κάθε τμήματος, θα πρέπει στις δύο επιφάνειες τομής να ενεργούν δυνάμεις, οι οποίες ονομάζονται *εσωτερικές δυνάμεις* και οι οποίες αντισταθμίζουν την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων. Εάν δεν υπήρχαν οι εσωτερικές δυνάμεις και επενεργούσαν μόνο οι εξωτερικές (π.χ.  $P_1$  και  $P_2$  στο τμήμα I), τότε τα τμήματα I και II δεν θα βρίσκονταν σε κατάσταση ηρεμίας ή ομαλής κίνησης (δηλαδή σε στατική ισορροπία), αλλά σε κατάσταση μη ομαλής κίνησης (π.χ. το τμήμα I θα επιταχυνόταν συνεχώς κάτω από την επίδραση των  $P_1$  και  $P_2$ ).



Εικόνα 1. Σκαρίφημα. [1]

Οι εσωτερικές δυνάμεις είναι κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια της τομής και, σύμφωνα με την αρχή της δράσης-αντίδρασης, θα πρέπει σε κάθε σημείο της τομής να είναι ίσες σε μέγεθος και αντίθετες σε φορά μεταξύ τους στα τμήματα I και II. Στη εικόνα 2 παριστάνεται η συνισταμένη εσωτερική δύναμη στο κέντρο βάρους της επιφάνειας διατομής, που αντιστοιχεί στο σημείο O του σχήματος. Στη γενική περίπτωση, η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες δυνάμεις (αξονική  $N_x$  και εγκάρσιες  $Q_y$  και  $Q_z$ ), καθώς και σε τρεις ροπές ( $M_x$ ,  $M_y$  και  $M_z$ ). Σε κατάσταση στατικής ισορροπίας οι εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται. Το μέγεθος και η φορά των εσωτερικών δυνάμεων εξαρτώνται από τα εξωτερικά φορτία και από την διεύθυνση της τομής, δηλαδή από τον προσανατολισμό του επιπέδου τομής T στον χώρο.



Εικόνα 2. Σκαρίφημα δυνάμεων και ροπών. [1]

### 1.3 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η εμπειρία από την παρατήρηση της μηχανικής συμπεριφοράς των στερεών υλικών - και κατά συνέπεια και των μετάλλων - έχει δείξει ότι όλα τα υλικά παραμορφώνονται, δηλαδή υφίστανται μεταβολές των διαστάσεων ή/και του σχήματός τους, κάτω από την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Επιπρόσθετα, έχει βρεθεί ότι για κάθε υλικό υπάρχει μία οριακή τιμή φορτίου, η οποία εάν δεν ξεπεραστεί τότε το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις μόλις απομακρυνθεί το φορτίο. Η επαναφορά ενός σώματος που έχει υποστεί παραμόρφωση στις αρχικές του διαστάσεις, μόλις απομακρυνθεί το φορτίο, ονομάζεται ελαστική συμπεριφορά. Αντίστοιχα, η παραμόρφωση [1] αυτού του είδους ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση.

Η οριακή τιμή του φορτίου, η οποία όταν ξεπεραστεί τότε το υλικό παύει να συμπεριφέρεται ελαστικά, ονομάζεται όριο ελαστικότητας (elastic limit). Όσον αφορά ειδικότερα τα μέταλλα, το οριακό αυτό φορτίο συνήθως αναφέρεται σαν όριο ροής (yield stress). Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο ελαστικότητας και το όριο ροής δεν είναι πάντοτε ταυτόσημες έννοιες. Πάντως, κατά την εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών, το όριο ροής είναι αυτό που βρίσκει την μεγαλύτερη πρακτική χρήση.

Στα περισσότερα στερεά υλικά, όσο τα εξωτερικά φορτία είναι μικρότερα από το όριο ελαστικότητας, η παραμόρφωση (δηλαδή η ελαστική παραμόρφωση) είναι ευθέως και γραμμικά ανάλογη προς το φορτίο. Η γραμμική αυτή συσχέτιση μεταξύ φορτίου και παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι γνωστή ως νόμος του Hooke. Ο νόμος του Hooke, δηλαδή η γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση (stress) και την ελαστική παραμόρφωση, ισχύει σε όλα τα μεταλλικά υλικά για μικρές τιμές παραμόρφωσης.

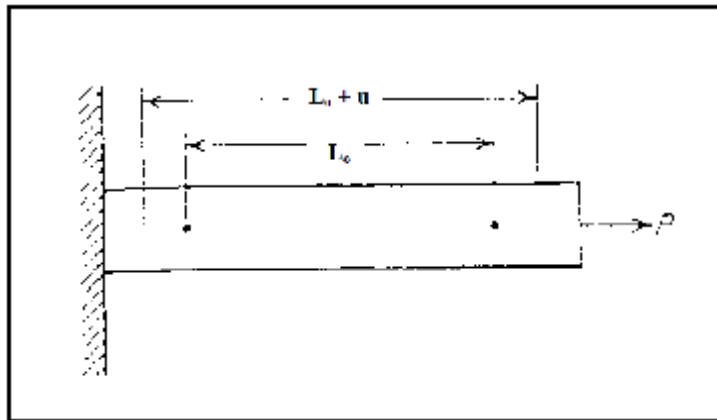
Όταν τα εξωτερικά φορτία υπερβούν το όριο ελαστικότητας (ή το όριο ροής) του υλικού, τότε το στερεό σώμα υφίσταται μία μόνιμη μεταβολή των διαστάσεων ή/και του σχήματός του, η οποία παραμένει ακόμη και μετά την απομάκρυνση του φορτίου. Ένα σώμα που παραμορφώνεται μόνιμα κατ' αυτό τον τρόπο λέγεται ότι έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση.

## 1.4 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η παραμόρφωση (strain) είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης των τάσεων στα στερεά σώματα. Οι ορθές τάσεις προκαλούν ορθές παραμορφώσεις (normal strains). Ας θεωρήσουμε την κυλινδρική ράβδο του Σχ. 9, επάνω στην οποία βάζουμε δύο σημάδια που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $L_0$ . Εφαρμόζοντας ένα εφελκυστικό φορτίο  $P$  στη ράβδο, θα διαπιστώσουμε ότι η απόσταση μεταξύ των δύο σημαδιών θα έχει αυξηθεί κατά μία ποσότητα  $u$  και θα είναι τώρα  $L_f = L_0 + u$ . Η ποσότητα  $u$  ονομάζεται επιμήκυνση (elongation). Η ποσότητα:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{L_0 + u - L_0}{L_0} = \frac{u}{L_0} \quad (1-1)$$

ονομάζεται ορθή παραμόρφωση και με τον τρόπο που ορίζεται παραπάνω καλείται ονομαστική ορθή παραμόρφωση ή απλώς ονομαστική παραμόρφωση (nominal ή engineering strain).



Εικόνα 3. Πακτωμένη ράβδος. [1]

Ωστόσο, εκτός από τον ορισμό της Εξ.(1-1), υπάρχει και άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να εκφραστεί η ορθή παραμόρφωση. Όταν η παραμόρφωση ορίζεται όχι μέσω της Εξ.(2), αλλά μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \left( \frac{L_f}{L_0} \right) \quad (1-2)$$

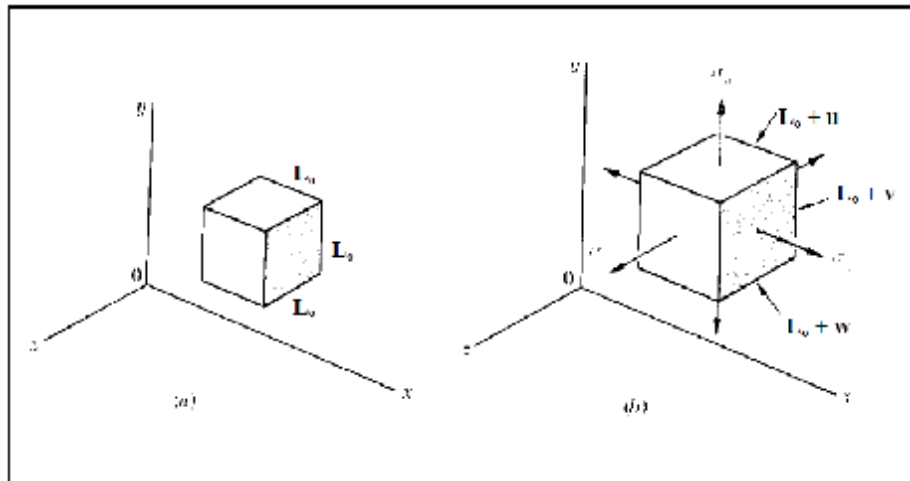
όπου  $L_0$  και  $L_f$  το αρχικό και το τελικό μήκος, αντίστοιχα, τότε καλείται πραγματική ορθή παραμόρφωση ή απλώς πραγματική παραμόρφωση (true strain).

Η έννοια της πραγματικής παραμόρφωσης αποκτά ιδιαίτερη χρησιμότητα σε περιπτώσεις που εμφανίζονται μεγάλες τιμές παραμόρφωσης, όπως είναι για παράδειγμα στις κατεργασίες διαμόρφωσης των μετάλλων (έλαση, βαθιά κοίλανση, κ.λ.π.). Με την έννοια της πραγματικής παραμόρφωσης θα ασχοληθούμε λεπτομερέστερα κατά τη συζήτηση της θεωρίας πλαστικότητας. Πάντως, θα πρέπει να επισημανθεί ότι για μικρές τιμές παραμόρφωσης, (π.χ. ελαστικές παραμορφώσεις) οι τιμές της ονομαστικής (Εξ.1-2) και της πραγματικής παραμόρφωσης (Εξ.1-3) συμπίπτουν. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία σύγχυσης με τις παραπάνω μορφές έκφρασης της παραμόρφωσης. Οι ορθές παραμορφώσεις είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης ορθών τάσεων σε ένα σώμα. Η ονομαστική και η πραγματική παραμόρφωση είναι απλώς δύο διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να εκφράσουμε την τιμή των ορθών παραμορφώσεων.

Οι ορθές παραμορφώσεις - και κατά συνέπεια οι ορθές τάσεις που τις προκαλούν - είναι υπεύθυνες για την μεταβολή των γραμμικών διαστάσεων ενός σώματος (π.χ. του μήκους μίας ράβδου, του μήκους και του πλάτους ενός λεπτού ελάσματος, κ.τ.λ.). Ας δούμε για παράδειγμα τον κύβο παρακάτω, στις έδρες του οποίου ασκούνται οι ορθές τάσεις  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ . Οι ακμές του κύβου, με αρχικό μήκος έστω  $L_o$ , κάτω από την επίδραση των ορθών τάσεων  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  έχουν επιμηκυνθεί κατά  $u$ ,  $v$  και  $w$ , αντίστοιχα (στην γενική περίπτωση  $u \neq v \neq w$ ). Η ορθή παραμόρφωση του κύβου κατά την διεύθυνση του άξονα  $x$  θα είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{(L_o + u) - L_o}{L_o} = \frac{u}{L_o} \quad \text{αν την εκφράσουμε σαν ονομαστική παραμόρφωση, ή (1-3)}$$

$$\varepsilon_x = \ln\left(\frac{L_o + u}{L_o}\right) \quad \text{αν την εκφράσουμε σαν πραγματική παραμόρφωση. (1-4)}$$



Εικόνα 4. Δυνάμεις στον κύβο ανά άξονα. [1]

Από εδώ και στο εξής, για να αποφεύγονται συγχύσεις σχετικά με την ονομαστική και την πραγματική παραμόρφωση, **την ονομαστική παραμόρφωση θα την συμβολίζουμε με το λατινικό γράμμα  $e$  και την πραγματική παραμόρφωση με το ελληνικό  $\epsilon$** . Επομένως, οι ορθές παραμορφώσεις σε κάθε άξονα, εκφρασμένες σαν ονομαστικές και σαν πραγματικές παραμορφώσεις, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Άξονας	Ονομαστική παραμόρφωση	Πραγματική παραμόρφωση
<b>x</b>	$e_x = \frac{(L_0 + u) - L_0}{L_0} = \frac{u}{L_0}$	$\epsilon_x = \ln\left(\frac{L_0 + u}{L_0}\right)$
<b>y</b>	$e_y = \frac{(L_0 + v) - L_0}{L_0} = \frac{v}{L_0}$	$\epsilon_y = \ln\left(\frac{L_0 + v}{L_0}\right)$
<b>z</b>	$e_z = \frac{(L_0 + w) - L_0}{L_0} = \frac{w}{L_0}$	$\epsilon_z = \ln\left(\frac{L_0 + w}{L_0}\right)$

Πίνακας 1. Τύποι εύρεσης παραμορφώσεων. [1]

Τονίζεται και πάλι στο σημείο αυτό ότι όταν οι παραμορφώσεις είναι μικρές (π.χ. στην ελαστική περιοχή), τότε οι τιμές ονομαστικής και πραγματικής παραμόρφωσης σχεδόν συμπίπτουν, δηλαδή  $e_x \cong \epsilon_x$ ,  $e_y \cong \epsilon_y$  και  $e_z \cong \epsilon_z$  (η

επαλήθευση αφήνετε σαν άσκηση για τον αναγνώστη). Η χρήση της πραγματικής παραμόρφωσης αποκτά νόημα σε μεγάλες παραμορφώσεις, δηλαδή αφού το υλικό έχει περάσει στην πλαστική περιοχή. Για να κλείσουμε την αναφορά μας σε ονομαστικές και πραγματικές (ορθές) παραμορφώσεις, πρέπει να αναφερθεί ότι μπορούμε να μετατρέπουμε τις τιμές της ορθής παραμόρφωσης από ονομαστικές σε πραγματικές, ή αντίστροφα, μέσω της σχέσης:

$$E_x = \ln(1+\varepsilon), \text{ για τον άξονα } x$$

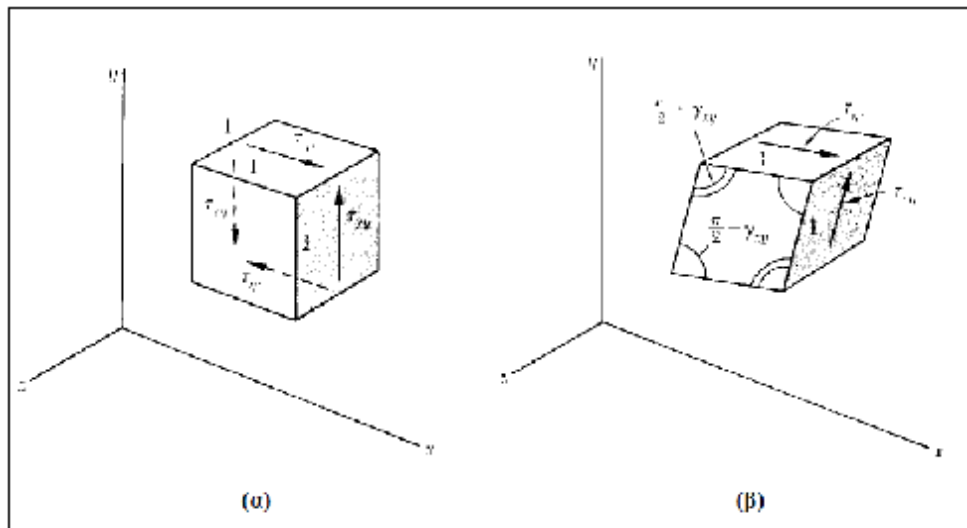
$$E_y = \ln(1+\varepsilon), \text{ για τον άξονα } y$$

$$E_z = \ln(1+\varepsilon), \text{ για τον άξονα } z$$

Η ορθή παραμόρφωση, εκφρασμένη είτε σαν ονομαστική είτε σαν πραγματική παραμόρφωση, σαν φυσικό μέγεθος αντιπροσωπεύει το πηλίκο μηκών (μήκος/μήκος) και επομένως δεν έχει μονάδες μέτρησης. Είναι, δηλαδή, ένα αδιάστατο μέγεθος. Επίσης, έχει επικρατήσει κατά σύμβαση, οι ορθές παραμορφώσεις να θεωρούνται θετικές όταν εκφράζουν εφελκυσμό (επιμήκυνση) και αρνητικές όταν εκφράζουν θλίψη (επιβράχυνση) των γραμμικών διαστάσεων ενός στερεού σώματος.

Από την παραπάνω συζήτηση για τις ορθές παραμορφώσεις, θα πρέπει να προσέξει κανείς ότι η επενέργεια των ορθών τάσεων μετέβαλε μόνο τις γραμμικές διαστάσεις του σώματος (δηλ. στην περίπτωση του κύβου παρακάτω το μήκος των ακμών) και όχι τις γωνίες μεταξύ των ακμών, οι οποίες παρέμειναν κάθετες μεταξύ τους. Αντίθετα, η επίδραση των διατμητικών τάσεων σε ένα στερεό σώμα έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της γωνίας μεταξύ δύο οποιονδήποτε, αρχικά κάθετων μεταξύ τους, γραμμών του σώματος. Υπό αυτή την έννοια, οι διατμητικές τάσεις προκαλούν μεταβολή του σχήματος ή στρέβλωση (distortion) ενός στερεού σώματος. Σαν παράδειγμα, ας θεωρήσουμε πάλι ένα κυβικό στοιχείο με μήκος ακμής  $L_0$ , σε τέσσερις από τις έδρες του οποίου επενεργούν οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  και  $\tau_{yx}$ , όπως φαίνεται παρακάτω. Η επίδραση των διατμητικών αυτών τάσεων έχει σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση του κύβου σε ένα ρομβοειδές πρίσμα, του οποίου το μήκος κάθε ακμής εξακολουθεί να είναι  $L_0$ . Ωστόσο, παρατηρώντας παρακάτω, διαπιστώνει κανείς ότι οι δύο από τις γωνίες που σχηματίζουν οι υπό τάση έδρες έχουν μειωθεί από  $2\pi$  σε  $\chi_{\gamma\pi}-2$ , ενώ οι δύο άλλες γωνίες έχουν αυξηθεί από  $2\pi$  σε  $\chi_{\gamma\pi}+2$ . Αυτή η μικρή γωνία  $\gamma_{xy}$  (εκφρασμένη σε rad και όχι σε μοίρες) ορίζεται σαν η διατμητική παραμόρφωση (shear strain) ως προς τους άξονες  $x$  και  $y$ . Εάν είχαμε την

επενέργεια διατμητικών τάσεων και στις υπόλοιπες έδρες του κύβου, δηλαδή  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zy}$ ,  
και  $\tau_{xzy}$ ,  $\tau_{zxy}$ ,  $\tau_{yxz}$ ,  $\tau_{zyx}$ .



Εικόνα 5. Διατμητικές τάσεις στον κύβο. [1]

## 1.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΔΡΟΜΗ

### ΓΕΝΙΚΑ

Στόχος της Αντοχής των Υλικών είναι η δικαίωση του τίτλου της. Δηλαδή, η πρόβλεψη των ορίων ασφαλούς επιβολής φορτίων στις κατασκευές<sup>2</sup>. Ο σκοπός αυτός είναι καταγεγραμμένος στη συλλογική μνήμη όλων των ανθρώπων που ενστικτωδώς ανησυχούσαν εάν «αντέξει» το σανίδι που γεφύρωνε τις όχθες του χειμάρρου που έπρεπε να διασχίσουν ή η σκεπή της καλύβας που τους προστάτευε. Και τώρα ανησυχούν για την αντοχή του διαμερίσματός τους στα επόμενα Richter. Αυτή η σχεδόν μεταφυσική ανησυχία παραλληλίζεται μόνον με την αγωνία μας να μακροημερεύσουμε υγιείς. Επιθυμούμε, επίσης, οι κατασκευές μας να μακροημερεύσουν ασφαλείς.

Το κείμενο, που ακολουθεί, δεν διεκδικεί δάφνες επιστημονικής ακρίβειας ή τεχνικής πληρότητας, αλλά διεκδικεί την ελπίδα αναγνώρισης της ζεστασιάς, που ο

<sup>2</sup> «Τα Κριτήρια Αστοχίας των Υλικών -Μια Περιήγηση στην Ιστορία», **Ν. Π. ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ**, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε. Μ. Π.



συγγραφέας του αισθάνεται, και της νοσταλγίας για εποχές που ασχολούμενος με τα κριτήρια αστοχίας, στην πραγματικότητα πολεμούσε αυτήν την προαιώνια «ανησυχία».

## Η ΕΠΟΧΗ ΤΟΥ ΛΙΘΟΥ

Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι το πρώτο κριτήριο αστοχίας των υλικών[2] (δηλαδή νόμος που προβλέπει τις συνθήκες αστοχίας τους) διατυπώθηκε περίπου μισόν αιώνα πριν η Επιστήμη της Μηχανικής θεμελιωθεί και αποκτήσει τη σημερινή μορφή της. Είναι ο Coulomb (ο ίδιος που έδωσε το όνομά του στη μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου), ο οποίος, λίγο πριν από τη γαλλική επανάσταση, διατύπωσε ένα κριτήριο αστοχίας κατάλληλο για τα οικοδομικά υλικά (λίθους και πλίνθους) της εποχής του. Και αυτό όταν ακόμη δεν είχαν ορισθεί τα θεμελιώδη μεγέθη (τάσεις, παραμορφώσεις, μηχανικές ιδιότητες) της Μηχανικής του Παραμορφωσίμου Σώματος. Το διατύπωσε με ένα μεγαλοφυή στην απλότητά του τρόπο, ο οποίος με όρους της εποχής μας (δηλαδή μετά το Mohr) είναι:

***Ένα υλικό αστοχεί, όταν σε μια τομή του δημιουργηθεί κατάλληλος συνδυασμός ορθής ( $\sigma$ ) και διατμητικής ( $\tau$ ) τάσης.***

Μια διατύπωση που μοιάζει να περιγράφει το προφανές. Αφού σε κάθε τομή ποιο άλλο «σημάδι» υπάρχει εκτός από τις τάσεις ότι το υλικό καταπονείται; Ποιος άλλος θα μπορούσε να «φταίει»; Και όμως!

Ήξερε ότι τα υλικά, που τον ενδιέφεραν (τα λεγόμενα σήμερα ψαθυρά), αστοχούν, όταν υπάρξει λύση της συνέχειάς τους, δηλαδή εξουδετέρωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των δομικών τους λίθων. Ήξερε ότι αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο μόνον γεωμετρικά επιτρεπτούς τρόπους. Είτε με σχετική απομάκρυνση των δύο «παρειών» ενός επιπέδου (μιας τομής) κατά τη διεύθυνση του επιπέδου αυτού υπό την επίδραση ορθών τάσεων, είτε με σχετική ολίσθηση των παρειών υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων, έτσι ώστε να καταργηθούν οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των δύο παρειών. Εφελκυστική ορθή τάση, που προκαλεί σχετική απομάκρυνση των δύο παρειών κατά τη διεύθυνσή τους, διευκολύνει τη σχετική ολίσθησή τους υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης, ενώ θλιπτική τάση την παρεμποδίζει. Η ορθή τάση, λοιπόν, δρα στο υλικό ως δημιουργός μιας οιονεί τάσης τριβής που προστίθεται στην ή αφαιρείται από τη διατμητική τάση. Το μέγεθος της τάσης τριβής καθορίζεται από το λεγόμενο συντελεστή εσωτερικής τριβής του υλικού. Έτσι, προκύπτει ο «κατάλληλος συνδυασμός» που θέτει ο Coulomb. Εάν ο

συντελεστής εσωτερικής τριβής είναι σταθερός, τότε ο κατάλληλος συνδυασμός ορθής και διατμητικής τάσης είναι μία γραμμική σχέση. Εάν εξαρτάται από το μέγεθος της ορθής τάσης, τότε η αλγεβρική διατύπωση του κατάλληλου συνδυασμού είναι μια συνάρτηση ανώτερου βαθμού. Όποια και αν είναι, πάντως, αυτή η συνάρτηση, περιγράφει την **«περιβάλλουσα αστοχία»** του ψαθυρού υλικού, δηλαδή τη γραμμή στο επίπεδο ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) που ξεχωρίζει επιτρεπτές από μη επιτρεπτές καταπονήσεις. Δεν υπάρχει άλλος, παρά μόνον πειραματικός, τρόπος για τον προσδιορισμό της περιβάλλουσας αστοχίας, μέσω εντοπισμού «αρκετών» σημείων αστοχίας και σύνδεσής τους με τεχνικές παρεμβολής.

Το κριτήριο του Coulomb με τις παραλλαγές του είναι αναντικατάστατο για τα ψαθυρά υλικά. Όσα άλλα υπάρχουν τελικώς καταλήγουν σε αυτό. Βέβαια, δεν είναι το καλύτερο για εφελκυστικές φορτίσεις, αλλά δεν απευθύνεται σ' αυτές, αφού τα υλικά στα οποία απευθύνεται συνήθως καταπονούνται σε θλιπτικές φορτίσεις.

## Η ΕΠΟΧΗ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Η βιομηχανική επανάσταση[2] στις αρχές του 19ου αιώνα οδήγησε στη γενίκευση της χρήσης των μετάλλων στις κατασκευές. Η αστοχία τέτοιων κατασκευών δεν θύμιζε την αστοχία των λίθων. Ούτε, όμως, και το είδος των καταπονήσεων. Στην περίπτωση αυτή, εφελκυστικές, στρεπτικές ή καμπτικές καταπονήσεις ήταν πολύ πιο συχνές από τις σχεδόν αποκλειστικά θλιπτικές των λίθων. Η χρήση του ατμού ως κινητήριας δύναμης εισήγαγε τη θερμοκρασία ως έναν από τους παράγοντες που επιδρούν στον τρόπο αστοχίας των υλικών. Τα μέταλλα, από τη φύση τους όλκιμα, γίνονται με αυτήν περισσότερο όλκιμα.

Οι λίθοι αστοχούν χωρίς αισθητή αλλαγή της εξωτερικής τους γεωμετρίας, του σχήματός τους. Αντιθέτως, τα μέταλλα πριν διαχωρισθούν αλλάζουν σημαντικά και μόνιμα την εξωτερική μορφή τους. Κάνουν «λαιμούς» σε εφελκυσόμενες διατομές. Φαινόταν, λοιπόν τότε, ότι το κύριο αίτιο της αστοχίας των μετάλλων ήταν κάποια εφελκυστική τάση, αφού και στη στρέψη υπάρχει μια λοξή τομή που μόνον εφελκύεται ή στην κάμψη υπάρχουν εφελκυσόμενες «ίνες» που αστοχούν πρώτες. Το νέο κριτήριο έμοιαζε να είναι εκείνο της **«μέγιστης εφελκυστικής τάσης»**. Το υποστήριξε ο Lamé, και άλλοι, ήδη από το 1832. Δεν απέδωσε. Γιατί να αποδώσει μια σχεδόν εξοντωτική απλοποίηση του κριτηρίου του Coulomb (παραμέληση της διατμητικής τάσης στην κρίσιμη τομή) όταν το ίδιο το κριτήριο του Coulomb αντιμετώπιζε μεγάλο πρόβλημα στην πρόβλεψη της αντοχής των υλικών αυτών;

Η κατάσταση παρέμενε σκοτεινή.

Το φως ήλθε ακριβώς τριάντα χρόνια αργότερα από μια απροσδόκητη πηγή,

αλλά δεν έγινε ορατό! Ο J. C. Maxwell, ο πατέρας της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας, ισχυρίζεται σε επιστολή προς ένα φίλο του ότι τα υλικά αστοχούν, επειδή στρεβλώνονται, δηλαδή επειδή αλλάζουν οι γωνίες του στοιχειώδους κύβου. Ήταν, υποστήριζε, υπόθεση μόνον διατμητικών τάσεων και καθόλου ορθών, όπως υποστήριζε ο Lamé! Βεβαίως, υπήρχε και ένα πρόβλημα ορισμών, που οφειλόταν στη διαφορετική εικόνα αστοχίας και, ίσως, οδηγούσε σε παρεξηγήσεις. Οι λίθοι (τα ψαθυρά υλικά) αστοχούν κατά «ψαθυρό» τρόπο, δηλαδή αποχωρίζονται σε τμήματα, ενώ τα μέταλλα (τα όλκιμα υλικά) αστοχούν κατά «όλκιμο» τρόπο, δηλαδή η παρουσία πλαστικών παραμορφώσεων απομειώνει την αντοχή περιοχών του μετάλλου τόσο ώστε να μην είναι πλέον λειτουργικά χρήσιμο, χωρίς αυτό να συνεπάγεται, υποχρεωτικά, το διαχωρισμό του σε διακριτά τμήματα.

Δεν έγινε ευρύτερα γνωστή η ιδέα του Maxwell. Αλλά, λίγο μετά, το 1864 ο μηχανικός του γαλλικού στρατού Tresca το επανέλαβε (ανεξάρτητα από τον Maxwell) ρητά και με απλούς όρους:

***Η μέγιστη διατμητική τάση, όταν λάβει μια κρίσιμη τιμή σε κάποια τομή, οδηγεί σε αστοχία το όλκιμο υλικό.***

Το κριτήριο του Tresca απέδωσε και εξακολουθεί να αποδίδει. Είναι δημοφιλές, επειδή είναι απλό και ενίοτε η εφαρμογή του δεν χρειάζεται ούτε καν χαρτί και μολύβι. Είναι, βέβαια, ειδική περίπτωση του κριτηρίου του Coulomb, όταν η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη είναι η ίδια.

Το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα χαρακτηρίζεται, μεταξύ άλλων, και από συγκροτημένες προσπάθειες μαθηματοποίησης της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών. Μεγάλοι επιστήμονες της εποχής, όπως οι Maxwell, Kelvin, Boltzmann και πολλοί άλλοι, ασχολήθηκαν με τη ρεολογική συμπεριφορά των υλικών ή με τη θεωρία της Πλαστικότητας. Ήταν η εποχή, κατά την οποία η θετικιστική αυτοπεποίθηση των επιστημόνων, αλλά και των φιλοσόφων, οδηγούσε στη βεβαιότητα ότι τελικώς όλα τα φαινόμενα θα περιγραφούν και θα εξηγηθούν με αυστηρό μαθηματικό τρόπο.

Μέσα στα πλαίσια αυτά ήταν αναπόφευκτη και η μαθηματοποίηση των κριτηρίων αστοχίας των υλικών. Ήταν, έτσι και αλλιώς, αναγκαία η αυστηρή μαθηματική διατύπωσή τους, διότι το απαιτούσε η θεωρία της Πλαστικότητας. Ο R. von Mises ήταν εκείνος, που το 1909 υποστήριξε ότι:

***Ένα όλκιμο υλικό αστοχεί (διαρρέει), όταν η δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνουντα τανυστή των τάσεων πάρει μια κρίσιμη τιμή.***

Ήταν η ίδια η ιδέα του Maxwell εκπεφρασμένη μαθηματικά και το ίδιο το κριτήριο του Tresca διατυπωμένο πληρέστερα. Όμως, τώρα, δεν ήταν η μία διατμητική τάση, που μεγιστοποιείται σε κάποια τομή και προκαλεί αστοχία του υλικού μέσω ολίσθησης, όπως ισχυριζόταν ο Tresca, αλλά ο μέσος γεωμετρικός όρος των μέγιστων διατμητικών τάσεων, που ασκούνται στις έδρες του στοιχειώδους κύβου. Ή με άλλα λόγια, ο στοιχειώδης κύβος (μεταξύ δύο παρειών κατά Coulomb) διογκώνεται ή συρρικνώνεται υπό την επίδραση των ορθών τάσεων και γίνεται ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, ενώ συγχρόνως στρεβλώνεται υπό την επίδραση των διατμητικών τάσεων και γίνεται πλαγιογώνιο παραλληλεπίπεδο. Οι απέναντι έδρες ολισθαίνουν, λοιπόν, μέχρις ότου η μάζα του κύβου μετατραπεί, τελικώς, σε «υγρό» και ο κύβος διαρρέυσει μη απαιτώντας, πλέον, προσφορά εξωτερικής μηχανικής ενέργειας για να αλλάξει το σχήμα του. Δεν αντέχει περισσότερο. Παίρνει το σχήμα του ελαστικού «δοχείου», στο οποίο περιέχεται, και γι' αυτό φροντίζει, τελικώς, η Βαρύτητα.

Ο von Mises, από πρακτική πλευρά, δεν προσέφερε πολύ περισσότερα από τον Tresca. Εξάλλου, οι προβλέψεις των δύο κριτηρίων είναι παρόμοιες. Όμως, η προσφορά του στη Θεωρία είναι τεράστια. Εν τούτοις, μεγάλος αριθμός αστοχιών σε μεταλλικές κατασκευές δεν μπορούσε να ερμηνευθεί με το κριτήριο του von Mises. Οι μεταλλικές κατασκευές είχαν διαστασιολογηθεί σωστά, τα μέταλλα είχαν επαρκώς γνωστές μηχανικές ιδιότητες, αλλά η κατασκευή αστοχούσε! Ήδη, ήταν γνωστό ότι π.χ. μια κυκλική οπή σε μια ελαστική πλάκα προκαλεί συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της και ενώ αυτό λαμβανόταν υπόψη στη διαστασιολόγηση, δεν έλυne το πρόβλημα. Τι συνέβαινε;

## Η ΕΠΟΧΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Στην πρώτη δεκαετία του 20ού αιώνα, ο Rutherford[2] παρουσίασε το ατομικό μοντέλο δομής της ύλης: ο πυρήνας-Ήλιος και τα ηλεκτρόνια-πλανήτες. Η ύλη είχε δομή και δεν ήταν ένα συνεχές πεδίο ιδιοτήτων, μηχανικών και άλλων, χωρίς υφή. Στην απλούστερη περίπτωση ήταν ένα τρισδιάστατο δικτύωμα με άυλες ράβδους. Τι συμβαίνει, όμως, στο δικτύωμα, εάν αφαιρεθεί ένας κόμβος; Ας το εξετάσουμε από τη σκοπιά της Αντοχής των Υλικών:

Οι παραδοσιακοί υπολογισμοί των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων βασίζονται σε λείες (ομαλές) γεωμετρικές μορφές των κατασκευαστικών στελεχών. Η πρώτη παράγωγος των συναρτήσεων, που περιγράφουν τη μορφή των στελεχών, είναι συνεχής. Μερικές εξαιρέσεις (π.χ. εισέχουσες γωνίες) μπορούσαν να

αντιμετωπισθούν. Η ίδια υπόθεση της ομαλότητας ίσχυε και για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Υποτίθετο ότι αυτές είναι χωρικά σταθερές (ισότροπα υλικά) ή μεταβάλλονταν κατά συνεχή τρόπο (ανισότροπα υλικά). Αυτή η, γενικώς ομαλή, συμπεριφορά των υλικών επέτρεπε την απρόσκοπτη εφαρμογή των νόμων της Μηχανικής, στους οποίους είχε βασισθεί η κλασική Αντοχή των Υλικών.

Η πικρή εμπειρία από πολλές και ανεξήγητες κατασκευαστικές αστοχίες, ήδη από τα μέσα του 19ου αιώνα (ας θυμηθούμε πόσο συχνές ήταν οι εκτροχιάσεις τραίνων ή οι καταρρεύσεις μεταλλικών γεφυρών στις ταινίες «western», χωρίς να φταίνε οι Ινδιάνοι γι' αυτές!) υπεδείκνυε ότι κάτι δεν ήταν σωστό στην κλασική Αντοχή των Υλικών. Επειδή η αξιοπιστία των μαθηματικών υπολογισμών και η μακροσκοπική «ομαλότητα» των κατασκευαστικών στελεχών μπορούσαν εύκολα να ελεγχθούν, ο μόνος ύποπτος για τις αστοχίες αυτές ήταν πλέον, μετά το Rutherford, η μικροσκοπική «ομαλότητα» των υλικών. Μήπως οι αόρατες, μικροσκοπικές ανωμαλίες της δομής των υλικών έπρεπε να θεωρηθούν ως πρόξενοι εκείνων των αστοχιών; Οι πειραματικοί Φυσικοί της εποχής είχαν αρχίσει να ακτινοσκοπούν τα υλικά και έλεγαν ότι τέτοιες δομικές ανωμαλίες όντως υπάρχουν και, μάλιστα, πολλές και ποικίλες. Χρειαζόταν, λοιπόν, μια στατιστικού τύπου αντιμετώπιση της αντοχής των υλικών; Φαινόταν πολύ δύσκολο και οι Μηχανικοί δεν ήταν πεπεισμένοι ότι αξίζει τον κόπο. Μηχανικές ιδιότητες (π.χ. το όριο διαρροής) μετρούμενες πειραματικά σε πολλά δοκίμια από το ίδιο υλικό δεν απέκλιναν σημαντικά από μια μέση τιμή, παρά το αναμφισβήτητο γεγονός ότι οι πληθυσμοί των δομικών ανωμαλιών δεν μπορούσαν να θεωρηθούν ταυτόσημοι σε όλα τα δοκίμια.

Την ίδια εποχή, λίγο πριν από τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο, οι Άγγλοι ενδιαφέρονταν να βελτιώσουν τη θωράκιση των πολεμικών τους πλοίων. Η προφανής λύση της αύξησης του πάχους των θωράκων οδηγούσε σε πλοία που κινδύνευαν να βυθισθούν υπό το ίδιο βάρος! Το αγγλικό Ναυαρχείο πίεζε να μελετηθεί επείγοντως η συμπεριφορά των πραγματικών υλικών με την ελπίδα ότι θα βρισκόταν τρόπος να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους. Παρεμπιπτόντως, ο στόχος αυτός του Ναυαρχείου για την παραγωγή άψογων υλικών, δεν έχει ακόμη επιτευχθεί παρά μόνον στο εργαστήριο και για μικρές ποσότητες υλικού. Όμως, μάθαμε αρκετά για τη συμπεριφορά των πραγματικών υλικών. Το πρώτο βήμα έγινε αμέσως μετά τον πόλεμο.

Το 1919 ο Άγγλος Ναυπηγός A. A. Griffith παρουσίασε μια λαμπρή ιδέα, η οποία του δικαιολογεί τον τίτλο του Πατέρα ενός νέου κλάδου της Αντοχής των Υλικών της **«Μηχανικής των Θραύσεων»**. Υπέθεσε ότι σε ένα πραγματικό υλικό με δομικές ανωμαλίες επιβάλλεται τεχνητά μια πολύ μεγαλύτερη (μακροσκοπική) γεωμετρική ανωμαλία, έτσι ώστε οι πραγματικές (μικροσκοπικές) ανωμαλίες να μην παίζουν

κανένα ρόλο στη συμπεριφορά του υλικού. Με τον τρόπο αυτόν μπορούσε να θεωρήσει ότι το υλικό δεν είχε καμία ανωμαλία πλην της τεχνητής και, επομένως, ήταν ένα τέλειο, ομογενές, ισότροπο, ελαστικό υλικό με λιγάκι «περίεργη» μακροσκοπική γεωμετρία. Η γεωμετρική ανωμαλία, που επέβαλε ο Griffith, ήταν μια ελλειπτική οπή, της οποίας ο μικρός ημιάξονας έτεινε στο μηδέν. Ήταν μια ευθύγραμμη «ρωγμή». Το πρόβλημα, λοιπόν, μετέπιπτε στον προσδιορισμό των συνθηκών εκκίνησης της ρωγμής σε ένα τέλειο, συνεχές υλικό. Η προσέγγιση του Griffith ήταν ενεργειακή. Υπέθεσε ότι:

***Η ρωγμή εκκινεί (οδηγώντας το υλικό σε αστοχία), όταν η ελαστική ενέργεια που προσφέρεται στο υλικό από τα εξωτερικά φορτία γίνει αρκετή για να καλύψει την ενεργειακή δαπάνη δημιουργίας νέων ελευθέρων επιφανειών κατά μήκος της επέκτασης της ρωγμής.***

Ήξερε να υπολογίσει αυτό το ενεργειακό ισοζύγιο. Λίγο πριν, ο Inglis είχε υπολογίσει τη διαφορά της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας σε μια ελαστική πλάκα που περιείχε ή δεν περιείχε μια ευθύγραμμη ρωγμή μήκους  $2a$ .

Ο Griffith υπέθεσε ότι η ενεργειακή διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η ρηγματωμένη πλάκα έχει περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες από την αρρηγμάτωση. Εκείνες που αντιστοιχούν στην περίμετρο της ρωγμής. Επομένως, εάν η ελαστική ενέργεια της πλάκας αυξηθεί, ώστε να δικαιολογήσει τη δημιουργία νέων επιφανειών μέσω αύξησης του μήκους της ρωγμής, τότε η ρωγμή θα εκκινήσει. Αυτή η ενεργειακή προσέγγιση του Griffith απετέλεσε την αφετηρία του πρώτου κλάδου της Μηχανικής των Θραύσεων που καλείται «**Γραμμική Ελαστική Μηχανική των Θραύσεων**».

Το κύριο πρόβλημα στη Γραμμική Ελαστική Μηχανική των Θραύσεων ήταν (και είναι) ο ακριβής προσδιορισμός του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου κοντά στις αιχμές ρωγμών, οι οποίες δεν είναι υποχρεωτικά ευθύγραμμες ή μόνες. Μη ευθύγραμμες ρωγμές, ομάδες ρωγμών που αλληλεπιδρούν, ρωγμές σε μορφή κέρματος σε τρισδιάστατα σώματα ή άλλες γεωμετρίες που παρουσιάζουν τεχνολογικό ενδιαφέρον, παρουσιάζουν επίσης μεγάλες μαθηματικές δυσκολίες στην επίλυσή τους, δηλαδή στον προσδιορισμό του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου. Και το πρόβλημα γίνεται δυσκολότερο, όταν τα φορτία δεν είναι απλά στατικά αλλά δυναμικά (κρουστικά) ή επαναλαμβανόμενα (κοπωτικά).

Στην αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών μεγάλη ώθηση έδωσε η ανάπτυξη νέων αριθμητικών μεθόδων, όπως τα Πεπειραμένα Στοιχεία, αλλά και ισχυρών, χαμηλού κόστους ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σε όλες τις λύσεις κλειστής μορφής υπάρχει ένα κοινό χαρακτηριστικό: Οι τάσεις μεταβάλλονται συναρτήσει της ανοιγμένης απόστασης από την αιχμή της ρωγμής κατά το νόμο  $(r/a)^{-1/2}$ , δηλαδή απειρίζονται στην αιχμή της ρωγμής ( $r=0$ ) και, εν πάση περιπτώσει, παίρνουν πολύ

μεγάλες τιμές κοντά της. Το τασικό πεδίο είναι «ιδιόμορφο», όπως λέγεται.

Οι δυσκολίες στον υπολογισμό των τασικών πεδίων έθεσαν σε κάπως δεύτερη μοίρα το πρόβλημα του κριτηρίου εκκίνησης της ρωγμής, καθ' εαυτό. Εξάλλου, ενεργειακές προσεγγίσεις, όπως εκείνη του Griffith, είναι γενικώς «συμπαθείς» και επαρκείς. Έτσι, δεν είναι περίεργο που μόνον μετά από μια γενεά, το 1955, ο Irwin εμμέσως επανέθεσε το πρόβλημα του κριτηρίου, όταν εισήγαγε την έννοια του **«Συντελεστή Έντασης των Τάσεων»**,  $K_I$ , ως  $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$  (σ<sub>Μ</sub>: η εφελκυστική τάση στα όρια της πλάκας), ο οποίος είναι ένας δείκτης της έντασης (του μεγέθους) του τασικού πεδίου στην περιοχή της ρωγμής. Η γνώση του συντελεστή αυτού επέτρεπε την εκτίμηση του μεγέθους των τάσεων. Δεν ήταν απροσδόκητο και το επόμενο βήμα του Irwin. Γιατί να μιλώ για τάσεις, που έτσι και αλλιώς απειρίζονται εκεί που με ενδιαφέρει και να μη μιλήσω μόνον για το συντελεστή έντασης των τάσεων, ο οποίος είναι ένας αριθμός ενδεικτικός της τασικής κατάστασης, που επικρατεί κοντά στη ρωγμή; Να, λοιπόν, το νέο κριτήριο, που εισήγαγε ο Irwin:

***Η ρωγμή θα εκκινήσει, όταν ο συντελεστής έντασης των τάσεων πάρει μια κρίσιμη τιμή.***

Και επειδή όλοι οι δυνατοί τρόποι σχετικής μετακίνησης των χειλέων της ρωγμής είναι μόνον τρεις (εφελκυστικός, διατμητικός στο επίπεδο της πλάκας και διατμητικός στο κάθετο προς την πλάκα επίπεδο), μπορούμε να προβλέψουμε τις συνθήκες εκκίνησης της ρωγμής σε καθεμιά από τις τρεις αυτές περιπτώσεις θέτοντας μια κρίσιμη τιμή στον καθένα από τους αντίστοιχους συντελεστές έντασης των τάσεων. Ωραία, αλλά εάν συνυπάρχουν και οι τρεις καταπονήσεις πώς «προστίθενται» οι τρεις συντελεστές; Ο μέσος αριθμητικός των τριών, ο μέσος γεωμετρικός, κάποιος άλλος ή όποιος προλάβει πρώτος;!

Εν πάση περιπτώσει, και χωρίς επαρκή απάντηση στο τελευταίο ερώτημα, το κριτήριο του Irwin χρησιμοποιείται μέχρι τώρα για την πρόβλεψη της αντοχής προρηγματωμένων κατασκευαστικών στελεχών. Υπάρχουν κανονισμοί (ASTM, DIN, ISO κ.λπ.) που περιγράφουν τη διαδικασία προσδιορισμού του κρίσιμου  $K_{Ic}$ , ο οποίος, ως εφελκυστικός, θεωρείται και ο πλέον επικίνδυνος. Σε πολύ ψαθυρά υλικά δίνει καλά αποτελέσματα. Πέραν αυτού, στα πλαίσια της Γραμμικής Ελαστικότητας ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων συνδέεται με την ενεργειακή προσέγγιση του Griffith μέσω του λεγόμενου **«Ρυθμού Εκροής της Ελαστικής Ενέργειας»** και, επομένως, βρίσκεται μέσα στη λογική του Griffith.

Ο απειρισμός των τάσεων στην αιχμή της ρωγμής μπορεί να θεωρηθεί ως μια δευτερεύουσα αδυναμία ενός μοντέλου υπολογισμού των τάσεων, αλλά πάντως αφήνει αναπάντητα πολλά ερωτήματα σχετικά με το τι συμβαίνει εκεί. Πώς αντιμετωπίζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις; Δεν υπάρχουν; Και γιατί ο **κρίσιμος**

συντελεστής έντασης των τάσεων δεν μένει σταθερός, όταν αλλάζει το πάχος του δοκιμίου που χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό του; Ή το πάχος του δοκιμίου είναι μηχανική ιδιότητα του υλικού ή ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων δεν είναι;

Ο Griffith υπέθεσε ότι το μόνο κόστος εκκίνησης μιας ρωγμής είναι η δημιουργία νέων επιφανειών, δηλαδή ότι είναι πρόβλημα ισορροπίας μεταξύ ελαστικών παραμορφώσεων και επιφανειακής τάσης του υλικού. Αυτό είναι ακριβές μόνον στην εξαιρετικά ακραία περίπτωση που το υλικό παραμένει ελαστικό μέχρι και την αστοχία του, χωρίς προηγούμενη ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων. Τέτοια υλικά δεν υπάρχουν! Αντιθέτως, στα πραγματικά υλικά (ακόμη και στα λεγόμενα ψαθυρά) μικρό μόνον μέρος της διατιθέμενης ελαστικής ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια δημιουργίας νέων επιφανειών. Το μέγιστο μέρος της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε πλαστικό έργο και για την ολοκλήρωση άλλων δομικών ανακατατάξεων.

Ο Griffith, το 1958, προσπάθησε να βελτιώσει την κατάσταση, προτείνοντας μια διόρθωση στη διατύπωση του κριτηρίου του Griffith. Πρότεινε να προστεθεί στον όρο που αντιπροσωπεύει την ανά μονάδα νέας επιφάνειας δαπάνη ελαστικής ενέργειας ένας διορθωτικός όρος για την αντίστοιχη δαπάνη δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων. Όμως, για να προσεγγίσουν στα πειραματικά δεδομένα οι προβλέψεις του διορθωμένου κριτηρίου του Griffith, σε μετρίως όγκιμα υλικά, έπρεπε ο διορθωτικός προσθετός του Griffith να είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον προς διόρθωση όρο. Το βάρος της διόρθωσης βύθιζε την αρχική προσέγγιση!

Η αναγνώριση της έντονης εμπλοκής των πλαστικών παραμορφώσεων στην **περιγραφή** των συνθηκών εκκίνησης μιας ρωγμής οδήγησε στην ανάπτυξη του δεύτερου κλάδου της Μηχανικής των Θραύσεων που καλείται «**Ελαστική-Πλαστική Μηχανική των Θραύσεων**». Πρώιμες προσπάθειες είχαν αποκλειστικά πειραματικό χαρακτήρα. Ο Wells, ήδη από το 1960, πρότεινε τη χρησιμοποίηση του ανοίγματος (δηλαδή της ορθής σχετικής μετατόπισης) των χειλέων της ρωγμής (Crack Opening Displacement, COD), κοντά στην αιχμή της, υποθέτοντας ότι:

***Το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής (COD), μετρημένο κοντά στην αιχμή της, παίρνει μια χαρακτηριστική τιμή, σταθερή για το υλικό, τη στιγμή της εκκίνησης της ρωγμής.***

Ο καθαρά πειραματικός-εμπειρικός χαρακτήρας του κριτηρίου αυτού δεν δημιουργούσε την ανάγκη θεωρητικής υποστήριξής του και, επομένως, επέτρεπε την εφαρμογή του σε οποιοδήποτε υλικό, γραμμικό ή μη. Ήταν το πρώτο κριτήριο στην Ελαστική-Πλαστική Μηχανική των Θραύσεων. Ακόμη και σήμερα, χρησιμοποιείται συστηματικά, γιατί η εφαρμογή του μπορεί να γίνει επί τόπου στη ρηγματωμένη



κατασκευή με πρόχειρα μέσα.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1968, παρουσιάσθηκαν δύο σημαντικές θεωρητικές συμβολές. Στην πρώτη, οι Hutchinson, Rice και Rosengren πρότειναν μέθοδο υπολογισμού του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου σε ρηγματωμένη πλάκα από **μη γραμμικό** ελαστικό υλικό, σε κλειστή μορφή. Ήταν μεγάλη επιτυχία, διότι επέτρεπε την εκτίμηση των **πλαστικών** παραμορφώσεων στην περιοχή της αιχμής της ρωγμής με εύκολο και επαρκή τρόπο. Τούτο διότι, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, οι ελαστικές παραμορφώσεις του μη γραμμικού ελαστικού υλικού μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπίπτουν με τις ελαστικές- πλαστικές παραμορφώσεις του ελαστοπλαστικού υλικού. Έτσι, υποθέσεις για την αστοχία τέτοιων υλικών μπορούσαν να ελεγχθούν εύκολα.

Η δεύτερη συμβολή έγινε από τον J. Rice, την ίδια χρονιά, με την παρουσίαση ενός, ανεξάρτητου από το δρόμο ολοκλήρωσης, επικαμπύλιου ολοκληρώματος (J-integral) για τον υπολογισμό του ρυθμού εκροής ελαστικής ενέργειας από την αιχμή μιας ρωγμής, σε μη γραμμικό ελαστικό υλικό. Επομένως, γινόταν δυνατή η επέκταση της ενεργειακής προσέγγισης των Griffith-Irwin στα μη γραμμικά ελαστικά υλικά, δηλαδή περίπου και στα ελαστοπλαστικά υλικά.

Μετά ήλθε το χάος! Οι δεκαετίες του 1970 και του 1980 χαρακτηρίζονται από υπερβολικά μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων που πρότειναν νέα ή «νέα» κριτήρια αστοχίας ρηγματωμένων υλικών. Υπήρξαν τεύχη διεθνών ειδικών περιοδικών, στα οποία όλα τα άρθρα παρουσίαζαν τέτοια κριτήρια. Ακόμη και η απλή παρακολούθηση της βιβλιογραφίας έγινε δύσκολη. Πολλά από αυτά τα κριτήρια είχαν νόημα μόνον σε μια στενή περιοχή υλικών, γεωμετριών και φορτίσεων. Άλλα παρουσίαζαν με νέα διατύπωση και αλγεβρική μορφή ήδη υπάρχοντα κριτήρια. Μερικά παραβίαζαν τους κανόνες της κοινής λογικής. Ένοιωθε κανείς την ανάγκη να ασχοληθεί αποκλειστικά με τη διατύπωση ενός **«υπερκριτηρίου»** επιλογής του «σωστού» για κάθε εφαρμογή κριτηρίου!

## **Στις μέρες μας**

Μένουν πολλά να γίνουν. Δεν υπάρχει παρά μόνον εμπειρική απάντηση για τις συνθήκες αστοχίας υλικών (ρηγματωμένων ή μη) υπό κοπωτικά φορτία. Ακόμη και τα παλιά θέλουν βελτίωση ή αναθεώρηση! Νέα υλικά, που παρουσιάζονται σχεδόν καθημερινά, με τη συμπεριφορά τους θέτουν προκλητικές ερωτήσεις στην Αντοχή των Υλικών και απαιτούν σαφείς απαντήσεις. Δεν γίνεται λογικά αποδεκτό το κρίσιμο μέγεθος αστοχίας ρηγματωμένου υλικού (είτε είναι ο κρίσιμος συντελεστής έντασης

των τάσεων, είτε το κρίσιμο άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής) να εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και, επομένως, να μην μπορεί να θεωρηθεί ως μηχανική ιδιότητα του υλικού, όπως το όριο διαρροής. Κάποιος ξέχασε να κάνει την αναγωγή! Δεν μπορεί τα υλικά, που αρρηγμάτιστα παρουσιάζουν συνεπή συμπεριφορά, σύμφωνα με τους νόμους της Μηχανικής, να αποκτούν ξαφνικά αλλοπρόσαλλο χαρακτήρα, επειδή ρηγματώθηκαν, και επομένως να υπακούσουν σε άλλα κριτήρια αστοχίας. Δεν είναι, λοιπόν, λογικό η Μηχανική των Θραύσεων να θεωρείται (τουλάχιστον από την πλειοψηφία των σπουδαστών μας) ως γνωστικό αντικείμενο ανεξάρτητο από την κλασική Αντοχή των Υλικών και όχι το τελευταίο της Κεφάλαιο, όπως πραγματικά είναι. Η διαφορά ανάμεσα σε μια ρηγματωμένη και μια αρρηγμάτιστα πλάκα βρίσκεται μόνον στην κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων. Ο «χαρακτήρας» του υλικού της πλάκας πρέπει να μένει ο ίδιος και το υλικό να υπακούει στους ίδιους νόμους της Μηχανικής, επομένως και στα ίδια κριτήρια αστοχίας. Αλλιώς, η προσέγγισή μας δεν είναι επιστημονική ή τα κριτήριά μας δεν είναι, ακόμη, επιστημονικά.

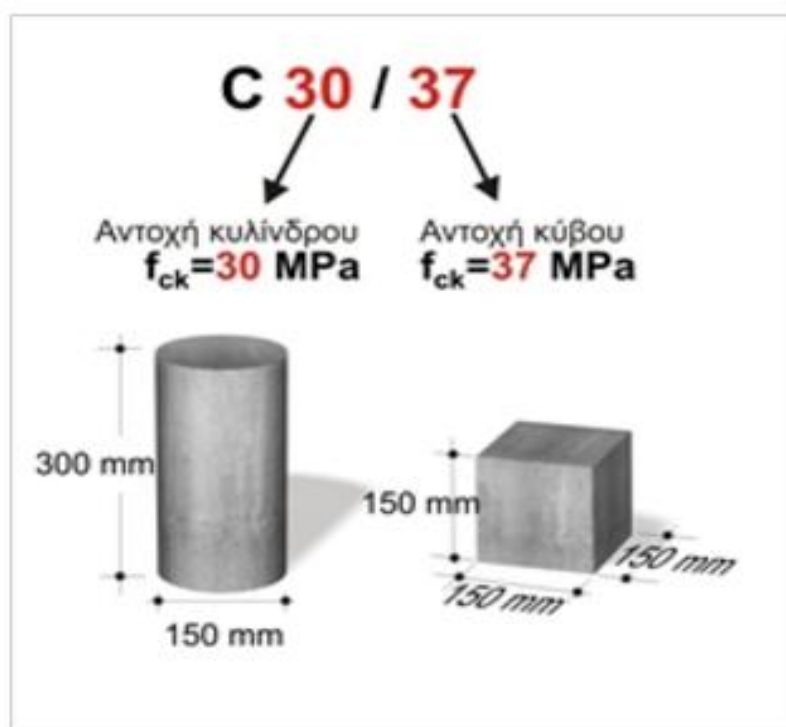
Στην πράξη δεν έχουμε σοβαρούς λόγους να «ανησυχούμε». Πάντοτε υπάρχουν καλές εμπειρικές (και μερικές επιστημονικές) απαντήσεις για τις ανάγκες των εφαρμογών. Γενικώς, ξέρουμε μέχρι πόσα Richter θα αντέξει το σπίτι μας. Αλλά, πρέπει να ομολογήσουμε ότι βρισκόμαστε ακόμη στην εποχή του Κλαυδίου Πτολεμαίου με τους επικύκλους του. Ο Νεύτωνας της Αντοχής των Υλικών δεν φάνηκε ακόμη!

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

### 2.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα<sup>3</sup>, όπως το λέει και η λέξη, είναι ένα «δέμα» από τα εξής υλικά: χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος, τσιμέντο και νερό. Όταν τα υλικά αναδευτούν για λίγο σχετικά χρόνο και σε κατάλληλες αναλογίες, δημιουργούν το σκυρόδεμα. Το χαρακτηριστικό του σκυροδέματος είναι η σκλήρυνση μέσα σε λίγες ώρες και η απόκτηση υψηλής αντοχής μέσα σε λίγα 24ωρα. Ανάλογα με τις πρόσθετες ιδιότητες που μπορεί να ζητηθούν από το σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται κατά την ανάδευσή του και διάφορα άλλα πρόσθετα υλικά επιβραδυντικά ή/και υπερευστοποιητικά για αύξηση της εργασιμότητας, ή ακόμα και χαλύβδινες ή σύνθετες (composites) ίνες, για να δώσουν στο μίγμα πρόσθετη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή.

Η ταξινόμηση των κατηγοριών σκυροδέματος γίνεται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη. Κάθε ποιότητα σκυροδέματος (Concrete) π.χ. C30/37, χαρακτηρίζεται από δύο ισοδύναμες μεταξύ τους αντοχές, που στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 30 MPa και 37 MPa. Η πρώτη αντοχή είναι η χαρακτηριστική αντοχή  $f_{ck}$  πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου και η δεύτερη αντοχή είναι η χαρακτηριστική αντοχή πρότυπου κυβικού δοκιμίου.



Εικόνα 6. Δοκίμια σκυροδέματος [3]

<sup>3</sup> «Γενικά το σκυρόδεμα – Καλούπια», <http://www.ktiriaka.gr/Default.aspx?ch=20>

Οι κατηγορίες σκυροδέματος που υποστηρίζει ο Ευρωκώδικας 2 και το EN 206-1 είναι:

δευτερεύουσες χρήσεις	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	
<b>συνήθεις χρήσεις</b>	<b>C30/37</b>	<b>C35/45</b>	<b>C40/50</b>	<b>C45/55</b>	<b>C50/60</b>
ειδικές χρήσεις	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105

Στην Ελλάδα, μέχρι το 1994 συστηματικά και μέχρι το 1997 περιστασιακά, χρησιμοποιούνταν οι παλιές ποιότητες σκυροδέματος (B). Οι πιο συνηθισμένες ήταν η B160 (που αντιστοιχούσε περίπου στο C12/15), η B225 (που αντιστοιχούσε σε ενδιάμεση ποιότητα μεταξύ C12/15 και C16/20) και η B300 (που αντιστοιχούσε περίπου στο C20/25).

Ο ΕΚΩΣ 2000 περιείχε τις ίδιες κατηγορίες σκυροδέματος με μέγιστη την C50/60 και πρακτικά ελάχιστη την C20/25, η οποία χρησιμοποιούνταν συνήθως μέχρι το 2010.

Με βάση τους Ευρωκώδικες, πρακτικά, η ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος είναι η C30/37.

Η προστασία του χάλυβα οπλισμού από διάβρωση εξαρτάται από το πορώδες, την ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος. Η πυκνότητα και η ποιότητα της επικάλυψης θεωρείται ότι επιτυγχάνεται με την κατηγορία ελάχιστης αντοχής του σκυροδέματος. Στον επόμενο πίνακα εμφανίζεται μία πρακτική σύνοψη του συνδυασμού ελάχιστης ενδεδειγμένης ποιότητας σκυροδέματος και της ελάχιστης επικάλυψης για τις κυριότερες συνθήκες περιβάλλοντος ενός κτιρίου.

	Κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος κτιρίου			
	Συνήθεις συνθήκες (XC2/XC3)	Δυσμενείς συνθήκες (XC4)	Παραθαλάσσιες (XD1/XS1)	<b>ΠΙΣΙΝΕΣ</b> (XD2)
Ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Ελάχιστα πάχη επικαλύψεων	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm
Ελάχιστη ευνοϊκή κατηγορία σκυροδέματος	C35/45	C40/50	C40/50	C40/50
Ελάχιστα πάχη επικαλύψεων	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm

**Πίνακας 2. Ελάχιστη επικάλυψη του χάλυβα οπλισμού και ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος. [3]**

- Στις πλάκες αφαιρούνται 5 mm.
- Σε περίπτωση διασφάλισης ειδικού ελέγχου παραγωγής του σκυροδέματος, αφαιρούνται 5 mm.
- Σε περίπτωση σχεδιασμού του κτιρίου για χρόνο ζωής 100 έτη, προστίθενται 10 mm.
- Στις επιφάνειες των πελμάτων των θεμελίων -με χυτό σκυρόδεμα- που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, αν υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση, ή σκυρόδεμα καθαριότητας πρέπει η επικάλυψη να είναι  $\geq 40$  mm, ενώ αν γίνεται επί του εδάφους, πρέπει να είναι  $\geq 75$  mm.

Τα καλούπια

Τα στοιχεία των καλουπιών για την κατασκευή δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, χωρίζονται σε τέσσερεις κατηγορίες:

1. Επιφανειακά στοιχεία ή πετσώματα
2. Οριζόντια φέροντα στοιχεία ή δοκοί
3. Σκαλωσιές ή ικριώματα
4. Βοηθητικά στοιχεία ή κλειδιά

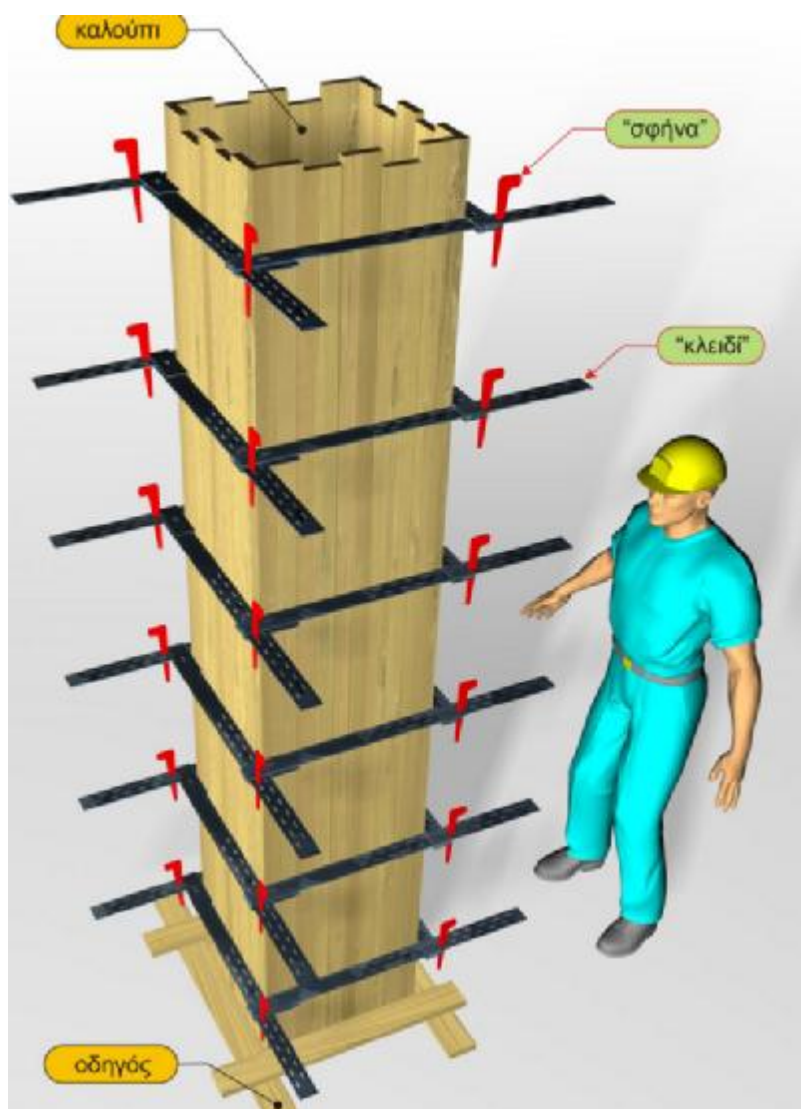
Τα στοιχεία των καλουπιών μπορεί επίσης να είναι συμβατικά, ή βιομηχανικά. Των συμβατικών καλουπιών τα στοιχεία είναι κυρίως από φυσικό ξύλο και ανάλογα με τις διατομές τους έχουν και τα παρακάτω ονόματα:

- σανίδα (τάβλα) με συνηθισμένο πάχος 22 mm, πλάτος 80 έως 150 mm, και μήκος 2.30 έως 4.50 m
- καδρόνι (λατάκι) με συνηθισμένη διατομή 80x80 mm και μήκη 2.40 έως 4.50 m
- δοκός ή ταμπάνι με συνηθισμένη διατομή 80 έως 120 mm επί 120 έως 200 mm σε μήκη 2.50 έως 5.00 m
- μπετοφόρμ πάχους 18 έως 25 mm και διαστάσεις πλάτους 1.25 m επί μήκος 2.50 m
- μαδέρι πάχους 50 mm, πλάτους 200 έως 300 mm και μήκους 4.0 m.

Σε μια συμβατική σκαλωσιά τα στοιχεία της είναι κατασκευασμένα από κοίλες σιδερένιες διατομές με συνήθη διάμετρο περίπου  $\varnothing 50$ . Με τις διατομές αυτές κατασκευάζονται οι σωλήνες και τα πλαίσια.

Τα πλαίσια συνήθως έχουν ύψος από 1.20 έως 2.50 m και με συνδυασμό πύργων, πατώβιδας και την πάνω βίδα Ψ μπορούν να φτάσουν σχεδόν σε οποιοδήποτε ύψος. Συνήθως τα πλαίσια ενώνονται μεταξύ τους, κατά την εγκάρσια έννοια, με διαγώνιους συνδέσμους τα λεγόμενα χιαστά, που είναι κατασκευασμένα από κοίλες σιδερένιες διατομές Ø25 έως Ø30 συνθέτοντας τους πύργους.

Τα βοηθητικά στοιχεία (κλειδιά) των καλουπιών των κολονών, εξασφαλίζουν τη θέση των πλευρικών στοιχείων από τις «υδροστατικές» πιέσεις που εξασκούνται κατά τη σκυροδέτηση. Το μεγαλύτερο πρόβλημα πλευρικών ωθήσεων εμφανίζεται στις κολόνες και τα τοιχεία, λόγω του μεγάλου ύψους που έχουν και επομένως λόγω των μεγάλων πλευρικών πιέσεων που δέχονται. Τα κλειδιά συνήθως είναι μεταλλικά μεταβλητού μήκους και τοποθετούνται σε αποστάσεις από 200 έως 500 mm.



Εικόνα 7. Καλούπωμα κολώνας.[3]

Τα στοιχεία των βιομηχανικών καλουπιών είναι συνδυασμός ξύλου, σιδήρου, αλουμινίου και πλαστικού και τα ονόματά τους ποικίλουν ανάλογα με τη βιομηχανία που τα παράγει.

Τα πλεονεκτήματα των βιομηχανικών ξυλοτύπων είναι:

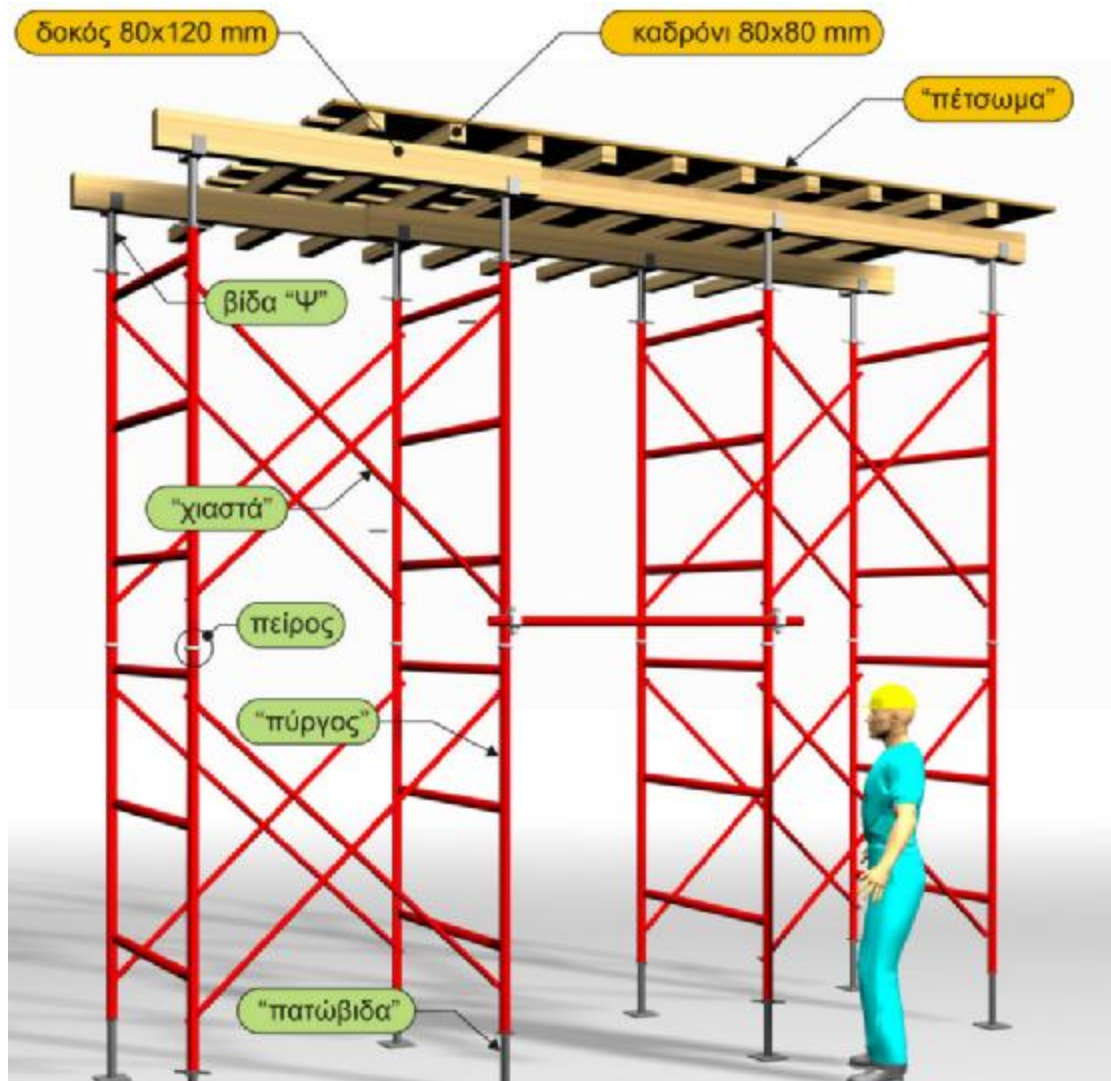
- ✚ υψηλή ποιότητα κατασκευής
- ✚ μικρός αριθμός προσωπικού
- ✚ ταχύτητα εκτέλεσης
- ✚ πολιτισμένες συνθήκες εργασίας
- ✚ ασφάλεια εργαζομένων
- ✚ επίτευξη λείων επιφανειών που μπορούν να παραμένουν ανεπίχριστες

Τα μειονεκτήματα των βιομηχανικών ξυλοτύπων είναι:

- ✚ υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης
- ✚ ανάγκη ύπαρξης ακριβούς μελέτης εφαρμογής σε κάθε έργο
- ✚ ανάγκη χρήσης γερανού
- ✚ η χρήση λείων πετσωμάτων δημιουργεί επιφάνειες με μικρή πρόσφυση σοβάδων
- ✚ μικρή ευελιξία σε μικρές και πολύπλοκες κατασκευές

Εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βιομηχανικών ξυλοτύπων με την αντίστοιχη βαρύτητά τους, προκύπτει σαφής υπεροχή των βιομηχανικών ξυλοτύπων σε σχέση με τους συμβατικούς. Αν ληφθεί υπόψη και η προβλεπόμενη επικράτηση της χρήσης του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (βλέπε § 2.4.9) στις αντισεισμικές κατασκευές, ίσως οι βιομηχανικοί ξυλότυποι να αποτελούν την ιδανική λύση, δεδομένου ότι μπορούν να αντέξουν τις μεγάλες πιέσεις που εξασκούνται στο εσωτερικό των καλουπιών.

Στη συνέχεια φαίνονται τρεις περιπτώσεις καλουπώματος με βιομηχανικούς ξυλοτύπους, όπου το χαρακτηριστικό τους στοιχείο είναι το μεγάλο ύψος των δομικών στοιχείων.

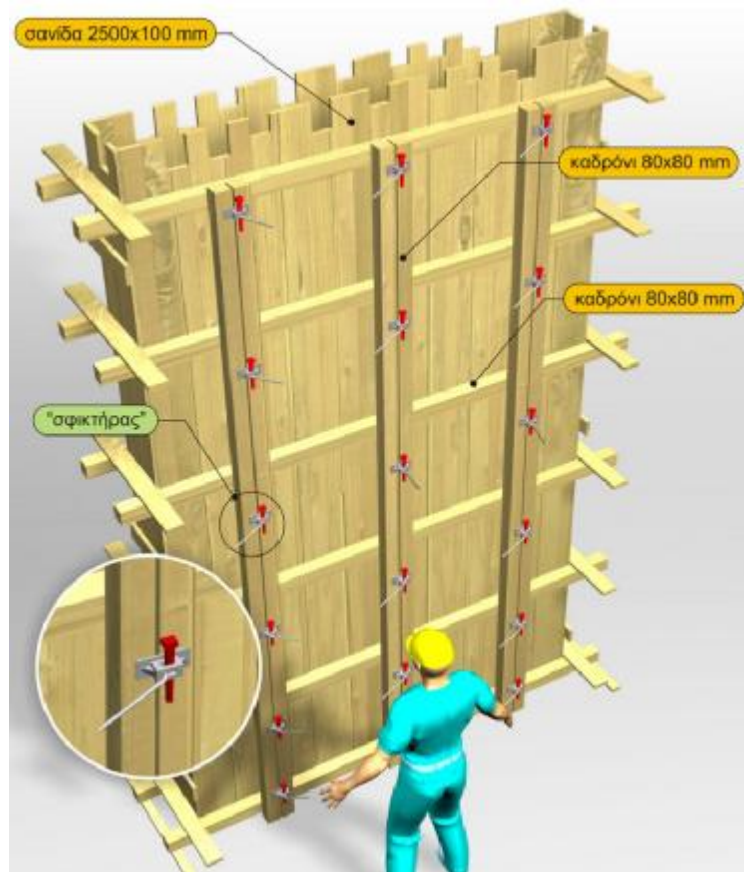


Εικόνα 8. Καλούπωμα πλάκας.[3]

Το καλούπωμα των δοκών και των πλάκων γίνεται με την χρησιμοποίηση σύνθετων ξύλινων δοκών διπλού ταυ και με μπετοφόρμ χωρίς καρφώματα. Τα ικριώματα είναι αλουμινίου. Το ξε-καλούπωμα γίνεται με την απελευθέρωση των ειδικών πείρων στην κορυφή των ικριωμάτων, που έτσι υποχωρούν ελεγχόμενα κατά 50 mm περίπου, χωρίς φθορές και χωρίς κίνδυνο ατυχήματος.

Το καλούπωμα του τοιχείου ύψους 5.50 m και η τοποθέτηση της εξέδρας εργασίας είναι θέμα λίγων λεπτών, ενώ ακόμα πιο γρήγορο, καθαρό και ασφαλές είναι το ξεκαλούπωμα.





Εικόνα 9. Καλούπωμα τοιχείου.[3]

Η κολόνα αυτή έχει ύψος 5.50 m και καλουπώνεται ταχύτατα, σε διαστάσεις διατομής που είναι πολλαπλάσια των 50 mm. Σφίγγεται με πεταλούδες σε προκαθορισμένες θέσεις και στηρίζεται προσωρινά με ελαφρούς διαγώνιους συνδέσμους. Η πλατφόρμα εργασίας στην κορυφή της κολόνας και η σκάλα, τοποθετούνται και αφαιρούνται σε λίγα λεπτά της ώρας.

Εφόσον οι επιφάνειες των τοιχείων, των δοκών και των πλακών πρόκειται να σοβατιστούν, απαιτείται καλό πλύσιμο με τη βοήθεια αντλιών πίεσης της τάξεως των εκατό ατμοσφαιρών και βέβαια στη συνέχεια απαιτούνται οι κατάλληλες πρακτικές για καλή πρόσφυση του σοβά.

Σε περίπτωση ιδιαίτερα επιμελημένης εφαρμογής βιομηχανικών ξυλοτύπων, είναι αξιοσημείωτη και η περίπτωση αποφυγής σοβάδων, λόγω της άριστης και έτοιμης για χρωματισμό επιφάνειας.

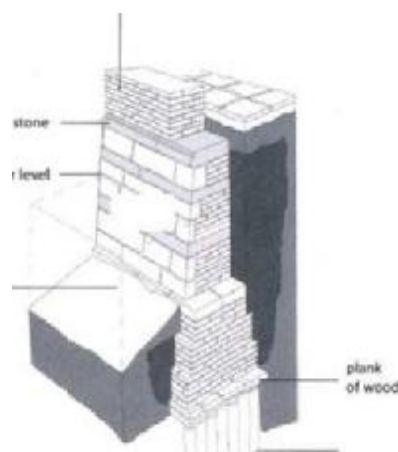


Εικόνα 10. Καλούπωμα κολώνας.[3]

## 2.2 ΞΥΛΟ

Το ξύλο<sup>4</sup> είναι ένα από τα αρχαιότερα δομικά υλικά και μάλιστα το πιο εύχρηστο, τόσο όσον αφορά την απόκτηση και την κατεργασία της πρώτης ύλης, όσο και τη μελέτη και κατασκευή εξαιρετικά λειτουργικών φορέων, απλών ή περίτεχνων ως την τελευταία λεπτομέρειά τους. Για πολλούς αιώνες και σε πολλές περιοχές υπήρξε το πιο διαδεδομένο οικοδομικό υλικό. Εμφανίζεται σε κατασκευές από την αρχαία Ελλάδα, μέχρι την μεσαιωνική Ευρώπη και τη Βενετία. Στην σύγχρονη εποχή, η πρόοδος της τεχνολογίας δημιουργεί νέες και αξιόπιστες μορφές βιομηχανικού ξύλου με αποτέλεσμα την αναβίωση των ξύλινων κατασκευών. Ιδιαίτερα στις χώρες του εξωτερικού, όπως η Αμερική και ο Καναδάς, οι ξύλινες προκατασκευασμένες κατοικίες είναι εξαιρετικά διαδεδομένες.

Στην Ελλάδα υπάρχει μία γενική δυσπιστία ως προς το ξύλο, ακόμα και από μηχανικούς. Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω του κατασκευαστικού μοντέλου που έχει επικρατήσει, το οποίο θέλει το σκυρόδεμα ως βέλτιστη λύση σε κάθε περίπτωση, και λόγω της έλλειψης εξειδικευμένων τεχνιτών. Όμως με τις αλλαγές που υφίστανται έχουν αρχίσει να δραστηριοποιούνται ελληνικές εταιρίες προς την κατεύθυνση της προκατασκευασμένης τοιχοποιίας. Μία από αυτές είναι η εταιρία Κοφινάς. Ως χαρακτηριστικό δείγμα μελετημένης και πιστοποιημένης τοιχοποιίας, στην παρούσα έκθεση θα εξεταστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της, με στόχο την εξαγωγή ενός ποιο γενικού συμπεράσματος για αυτόν τον τρόπο δόμησης.



Εικόνα 11. Τυπική θεμελίωση με ξύλινους πασσάλους σε βενετσιάνικη κατασκευή[4]

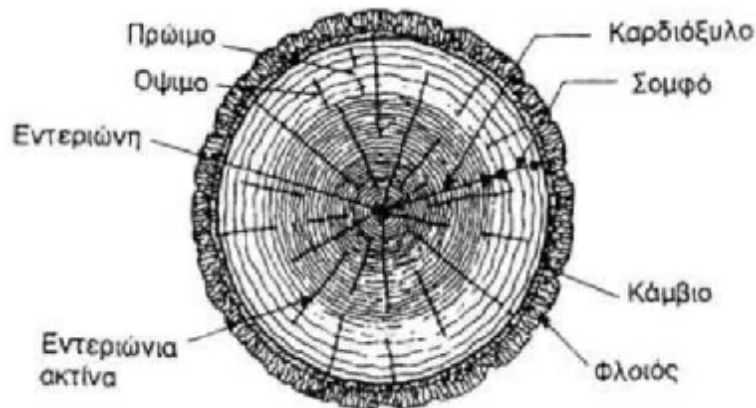
<sup>4</sup> Ξύλινη προκατασκευασμένη τοιχοποιία», ΕΜΠ, Πουλιάσης Γεώργιος, Ψυχάρης Νικόλαος, Ντιγκάκης Χαράλαμπος, Φιλαρέτου Φιλάρετος.

Για την καλύτερη κατανόηση όμως των παραπάνω χαρακτηριστικών κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη πρώτα των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων της δομικής ξυλείας ώστε αυτές να αποτελέσουν την βάση, σύμφωνα με την οποία θα εξαχθούν οποιαδήποτε συμπεράσματα.

Μέρος πρώτο: Οι ιδιότητες του ξύλου ως τεχνικό υλικό

### 1. Δομή [4]

Το ξύλο είναι οργανικό προϊόν, προέρχεται δηλαδή από ζώντες οργανισμούς τα δένδρα. Οι δύο κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται όλα τα δένδρα είναι τα πλατύφυλλα που παράγουν την «Σκληρή Ξυλεία» (Hardwood) και τα κωνοφόρα που δίνουν την λεγόμενη «Μαλακή Ξυλεία» (Softwood). Το μεγαλύτερο ποσοστό της δομικής ξυλείας προέρχεται από τα κωνοφόρα όπως το έλατο ή το πεύκο.



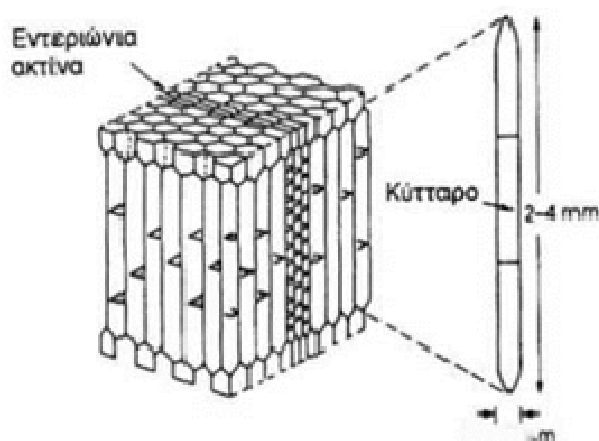
Εικόνα 12. Τομή κάθετη στον άξονα κορμού δένδρου [4]

Εκτελώντας μία τομή κάθετα στον άξονα ενός δένδρου (εικόνα 2) αποκαλύπτονται διάφορα χαρακτηριστικά του μέρη. Στην σχηματική απεικόνιση της τομής ξεχωρίζουν τα μέρη του κορμού. Ξεκινώντας από το κέντρο βρίσκεται η εντεριώνη η οποία σχηματίζεται από τον ιστό που προωθεί την καθ' ύψος ανάπτυξη κάθε χρόνο και ελέγχει την ανάπτυξη προς το εξωτερικό και προς τα κλαδιά και τις ρίζες. Από τεχνικής άποψης αποτελεί μειονέκτημα του ξύλου μειώνοντας την αντοχή του.

Γύρω από αυτό βρίσκεται το καρδιόξυλο που είναι αδρανής στρώση η οποία περιβάλλεται από το σομφό ξύλο. Μέσω αυτού μεταφέρονται οι χυμοί από τις ρίζες

στα φύλλα. Ύστερα ακολουθεί το κάμβιο το οποίο παράγει τον εσωτερικό φλοιό προς τα έξω και τέλος έχουμε τον φλοιό που αποτελείται από τον εσωτερικό και τον εξωτερικό φλοιό.

Εξετάζοντας την μικροσκοπική δομή των δένδρων παρατηρούμε (εικόνα 3) περίπου κοινή κυτταρική δομή σε όλα τα είδη. Τα βασικότερα κύτταρα του ξύλου είναι σωληνωτής μορφής με προσανατολισμό παράλληλα στην αξονική διεύθυνση. Τα τοιχώματα τους δομούνται από ίνες κυτταρίνης σε ποσοστό 50% κ.β. που περιβάλλονται από άλλα συστατικά, το σημαντικότερο από τα οποία είναι η λιγνίνη. Αυτή αποτελεί άμορφο πολυμερές που βρίσκεται σε ποσοστό περίπου 25% κ.β. στο κύτταρο και δίνει σταθερότητα διαστάσεων. Η κυτταρίνη είναι κρυσταλλικής δομής και απαρτίζεται από μακρομόρια  $O_6H_{10}O_5$ . Τα μόρια αυτά σχηματίζουν μακριές αλυσίδες κατά μήκος των κυττάρων, γεγονός στο οποίο οφείλεται η καλή μηχανική συμπεριφορά του ξύλου στην αξονική διεύθυνση



Εικόνα 13.Μικροσκοπική δομή δένδρου [4]

## 2. Φυσικές Ιδιότητες [4]

### 2.1. Πυκνότητα

Η πυκνότητα του ξύλου αποτελεί μία σημαντική φυσική ιδιότητά του καθώς συνδέεται άμεσα με τις μηχανικές του ιδιότητες αλλά και με τις υπόλοιπες φυσικές, όπως η υγροσκοπικότητα, η ρίκνωση και η διόγκωση, οι ακουστικές, θερμικές και οι ηλεκτρικές ιδιότητες. Πυκνότητα είναι το μέτρο της μάζας που περιέχεται σε ορισμένο όγκο υλικού και εκφράζεται με το πηλίκο μάζας και όγκου. Στην δομική ξυλεία αυτή κυμαίνεται μεταξύ 300 και 550  $kg/m^3$ , ενώ στις πλάκες προσανατολισμένων ινών κυμαίνεται μεταξύ 550 και 750  $kg/m^3$ .

Η πυκνότητα του ξύλου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Σημαντικότερος από αυτούς είναι η υγρασία. Το ξύλο είναι ύλη υγροσκοπική, δηλαδή έχει την ιδιότητα να προσλαμβάνει υγρασία. Πρόσληψη υγρασίας έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του όγκου και της μάζας του, και απώλεια υγρασίας την μείωσή τους. Είναι ευνόητο ότι συγκρίσιμα στοιχεία μπορούν να προκύψουν μόνο αν η υγρασία κατά τον προσδιορισμό της μάζας και του όγκου είναι γνωστή. (Εκτενέστερη αναφορά για τις επιδράσεις της υγρασίας στο ξύλο γίνεται παρακάτω όμως γίνεται από νωρίς κατανοητή η σημασία της υγροσκοπικότητας στις ιδιότητές του)

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει την πυκνότητα του ξύλου είναι η δομή του. Το ξύλο είναι κατασκευασμένο από κύτταρα που αποτελούνται από κυτταρικά τοιχώματα και κυτταρικές κοιλότητες. Μερικές φορές ανάμεσα στα κύτταρα υπάρχουν μεσοκυττάριοι αγωγοί ή μεσοκυττάριοι χώροι. Η πυκνότητα του ξύλου θεωρείται ως το μέτρο της ποσότητας της ξυλώδους ύλης που περιέχεται σε ορισμένο όγκο αλλά είναι και δείκτης των κενών χώρων. Το ποσοστό αυτών κυμαίνεται από 95% στα ελαφρά ως 15% σε πολύ βαριά ξύλα. Διαφορές πυκνότητας προέρχονται από διαφορές δομής, που αναφέρονται στην κυτταρική συγκρότηση και ιδιαίτερα στους τύπους κυττάρων, στην ποσοτική κατανομή τους, στο πάχος των κυτταρικών τοιχωμάτων και στο μέγεθος των κυτταρικών κοιλιοτήτων. Ενδεικτικά αναφέρονται και παράγοντες μικρότερης σημασίας όπως τα διάφορα εκχυλίσματα που μπορεί να περιέχονται στο ξύλο και η χημική σύσταση των κυτταρικών τοιχωμάτων.

Γενικά παρατηρείται ότι μεγαλύτερη πυκνότητα του ξύλου είναι δηλωτική καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων. Αυτό είναι εύλογο καθώς αύξηση της πυκνότητας υποδηλώνει κύτταρα με παχύτερα τοιχώματα και λιγότερα διάκενα μεταξύ των κυττάρων.

## 2.2. Υγροσκοπικότητα [4]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το ξύλο αποτελεί ένα υγροσκοπικό υλικό που ανταλλάσσει νερό με το περιβάλλον, ώσπου να φθάσει σε μία στάθμη ισορροπίας. Το περιεχόμενο νερό, εκτός από τις αναμενόμενες προφανείς ογκομετρικές μεταβολές και τις μεταβολές του βάρους, επηρεάζει σημαντικά όλες τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ξύλου. Έτσι μία σωστή αναφορά ή χρήση των μηχανικών ιδιοτήτων του ξύλου πρέπει να γίνεται σε αντιστοιχία με το ποσοστό της υγρασίας που αυτό περιέχει, ή που αναμένεται να περιέχει στην κατασκευή.

Σχετική υγρασία(%)	Θερμοκρασία (°C)								
	10	15	20	30	40	50	60	70	80
90	22	22	22	21	20	19	18	17	15.5
80	17	17	16,5	16	15	14.5	13.5	12.5	12
70	14	13.5	13	13	12	11.5	11	10	9
60	11.5	11	11	10.5	10	9.5	9	8	7.5
50	9.5	9,5	9.5	9	8,5	8	7,5	7	6
40	8	8	8	7.5	7	6.5	6	5.5	5
30	6	6	6	6	5.5	5	5	4.5	4
20	4.5	4.5	4.5	4	4	3.5	3	3	2.5
10	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2	2	1.5	1.5

**Πίνακας 3.** Εσωτερική υγρασία σε σχέση με την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία περιβάλλοντος

Ανεξάρτητα από την υγρασία που περιέχει το ξύλο στο ζωντανό δέντρο (επομένως και αμέσως μετά την υλοτομία), η επαφή του με την ατμόσφαιρα έχει ως συνέπεια την απώλεια υγρασίας. Η ποσότητα που τελικά συγκρατεί εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στις οποίες είναι εκτεθειμένο. Η υγρασία βρίσκεται στο ξύλο σε δύο μορφές: ως υγρό νερό στα κυτταρικά τοιχώματα και ως υγρό ή με μορφή υδρατμών στις κυτταρικές κοιλότητες. Σε κατάσταση κορεσμού δεν υπάρχουν υδρατμοί αλλά μόνο υγρό νερό.

Βασική αιτία εισόδου νερού στη μάζα ξηρού ξύλου είναι η έλξη μορίων νερού από υδροξύλια των χημικών δομικών συστατικών του, ιδίως της κυτταρίνης. Στην αρχή δημιουργείται μονομοριακό στρώμα νερού, που βαθμιαία γίνεται πολυμοριακό. Το μονομοριακό στρώμα συγκρατιέται από τα υδροξύλια με ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου. Το πολυμοριακό στρώμα εισέρχεται και συγκρατιέται με τη δράση δευτερευουσών ελκτικών δυνάμεων. Η είσοδος νερού προκαλεί απώθηση κρυσταλλινών και μικροϊνιδίων με συνέπεια την έναρξη διογκώσεως του ξύλου. Συμπληρωματικά, νερό μπορεί να προσληφθεί με τριχοειδή συμπύκνωση σε κενά που υπάρχουν στο κυτταρικό τοίχωμα, ανοίγματα μεμβρανών βοθρίων και μικρά στόμια βοθρίων που όλα δρουν ως τριχοειδή. Μετά τον κορεσμό των τοιχωμάτων, υγρό νερό μπορεί και να εισέλθει και στις κυτταρικές κοιλότητες.

Από την παραπάνω βασική ανάλυση του μηχανισμού συγκράτησης της υγρασίας προκύπτουν δύο πολύ βασικά συμπεράσματα με άμεση σχέση μεταξύ

τους. Αρχικά δύναται ο υπολογισμός ενός σημείου του ποσοστού της υγρασίας του ξύλου που θα αντιστοιχεί σε πλήρη κορεσμό των κυτταρικών τοιχωμάτων και κυτταρικές κοιλότητες εντελώς κενές. Αυτό το σημείο το ονομάζεται σημείο ινοκόρου και θεωρητικά κυμαίνεται γύρω στο 28%. Επίσης παρατηρείται ότι οποιαδήποτε μεταβολή υγρασίας κάτω από το σημείο αυτό επηρεάζει άμεσα την κυτταρική δομή του ξύλου επομένως περιμένουμε μεταβολή των διαστάσεών του. Πράγματι οι μεταβολές της υγρασίας κάτω από το σημείο του ινοκόρου έχουν ως αποτέλεσμα την σχεδόν γραμμική μεταβολή των διαστάσεών του ενώ αντίθετα πάνω από αυτό οι παραπάνω μεταβολές είναι αμελητέες και συντελούν πρακτικά μόνο στην αύξηση του βάρους.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αποβολής-πρόσληψης νερού από το ξύλο παρουσιάζει μία υστέρηση. Για την ίδια σχετική υγρασία περιβάλλοντος, το ποσοστό υγρασίας του είναι υψηλότερο κατά την διάρκεια της αποβολής νερού κατά την πρώτη ξήρανση του ξύλου απ' ότι για τις επόμενες ξηράνσεις οι οποίες, με την σειρά τους σημειώνουν υψηλότερα ποσοστά υγρασίας από τις προσλήψεις νερού. Δηλαδή το ξύλο μετά την πρώτη ξήρανση φτάνει δυσκολότερα (υπό υψηλότερη σχετική υγρασία περιβάλλοντος) το ποσοστό υγρασίας που είχε αρχικά.

### 2.3. Ρίκνωση και Διόγκωση λόγω μεταβολής υγρασίας [4]

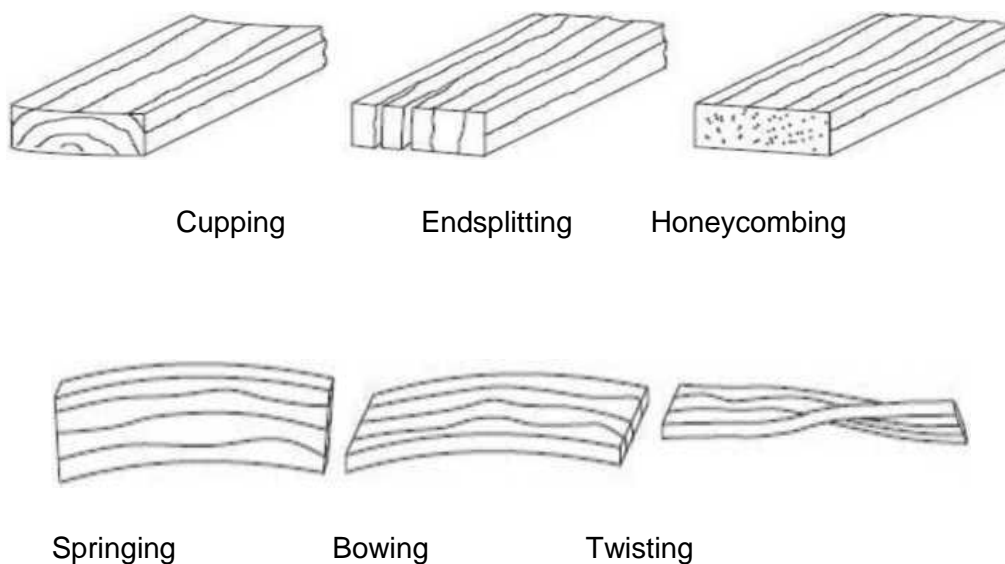
Το ξύλο είναι ανισότροπο υλικό από άποψη ρίκνωσης και διόγκωσης, δηλαδή οι μεταβολές των διαστάσεών του, για την ίδια μεταβολή υγρασίας, διαφέρουν σε διαφορετικές αυξητικές διευθύνσεις. (Διάγραμμα 1) Συγκεκριμένα, η αυξομείωση είναι ελάχιστη στην αξονική διεύθυνση, πολύ μεγαλύτερη ακτινικά και σχεδόν διπλάσια της ακτινικής στην εφαπτομενική διεύθυνση. Ως αποτέλεσμα της ανομοιομορφίας στην κατανομή των παραμορφώσεων, λόγω του παραπάνω φαινομένου αλλά και λόγω ενδεχόμενης ανομοιόμορφης κατανομής της υγρασίας στο εσωτερικό του ξύλου, εμφανίζεται στρέβλωση επιφανειών και διατομών του ξύλου, ακόμη και διαμήκεις και εγκάρσιες ρωγμές. (Εικόνα 4) Όπως είναι προφανές η παραμορφωσιμότητα του ξύλου μπορεί να γίνει σοβαρό εμπόδιο στην αξιοποίηση του ξύλου γιατί υποβαθμίζει την ποιότητα κατασκευών και προϊόντων του. Για παράδειγμα ένα σκεβρωμένο ξύλο εμφανίζει προβλήματα εφαρμογής, ένα δομικό στοιχείο με υψηλή παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις στις συνδέσεις.

Προκύπτει επομένως ότι η υγροσκοπικότητα του ξύλου αποτελεί το σημαντικότερο ελάττωμα του ως δομικό υλικό, για το οποίο έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι αντιμετώπισης, όπως μηχανική μεταποίηση του ξύλου, κάλυψη της



επιφάνειάς του, διατήρηση σε κατάσταση διογκώσεως και ελάττωση της υγρασκοπικότητας.

Όμως αυτές οι μέθοδοι είναι είτε εργαστηριακές είτε ιδιαίτερα δαπανηρές, εκτός της εξωτερικής επικάλυψης που προσφέρει περιορισμένη προστασία η οποία φθίνει με τον χρόνο και της μεταποίησης του ξύλου με παραγωγή αντικολλητών, μοριόπλακων (particle boards) κλπ. Έτσι, η απλούστερη μέθοδος χειρισμού του ξύλου είναι η ξήρασή του, με την οποία επιδιώκεται ρύθμιση της υγρασίας του σε επίπεδο παραπλήσιο του μέσου όρου της υγρασίας που αναμένεται να συγκρατεί στον χώρο χρησιμοποίησής του, ελαχιστοποιώντας έτσι την διακύμανση υγρασίας. Όμως η ξήραση θα πρέπει να τελείται με μεγάλη επιμέλεια καθώς όπως είδαμε υψηλός ρυθμός θα προκαλέσει αστοχίες.



Εικόνα 14. Διάφορες παραμορφώσεις ξύλου λόγω απότομης ξήρασης. [4]

### 3. Θερμικές Ιδιότητες [4]

#### 3.1. Συστολή και Διαστολή

Όπως συμβαίνει και σε άλλα υλικά, όταν το ξύλο ψύχεται οι διαστάσεις του ελαττώνονται (συστολή) και αντίστροφα όταν θερμαίνεται οι διαστάσεις του αυξάνονται (διαστολή). Οι θερμικές συστολοδιαστολές του ξύλου δεν έχουν σημαντική πρακτική σημασία, καθώς είναι πολύ μικρές σε σχέση με εκείνες τις οποίες συνεπάγονται οι σύγχρονες μεταβολές του ποσοστού υγρασίας, δηλαδή η

ταυτόχρονη ρίκνωση ή διόγκωση που προκαλείται εξουδετερώνει ουσιαστικά τις αντίστοιχες διαστολές ή συστολές. Μάλιστα γίνεται, με την μεταβολή της θερμοκρασίας να έχουμε ρίκνωση ή διόγκωση μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διαστολή ή συστολή με αποτέλεσμα το ξύλο να συμπεριφέρεται αντίθετα από το αναμενόμενο. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής κάθε ξύλου διαφέρει κι αυτός στις διάφορες διευθύνσεις, με την μικρότερη τιμή στην αξονική διεύθυνση ( $3-4,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Συγκριτικά αναφέρουμε ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής της συνήθους δομικής ξυλείας έχει περίπου μισή τιμή του αντίστοιχου συντελεστή του σκυροδέματος και του χάλυβα ( $11-12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

### 3.2. Θερμοαγωγιμότητα

Η θερμοαγωγιμότητα είναι έννοια αντίστροφη από την θερμομονωτική αξία του υλικού. Το ξύλο έχει μικρή θερμοαγωγιμότητα λόγω της πορώδους δομής του. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας «λ» του ξύλου είναι περίπου διπλάσιος στην αξονική διεύθυνση από ότι στις εγκάρσιες (ακτινική και εφαπτομενική). Αυτό οφείλεται στην ευκολότερη πορεία της θερμότητας μέσα από τα πυκνότερα, άρα θερμικώς αγωγιμότερα, «καλαμάκια ινών», ενώ στις εγκάρσιες διευθύνσεις συναντά τις θερμικώς λιγότερο αγωγίμες ουσίες που γεμίζουν τον μεσοκυτταρικό χώρο.

Η διαφοροποίηση του «λ» ανάλογα με τη διεύθυνση των ινών είναι ευνοϊκή για τις συνήθεις περιπτώσεις διατάξεως των φερόντων δομικών στοιχείων και των επικαλύψεων, με τις ίνες τους κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης της θερμότητας. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ο «λ» εξαρτάται από τη θερμοκρασία, μειώνεται μάλιστα όσο αυτή αυξάνεται, δηλαδή το ξύλο είναι περισσότερο θερμομονωτικό σε χαμηλές θερμοκρασίες (τον χειμώνα).

ΥΛΙΚΑ	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ(J/kgK)	ΘΕΡΜΟΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ(W/MK)
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	880	160
ΧΑΛΥΒΑΣ	450	50
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ	1000	2.30
ΠΛΙΝΘΟΙ ΚΟΙΝΟΙ	1000	0.51
ΞΥΛΟ (ΚΩΝΟΦΟΡΑ)	1600	0.14

<b>ΜΟΡΙΟΣΑΝΙΔΕΣ</b>	1700	0.14
---------------------	------	------

Πίνακας 4. Θερμοαγωγιμότητα υλικών. [4]

### 3.3. Ειδική Θερμότητα

Από την επιστήμη της Φυσικής είναι γνωστή η σχέση που συνδέει την προσφερόμενη σ' ένα σώμα θερμότητα με την συνεπαγόμενη αύξηση της θερμοκρασίας αυτού:  $dQ=c*m*d\theta$  όπου  $dQ$ : το προσφερόμενο ποσό θερμότητας,  $c$ : η ειδική θερμότητα, σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό,  $m$ : μάζα και  $d\theta$ : η μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος. Σαν ειδική θερμότητα του σώματος ορίζεται το ποσό της θερμότητας που χρειάζεται για να αυξηθεί η θερμοκρασία μονάδας της μάζας του υλικού κατά  $1^{\circ}\text{C}$ . Μετριέται σε  $\text{J}/(\text{kgK})$ . Αυτή η σταθερά είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ουσιαστικά εκφράζει το πόσο εύκολα αναφλέγεται ένα υλικό.

Η ειδική θερμότητα του ξύλου είναι μεγαλύτερη από άλλα συνηθισμένα δομικά υλικά πράγμα το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτή δεν επηρεάζεται σημαντικά από το είδος και την πυκνότητα αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η υγρασία του. Παρατίθεται ενδεικτικά συγκριτικός πίνακας (πίνακας 4) με την θερμοαγωγιμότητα και την ειδική θερμότητα διαφόρων δομικών υλικών.

### 3.4. Συμπεριφορά του Ξύλου σε πυρκαγιά

Το ξύλο κατατάσσεται στα καιόμενα υλικά. Αυτή του η ιδιότητα έχει προκαλέσει την αμφισβήτηση κατά καιρούς της ικανότητας αντοχής του σε πυρκαγιά. Όμως πειραματικές μετρήσεις καθώς και πραγματικά γεγονότα καταδεικνύουν το αντίθετο, δηλαδή ότι η συμπεριφορά του ξύλου σε καύση είναι εξαιρετική, γεγονός το οποίο επαληθεύεται και από τις ιδιότητες της θερμοαγωγιμότητας και της ειδικής θερμότητας που πεζογράφησαν παραπάνω. Θα εξετάσουμε αρχικά την πορεία της καύσης σε ένα δοκίμιο ξύλου.

- **$\theta \leq 100^{\circ}\text{C}$**

Σε αυτήν την περιοχή γίνεται εξάτμιση της περιεχόμενης υγρασίας, η οποία προσωρινά καθυστερεί την άνοδο της θερμοκρασίας.

- **$100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 300^{\circ}\text{C}$**

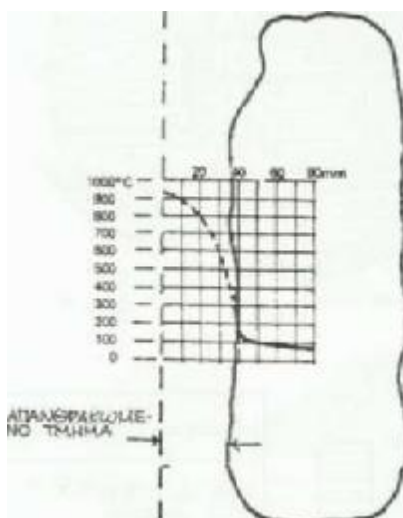
Εδώ ξεκινούν οι χημικές αλλαγές του υλικού. Σε θερμοκρασία 150 με 200  $^{\circ}\text{C}$

παρατηρείται μαύρισμα του ξύλου και εκλύονται άφλεκτο CO<sub>2</sub> σε ποσοστό 70% και εύφλεκτο CO σε ποσοστό 30%. Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 200 °C αυξάνεται το ποσοστό έκλυσης εύφλεκτων αερίων που με την ανάφλεξή τους αυξάνεται η θερμοκρασία των επιφανειών του ξύλου. Μεταξύ 275 μέχρι 300 °C απανθρακώνονται οι εκτεθειμένες επιφάνειες με ταυτόχρονη έκλυση CO και μεθανίου τα οποία με την καύση τους δημιουργούν φλόγα.

- **Θ > 300 °C**

Με την εξάντληση της φλόγας ξεκινά η ανάφλεξη του άνθρακα γύρω στους 500 °C. Μέχρι αυτή την θερμοκρασία ο άνθρακας είχε παραμείνει ανέπαφος προστατεύοντας το ξύλο που κάλυπτε καθώς η θερμοαγωγιμότητα του είναι περίπου 1/6 από εκείνης του ξύλου.

Επιβάλλεται τώρα να γίνουν κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις επάνω στην διαδικασία της καύσης που μόλις περιγράφηκε. Καθώς φαίνεται και από τις θερμικές ιδιότητες η ταχύτητα ανάφλεξης και απανθρακώσεως του ξύλου είναι σχετικά αργές. Μάλιστα όσο μεγαλώνει η πυκνότητα τόσο αυτές μειώνονται. Συγκεκριμένα η ταχύτητα απανθρακώσεως έχει προσδιορισθεί κατά μέσο όρο στα 0,6 mm/min. Ο προσδιορισμός αυτός δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα στον αντιπυρικό σχεδιασμό μιας κατασκευής καθώς μπορεί να υπολογιστεί με μικρές αποκλίσεις το πάχος της απανθράκωσης σε μια τυπική πυρκαγιά και να αυξηθεί αναλόγως την διατομή των δομικών στοιχείων ώστε όχι μόνο να μην επέλθει αστοχία αλλά με την κατάλληλη επεξεργασία (τρίψιμο, βερνίκωμα) μετά την σβέση να είναι πλήρως ασφαλής. Συγκριτικά οι παραπάνω υπολογισμοί στο σκυρόδεμα και στον χάλυβα είναι αδύνατοι και η αποκατάστασή τους δύσκολη ως αδύνατη και πολύ δαπανηρή.



**Διάγραμμα 1.** Θερμοκρασίες καίόμενης διατομής [4]

Επίσης παρατηρείται πως η απανθράκωση ξεκινά σε θερμοκρασία περίπου 500 °C από εξωτερικά της διατομής προς το εσωτερικό και σε αυτό το σημείο το ξύλο ξεκινά και χάνει τις μηχανικές του ιδιότητες με εξαιρετικά βραδύ ρυθμό. Εν αντιθέση ο χάλυβας και το σκυρόδεμα έχουν απότομη πτώση των αντοχών τους κατά 50% σε αυτή την θερμοκρασία με αποτέλεσμα να έχουμε ξαφνική κατάρρευση της κατασκευής. Από πειραματικά δεδομένα βλέπουμε ότι η παραπάνω αστοχία τελείται σε χρονική διάρκεια περίπου 5 λεπτών από την έναρξη της πυρκαγιάς, καθώς η θερμότητα στα μέταλλα μεταφέρεται ακαριαία σε όλη τους την μάζα ενώ σύνθετη ξυλεία μεγάλης διατομής έχει διατηρήσει περίπου 80% των αρχικών της αντοχών μετά από 30 λεπτά.

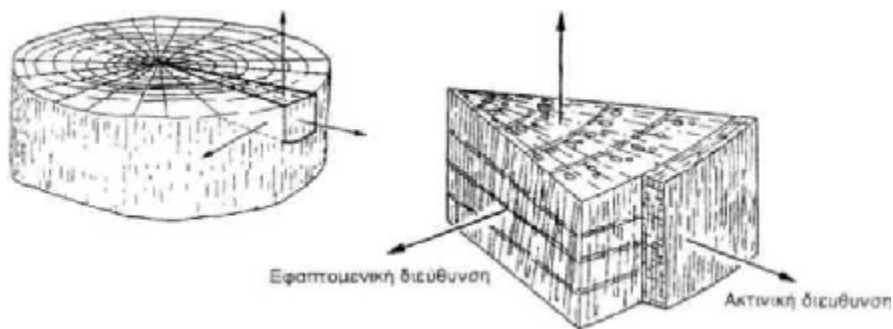
Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι ιδιαίτερη προσοχή κατά τον αντιπυρικό σχεδιασμό πρέπει να δίνεται στις μεταλλικές συνδέσεις καθώς όχι μόνο είναι πολύ πιο ευάλωτες στην πυρκαγιά από το ξύλο αλλά μεταφέρουν την θερμότητα στο εσωτερικό των διατομών του.

#### **4. Ακουστικές Ιδιότητες**

Η ηχομονωτική ικανότητα του ξύλου μετριέται με τον συντελεστή απορροφήσεως, που εκφράζει το ποσοστό % της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας που απορροφάτε. Το ξύλο πλεονεκτεί γενικά από άλλα υλικά, όπως σκυρόδεμα ή τούβλα αλλά έχει σχετικά μικρό συντελεστή απορροφήσεως. Αυτός επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η υγρασία, ελαστικότητα, θερμοκρασία, ένταση και συχνότητα του ήχου. Η ηχομονωτική ικανότητα του ξύλου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά (μέχρι 90%) σε ξύλινες κατασκευές όπως τοίχους ή διαχωρίσματα προκατασκευασμένων σπιτιών με τη δημιουργία κενών χώρων ανάμεσα σε παράλληλες επιφάνειες.

#### **5. Μηχανικές Ιδιότητες**

Βασικό χαρακτηριστικό του ξύλου ως προς την μηχανική του αντοχή είναι ότι αποτελεί ανισότροπο υλικό δηλαδή παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διάφορες διευθύνσεις. Συγκεκριμένα τρεις είναι οι διευθύνσεις (ορθότροπο) όπου μελετώνται οι μηχανικές ιδιότητές του: η αξονική (παράλληλα στον άξονα του κορμού), η ακτινική και η εφαπτομενική. (Εικόνα 15)



**Εικόνα 15.** Οι τρεις διευθύνσεις του ξύλου [4]

Για την μεγαλύτερη κατανόηση των ικανοτήτων του στις παραπάνω φορτίσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλοποιημένο προσομοίωμα της δομής του υλικού παρουσιάζοντάς το ως ένα δεμάτι καλαμάκια, τα οποία παριστάνουν τα σωληνωτά κύτταρα του ξύλου. Η εξέταση αυτού του προσομοιώματος δίνει ποιοτικές ερμηνείες για την διαμόρφωση των μηχανικών ιδιοτήτων του ξύλου.

Σε εφελκυσμό η αντοχή του δεματίου είναι μεγάλη. Αντίστοιχα σε θλίψη, ένα καλαμάκι που λυγίζει παρασύρει σχετικά εύκολα και τα γειτονικά του με αποτέλεσμα η φόρτιση να κατανέμεται και να παρουσιάζεται εξίσου σημαντική αντοχή παράλληλα προς τα καλαμάκια (ίνες του ξύλου). Όμως σε κάθετες προς τα καλαμάκια φορτίσεις αυτά συνθλίβονται και αποχωρίζονται εύκολα και αυτό εξηγεί την μειωμένη εφελκυστική και θλιπτική αντοχή του ξύλου σε υπό γωνία ασκούμενα φορτία ως προς την διεύθυνση των ινών του. Όμως η ευκολία με την οποία θραύονται τα καλαμάκια (ίνες) τοπικά επιτρέπει το βίδωμα και το κάρφωμα χωρίς σκισίματα του ξύλου και γενικά το καθιστά εξαιρετικά ανθεκτικό στις συγκεντρώσεις τάσεων.

### 5.1. Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή παράλληλα στις ίνες

Τα σωληνωτά κύτταρα του ξύλου εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό (200-1300 MPa). Η αντίστοιχη αντοχή του ξύλου είναι αισθητά μικρότερη (50-160 MPa). Αυτό οφείλεται σε διάφορες ατέλειες στην δομή του ξύλου, όπως απόκλιση ινών από την παραλληλότητα με τον άξονα του κορμού του δένδρου, εμφάνιση ασυνεχειών της δομής (ρόζοι) αλλά και ουσίες που παρεμβάλλονται μεταξύ των κυττάρων όπως ημικυτταρίνες, λιγνίνη και εκχυλίσματα. Επίσης έχει βρεθεί ότι και το μήκος των κυττάρων σχετίζεται με την αντοχή του ξύλου σε μονοαξονικό

εφελκυσμό. Συγκεκριμένα τα μακρόνια ξύλα (γενικά ξύλα κωνοφόρων σε σύγκριση με πλατύφυλλα) έχουν μεγαλύτερη αντοχή.

Η αντοχή του ξύλου σε θλίψη κυμαίνεται μεταξύ 30-100 MPa. Παρατηρούμε ότι αυτή η αντοχή είναι μικρότερη της εφελκυστικής. Αυτό συμβαίνει γιατί για την θλιπτική αντοχή του ξύλου συνεισφέρουν η λιγνίνη και οι ημικυτταρίνες, ενώ για την εφελκυστική αντοχή οι αλυσίδες μορίων κυτταρίνης. Η αστοχία του ξύλου σε αξονική θλίψη προέρχεται από την θραύση των μεσοκυττάρων στρώσεων (λιγνίτης) τη διατμητική ολίσθηση και αποκόλληση και τέλος των λογισμό των κυτταρικών ινών. Όταν αστοχεί το ξύλο σε θλίψη παρατηρούνται στην πλαϊνή επιφάνεια του ξύλου ρυτίδες υπό γωνία  $45^\circ$  μοιρών περίπου με τον άξονα του δένδρου και οφείλονται στην αστοχία των ινών.

Γενικά με την εισαγωγή των κανονισμών και την διαβάθμιση της δομικής ξυλείας σε κατηγορίες αντοχών είναι εύκολη η αντιστοίχισή τους με άλλα δομικά υλικά. Εκεί όμως που το ξύλο υπερτερεί είναι στην σχέση πυκνότητας-αντοχής. Δηλαδή συγκριτικά με όλα τα δομικά υλικά πλην κάποιων πολυμερών δίνει μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές με μικρότερο βάρος, χαρακτηριστικό όμως όχι τόσο σημαντικό για μικρές κατασκευές (μικρές κατοικίες).

## 5.2. Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή κάθετα προς τις ίνες

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου το ξύλο αποτελεί ορθότροπο υλικό επομένως θα πρέπει να εξετάζονται οι μηχανικές του ιδιότητες σε τρεις διευθύνσεις. Όμως οι πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει πως οι αντοχές του ξύλου είναι παρόμοιες στην ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση επομένως γίνεται προσεγγιστικά αναφορά σε ιδιότητες καθέτως στις ίνες.

Η εφελκυστική αντοχή καθέτως στις ίνες του ξύλου εξαρτάται από την αντοχή της συγκολλητικής ύλης μεταξύ των κυττάρων και είναι ως και 50 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη παράλληλα προς τις ίνες. Επίσης τυχόν σχισμές λόγω ρικνώσεως κατά την ξήρανση μπορούν πρακτικά να μηδενίσουν τις ήδη μικρές αντοχές. Επομένως κατά τον σχεδιασμό ξύλινων κατασκευών θα πρέπει να αποφεύγονται οπωσδήποτε τέτοιες φορτίσεις σε μέλη της κατασκευής.

Η θλίψη καθέτως στις ίνες προκαλεί παραμόρφωση της διατομής των σωληνίσκων των κυττάρων και, γενικώς συρρίκνωση των κοιλοτήτων και των διάκενων των κυττάρων. Οι παραμορφώσεις αυτές δεν αναπτύσσονται ομοιόμορφα στη φορτιζόμενη μάζα του ξύλου, αλλά ξεκινούν από τις άμεσα φορτιζόμενες στιβάδες και διαδίδονται με την εξέλιξη της φορτίσεως. Μια δοκιμή θλίψης κάθετα προς τις ίνες συνεχίζεται με σταθερό φορτίο και συνεχή αύξηση των παραμορφώσεων με το

δοκίμιο διαλυμένο να προσπαθεί να γίνει χαρτί.



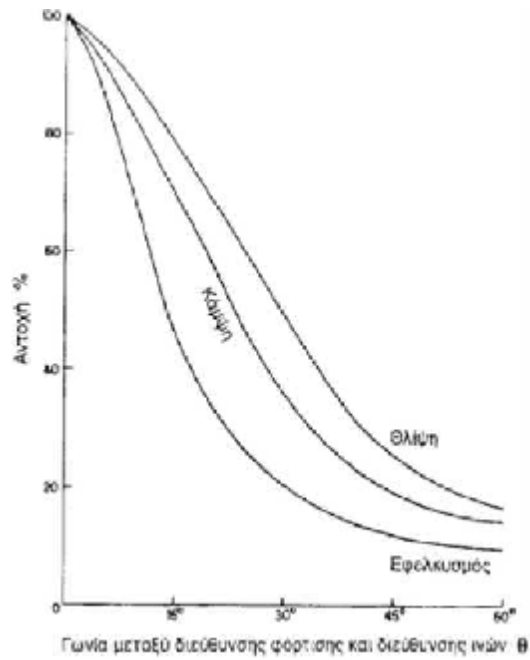
Εικόνα 16. Δοκίμια ξύλου από θλιπτική καταπόνηση. Από αριστερά α) ακτινική, β) εφαπτομενική, γ) αξονική [4]

Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται βέλτιστα από το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του ξύλου σε θλίψη.

Παρατηρείται αύξηση του φορτίου στο τέλος της καμπύλης καθώς οι ίνες του ξύλου έχουν συμπιεστεί και έχουν εξαλειφθεί πλήρως τα διάκενα μεταξύ τους. Επιβεβαιώνονται όσα προαναφέρθηκαν για την συμπεριφορά του ξύλου στην εικόνα 7. Στην περίπτωση γ παρατηρείται πως οι παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία είναι ελάχιστες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η β καθώς διακρίνονται οι αυξητικοί δακτύλιοι να έχουν αποκολληθεί υπό την θλίψη. Τέλος στην α περίπτωση φαίνεται η μεγάλη παραμόρφωση που έχει η υποστεί το δοκίμιο. Επίσης είναι ξεκάθαρο το φαινόμενο Poisson.

Για θλίψη υπό γωνία προς τις ίνες, η αντοχή του ξύλου αυξάνεται με τη γωνία επιβολής της θλίψης, από την τιμή της θλιπτικής αντοχής καθέτως προς τις ίνες, έως την τιμή της θλιπτικής αντοχής παραλλήλως προς τις ίνες.





**Διάγραμμα 2.** % της μέγιστης αντοχής του ξύλου σε σχέση με την γωνία  $\theta$  μεταξύ διεύθυνσης φόρτισης και ινών [4]



**Εικόνα 17.** Γωνία  $\theta$  μεταξύ διεύθυνσης φόρτισης και ινών. [4]

### 5.3 Αντοχή σε Κάμψη [4]

Η αντοχή του ξύλου σε κάμψη καθορίζεται βασικώς από την αντοχή των εφελκυσόμενων ινών του, καθώς εμφανίζεται μια πλαστικοποίηση της θλιβομένης ζώνης της καμπτόμενης διατομής, με αύξηση του πάχους ινών οι οποίες φθάνουν τη μέγιστη τάση τους. Με την πλαστικοποίηση και τις τοπικές αστοχίες των θλιβόμενων

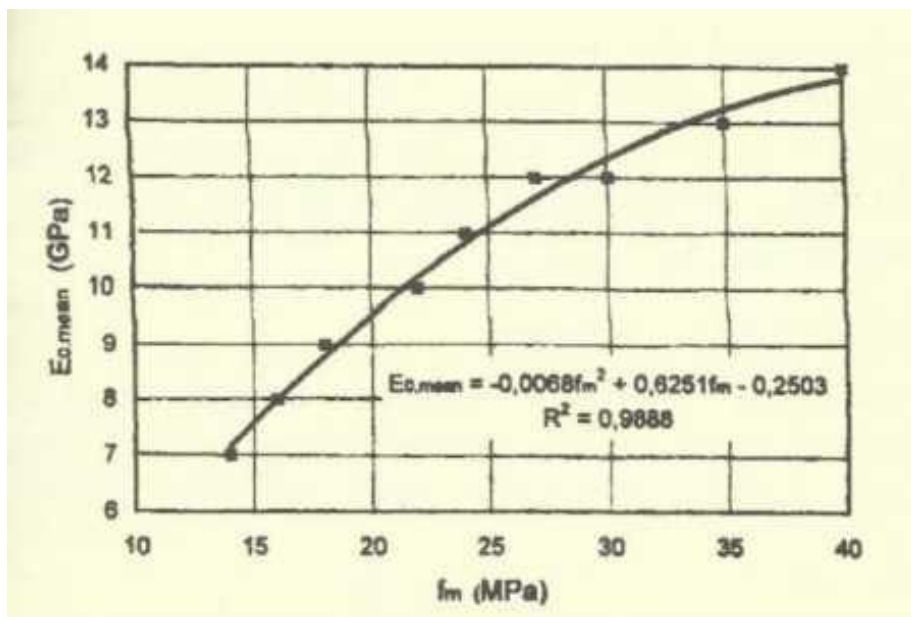
ινών, η μέγιστη τάση στη θλιβόμενη ζώνη μένει σταθερή, ενώ μεγαλώνουν οι εφελκυστικές τάσεις, έναντι των οποίων το ξύλο εμφανίζει και μεγαλύτερη αντοχή. Στην εικόνα απεικονίζεται δοκίμιο ξύλου κατηγορίας D40 το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων μέχρι την αστοχία του. Παρατηρείται στο εφελκυσμένο (άνω τμήμα στην εικόνα) η αστοχία των ινών οι οποίες έχουν σχιστεί στην επιφάνεια με την μέγιστη εφελκυστική τάση.



**Εικόνα 18. Αστοχία δοκιμίου D40 σε κάμψη τεσσάρων σημείων. [4]**

#### 5.4. Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας του ξύλου παρουσιάζει και αυτό ορθοτροπία. Όμως προσεγγιστικά για την εφαπτομενική και την ακτινική διεύθυνση λόγω μικρής απόκλισης λαμβάνεται η ίδια τιμή, η οποία ορίζεται ως το μέτρο ελαστικότητας κάθετα στην αξονική διεύθυνση. Το μέτρο ελαστικότητας στην αξονική διεύθυνση έχει άμεσο συσχετισμό με την αντοχή του ξύλου σε κάμψη. (διάγραμμα) Κυμαίνεται από 7 GPa (C14) έως 20 GPa (D70).



Διάγραμμα 3. Σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και καμπτικής αντοχής, κατά EN338 [4]

### 5.5 Αντοχή σε κρουστικά φορτία

Η αντοχή σε κρούση αναφέρεται σε απότομη (δυναμική) φόρτιση, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου δρούσαν στατικά φορτία. Το ξύλο εμφανίζει γενικώς υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία κυμαινόμενη σε μεγάλο εύρος ανάλογα με το είδος του ξύλου, η οποία είναι συνήθως μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της σε στατική φόρτιση. Αυτή του η αντοχή έχει ιδιαίτερη σημασία για ορισμένες περιοχές των ξύλινων κατασκευών, όπως οι περιοχές των συνδέσεων όπου υφίστανται κρουστική καταπόνηση κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

### 5.6. Φαινόμενο Κλίμακας

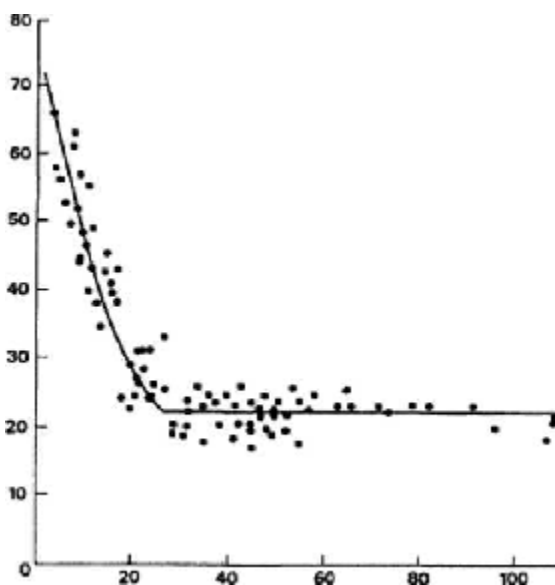
Το ξύλο, όπως και το σκυρόδεμα εμφανίζει το λεγόμενο φαινόμενο κλίμακας, δηλαδή παρατηρείται αύξηση της αντοχής με την μείωση του όγκου. Ποιοτικά το φαινόμενο εξηγείται ως εξής. Σε μικρότερο όγκο ξύλου υπάρχουν μικρότερες πιθανότητες ύπαρξης ατελειών, δηλαδή κομματιών μικρότερης αντοχής από τα οποία θα ξεκινήσει η αστοχία. Αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό και η αντιμετώπισή του προβλέπει από τους κανονισμούς απαιτούμενη αύξηση των αντοχών ανάλογα με το μήκος και την επιβαλλόμενη φόρτιση.<sup>16</sup>

### 5.7. Υγρασία και μηχανικές ιδιότητες

Η αύξηση του ποσοστού υγρασίας του ξύλου έχει ιδιαίτερα δυσμενείς επιπτώσεις στις μηχανικές του ιδιότητες (Διάγραμμα 3). Μέχρι το σημείο ινοκόρου εμφανίζεται

μείωση των αντοχών του ενώ πάνω από αυτό ο ρόλος της υγρασίας είναι γενικά ασήμαντος. Το παραπάνω φαινόμενο φαντάζει λογικό καθώς όπως έχουμε ήδη αναφέρει αύξηση υγρασίας κάτω από το σημείο ινοκόρου σημαίνει σημαντική αύξηση των διαστάσεων του ξύλου επομένως και μείωση της πυκνότητάς του.

Η αύξηση της υγρασίας προκαλεί μείωση της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και διατμήσεως και αύξηση των ερπυστικών παραμορφώσεων. Η τελευταία αποτελεί την πιο σημαντική επίδραση της υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες του ξύλου. Στο διπλανό διάγραμμα παριστάνεται γραφικά η μείωση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας.



Διάγραμμα 4. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας **Υγρασία (%)**[4]

#### 5.8. Ο ερπυσμός του ξύλου

Το φαινόμενο του ερπυσμού είναι αρκετά έντονο στο ξύλο όπως και σε όλα σχεδόν τα πολυμερή υλικά. Δύναται να παρατηρηθεί σε ράφια βιβλιοθήκης, σε οριζόντιες δοκούς όπου φέρουν το βάρος στεγών καθώς υπό τα φορτία φαίνεται το ξύλο να κυρτώνει. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον ερπυσμό του ξύλου είναι οι εξής:

- Το ποσοστό υγρασίας του ξύλου
- Η διάρκεια φορτίσεως
- Η στάθμη φορτίσεως
- Η θερμοκρασία

Από τους παραπάνω παράγοντες οι πιο σημαντικοί είναι οι δύο πρώτοι οι

οποίοι λαμβάνονται υπόψη και κατά τον σχεδιασμό.

Την επίδραση στον ερπυσμό έχει και η διεύθυνση φόρτισης σε σχέση με την διεύθυνση των ινών του ξύλου. Ο ερπυσμός είναι μικρότερος στην αξονική διεύθυνση και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνία επιβολής του φορτίου λαμβάνοντας την μέγιστη τιμή τις με το φορτίο κάθετα τις ίνες.

Στο ξύλο ο ερπυσμός προέρχεται από την απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού υπό την πίεση επιβαλλόμενου φορτίου. Με την μείωση της ποσότητας του νερού, το ποσοστό των τάσεων τις οποίες φέρει το νερό μειώνεται ενώ οι τάσεις οι οποίες αναλαμβάνονται από τον στερεό ιστό μεγαλώνουν με συνέπεια την αύξηση των παραμορφώσεων του ξύλου υπό σταθερό φορτίο στην διάρκεια του χρόνου.<sup>17</sup> Όμως στο ξύλο το φαινόμενο είναι γενικά ποιο πολύπλοκο καθώς με τις αυξομειώσεις της υγρασίας αντίστοιχα μεταβάλλονται και οι μηχανικές του ιδιότητες. Γενικά παρατηρείται ότι για σταθερή υγρασία ο ερπυσμός παραμένει σταθερός καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης. Αντίθετα τα αποτελέσματα δείχνουν πως όταν το ξύλο υπόκειται σε κύκλους ύγρανσης-ξηράνσης οι ερπυστικές παραμορφώσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για σταθερή υγρασία, γεγονός που οφείλεται στην χαλάρωση της συνοχής μεταξύ των κυτταρικών ινών. Επίσης ο ερπυσμός αυξάνεται όταν αυξάνεται η υγρασία γεγονός που αποδίδεται στην μείωση των μηχανικών του αντοχών. Τέλος ο ερπυσμός μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και η στάθμη φορτίσεως.

Γενικά η δομική ξυλεία σχεδιάζεται να φέρει φορτίο που αντιστοιχεί περίπου στο 35% των αντοχών της.

Σε αυτή την φόρτιση ο ερπυσμός παραμένει σταθερός. Στο διάγραμμα 4 που παρατίθεται βλέπουμε την σχέση μεταξύ ερπυσμού και στάθμης φορτίσεως. Αξίζει να παρατηρήσουμε πως για φόρτιση μεγαλύτερη του 35% της συνολικής του αντοχής το ξύλο όχι μόνο εμφανίζει αισθητά μεγαλύτερο ερπυσμό αλλά και το φαινόμενο αυτό αυξάνεται με την πρόοδο του χρόνου.

#### 5.9. Επαναλαμβανόμενη φόρτιση

Η συμπεριφορά του ξύλου στην επαναλαμβανόμενη φόρτιση είναι γενικά πολύ καλή. Πειράματα κόπωσης με μέγιστη τάση στο 50% περίπου της αντοχής σε βραχυχρόνια φόρτιση έχουν δείξει πως το ξύλο μπορεί να υποστεί αρκετά εκατομμύρια κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης χωρίς να μειωθεί η αντοχή του. Βασικό χαρακτηριστικό της ανακλυζόμενης φόρτισης του ξύλου είναι ο ερπυσμός που παρουσιάζει λόγω της μέσης τάσης που του ασκείται. Οι ερπυστικές

αυτές παραμορφώσεις αυξάνονται όσο αυξάνεται η μέση τάση και ο χρόνος φόρτισης με αποτέλεσμα το υλικό να βρεθεί στο τελικό στάδιο ερπυσμού. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικά μειώνονται οι αντοχές του ξύλου σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση από ύπαρξη ατελειών στην δομή του ξύλου(ρόζοι) οι οποίες αποτελούν πηγές αστοχίας.

## 2.3 ΓΥΑΛΙ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην τελευταία δεκαετία, έχουμε δει μια δραματική αύξηση στη χρήση του δομικού γυαλιού<sup>5</sup> σε κατασκευές λόγω της αύξησης του ενδιαφέροντος των αρχιτεκτόνων και τις βελτιώσεις στην τεχνολογία του. Ο προφανής λόγος που επιλέγεται το γυαλί είναι το ότι είναι διαφανές αλλά και ανθεκτικό στα αποτελέσματα της διάβρωσης.

Η εργασία έχει σκοπό να συγκεντρώσει πληροφορίες σχετικές με την χρήση του υλικού και κυρίως να δώσει στον αναγνώστη το έναυσμα για βαθύτερη ενασχόληση με το αντικείμενο. Στηριγμένη στη βιβλιογραφία περιγράφει την εμπειρία που αποκτιέται από τη σχεδίαση και την κατασκευή γυάλινων δομικών έργων, που όμως λόγω της μεγάλης έκτασης του θέματος αλλά και του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος περιορίζεται κυρίως σε υαλοπετάσματα.

Πιστεύεται πως γύρω στα 3500 π.Χ. άρχισαν οι άνθρωποι να φτιάχνουν γυαλί, κυρίως αδιαφανείς χάντρες. Τέτοια αντικείμενα έχουν βρεθεί στην Αίγυπτο και στην Ανατολική Μεσοποταμία. Γυάλινα αγγεία εμφανίστηκαν στον δέκατο έκτο αιώνα π.Χ.

---

<sup>5</sup> «ΤΟ ΓΥΑΛΙ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ», Αλέξανδρος Τόλης, Πολιτικός μηχανικός Π.Θ. MSc ΔΣΑΚ ΕΜΠ

και ακολούθησαν γυάλινα κιούπια. Η επόμενη σημαντική ανακάλυψη για το γυαλί ήταν το υαλοφύσημα κάπου μεταξύ 27 πΧ και 14 μΧ. Η ανακάλυψη αυτή έγινε από Σύριους χειροτέχνες. Οι Ρωμαίοι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν πρώτοι το γυαλί για καλλιτεχνικούς σκοπούς, με την ανακάλυψη του καθαρού γυαλιού στην Αλεξάνδρεια στο 100 μ.Χ. περίπου, κατασκευάζοντας σε σημαντικά κτίρια γυάλινα παράθυρα παρόλο που αυτά είχαν κακή ποιότητα. Από τον ενδέκατο αιώνα και μετά, αναπτύχθηκαν νέοι τρόποι δημιουργίας φύλλων γυαλιού όταν μικρά ορθογώνια κομμάτια γυαλιού με κομμάτια καλωδίου ενώθηκαν και δημιούργησαν τα πρώτα παράθυρα. Το γυαλί εξακολούθησε να είναι υλικό πολυτελείας ως τα τέλη του μεσαίωνα. Η προώθηση του γυαλιού στη σύγχρονη εποχή έγινε από τους αδελφούς Pilkington στην Βρετανία το 1959 και από τότε χρησιμοποιείται ευρύτατα. Σήμερα μεγάλα κομμάτια από υψηλής ποιότητας γυαλιού παράγονται αξιόπιστα και με χαμηλό κόστος.



Εικόνα 19. Γυάλινες κατασκευές, Λούβρο, Γαλλία [5]



Εικόνα 20. Γυάλινες κατασκευές, Λούβρο, Γαλλία [5]

Επί αιώνες, η χρήση γυαλιού σε κτίρια ήταν ουσιαστικά περιορισμένη σε βιτρίνες και παράθυρα. Τα αισθητικά πλεονεκτήματα και οι σημερινές τάσεις της σύγχρονης αρχιτεκτονικής ζητούν την επέκταση της χρήσης του σε πραγματικά νέες περιοχές. Ταυτόχρονα τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μια συνεχής βελτίωση στην παραγωγή. Η τεχνολογία επέτρεψε τα στοιχεία από γυαλί να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία και έτσι να μπορούν να διαδραματίσουν ένα πιο ουσιαστικό ρόλο.

Ο δομικός σχεδιασμός τέτοιων στοιχείων παρόλα αυτά παραμένει προβληματικός. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται σχεδιαστικές μέθοδοι οι οποίες υποφέρουν από χαρακτηριστικές αδυναμίες. Δεν εφαρμόζονται, προς το παρόν, σε γενικές συνθήκες αλλά περιορίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως ορθογώνιες κατασκευές, για ομοιόμορφα πλευρικά φορτία, σταθερές φορτίσεις και καταπονήσεις ανεξάρτητες του χρόνου. Έχουν δημιουργηθεί μερικές πρότυπες παράμετροι οι οποίες όμως συνδυάζουν ταυτόχρονα πολλά φυσικά χαρακτηριστικά μαζί και εξαρτώνται από τα πειράματα από τα οποία προκύπτουν. Οι σχεδιαστικές μέθοδοι περιέχουν ανακολουθίες και δεν δίνουν πραγματικά αποτελέσματα σε ειδικές περιπτώσεις όπου διαφορετικά μοντέλα παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα και πολλοί ερευνητές εξέφρασαν σοβαρές αμφιβολίες αναφορικά με την καταλληλότητα του κοινού γυαλιού. Η έλλειψη εμπιστοσύνης σε προηγμένα μοντέλα γυαλιού, η έλλειψη ενός κοινού σχεδιαστικού τρόπου και η ακρίβεια των πειραμάτων είναι ζητήματα που δημιουργούν εμπόδια στην μεγαλύτερη εφαρμογή



του.

Η συνέπεια στην αλυσίδα σχεδιασμός - παραγωγή - κατασκευή - ποιοτικός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με αξιοπιστία όταν υπάρξουν καλά καθιερωμένα πρότυπα γενικής εφαρμογής. Σε σχέση με την μελέτη έργων από γυαλί, αυτήν την περίοδο, δεν υπάρχουν διεθνώς διεξοδικά πρότυπα για εφαρμογή και έτσι απαιτείται γνώση εφαρμοσμένης μηχανικής σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού που θα αναζητηθούν στη βάση δημοσιευμένων ανακοινώσεων και ερευνών.

Η μελέτη των έργων θα πρέπει να έχει λάβει υπόψη της ότι η αστοχία του γυαλιού, που είναι ένα ψαθυρό υλικό, είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης ρωγμών στην επιφάνεια του, κάτω ακόμη και από στατικές φορτίσεις. Η συμπεριφορά στοιχείων γυαλιού εξαρτάται σημαντικά από την κατάσταση της επιφάνειάς του, λόγω παραμενουσών μόνιμων τάσεων, τις κλιματολογικές συνθήκες αλλά και την προϊστορία του σε φορτίσεις. Η αστοχία προκύπτει πάντα από εφελκυστικές τάσεις. Ένα πρωταρχικό στοιχείο στο σχεδιασμό είναι ο πλεονασμός αντοχής σε περίπτωση ξαφνικής αστοχίας ενός στοιχείου ή ενός φύλλου του που μπορεί να προκύψει σαν αποτέλεσμα κάποιου κρουστικού φορτίου ή τοπικής αστοχίας λόγω κακής πρόσμιξης του γυαλιού αλλά ακόμη και για να αποφευχθεί η περίπτωση μιας δυσανάλογης κατάρρευσης ως αποτέλεσμα μιας τοπικής αστοχίας. Με την εφαρμογή των κατάλληλων παραγόντων ασφάλειας, και με τη χρήση σύνθετου γυαλιού σε κρίσιμα δομικά μέλη, το γυαλί μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να είναι ασφαλές κάτω από τα λειτουργικά φορτία και καθώς επίσης κατά την αστοχία του.

## ΤΥΠΟΙ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου, η οποία αποτελεί το βασικό συστατικό του (διαμορφωτής), ενός ή περισσότερων συλλιπασμάτων και ενός ή περισσότερων σταθεροποιητών. Αν δεν χρησιμοποιηθεί σταθεροποιητής, τότε το γυαλί γίνεται εύθρυπτο και αποσθρώνεται από το νερό. Το κοινό γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου ( $\text{SiO}_2$  - 73,7%), ανθρακικού νατρίου (κοιν. Σόδα,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  - 16%), οξειδίου του καλίου ( $\text{K}_2\text{O}$  - 0,5%) ως συλλιπάσματα και ανθρακικού ασβεστίου (κοιν. ασβεστόλιθου ( $\text{CaCO}_3$  - 5,2%) ανθρακικού μαγνησίου ( $\text{MgCO}_3$  - 3,6%) και οξειδίου του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 1%) ως σταθεροποιητές. Ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό των συλλιπασμάτων και των σταθεροποιητών λαμβάνονται και οι διάφοροι τύποι γυαλιού.

### **Βασικοί τύποι γυαλιού :**

- Κοινό γυαλί (Soda-lime glass): Παρασκευάζεται με συλλίπασμα οξειδίου του

νατρίου (12-18%) και σταθεροποιητή οξείδιο του ασβεστίου (5-12%). Ορισμένα άλλα οξείδια μπορεί να συμμετέχουν για λόγους απόδοσης χρωματισμών. Το κοινό γυαλί είναι φθινό στην κατασκευή του και παρουσιάζει οπτικές και φυσικές ιδιότητες κατάλληλες για την κατασκευή κοινών αντικειμένων, όπως υαλοπίνακες και οικιακά σκεύη (ποτήρια, φιάλες, δοχεία τροφίμων). Επειδή δεν είναι πορώδες, δεν συγκρατεί κανένα συστατικό και καθαρίζεται εύκολα. Δεν αντιδρά με υδατικά διαλύματα ή έλαια και λίπη, κι έτσι δεν αλλοιώνει τη σύσταση των τροφίμων και τη γεύση ή την οσμή τους. Είναι, επίσης, βιολογικά αδρανές και δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη βακτηρίων ή μυκήτων. Το κοινό γυαλί είναι, επίσης, αδιαφανές στην φωτεινή ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 400 nm. Αυτό το κάνει κατάλληλο για χρήση σε υαλοπίνακες παραθύρων.

- Γυαλί μολύβδου: Παρασκευάζεται με αντικατάσταση του οξειδίου του νατρίου από οξείδιο του καλίου και του οξειδίου του ασβεστίου από οξείδιο του μολύβδου (PbO). Η περιεκτικότητα του PbO μπορεί να φθάνει και το 30%, αλλά το γυαλί με περιεκτικότητα μέχρι 24% σε PbO χαρακτηρίζεται ως κρύσταλλο. Έχει υψηλή ανθεκτικότητα, τα αντικείμενα είναι εξαιρετικά στιλπνά και παρουσιάζει υψηλό δείκτη διάθλασης. Οι δύο τελευταίες ιδιότητες το κάνουν υλικό ιδιαίτερα κατάλληλο για την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων αλλά και (ακριβών) ειδών οικιακής χρήσεως, όπως ποτήρια, ανθοδοχεία κτλ. Ο μολύβδος είναι δηλητηριώδες υλικό, αλλά επειδή τα άτομα του είναι ολοσχερώς εγκλωβισμένα στη μοριακή δομή του γυαλιού, δεν επιφέρει καμία απολύτως βλάβη στην ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι ευαίσθητο στις μεταβολές θερμοκρασίας και να θραύεται εύκολα από αυτές. Λόγω της υψηλής του διαθλαστικότητας χρησιμοποιείται στην κατασκευή οπτικών οργάνων (π.χ. φακών). Μια ειδική μορφή αυτού του τύπου γυαλιού, με περιεκτικότητα σε PbO περίπου στο 65% χρησιμοποιείται για την κατασκευή ειδικών προστατευτικών υαλοπινάκων, επειδή ο μολύβδος απορροφά τις επικίνδυνες ακτινοβολίες που περιέχονται στο ηλιακό φως.
- Γυαλί βορίου: Είναι γνωστότερο με την εμπορική ονομασία "Pyrex". Η σύστασή του είναι οξείδιο του πυριτίου (70-80%), οξείδιο του βορίου B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7-13%) μικρά ποσοστά οξειδίων των αλκαλίων (4-8% Na<sub>2</sub>O και K<sub>2</sub>O, και 2-7% οξείδιο του αργιλίου Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Η παρουσία βορίου και το μικρό ποσοστό αλκαλίων κάνουν το γυαλί αυτό ανθεκτικό στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και περισσότερο δύστηκτο. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαστηριακών οργάνων και συσκευών, συσκευασίες φαρμακευτικών προϊόντων, σε λαμπτήρες υψηλών αποδόσεων (π.χ. προβολέων) αλλά και

για οικιακές εφαρμογές (σκεύη Pyrex, τα οποία δεν θραύονται κατά το μαγείρεμα). Παρουσιάζει, επίσης, χαμηλό συντελεστή διαστολής, πράγμα που δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων στα πειράματα.

- **Υαλόνημα:** Κατασκευάζεται από ποικίλους τύπους γυαλιού σε μορφή νήματος με πολλαπλές χρήσεις. Το κοινό γυαλί παρέχει νήματα κατάλληλα για κατασκευή μονώσεων (υαλόμαλλο), ενώ το γυαλί βορίου δίνει υαλόνημα από το οποίο κατασκευάζονται υφαντικές δομές που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών από πλαστικό, όπως κράνη, μικρά σκάφη, σασί αυτοκινήτων, σωληνώσεις κτλ. και είναι γνωστό με το εμπορικό όνομα Fiberglass. Μια πιο πρόσφατη εφαρμογή του υαλόνηματος είναι η κατασκευή οπτικών ινών, που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση φωτεινών σημάτων, παρακάμπτοντας το ευθύγραμμο της διάδοσης του φωτός. Χρησιμοποιούνται για ενδοσκοπήσεις οργάνων σε ζωντανούς οργανισμούς, στη διαχείριση σημάτων οδικής και σιδηροδρομικής κυκλοφορίας και στην κατασκευή ειδικών οργάνων, όπως Σόναρ, υδροφώνων κτλ. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης, στην τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών. Χάρη στη χρήση τους αναπτύχθηκαν πολύ η τηλεφωνία, τα δίκτυα υπολογιστών και το Διαδίκτυο (ευρυζωνικές συνδέσεις).

#### Ειδικοί τύποι

- **Γυαλί αργιλίου:** Περιέχει περίπου 20% οξειδίου του αργιλίου, μικρά ποσοστά οξειδίων του βορίου και του μαγνησίου, αλλά πολύ μικρό ποσοστό οξειδίων των αλκαλίων. Το γυαλί αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα θερμοανθεκτικό και χρησιμοποιείται σε θαλάμους καύσεων, σε γυαλιά οργάνων μέτρησης υψηλών θερμοκρασιών και σε λαμπτήρες αλογόνου, στους οποίους η θερμοκρασία αυτού του γυαλιού μπορεί να φθάσει και τους 750°C.
- **Γυαλί αλκαλίων - βαρίου:** Χωρίς αυτό τον τύπο γυαλιού, η χρήση οθονών για υπολογιστές και τηλεοράσεις θα ήταν επικίνδυνη. Η οθόνη καθοδικού σωλήνα, από τον τρόπο λειτουργίας της, παράγει ιδιαίτερα επικίνδυνες ακτινοβολίες (Ακτίνες X), οι οποίες απορροφώνται από αυτόν τον τύπο γυαλιού, που περιέχει εκτός από οξείδιο του μολύβδου σε χαμηλό ποσοστό, και οξείδιο του βαρίου (BaO) και του στροντίου (SrO).
- **Κεραμικό γυαλί:** Είναι γυαλί με οξείδια του αργιλίου και του λιθίου να συμμετέχουν στη σύστασή του και, λόγω θερμοανθεκτικότητας, έχει βρει εφαρμογή ως πυρίμαχο διάφανο υλικό σε θύρες κλιβάνων, κατόπτρων

τηλεσκοπίων, υαλοποίησης πλακιδίων διαστημοπλοίων, αλλά και σε οικιακές συσκευές (υαλοκεραμικές εστίες μαγειρέματος κτλ.).

- Οπτικά γυαλιά: Δεν έχουν σταθερή σύσταση, αλλά αυτή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο που απαιτείται κάθε φορά. Τα συναντούμε στην κατασκευή γυαλιών οράσεως και ηλίου, σε συσκευές όπως φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες και μικροσκόπια (κατασκευή φακών) και σε συσκευές ακριβείας (οπτικά όργανα πλοήγησης, κάτοπτρα, τηλεσκόπια κτλ.).

#### ΚΟΙΝΟ ΓΥΑΛΙ

Από τους πιο πάνω τύπους τις κατασκευές ενδιαφέρει το κοινό γυαλί. Το κοινό γυαλί χωρίζεται στο επίπεδο γυαλί (float ή flat glass) και σε αυτό της συσκευασίας (μπουκάλια κτλ). Οι δύο τύποι αυτοί διαφέρουν:

- στην μέθοδο παρασκευής, Το επίπεδο γυαλί παράγεται με έγχυση του πάνω σε λιωμένο κασσίτερο, από όπου και η αγγλική ονομασία float, έτσι ώστε να του δίδεται ομοιόμορφο πάχος και επίπεδη επιφάνεια.
- στην χημική τους σύνθεση. Το επίπεδο γυαλί έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξείδια του μαγνησίου (MgO) και σε ανθρακικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ενώ μικρότερη περιεκτικότητα σε χαλαζιακή άμμο ( $\text{SiO}_2$ ), οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Το ιξώδες του γυαλιού αυξάνεται πολύ γρήγορα με την θερμοκρασία. Η μετάβαση γυαλιού από ένα στερεό ελαστικό σώμα σε ρευστό γίνεται πολύ γρήγορα. Στη θερμοκρασία αυτή,  $555^\circ\text{C}$ , έχει δοθεί ο όρος μεταβατική θερμοκρασία (transition temperature) ή σημείο ανόπτησης (annealing point).

#### Ανοπτημένο γυαλί (annealed glass)

Πρόκειται για μία διαδικασία αποβολής των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται μέσα στη κρυσταλλική δομή του γυαλιού. Κατ' αυτή το γυαλί θερμαίνεται στο σημείο ανόπτησης (annealing point) και ακολούθως ψύχεται ελεγχόμενα. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική για την αντοχή του και προηγείται της κοπής και της λοιπής επεξεργασίας του.

Το ανοπτημένο γυαλί παράγεται σε τυποποιημένα πάχη 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19, και 25 χιλιοστών σε φύλλα μέγιστης διάστασης  $3.0 \times 6.0\text{m}$  είναι όμως δυνατή η παραγωγή και σε διαστάσεις ως  $3.2 \times 8.0\text{m}$ .

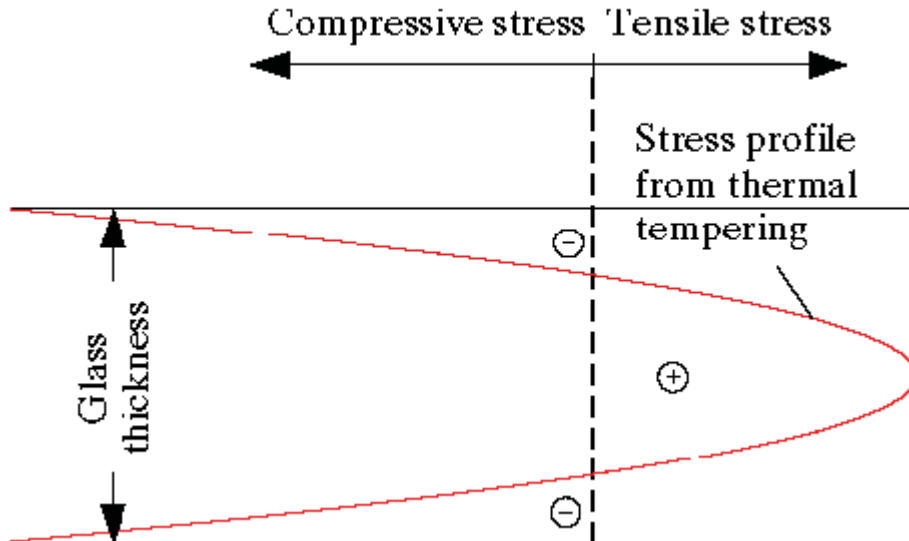
Η αντοχή του σε μόνιμη τάση υποβαθμίζεται με τον χρόνο λόγω της χημικής διάβρωσης στις μικρορωγμές που δημιουργούνται στην επιφάνεια του, από την

δράση του νερού η οποία διευρύνει τις ρωγμές αυτές. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα όριο φόρτισης (περί τα 7Μρα) κάτω από το οποίο η δράση αυτή δεν είναι σημαντική. Ένα ακόμη φαινόμενο στο οποίο το ανοπτημένο γυαλί είναι ευαίσθητο είναι το θερμικό σοκ. Το θερμικό σοκ προκαλείται από διαφορές θερμοκρασίας που υπάρχουν σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του ίδιου φύλλου γυαλιού (π.χ. ένα τμήμα του βρίσκεται σε σκιά ενώ άλλο σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία) οι οποίες αναπτύσσουν εσωτερικές τάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών. Ως κρίσιμη θερμοκρασία έχει βρεθεί να είναι οι 33°C. Όπου το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό τότε στο γυαλί πρέπει να προδιαγραφεται με διαδικασία επαναφοράς (Tempered).

Γυαλί με επαναφορά (tempered glass)

Αφού έχει ολοκληρωθεί η προβλεπόμενη επεξεργασία (κοπή, γυάλισμα, διάνοιξη οπών κτλ), στο ανοπτημένο γυαλί, γίνεται επαναφορά με επαναθέρμανση του στους 650°C και ταχεία ψύξη της επιφάνειας του με προσεκτικά ελεγχόμενο τρόπο. Αυτή η διαδικασία προεντείνει την εξωτερική επιφάνεια αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την αντοχή του γυαλιού σε εφελκυσμό. Το επίπεδο της παραμένουσας τάσης εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό της ψύξης και υπάρχουν βασικά δύο ποιότητες:

- Σκληρυμένο γυαλί (Toughened glass), που προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση κατ ελάχιστο 100Μρα. Όλα τα πάχη του ανοπτημένου γυαλιού παράγονται με εξαίρεση τα 25mm στα οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί παραμένουσα τάση στο όριο των 100Μρα. Οι μέγιστες διαστάσεις φύλλων εξαρτώνται από τον εξοπλισμό των εργοστασίων και είναι συνήθως 2.14x4.5m αν και μπορεί να βρεθούν έως 3.0x6.0m.
- Θερμικά ενισχυμένο γυαλί (Heat strengthened glass), που προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση ανάμεσα στα 40-50Μρα. Παράγονται τα πάχη του ανοπτημένου γυαλιού με μέγιστο όμως πάχος τα 12mm.



Διάγραμμα 5. Παραμένουσες τάσεις από την επαναφορά [5]

Στα γυαλιά με επαναφορά υπάρχει ο κίνδυνος του τυχαίου θρυμματισμού τους λόγω της περιεκτικότητάς τους σε θειούχο νικέλιο. Η θραύση αυτή προκαλείται από την διαδικασία της σκλήρυνσης, λόγω της ταχείας ψύξης που υποβάλλεται η επιφάνεια του γυαλιού, κατά την οποία αλλάζει η κρυσταλλική δομή των κρυστάλλων του θειούχου νικελίου. Το φαινόμενο αυτό πάντως δεν αφορά το θερμικά ενισχυμένο γυαλί λόγω της ηπιότερης ψύξης του. Για την ελαχιστοποίηση του ποιο πάνω κινδύνου το γυαλί υποβάλλεται σε θερμικό διαποτισμό (heat soaking) μετά την σκλήρυνση σε θερμοκρασία περί τους 280°C.

Το γυαλί με επαναφορά έχει την ιδιότητα να σπάει σε μικρά κυβικά τμήματα αντί μεγάλα και με οξείες γωνίες κομμάτια γεγονός που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο για τραυματισμούς ή θάνατο. Τέλος ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που υπάρχει στα άκρα τους μπορεί να προκληθεί η θραύση τους από κτυπήματα στις άκρες.

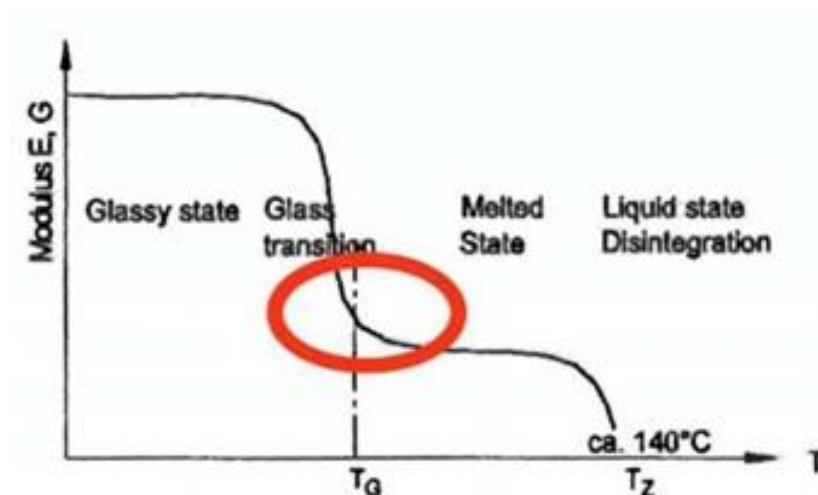


Εικόνα 21. Μορφή θραύσης γυαλιού. Από αριστερά ανοπτημένο , heat strengthened, toughened [5]

### Σύνθετο γυαλί (Laminated glass).

Αποτελείται από φύλλα ολόσωμου γυαλιού συνδεδεμένα με συγκολλητικό υλικό, που σκοπό έχει την συγκράτηση τους αλλά και την δημιουργία διατμητικής συνεργασίας. Σαν τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται το πολυβινυλοβουτιλένιο (PVB), η πολυουρεθάνη ή ρευστές κατά την έγχυση ρητίνες.

Το πάχος σχεδιασμού του σύνθετου γυαλιού εξαρτάται από το είδος της φόρτισης (μόνιμο ή κινητό) και την θερμοκρασία. Κύριο πρόβλημα είναι η μεταβλητότητα του μέτρου διάτμησης του συνδετικού υλικού με την θερμοκρασία και τον χρόνο επιβολής της φόρτισης.



Διάγραμμα 6. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και διατμήσεως με την θερμοκρασία στο PVB [5].

Έτσι ενώ το μέτρο διάτμησης σε χαμηλές θερμοκρασίες και για στιγμιαίες φορτίσεις μπορεί να είναι σε τιμές ανάλογες με αυτές που έχει το γυαλί (περί τα 100MPa), σε υψηλές θερμοκρασίες και για μόνιμες φορτίσεις μπορεί ακόμη και να υποχλιαπλασιασισαστεί. Η καμπύλη του σχήματος 2 αναφέρεται στη μεταβολή των E και G με την θερμοκρασία για το PVB και το σημείο κατά το οποίο η καμπύλη εμφανίζει απότομη κλίση είναι μεταξύ 15 και 20°C [5].

## **ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ**

Η θεωρητική αντοχή του γυαλιού υπαγορεύεται από την μοριακή συνοχή των δεσμών πυριτίου και οξυγόνου. Για το κοινό γυαλί (soda-lime) η θεωρητική δύναμη συνοχής είναι  $\sigma_{coh} = 20000 \text{ MPa}$  η οποία όμως είναι μερικές εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την πραγματική αντοχή. Έχει αποδειχθεί πως όλα τα χαρακτηριστικά αντοχής του γυαλιού έχουν εξήγηση στις ατέλειες που υπάρχουν στην επιφάνεια του και στις άκρες του. Έτσι και η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από τις ατέλειες αυτές και οι οποίες έχουν προέλθει είτε κατά την διάρκεια της κατασκευής του είτε κατά την τοποθέτηση του. Κατά την παραγωγή του επίπεδου γυαλιού τέτοιες ατέλειες εμφανίζονται σε όλη την επιφάνεια με μήκος  $a < 10 \mu\text{m}$ . Χτυπήματα κατά την διάρκεια της τοποθέτησης, γρατσουνιές ή μικρές κρούσεις με άλλα αντικείμενα επιφέρουν ατέλειες της τάξης των 100μσι. Η εφελκυστική δύναμη που επιβάλλεται στο γυαλί συγκεντρώνεται στις άκρες των ατελειών αυτών υπό μορφή αυξημένων εφελκυστικών τάσεων. Αν η δύναμη συνοχής  $\sigma_{coh}$  στη περιοχή υπερκαλυφθεί τότε τα άτομα χωρίζουν και η ρωγμή μεγαλώνει. Αυτού του τύπου μηχανισμός οδηγεί σε μια ψαθυρή μορφή αστοχίας.

Εκτός από την παρουσία και την διανομή των ατελειών στην επιφάνεια, η αντοχή του γυαλιού εξαρτάται και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πρόκειται για χαρακτηριστικό που απαιτεί προσοχή κατά τον σχεδιασμό γιατί, αντίθετα με άλλα υλικά, η απόκλιση της αντοχής είναι μεγάλη και μπορεί να αυξηθεί επιπλέον κατά την διάρκεια της ζωής του υλικού.

Η θεμελιώδης θεωρία για το κριτήριο αστοχίας διατυπώθηκε από τον Griffith το 1920 και βασίζεται σε μια ενεργειακή ισορροπία σύμφωνα με την οποία η ρωγμή θα μεγαλώσει σε ένα υπό ένταση στοιχείο εάν η αύξηση της απελευθερώνει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτείται για την δημιουργία νέων ρωγμών.





Εικόνα 22. Παρίσι Λεωφόρος Ηλυσίων Πεδίων [5]

Ορίζουμε τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης ως:

$$K_t = Y \cdot \sigma_t \cdot a^{0.5}$$

όπου  $\sigma_t$  η εφελκυστική τάση από κεντρικό εφελκυσμό, που προσδιορίζεται χωρίς την παρουσία της ρωγμής,  $a$  το μήκος της ρωγμής και  $Y$  συντελεστής αναλογίας εξαρτώμενος από το σχήμα της ρωγμής, το λόγο του μήκους της προς το πάχος του στοιχείου και την θέση της ρωγμής στην περιοχή εφελκυσμού. Ο συντελεστής  $Y$  έχει βρεθεί πειραματικά ίσος με 1.77 για ρωγή στο κέντρο του πλάτους της εφελκυσμένης περιοχής και 1.99 όταν βρίσκεται στο άκρο. Ο προσδιορισμός του κρίσιμου συντελεστή συγκέντρωσης τάσης  $K_{IC}$  γίνεται εάν στην προηγούμενη σχέση θέσουμε  $K_t = K_{IC}$  και ο συσχετισμός γίνει με την τάση αστοχίας  $\sigma_f$ . Τότε

$$\sigma_f = K_{IC} / Y \cdot a^{0.5}$$

Ο συντελεστής  $K_{IC}$  έχει βρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.72 και 0.82  $\text{MPa m}^{-1/2}$ . ενώ μια συνηθισμένη τιμή είναι 0.75  $\text{MPa m}^{-1/2}$ .

Στην προηγούμενη εξίσωση έχει υποθεθεί ότι η ακμή της ρωγμής είναι οξεία δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας της είναι μηδενική. Αν θεωρηθεί όμως ότι η ακτίνα δεν είναι μηδενική τότε προκύπτει:

$$\sigma_f = \sigma_{coh} \cdot (P^{0.5} / 2 \cdot a^{0.5})$$

Είναι προφανές ότι με την αύξηση της ακτίνας αυξάνει και η αντοχή. Σύμφωνα με τον Lawn και άλλους, η ελάχιστη ακτίνα βρίσκεται από τον τύπο :

$$P_{min} = (2 * K_{IC} / Y * \sigma_{coh})^2$$

Με εφαρμογή των τιμών  $K_{IC}=0.75 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\sigma_{coh} = 20000 \text{ MPa}$  και  $Y=1.99$  η ελάχιστη ακτίνα προκύπτει  $r_{min}=1.4 \text{ nm}$ . Η τιμή αυτή είναι τέσσερις φορές το μήκος δεσμού Si-O-Si το οποίο είναι  $0.32 \text{ nm}$ .

Μερικές φορές το μέγεθος των κρίσιμων ατελειών καθορίζεται από την επιφάνεια αστοχίας μετά την θραύση. Η μέτρηση απαιτεί πολύ μεγάλη ακρίβεια η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο από ηλεκτρονικά μικροσκόπια.

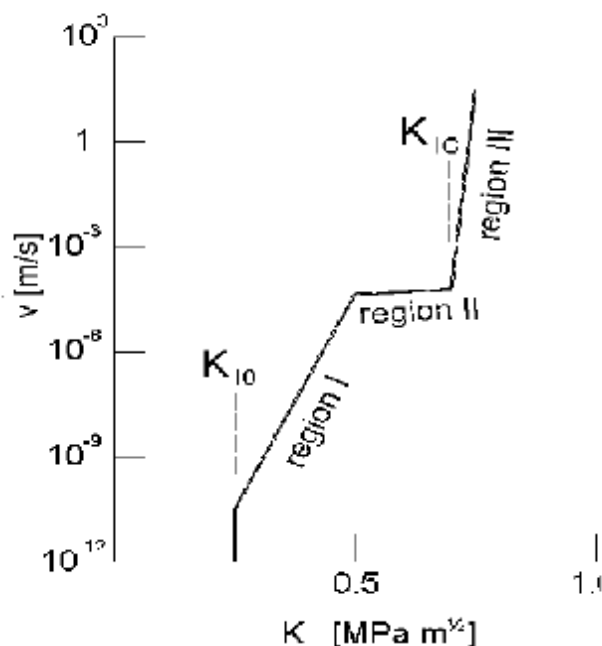
Όταν ψαθυρά υλικά, όπως το γυαλί, χαράζονται από άλλα σκληρά υλικά, δημιουργούνται τελικά ρωγμές από αυτές τις εγκοπές. Από την στιγμή που η αστοχία του γυαλιού ξεκινάει από ατέλειες στην επιφάνεια σε μέγεθος μερικών μικρών του μέτρου, η αστοχία μπορεί να είναι αποτέλεσμα επαφής με μικροσκοπικούς αλλά σκληρούς κόκκους. Ο αέρας περιέχει σκόνη η οποία κατά ένα μεγάλο μέρος αποτελείται από μικρά κομμάτια χαλαζία που είναι αρκετά σκληρά ώστε να μπορούν να χαράξουν όλα τα υλικά εκτός από το διαμάντι. Χαρακτηριστικά εάν θεωρηθεί ένα κομμάτι χαλαζία με ακτίνα  $1 \text{ mm}$  που βρίσκεται στην επιφάνεια γυαλιού, το κρίσιμο φορτίο για να χαραχθεί είναι μόλις  $0.5 \text{ N}$  (Derby 1992). Είναι πολύ συχνό τέτοια κομμάτια να συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των υλικών και όταν αυτά παγιδεύονται μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, το κρίσιμο αυτό φορτίο εύκολα ξεπερνιέται. Έτσι στην άμεση επαφή του γυαλιού και του μεταλλικού πλαισίου που το περιβάλλει, τα μικροσκοπικά κομμάτια χαράζουν το γυαλί, αντί την μεταλλική επιφάνεια, και η αστοχία ξεκινάει. Ως εκ τούτου η επαφή μεταξύ γυαλιού και μετάλλου θα πρέπει να εμποδίζεται με την τοποθέτηση υλικών με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (π.χ. λάστιχο), μεταξύ των επιφανειών γυαλιού - μετάλλου.

Παρόλο που το γυαλί χαρακτηρίζεται ως χημικά αδρανές και με σημαντική αντίσταση στη διάβρωση στην πραγματικότητα είναι πολύ ευαίσθητο στην αστοχία, λόγω διάβρωσης υπό τάση, η οποία προκαλείται από το νερό του περιβάλλοντος. Αυτό το φαινόμενο, συχνά καλούμενο ως στατική κόπωση, είναι ο λόγος για την αστοχία του γυαλιού υπό μακρόχρονες εφελκυστικές τάσεις.

Η διαδικασία της θραύσης του γυαλιού χωρίζεται στα ακόλουθα μέρη:

- Η ρωγή προκαλείται στην επιφάνεια του γυαλιού κατά την διάρκεια της παραγωγής ή και της τοποθέτησης.
- Εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται κανονικά στις ρωγμές. Εάν η ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης  $K_I > K_{I0}$  ( $K_{I0} = (20-30)\% K_{IC}$ , (περιοχή I στη

παρακάτω εικόνα) η ρωγμή αρχίζει να μεγαλώνει εξαιτίας της στατικής κόπωσης, η οποία προκαλείται από την χημική αντίδραση  $\text{Si}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{SiOH}$ , με αποτέλεσμα να καταλύεται ο δεσμός.



Διάγραμμα 7. Μεταβολή της ταχύτητας αστοχίας σε συνάρτηση με τον συντελεστή  $K_I$  [5]

- Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισωθεί με τον κρίσιμο  $K_I=K_{IC}$  η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής αυξάνεται δραματικά οδηγώντας άμεσα σε θραύση. Στην περίπτωση που η ρωγμή έχει χώρο να αναπτυχθεί μπορεί η ταχύτητα να φτάσει την τιμή  $v_{max}=1500$  m/s. Όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα, η ρωγμή χωρίζεται σε μικρότερες που αναπτύσσονται με μικρότερες ταχύτητες.
- Στην περίπτωση που το επίπεδο της τάσης είναι εξ αρχής υψηλό ή οι ατέλειες μεγάλες σε μέγεθος, ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισώνεται άμεσα με τον κρίσιμο  $K_I=K_{IC}$  αμέσως με της επιβολή της φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση η αντοχή του γυαλιού σε βραχυχρόνιες φορτίσεις ξεπερνιέται και το γυαλί θρυμματίζεται ακαριαία χωρίς καμία προειδοποίηση.

Ήδη φαίνεται από την παραπάνω διαδικασία και το σχήμα 3 ότι είναι δυνατό να προβλεφθεί κάποιο επίπεδο φόρτισης το οποίο να οδηγεί σε μια χαμηλή ταχύτητα διάδοσης ρωγμών που, για την χρονική διάρκεια επιβολής της φόρτισης, να οδηγεί σε προβλέψιμη, σε χρόνο, χρησιμότητα του υλικού. Είναι ακόμη φανερό ότι οι φορτίσεις με μεγάλη διάρκεια (π.χ. μόνιμα φορτία) πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό επίπεδο φόρτισης από ότι φορτία με μικρότερο χρόνο επιβολής (π.χ. χιόνι) είτε με σχεδόν στιγμιαίο χρόνο επιβολής όπως η ανεμοπύεση.

## **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΟ ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ ΠΡΟΣΧΕΔΙΟ prEN 13474**

Από το 1999 δημιουργήθηκε το προσχέδιο του ευρωπαϊκού προτύπου για τον υπολογισμό του γυαλιού σε υαλοστάσια το οποίο αποτελείται από τρία μέρη, το πρώτο αφορά γενικές διατάξεις υπολογισμού το δεύτερο υπολογισμό με ομοιόμορφη φόρτιση και το τρίτο φόρτιση με γραμμικά φορτία. Αν και το πρότυπο αυτό θα έπρεπε να είχε γίνει EN (κανονικό πρότυπο για εφαρμογή) την στιγμή που γράφεται το παρόν κείμενο έχει αποσυρθεί για διορθώσεις.

Ο σχεδιασμός σύμφωνα με το πρότυπο αυτό αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Τον προσδιορισμό της αντοχής σχεδιασμού η οποία είναι συνάρτηση της φορτιζόμενης επιφάνειας, της διάρκειας επιβολής φορτίου του υλικού και βεβαίως των μερικών συντελεστών ασφαλείας που ορίζονται στο πρότυπο.
- Τον προσδιορισμό των φορτίων με βάση τους αντίστοιχους ευρωκώδικες φόρτισης (π.χ. EN 1991-1-4 Δράση στις κατασκευές - Γενικές δράσεις - Δράση ανέμου, κα)
- Τον προσδιορισμό της μέγιστης τάσης καθώς και της παραμόρφωσης του βέλους. Εδώ ας τονιστεί ότι λόγω του πολύ μικρού πάχους που έχει το γυαλί σε σχέση με το αναπτυσσόμενο βέλος (πολλαπλάσιο του μισού πάχους της διατομής), δημιουργούνται θέματα μεγάλων παραμορφώσεων (γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά). Για το λόγο αυτό το προσχέδιο του κανονισμού δίνει έναν εύκολο τρόπο, για προκαθοριζόμενες φορτίσεις, του προσδιορισμού της έντασης και του βέλους μη γραμμικά.
- Τον προσδιορισμό μιας ισοδύναμης έντασης που λαμβάνει υπ' όψη της την μειωμένη πιθανότητα αστοχίας όταν η μέγιστη τάση είναι περιορισμένη σε έκταση.

### **ΣΥΝΘΕΤΟ ΓΥΑΛΙ**

Σε κρίσιμες θέσεις, η τοποθέτηση υαλοπινάκων μπορεί να θέτει θέματα ασφαλείας προσώπων. Αν π.χ. κατασκευαστεί η κάλυψη ενός υπόστεγου από υαλοπίνακες τότε τίθεται θέμα τι θα γινόταν αν αυτοί έσπασαν από λόγους που δεν σχετίζονται από την φόρτιση τους. Τέτοιοι λόγοι θα μπορούσαν να είναι η κρούση με ένα αντικείμενο που έπεσε από ψηλά ή τυχαία αστοχία από προσμίξεις θειούχου νικελίου κα. Η τοποθέτηση γυαλιού tempered δεν διορθώνει πλήρως το πρόβλημα διότι αν και το γυαλί τελικά θρυμματίζεται σε μικρά τμήματα υπάρχει η πιθανότητα

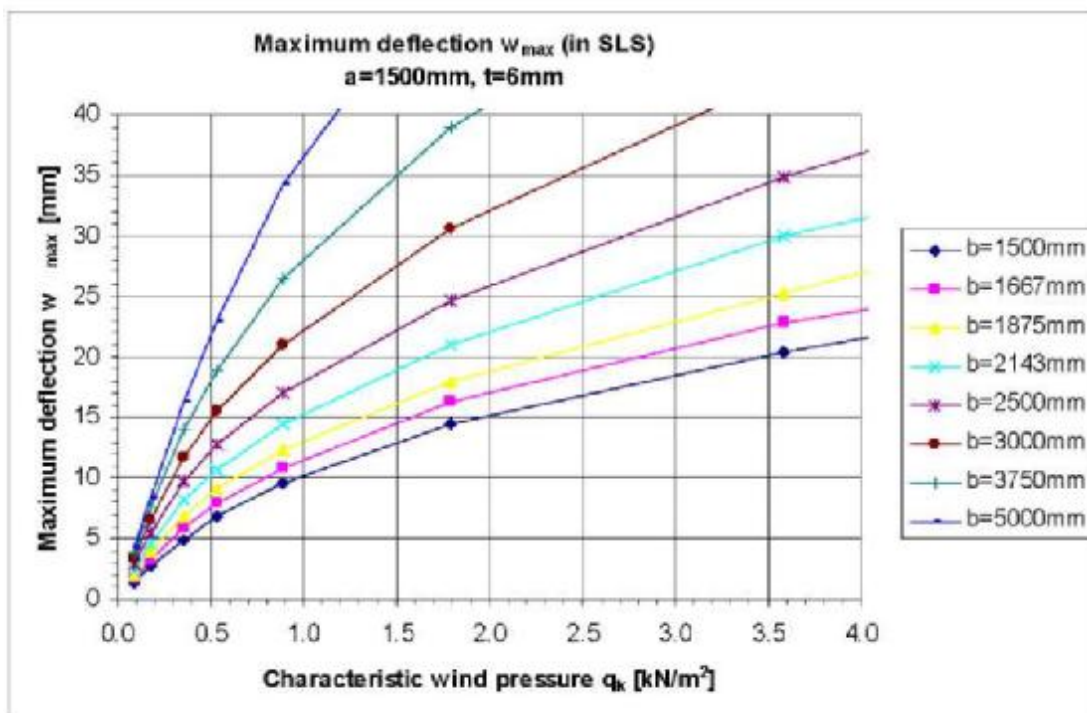
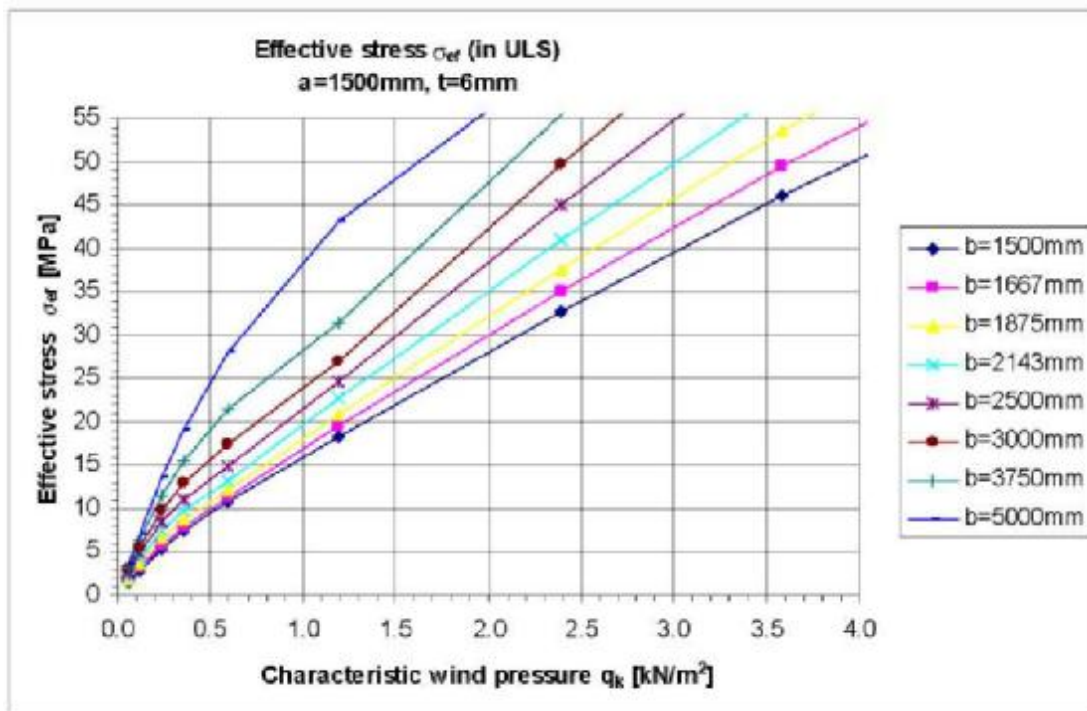
πτώσης από ύψος ενός ολόκληρου τμήματος του από χαλαρά συγκρατούμενα τέτοια τμήματα πάνω σε ανθρώπους, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητά τους.

Σε τέτοιες περιπτώσεις συνίσταται η τοποθέτηση σύνθετου υαλοπίνακα στον υπολογισμό του οποίου θα ληφθεί υπόψη ότι ο ένας υαλοπίνακας έχει θραυστεί και φέρεται από το υπόλοιπο τμήμα. Τα φορτία με βάση τα οποία βεβαίως θα υπολογιστεί το σύστημα θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την επικινδυνότητα μιας τέτοιας περίπτωσης. Έτσι αυτά μπορεί να μεταβάλλονται από το ίδιο φορτίο των υαλοπινάκων (ακραία περίπτωση) έως το πλήρες φορτίο σχεδιασμού του συστήματος (ίσως επίσης ακραία περίπτωση).

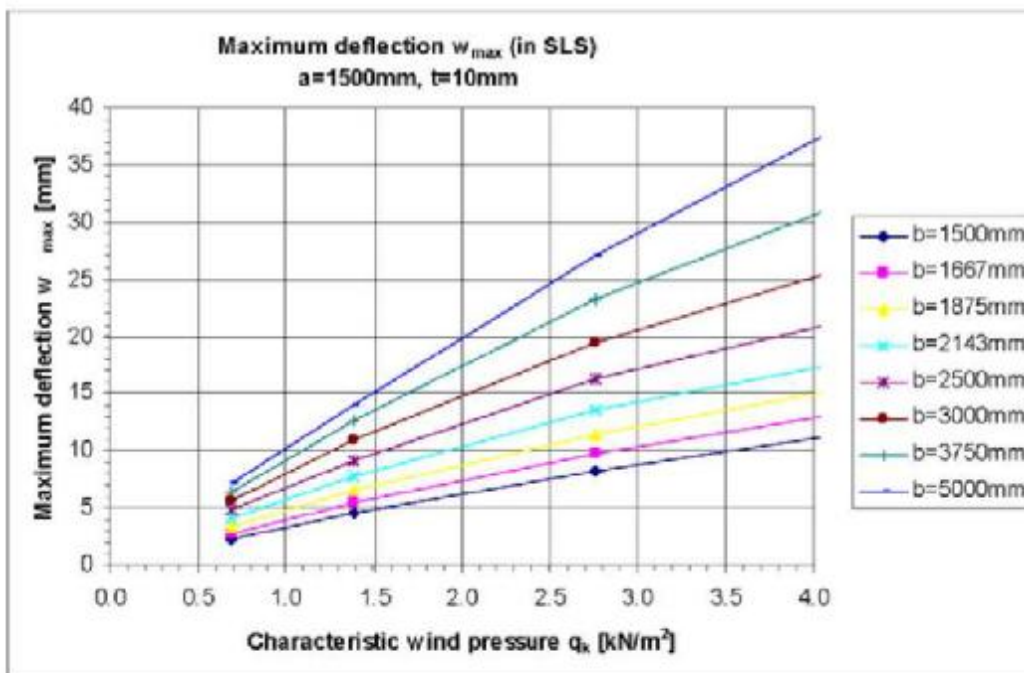
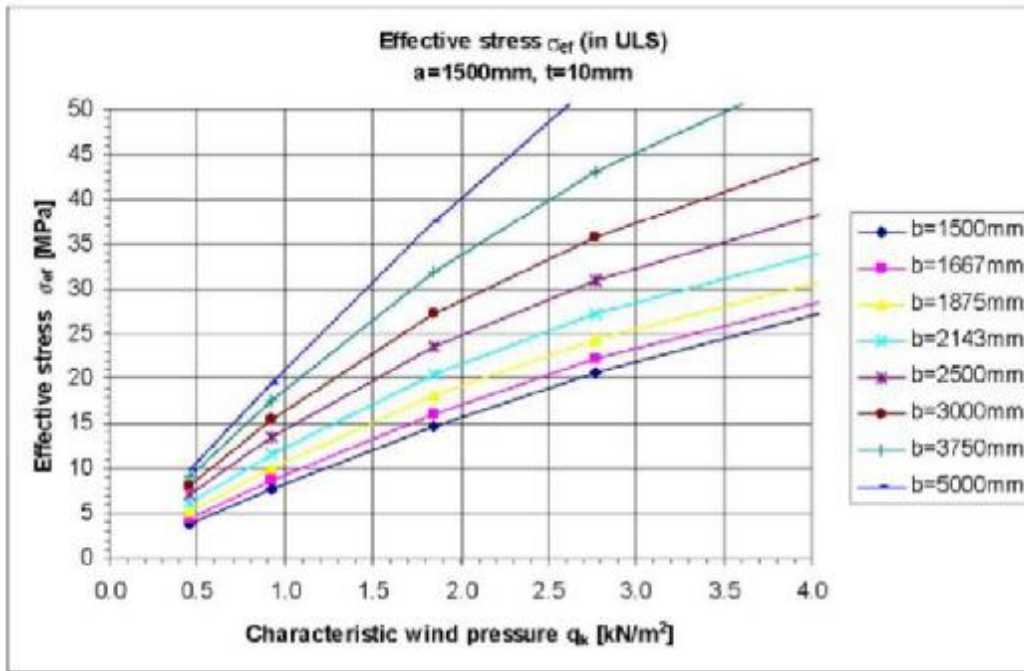
Εκείνο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι η διατμητική συνεργασία μέσω της στρώσης συγκόλλησης (πχ PVB) δεν είναι πλήρης λόγω της επιρροής του μέτρου διατμήσεως του συνδετικού αυτού υλικού από την θερμοκρασία, τον ερπυσμό και την γήρανση από την υπεριώδη ακτινοβολία. Είναι βέβαιο ότι τα μόνιμα φορτία ή αυτά με μεγάλη διάρκεια, θα πρέπει να κατανέμονται στα φύλλα ανάλογα με την ακαμψία τους (το πάχος τους στον κύβο). Θα πρέπει ακόμη να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα εμφάνισης φορτίων σε ακραίες (υψηλές) θερμοκρασίες. Ίσως όμως η θεώρηση απουσίας διατμητικής συνεργασίας σε στιγμιαία ή ατυχηματικά φορτία να είναι υπερβολή και να πρέπει ένα τμήμα του φορτίου να παραληφθεί από στο σύνολο του πάχους (σαν να επρόκειτο για ενιαίο υλικό). Για παράδειγμα το Καναδέζικο πρότυπο (CAN/CGS 12.20-M89, Structural design of glass for buildings) επιβάλλει τη θεώρηση του σύνθετου γυαλιού ως το αντίστοιχο με πλήρες πάχος μόνο για την φόρτιση ανέμου κάτω από την θερμοκρασία των 70F (21°C).

Ως σύνθετο γυαλί δεν θεωρούνται οι θερμομονωτικοί υαλοπίνακες (διπλά τζάμια) οι οποίοι, λόγω του αεροστεγούς διακένου που διαθέτουν έχουν ειδικό τρόπο αντιμετώπισης. Αναφέρονται επιγραμματικά, η μεταβολή της εξωτερικής πίεσης του αέρα (από μετεωρολογικούς λόγους ή από διαφορά υψομέτρου) σε σχέση με αυτή που υπήρχε όταν σφραγίστηκε, η μεταβολή της θερμοκρασίας, η μεταφορά φορτίων από τον ένα υαλοπίνακα στον άλλο μέσω του αέρα του διακένου κα.

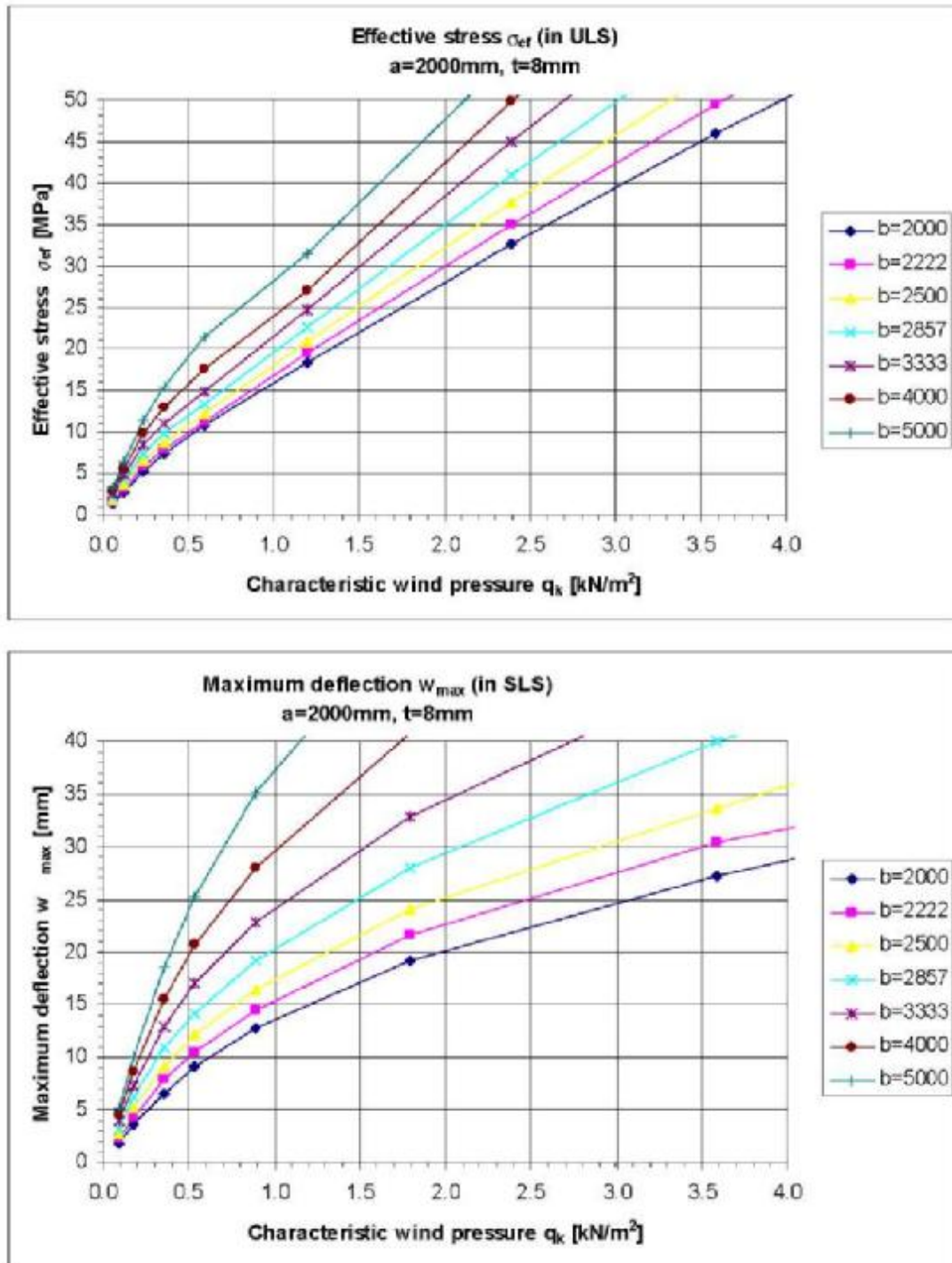
Διαγράμματα προεκτίμησης υαλοπινάκων σύμφωνα με το prEN 13474-2(2000) [5]



Διάγραμμα Β-1: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=1500\text{mm}$  και πάχους  $t=6\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS.

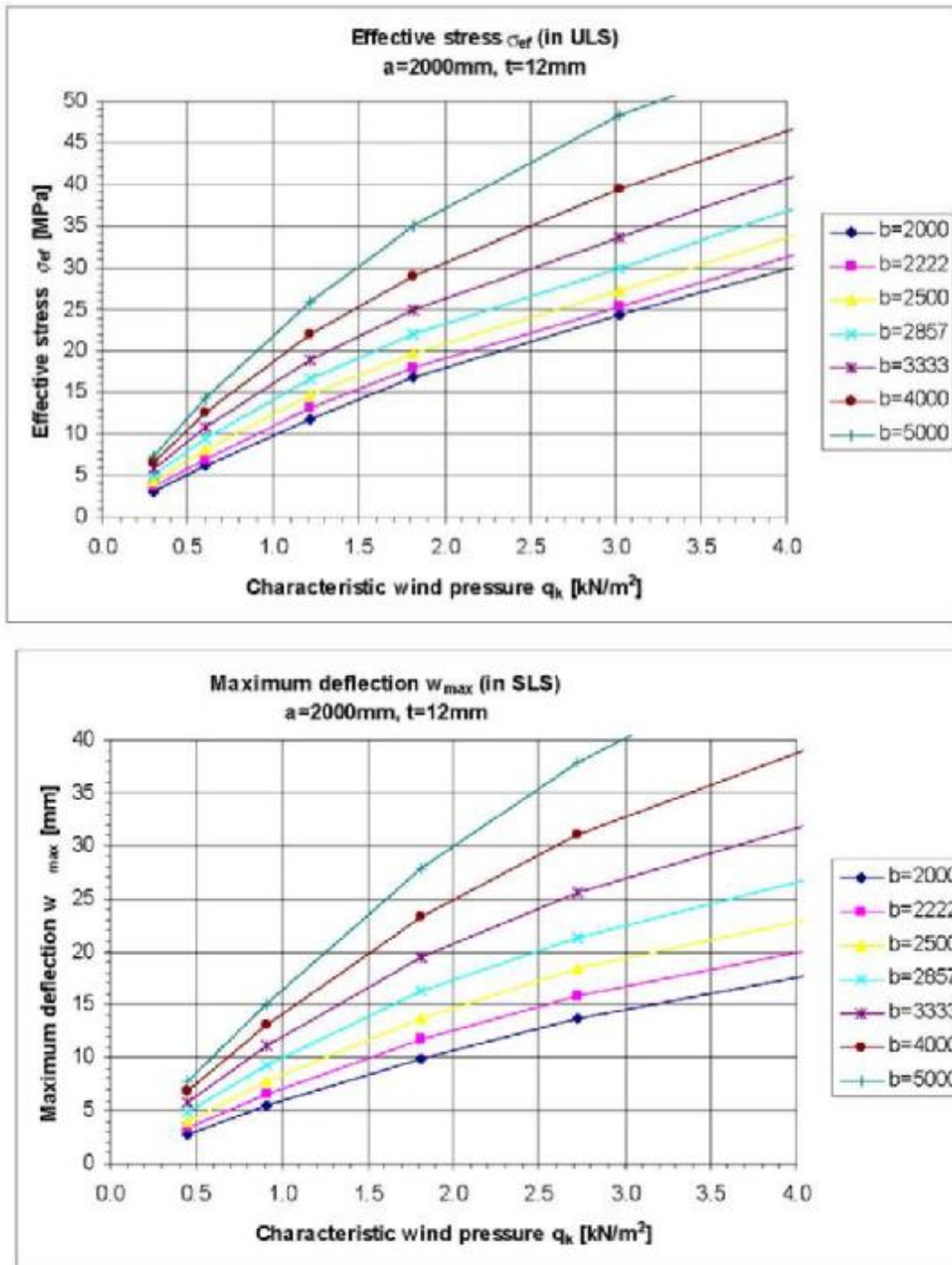


Διάγραμμα Β-2: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=1500\text{mm}$  και πάχους  $t=10\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS

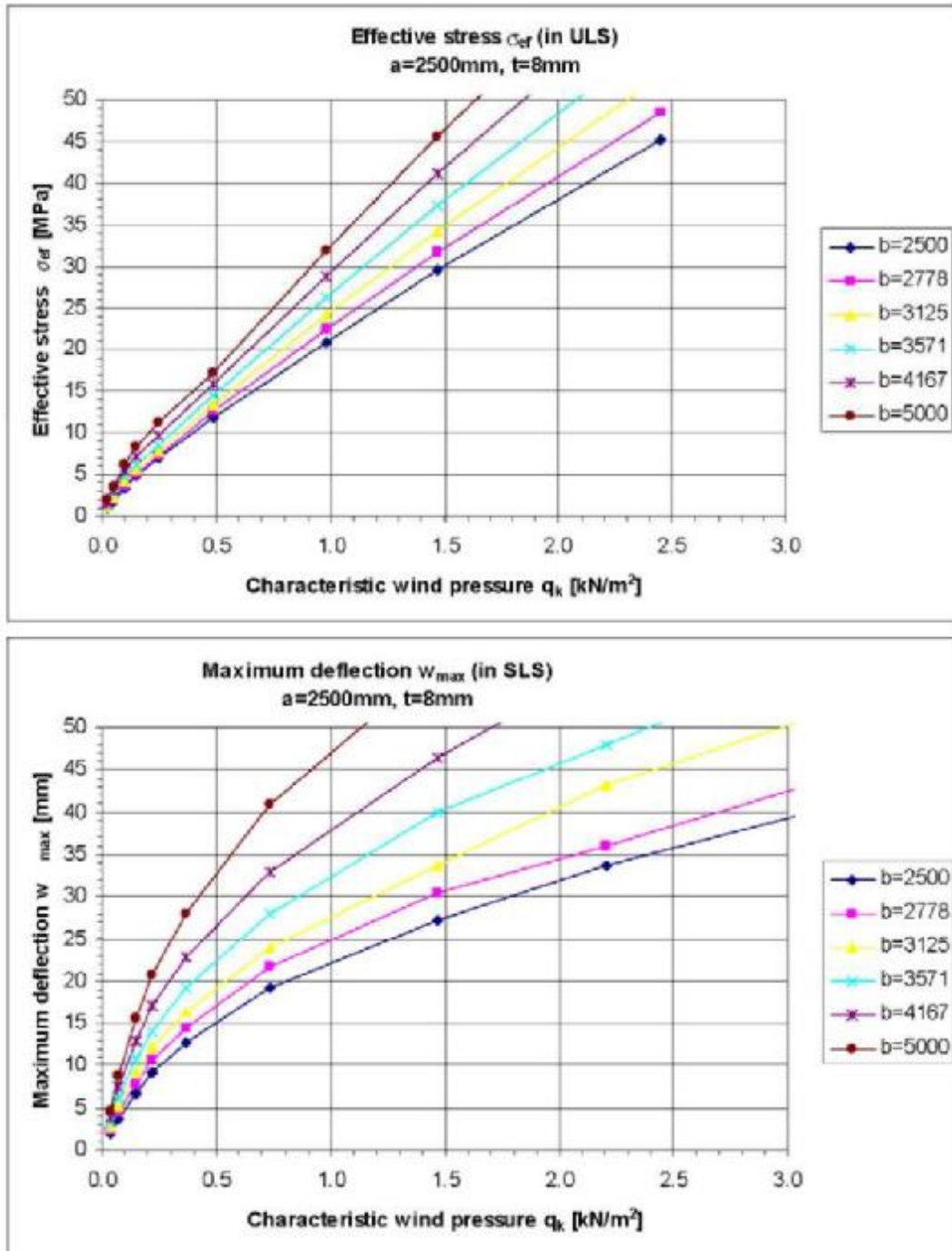


Διάγραμμα Β-3: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=2000\text{mm}$  και πάχους  $t=8\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS

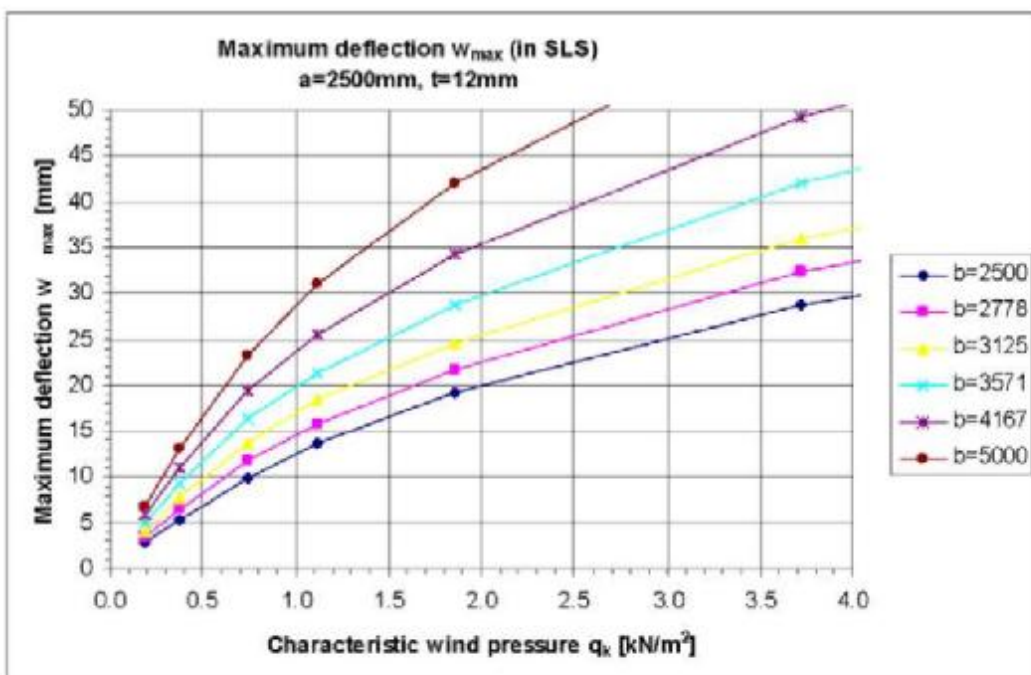
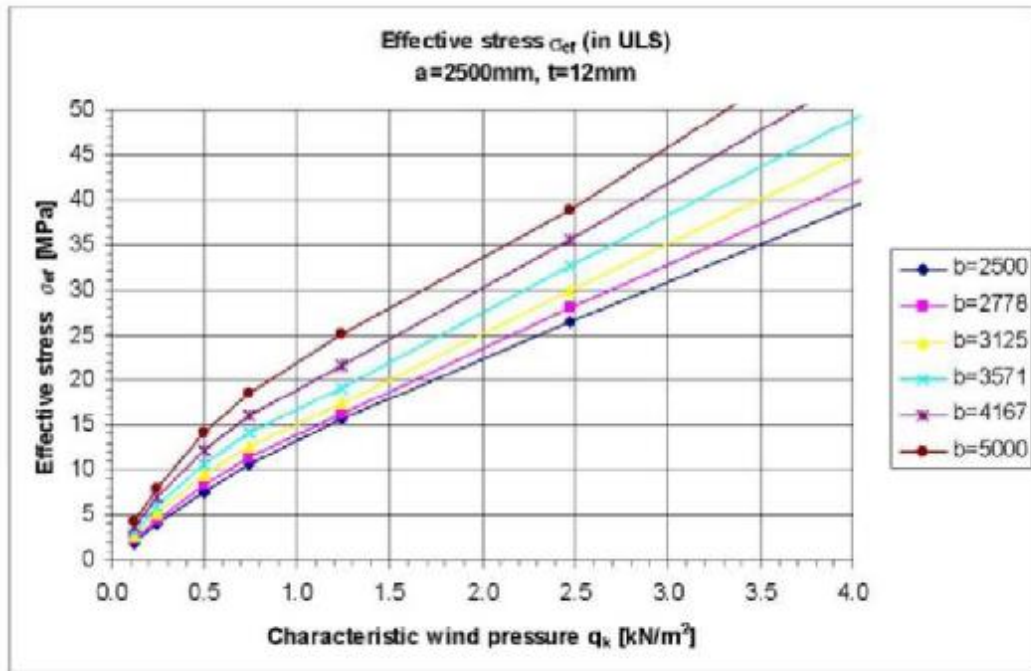




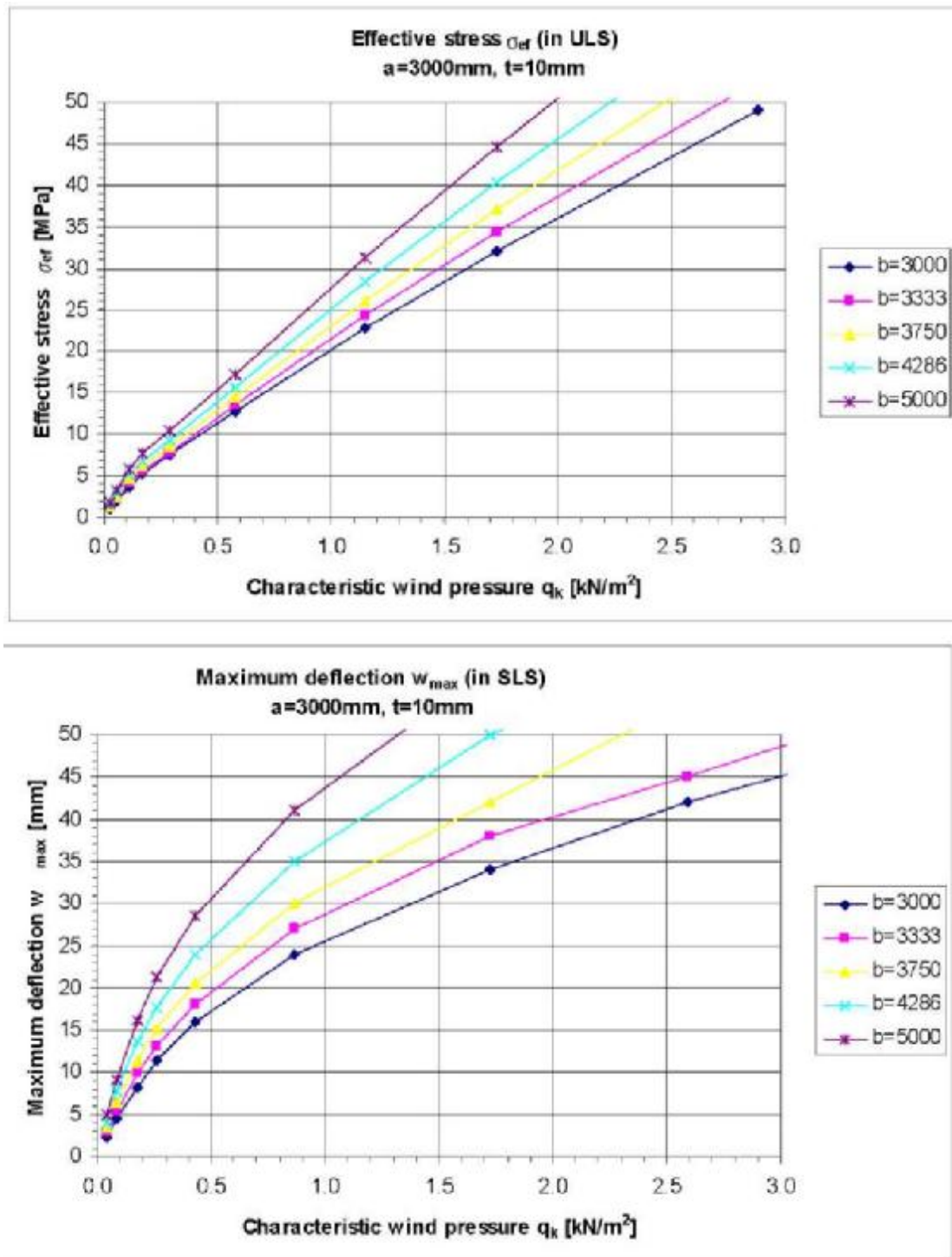
Διάγραμμα Β-4: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=2000\text{mm}$  και πάχους  $t=12\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



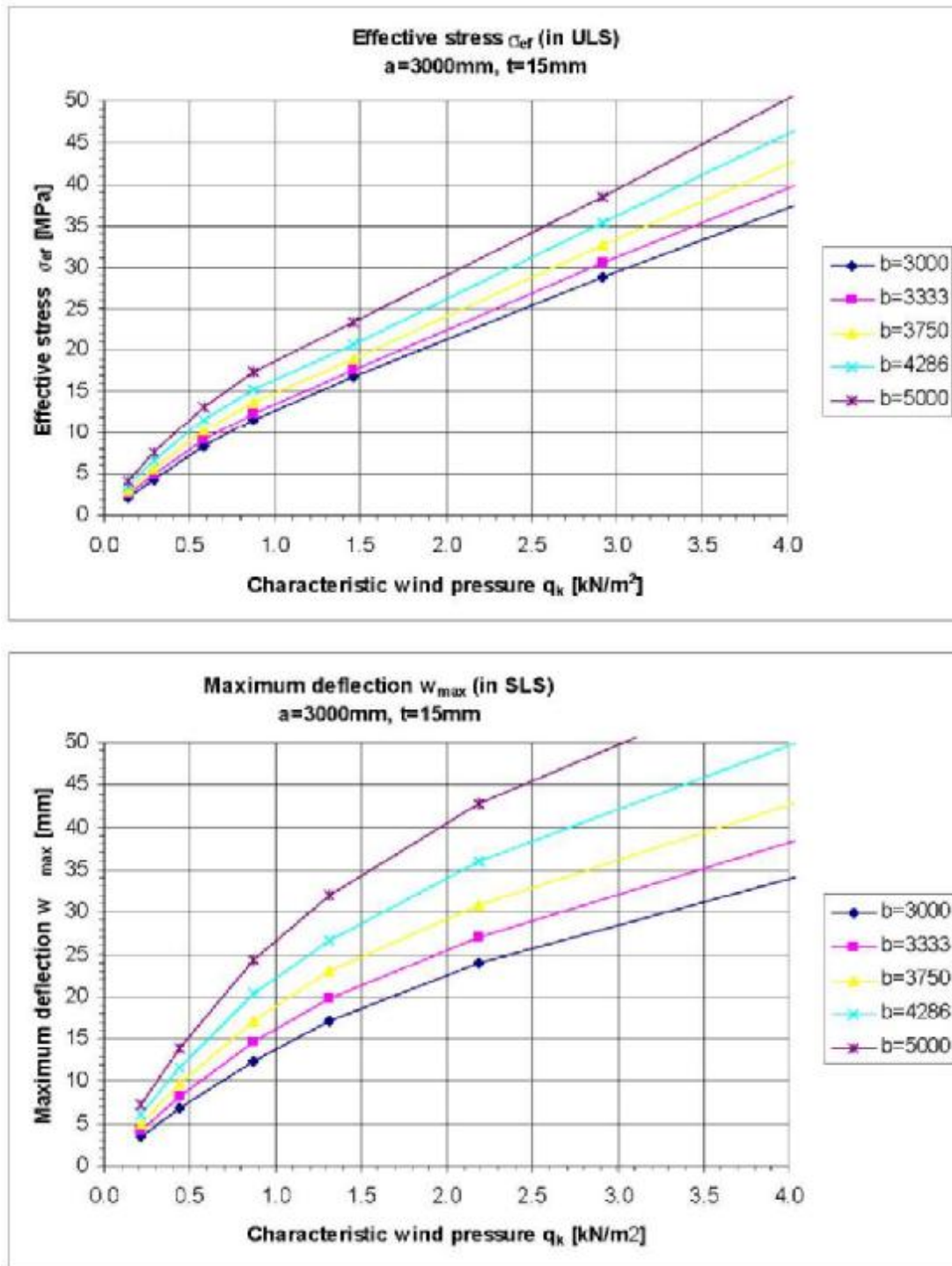
Διάγραμμα Β-5: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=2500\text{mm}$  και πάχους  $t=8\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-6: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=2500\text{mm}$  και πάχους  $t=12\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-7: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=3000\text{mm}$  και πάχους  $t=10\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS



Διάγραμμα Β-8: Για ορθογωνικούς υαλοπίνακες πλευράς  $a=3000\text{mm}$  και πάχους  $t=15\text{mm}$ , περιμετρικά εδρασμένοι, σε συνάρτηση με την άλλη διάσταση  $b$  και την χαρακτηριστική τιμή της ανεμοπίεσης  $q_k$ . Στο άνω διάγραμμα υπολογίζεται η ενεργός τάση σε ULS και στο κάτω το μέγιστο βέλος σε SLS

## 2.4 ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

### Γενικά

Η τοιχοποιία<sup>6</sup> είναι από τα αρχαιότερα δομικά υλικά. Εντούτοις, οι γνώσεις μας για τη μηχανική της συμπεριφορά και την απόκριση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία είναι σχετικά περιορισμένες. Η αντίφαση αυτή μπορεί να αποδοθεί στους ακόλουθους λόγους :

α. Η ανάπτυξη της επιστήμης της μηχανικής σχεδόν συνέπεσε με την εμφάνιση νέων ισχυρών και εύπλαστων δομικών υλικών - χάλυβας, σκυρόδεμα - που μείωσαν το κόστος του φέροντα οργανισμού και βαθμιαία περιόρισαν την τοιχοποιία στο ρόλο του οργανισμού πλήρωσης.

β. Η τοιχοποιία έχει σχετικά χαμηλές αντοχές και εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη αύξησης των διατομών και του κόστους του φέροντα οργανισμού και περιορίζει τον αριθμό των ορόφων ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα.

γ. Η τοιχοποιία είναι υλικό πολυφασικό, πολύμορφο και "απειθαρχο". Τα βασικά συστατικά της είναι οι πλίνθοι και το συνδετικό κονίαμα. Οι πλίνθοι μπορεί να είναι τεχνητές ή τεμάχια φυσικών λίθων και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία υλικών, κατεργασίας, σχημάτων και μεγεθών. Το κονίαμα παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία συνθέσεων και αντοχών αλλά μπορεί και να απουσιάζει εντελώς (ξηρολιθοδομές). Ένας επί πλέον παράγοντας πολυμορφίας είναι και ο τύπος δόμησης (πλέξη) της τοιχοποιίας. Κατά συνέπεια απαιτείται θεμελιώδης έρευνα των επί μέρους φάσεων (πλίνθοι - κονίαμα) και της μηχανικής "συνεργασίας" τους στο σώμα της τοιχοποιίας για την κατανόηση της συμπεριφοράς της.

Έτσι, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα ο σχεδιασμός κτιρίων με φέροντα οργανισμό από τοιχοποιία ήταν σχεδόν εμπειρικός.

Σε χώρες με παράδοση στη χρήση της φέρουσας τοιχοποιίας και σχετικά άσειστες (Μ. Βρετανία) εξακολουθεί ακόμη και σήμερα εκτεταμένη χρήση της φέρουσας τοιχοποιίας σε νέα κτίρια μέχρι και τεσσάρων (4) ορόφων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διεθνώς έντονη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για τη συντήρηση και ανάδειξη της οικιστικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσα στο κλίμα αυτό αναζωπυρώθηκε και η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μνημείων και διατηρητέων κτιρίων και συνόλων είναι κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία. Παράλληλα άρχισαν να ανακαλύπτονται ξανά τα ξεχασμένα προτερήματα της τοιχοποιίας όπως : Θερμομόνωση, Πυρασφάλεια, Αντοχή στο χρόνο, Αισθητική υπεροχή.

Τροχοπέδη στην ανάπτυξη της διεθνούς συνεργασίας για την προώθηση της έρευνας της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας είναι η πολυμορφία και πολυτυπία του ίδιου του υλικού, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη δυσκολία προτυποποίησης υλικών και μεθόδων.

Πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, σχετικά πρόσφατα απέκτησαν κανονισμό για κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Παρατηρείται

<sup>6</sup> «Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία», ΤΕΕ, Σοφία Κωνσταντινίδου.

ανομοιομορφία μεθόδων, ποικιλία ορισμών και σημαντική διασπορά τιμών μεταξύ των διαφόρων κανονισμών. Είναι χαρακτηριστικό ότι το πρώτο κείμενο Ευρωκώδικα για κατασκευές από τοιχοποιία (Ευρωκώδικας 6 [1] κυκλοφόρησε μόλις το 1989).

Σε κάθε μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους σεισμό, στον Ελλαδικό χώρο αλλά και παγκόσμια, διαπιστώνεται η υψηλή τρωτότητα των κτισμάτων από φέρουσα τοιχοποιία. Η αδυναμία αυτή μπορεί να αποδοθεί σε μία σειρά από λόγους όπως:

- ✚ Η ψαθυρότητα της άοπλης τοιχοποιίας.
- ✚ Η ανεπαρκής διαφραγματική λειτουργία πατωμάτων και στεγών.
- ✚ Η ανεπαρκής σύνδεση οριζόντιων και κατακόρυφων στοιχείων του φέροντα οργανισμού.
- ✚ Η παντελής απουσία ή η μη τήρηση της μελέτης όταν αυτή υπάρχει.
- ✚ Οι κάθε είδους κακοτεχνίες.
- ✚ Οι κατά καιρούς επεμβάσεις τροποποιήσεις και προσθήκες.
- ✚ Η κακή συντήρηση και η γήρανση των υλικών.

Η γνώση των Πολιτικών Μηχανικών όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας και τη δομή και συμπεριφορά κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία ήταν γενικά μέχρι πρόσφατα ανεπαρκής και επιφανειακή. Μόλις τα τελευταία χρόνια έχει ενταχθεί στα προπτυχιακά προγράμματα σπουδών των Ελληνικών Πολυτεχνείων περιορισμένος αριθμός μαθημάτων επιλογής με αντικείμενο τις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία.

## Τύποι Τοιχοποιιών - Ορολογία

Κατάταξη τοιχοποιιών με κριτήριο το είδος των πλίνθων

### A. Λιθοδομές

- α. Ξηρολιθοδομές
  - i Αργοξηρολιθοδομές (Ξηρολιθιές)
  - ii Ημιλάξευτες ξηρολιθοδομές } Λιθοδομές κλασικής αρχαιότητας
  - iii Λαξευτές ξηρολιθοδομές
- β. Αργολιθοδομές
- γ. Ημιλάξευτες λιθοδομές
- δ. Λαξευτές λιθοδομές

### B. Πλινθοδομές

- α. Ωμοπλινθοδομές
- β. Οπτοπλινθοδομές
  - i Συμπαγών πλίνθων με ή χωρίς σκάφη
  - ii Διάτρητων πλίνθων (με οριζόντιες οπές)
  - iii Διάκενων πλίνθων (με κατακόρυφες οπές ή διάκενα)

### Γ. Τσιμεντολιθοδομές - Γυψοδομές

- α. Τσιμεντοπλίνθων βαρέως τύπου
- β. Πλίνθων ελαφροσκυροδέματος (Κισσηρόπλινθοι)
- γ. Πλίνθων αεροσκυροδέματος
- δ. Γυψοπλίνθων (Για μη φέροντα ηχομονωτικά χωρίσματα)

### Δ. Μικτές τοιχοποιίες

- α. Λιθοπλινθοδομές
- β. Ξυλόπηκτες τοιχοποιίες (Τσατμάδες)
- γ. Σύνθετες τοιχοποιίες (Με επένδυση όψεως κ.τ.λ.)

Είναι πολύ συνηθισμένη, ιδιαίτερα στις Η.Π.Α., η πλήρωση των διάκενων των τσιμεντολίθων με ισχυρό κονίαμα (grouted masonry) για τη δημιουργία κατακόρυφων νευρώσεων.

### Ονομασίες τοιχοποιιών με κριτήριο τον τύπο δόμησης

- α. Ανισόδομη τοιχοποιία
- β. Ισόδομη τοιχοποιία
  - i. Ισοϋψές σύστημα
  - ii. Ανισοϋψές σύστημα
- γ. Έμπλεκτες τοιχοποιίες
- δ. Δρομική τοιχοποιία
- ε. Μπατική τοιχοποιία
- στ. Υπερμπατική τοιχοποιία
- ζ. Κοίλη ή Ψαθωτή τοιχοποιία (δύο στρώσεις με εσωτερικό διάκενο)
- η. Τοιχοποιία με αλυσοειδές ή σταυροειδές σύστημα πλέξης (English bond)
- θ. Τοιχοποιία με μικτό σύστημα πλέξης (Flemish bond)
- ι. Οπλισμένη τοιχοποιία

#### Μηχανική συμπεριφορά

- Η μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας χαρακτηρίζεται από:

- α. Σχετικά υψηλή θλιπτική αντοχή.
- β. Ιδιαίτερα χαμηλή εφελκυστική αντοχή.
- γ. Σχετικά ικανοποιητική αντοχή σε διάτμηση.
- δ. Έντονα ανισότροπη συμπεριφορά.

- Εκτός της θλιπτικής αντοχής, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αποτελούν και τις βασικές αδυναμίες της τοιχοποιίας. Οι αδυναμίες αυτές οφείλονται όχι μόνο στον ψαθυρό χαρακτήρα των πλίνθων και του κονιάματος, αλλά κυρίως στην συμπεριφορά της διεπιφάνειας επαφής ιδιαίτερα κατά μήκος των συνεχών οριζόντιων αρμών που έχουν χαρακτηριστεί ως τα "αδύνατα επίπεδα της τοιχοποιίας".

#### Θλιπτική αντοχή

- Η υψηλή θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μηχανικά της χαρακτηριστικά καθόρισε και τη χρήση της ως κυρίως θλιβόμενου φέροντος δομικού στοιχείου.
- Τόσο η αντοχή όσο και ο τύπος αστοχίας επηρεάζεται έντονα από τη γωνία της θλιπτικής δύναμης ως προς τη διεύθυνση των οριζόντιων αρμών (ανισοτροπία). Στη συνέχεια αναφερόμαστε στη θλιπτική αντοχή κάθετα στους οριζόντιους αρμούς ( $f_{wc}$ ).
- Η τοιχοποιία καταπονούμενη σε θλίψη κάθετα στους κύριους οριζόντιους αρμούς αστοχεί συνήθως από εγκάρσια ρηγμάτωση των πλίνθων, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στις πλίνθους σε εγκάρσιες διευθύνσεις. Οι τάσεις αυτές προκαλούνται από τον συμβιβασμό των μεγάλων εγκάρσιων παραμορφώσεων του κονιάματος των αρμών με τις μικρότερες των πλίνθων που προκαλεί αντίστοιχα εγκάρσια περίσφιξη στο κονίαμα ( $\epsilon_M < \epsilon_b$ ,  $\nu_M > \nu_b$ ). Έτσι υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση της τοιχοποιίας αναπτύσσεται τριαξονική καταπόνηση στις πλίνθους και στο κονίαμα των αρμών.



- Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας για τους συνήθεις συνδυασμούς πλίνθων και κονιάματος ( $fbc > fmc$ ) είναι μικρότερη από τη θλιπτική αντοχή των πλίνθων αλλά υπερβαίνει την αντοχή του κονιάματος:  $fbc > fwc > fmc$
- Παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας :
  - α. Αντοχή των πλίνθων ( $fbc, fbt$ ).
  - β. Θλιπτική αντοχή του κονιάματος ( $fmc$ ).
  - γ. Γεωμετρία δόμησης (πάχος αρμού/ύψος πλίνθου:  $tm/tb$ ).
  - δ. Παραμορφώσεις πλίνθων και κονιάματος.
  - ε. Ποιότητα δόμησης.

### **Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας**

- Είναι γενικά πολύ χαμηλότερη της θλιπτικής αντοχής.
- Διαφοροποιείται έντονα από τη γωνία της εφελκυστικής δύναμης ως προς τους οριζόντιους αρμούς (ανισοτροπία).
- Εμφανίζεται μεγάλη διασπορά τιμών (αναξιοπιστία).
- Παράγοντες που επηρεάζουν την εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας :
  - α. Αντοχή αρμού σε αποκόλληση ( $fjt$ ).
  - β. Εφελκυστική αντοχή κονιάματος ( $fmt$ ).
  - γ. Συνοχή κονιάματος - πλίνθου ( $fjso$ ).
- Εφελκυστική αντοχή κάθετα στους οριζόντιους αρμούς : Αποκόλληση αρμών από υπέρβαση της μικρότερης από τις  $fjt, fmt$ .
- Εφελκυστική αντοχή παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς ( $fwl$ ) : Έντονη διαφοροποίηση αντοχών και τύπων αστοχίας.
- Συνήθως η εφελκυστική αντοχή παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή κάθετα σε αυτούς.
- Οι Κανονισμοί κατά κανόνα δεν χρησιμοποιούν την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας στο σχεδιασμό (non tension material). Αντίθετα, συνήθως προδιαγράφουν την καμπτική αντοχή τοιχοποιίας για φόρτιση κάθετα στο επίπεδό της (σεισμός, άνεμος).

### **Διατμητική Αντοχή**

- Καθαρή διάτμηση δεν υπάρχει υπό πραγματικές συνθήκες. Στο επίπεδο των αρμών συνυπάρχουν με τις διατμητικές ( $\tau$ ) και ορθές τάσεις ( $\sigma$ ) ακόμη και μόνο λόγω του ίδιου βάρους της τοιχοποιίας.
- Πολύ χρήσιμη για το σχεδιασμό υπό σεισμικά φορτία είναι η περιβάλλουσα αστοχίας τοιχοποιίας υπό συνδυασμό ( $\tau, \sigma$ ).

### **Απόκριση και παθολογία κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία υπό κατακόρυφα φορτία**

Η μεταβίβαση των ιδίων βαρών του οριζόντιου φέροντα οργανισμού (πατώματα, στέγες) και των κινητών φορτίων στις φέρουσες τοιχοποιίες και από εκεί, μαζί με τα σημαντικά ίδια βάρη των τοίχων, στη θεμελίωση και το έδαφος, είναι συνήθως σαφής και εξασφαλισμένη σε όλους του τύπους κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία.

Τα τυχόν προβλήματα είναι συνήθως περιορισμένα και μπορούν να καταταγούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

α. Προβλήματα τοπικής ανεπάρκειας λόγω κακού σχεδιασμού (τοπική ρηγμάτωση τοιχοποιίας υπό ισχυρά μοναχικά φορτία ή λόγω αναντιστοιχίας ανοιγμάτων καθ' ύψος).

β. Προβλήματα τοπικής ή γενικής ανεπάρκειας από διαφορικές καθιζήσεις της θεμελίωσης.

γ. Προβλήματα τοπικής ανεπάρκειας από επεμβάσεις, διαρρυθμίσεις ή προσθήκες και επέκταση.

δ. Προβλήματα τοπικής ή γενικής ανεπάρκειας από προσθήκες καθ' ύψος.

ε. Προβλήματα τοπικής ή γενικής ανεπάρκειας από αλλαγή χρήσης (αύξηση κινητών φορτίων).

στ. Προβλήματα τοπικής ή γενικής ανεπάρκειας από γήρανση υλικών.

Οι βλάβες από τα κατακόρυφα φορτία είναι συνήθως των ακόλουθων τύπων :

α. Όταν υπάρχει τοπική υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής είτε από κακό σχεδιασμό είτε από συγκέντρωση φορτίου εμφανίζονται, είτε σχεδόν κατακόρυφες ρηγματώσεις που οφείλονται στις εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται σε μονοαξονικά θλιβόμενη τοιχοποιία, είτε, ιδιαίτερα σε περίπτωση τρίστρωτης λιθοδομής, εμφανίζεται κατακόρυφο επίπεδο ρηγμάτωσης - διαχωρισμού κατά το πάχος του τοίχου που εκδηλώνεται με μονόπλευρο είτε αμφίπλευρο φούσκωμα της τοιχοποιίας .

β. Σε περίπτωση διαφορικών καθιζήσεων εμφανίζονται λοξές ρηγματώσεις μιας διεύθυνσης κατά μήκος της θλιβόμενης - βραχυνόμενης διαγωνίου σε πεσσούς ή δίσκους τοιχοποιίας κατά μήκος του πόδα, των οποίων εκδηλώνεται διαφορική καθίζηση (Σχ. 4.2b). Οι βλάβες παρουσιάζονται εντονότερες στους χαμηλούς ορόφους.

γ. Σε περίπτωση διαφορικής βράχυνσης υπό τα κατακόρυφα φορτία σε μεσαίους συνήθως τοίχους, εμφανίζονται λοξές ρηγματώσεις μιας διεύθυνσης στους εγκάρσιους τοίχους, παρόμοιες με αυτές της προηγούμενης περίπτωσης, με τη διαφορά ότι οι βλάβες εμφανίζονται εντονότερες στους ανώτερους ορόφους.

## Ξύλινη τοιχοποιία<sup>4</sup>

### Η δομική ξυλεία στην σύγχρονη εποχή

Στην Αμερική το 2005 η παραγωγή δομικής ξυλείας ξεπέρασε τα 16 δισεκατομμύρια μέτρα σανίδων, σύμφωνα με το αμερικάνικο υπουργείο γεωργίας. Περίπου μισή από αυτήν την ποσότητα χρησιμοποιήθηκε για την ανέγερση 2 εκατομμυρίων νέων κατοικιών και περίπου 7 δισεκατομμύρια χρησιμοποιήθηκαν για επισκευές. Παρόλο που σήμερα η παραγωγή έχει μειωθεί κατά 55% στην Αμερική, η οποία αποτελεί την μεγαλύτερη ξυλοπαραγωγό χώρα του κόσμου, από το 2005 τα παραπάνω νούμερα μας δίνουν μία σημαντική εικόνα για την ευρεία χρήση της ξυλείας στις μέρες μας. Μάλιστα με την αυξημένη ζήτηση αναπτύσσονται και νέες τεχνολογίες όχι μόνο στην συντήρηση και στην επεξεργασία του ξύλου αλλά σε νέα προϊόντα σύνθετης ξυλείας όπως είναι οι μοριοσανίδες (particle boards) που σκοπό έχουν να βελτιώσουν τα ελαττώματα του φυσικού ξύλου και τις εφαρμογές του.

### Παρουσίαση Τοιχοποιίας

Η εταιρία Κοφινάς κατασκευάζει προκατασκευασμένη ξύλινη τοιχοποιία σε πάνελ. Η τομή ενός τοίχου παρουσιάζει τα υλικά που την αποτελούν.



Εικόνα 23. Τρισδιάστατη τομή εξωτερικής τοιχοποιίας Κοφινάς [4]

i. Σουηδικό Πεύκο Κλάσης C24

Όπως παρατηρείται και από την κατάταξη της αυτή η ξυλεία είναι μαλακή με χαρακτηριστική αντοχή σε κάμψη 24 MPa. Αντίστοιχα από τον πίνακα 1 του πρότυπου EN 338 λαμβάνονται οι υπόλοιπες μηχανικές αντοχές του ξύλου, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι η αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό και θλίψη που ανέρχονται σε 13 MPa και 20 MPa αντίστοιχα. Σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του ξύλου είναι η διαδικασία της κατεργασίας του φυσικού κορμού. Σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρίας του προμηθευτή η παραπάνω ξυλεία είναι πριστή, δηλαδή ο αρχικός κορμός δεν έχει σχιστεί αλλά έχει κοπεί με μηχανικό τρόπο εξασφαλίζοντας τυποποίηση διαστάσεων. Επίσης ξηραίνεται σε φούρνο ώστε να έρθει σε επίπεδο υγρασίας επιθυμητό γύρω στο 15% κάτι το οποίο εξασφαλίζει την λιγότερη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας κατά την διάρκεια κατασκευής. Ταυτόχρονα γίνεται απεντόμωση του ξύλου. Τέλος γίνεται λείανση και αποθήκευση σε ελεγχόμενο περιβάλλον θερμοκρασίας και υγρασίας. Να σημειωθεί ότι όλη η παραπάνω διαδικασία είναι πιστοποιημένη και ελέγχεται.

ii. OSB (Oriented Strand Board)

Η ελληνική μετάφραση του ονόματος αυτού του τύπου μοριοσανίδας είναι πλάκες προσανατολισμένων ινών. Αυτή η ονομασία δικαιολογείται άμεσα από την διαδικασία κατασκευής τους. Πρόκειται για σύνθετες πλάκες από τεμαχίδια ξύλου μήκους 55-77 mm τα οποία τοποθετούνται σε τρία στρώματα. Στα εξωτερικά δύο στρώματα τα τεμαχίδια διατάσσονται σε ισόπαχες στρώσεις παράλληλα στο μήκος της πλάκας, ενώ στην μεσαία, που καλύπτει περίπου το 50% του όγκου της πλάκας διατάσσονται κάθετα στο μήκος της. Για την ένωση των τεμαχιδίων χρησιμοποιείται κάποια συγκολλητική ύλη η οποία κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας κάνει ένα σώμα τα παραπάνω στοιχεία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το ξύλο είναι ορθότροπο υλικό. Με την μεταξύ τους κάθετη διάταξη των τεμαχιδίων το OSB στοχεύει στην μείωση της ανισοτροπίας με πολύ καλά αποτελέσματα όπως δείχνουν οι πειραματικές μετρήσεις. Σχετικά με τις άλλες ιδιότητες (θερμομόνωση, ηχομόνωση κλπ.) είναι παρόμοιες με αυτές του φυσικού ξύλου εκτός της υγροσκοπικότητας που εμφανίζεται μειωμένη. Συγκεκριμένα στην περίπτωση μας ο κατασκευαστής προσθέτει και επιπλέον εκτός της συγκολλητικής ουσία πρόσθετα που μειώνουν σημαντικά την υγροσκοπικότητα. Ο τύπος OSB που χρησιμοποιείται είναι OSB/4

πάχους 22mm.

iii. Διογκωμένη Πολυστερίνη EPS 80

Για την θερμομόνωση της τοιχοποιίας χρησιμοποιείται ενδιάμεσα των φύλλων OSB διογκωμένη πολυστερίνη EPS 80 διατομής 100mm η οποία είναι η μεγαλύτερη που διατίθεται. Είναι αυτοσβενώμενη και δημιουργεί ένα φράγμα υδρατμών για το εσωτερικό της τοιχοποιίας. Έχει εξαιρετική απόδοση θερμομόνωσης με συντελεστή θερμοαγωγιμότητας  $\lambda=0,032 \text{ W/mK}$ .

iv. Ασφαλική Μεμβράνη

Η ασφαλική μεμβράνη αποτελεί την πιο συνηθισμένη λύση για υγραμόνωση. Τοποθετείται με ζεστή πίσσα και κολλάει επάνω στην επιφάνεια. Έχει αποδειχτεί μέχρι στιγμής αρκετά αξιόπιστη λύση στις κατασκευές.

Για τα στριφώνια, τις μεταλλικές γωνίες και την θερμοπρόσοψη πάκτωσης γίνεται λόγος παρακάτω.

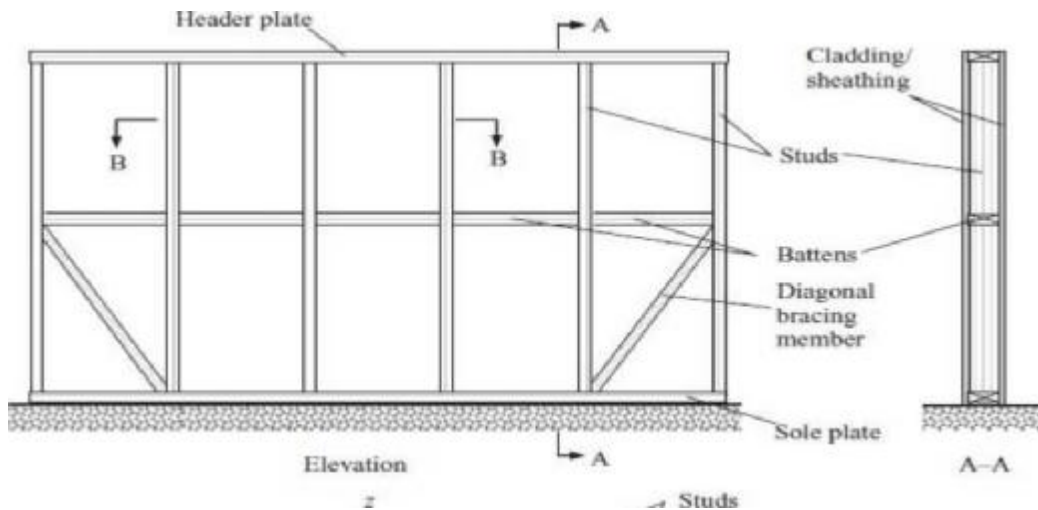
### **Ανάλυση κατασκευαστικής μεθόδου**

Η κατασκευή γίνεται στο εργοστάσιο της εταιρίας Κοφινάς. Είναι αυτοματοποιημένη στο μεγαλύτερο κομμάτι της, σαφές πλεονέκτημα καθώς εξασφαλίζεται σταθερότητα ποιότητας. Η διαδικασία ξεκινάει από την τοποθέτηση του σκελετού του πάνελ σε τραπέζι ευθυγράμμισης. Ανάλογα με την διάταξη τα κάθετα μεταξύ τους ξύλα γωνιάζονται ηλεκτρονικά και πρεσάρονται ώστε να εκμηδενιστούν οι αρμοί μεταξύ τους και να επιτευχθεί καλύτερη συναρμογή, έτσι ώστε να αυξηθεί-βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά του πάνελ. Χαλαροί αρμοί μπορούν να αποτελέσουν σημεία αστοχίας. Ύστερα τα μέλη βιδώνονται μεταξύ τους και τοποθετείται το πρώτο φύλλο OSB το οποίο και αυτό βιδώνεται επάνω στον σκελετό. Στην συνέχεια εγκιβωτίζεται μέσα στο πάνελ η θερμομόνωση με αυτοδιογκούμενη πολυστερίνη EPS 80 και βιδώνεται και το δεύτερο φύλλο OSB. Τέλος στο κάτω μέρος του τοιχίου τοποθετείται ασφαλική μεμβράνη για υγραμόνωση και το τοιχίο εξετάζεται για τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες.

### **Σχεδιασμός φέροντος οργανισμού**

Στις ξύλινες κατασκευές ο ρόλος του τοίχου είναι να φέρει τα αξονικά φορτία που προκύπτουν από την στέγη, τον υπερκείμενο όροφο, τα πρόσθετα φορτία όπως χιόνι, και στις εκτός επιπέδου φορτίσεις όπως ο άνεμος και ο σεισμός. Ο σχεδιασμός φέροντος οργανισμού ξύλινης κατασκευής καλύπτεται πλέον σχεδόν

πλήρως από τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 5. Η τοιχοποιία της εταιρία Κοφινάς στην οποία αναφερόμαστε χαρακτηρίζεται ως φέρουσα και ο στατικός της μηχανισμός αποτελείται από ένα σύνολο στρωτήρων (sole plate στην βάση και head plate στην κεφαλή) και ορθοστατών (studs) τα οποία τοποθετούνται στην διάταξη που φαίνεται στο σκαρίφημα (Εικόνα 24) και την εξωτερική αμφίπλευρη επένδυση από ξύλινα πάνελ.



Εικόνα 24. Σκαρίφημα ξύλινων ορθοστατών.[4]

Όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω τα φορτία τα οποία καλείται να αντεπεξέλθει ο τοίχος είναι τα εξής.

- κατακόρυφα φορτία, παράλληλα στους ορθοστάτες, από τα υπερκείμενα πατώματα και την ξύλινη στέγη (ίδια βάρη, κινητά, άνεμος, χιόνι).
- Φορτία κάθετα στην επιφάνεια των πάνελ, εκτός επιπέδου του τοίχου, προερχόμενα (κυρίως) από δράση ανέμου.
- Διατμητικά φορτία εντός επιπέδου του τοίχου, προερχόμενα από δράση ανέμου και σεισμού.

Τα κατακόρυφα και τα εκτός επιπέδου φορτία αναλαμβάνονται από τους ορθοστάτες, ενώ τα εντός επιπέδου από τα πάνελ. Όμως τα πάνελ βιδώνονται επάνω στους ορθοστάτες επομένως ο τοίχος μπορεί να θεωρηθεί ως μια σύνθετη διατομή η οποία αναλαμβάνει εξίσου τα κατακόρυφα και τα εκτός επιπέδου φορτία. Συγκεκριμένα η σύνθετη διατομή καταπονείται από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, δρώντας ως δοκός, και από αξονικά φορτία δρώντας ως υποστύλωμα.

Σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού είναι οι χρησιμοποιούμενες συνδέσεις. Αυτές είναι υπεύθυνες για την σταθερότητα της κατασκευής και λειτουργούν ως περιοχές ανάλωσης ενέργειας κατά την σεισμική δραστηριότητα. Όπως επισημάνθηκε και κατά την περιγραφή της κατασκευής της τοιχοποιίας οι ορθοστάτες και οι στρωτήρες αφού γωνιαστούν και πρεσαριστούν βιδώνονται μεταξύ τους. Επίσης τα πάνελ βιδώνονται και αυτά επάνω στους στρωτήρες. Η βίδα (στριφώνι) σαν μέσω σύνδεσης υπερέχει εξαιρετικά του ήλου (καρφιού). Λόγο των σπειρωμάτων στον κορμό της γίνεται πολύ πιο δύσκολη η εξόλκευσή της ακόμα και από ήλους με νευρώσεις. Επίσης η βίδα, όπως και ο ήλος, δημιουργεί συνδέσμους άκαμπτους με καμία δυνατότητα ανάλωσης ενέργειας με αποτέλεσμα ο σύνδεσμος να φορτίζεται κρουστικά από σεισμικές δονήσεις και έτσι να αυξάνεται κατακόρυφα ο κίνδυνος εξόλκευσης, πράγμα το οποίο την καθιστά καταλληλότερο μέσω σύνδεσης.

Φεύγοντας από το επίπεδο συνδέσεων ενός τοιχίου περνάμε στις συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών τοιχίων κάθετων μεταξύ τους. Όπως είναι προφανές η σύνδεση γίνεται στην γωνία που σχηματίζουν. Μέσω προ διάτρητων οπών στο πάνελ του OSB τα δύο στοιχεία βιδώνονται μεταξύ τους στους ορθοστάτες και ύστερα 'δένονται' μεταξύ με την προσθήκη εξωτερικά μεταλλικών ελασμάτων. (Εικόνα 13)

Η υψηλή συναρμογή που επιτυγχάνεται με το βίδωμα τόσο των στοιχείων των μεμονωμένων τοιχίων όσο και των ίδιων των τοιχίων μεταξύ τους έχει δύο σημαντικά οφέλη. Για μέλη τα οποία δεν εφαρμόζουν σωστά οι περιοχές σύνδεσής τους αποτελούν σημεία πιθανής αστοχίας λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Επίσης όσο αφορά την σεισμική συμπεριφορά του φέροντος οργανισμού αυξάνοντας την συναρμογή αυξάνεται ταυτόχρονα και η στρεπτική αντίσταση και ακαμψία και έτσι περιορίζεται η στροφική κίνηση της κατασκευής η οποία καταπονεί ανομοιόμορφα τα μέλη της. Με λίγα λόγια επιτυγχάνεται η συμπεριφορά του συνόλου της κατασκευής ως ένα ενιαίο σώμα.

Τέλος θα εξετάσουμε τους συνδέσμους της κατασκευής με τις θεμελιώσεις. Τα τοιχία τοποθετούνται επάνω σε μικρά ξύλινα κομμάτια ορθογωνικής διατομής και πακτώνονται με μεταλλικά ελάσματα τα οποία τοποθετούνται κατά μήκος του πάνελ με βίδες ανά εξήντα εκατοστά. Τα εν λόγω ελάσματα στερεώνονται στην πλάκα με μεταλλικές ντίζες.



Εικόνα 25. *Μεταλλικά ελάσματα σύνδεσης [4]*

Αξίζει να αναφερθεί πως η παραπάνω συνδεσμολογία και σχεδιασμός έχουν σαν αποτέλεσμα η κατασκευή να θεωρείται από τους κανονισμούς σαν μέτρια ή υψηλής ανάλωσης ενέργειας κατασκευή με αποτέλεσμα την υψηλή σεισμική αντοχή της όπως αποδεικνύουν τα πειραματικά δεδομένα.

#### **Δοκιμές και συμμόρφωση με τις απαιτήσεις**

##### **i. Αντισεισμικότητα**

Η παραπάνω κατασκευή με τον σχεδιασμό που περιεγράφηκε ελέγχθηκε όσο αναφορά την αντισεισμικότητά της στο εργαστήριο αντισεισμικών ερευνών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ένα μονώροφο δοκίμιο κατασκευασμένο σε φυσική κλίμακα από την εταιρία Κοφινάς εξετάστηκε πειραματικά με την χρήση σεισμικού προσομοιωτή. Το δοκίμιο αποτελείται από τοίχοποιία η οποία συνίσταται από ξύλινο σκελετό, μόνωση με διογκωμένη πολυστερίνη και ξύλινη θωράκιση OSB. Η μία πρόσοψη είναι καλυμμένη με σύστημα θερμοπρόσοψης.

Αρχικά το δοκίμιο διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία σταθερής επιτάχυνσης ημιτονικής μορφής με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του (ιδιοπερίοδο και λόγο απόσβεσης). Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σεισμικές δοκιμές κατά τις οποίες το δοκίμιο διεγέρθηκε από χρονοϊστορίες επιτάχυνσης στις διευθύνσεις X, Y και Z. Οι χρονοϊστορίες αυτές αποτελούσαν τις συνιστώσες ενός τεχνητού σεισμού το φάσμα του οποίου περιβάλλει το ελαστικό φάσμα του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000) για έδαφος κατηγορίας Α και μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0,16g (πρώτη περίπτωση). Το δοκίμιο καταπονήθηκε από διαδοχικές κλιμακωτές τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις. Ακολούθως, τοποθετήθηκε πρόσθετη μάζα στο δοκίμιο 8Mgr και πραγματοποιήθηκαν σεισμικές



τριαξονικές διεγέρσεις. Το φάσμα των διεγέρσεων αυτών αντιστοιχούσε στο ελαστικό φάσμα του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού για έδαφος Κατηγορίας Β και μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0,16g (δεύτερη περίπτωση). Το δοκίμιο καταπονήθηκε από διαδοχικές κλιμακωτές τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις.

Στην α' περίπτωση πραγματοποιήθηκαν 11 σεισμικές δοκιμές με τη διέγερση να αυξάνεται κλιμακωτά μέχρι επιτάχυνση 1,50g κατά διεύθυνση Χ, 1,17g κατά διεύθυνση Υ και 0,87g κατά διεύθυνση Ζ. Στην β' περίπτωση πραγματοποιήθηκαν 5 σεισμικές δοκιμές με τη διέγερση να αυξάνεται κλιμακωτά μέχρι επιτάχυνση 0,58g κατά διεύθυνση Χ, 0,54g κατά τη διεύθυνση Υ και 0,68g κατά την διεύθυνση Ζ.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών δεν παρατηρήθηκε καμία ορατή βλάβη ή ρωγμή στο δομικό σύστημα (ξύλινο σκελετό, ξύλινη θωράκιση OSB, επιφάνεια με θερμοπρόσοψη).

## ii. Ενεργειακή Απόδοση

Διάφορες κατοικίες κατασκευασμένες με την τοιχοποιία της εταιρίας Κοφινάς έλαβαν πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ) κατηγορίας Α. Κατά την διαδικασία της πιστοποίησης ελέγχεται η θερμομονωτική επάρκεια των επιμέρους δομικών στοιχείων καθώς και η θερμομονωτική επάρκεια του κτηριακού κελύφους στο σύνολό του. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την έκδοση του εν λόγω πιστοποιητικού είναι

- Τη χρήση του κτηρίου, τις επιθυμητές συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος (θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα, αερισμό) και τον αριθμό χρηστών.
- Τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής του κτηρίου
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτηριακού κελύφους σε σχέση με τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των εσωτερικών δομικών στοιχείων
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης θέρμανσης χώρων
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης/κλιματισμού χώρων
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης παραγωγής ζεστού νερού χρήσης
- Τα παθητικά ηλιακά συστήματα

Επίσης στη μεθοδολογία υπολογισμού συνεκτιμάται κατά περίπτωση η θετική επίδραση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της ενέργειας παραγόμενης με τεχνολογίες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης ή ψύξης και αξιοποίηση φυσικού φωτισμού. Οι τελικοί έλεγχοι γίνονται αφού αναχθούν όλες οι παραπάνω

παράμετροι σε πρωτογενής ενέργεια.

### **Διερεύνηση λειτουργικότητας κατασκευής, αντιμετώπιση προβλημάτων**

Όπως είναι ξεκάθαρο για μία κατασκευή που στοχεύει να αποτελέσει κατοικία, εκτός από την στατική μελέτη και τις μηχανικές παραμέτρους αντοχής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η λειτουργικότητα της. Ως λειτουργική κατασκευή μπορεί να οριστεί μία κατασκευή που «λειτουργεί» σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών της καθ' όλη ή κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας ζωής της. Γενικά αυτή η παράμετρος αφορά και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του κτηρίου και τα υλικά κατασκευής. Παρακάτω εξετάζονται τα υλικά κατασκευής όσο αφορά την ξύλινη προκατασκευασμένη τοιχοποιία.

Από την ανάλυση των φυσικών ιδιοτήτων του ξύλου που έγινε στο πρώτο μέρος της παρούσας έκθεσης παρατηρείται πως η έντονη υγροσκοπικότητα που αυτό παρουσιάζει επηρεάζει αρνητικά όλες τις ιδιότητές του, μηχανικές και φυσικές. Είναι σαφές λοιπόν πως, όπως και σε κάθε κτήριο, είναι αναγκαία η υγρομόνωση του και η προστασία της τοιχοποιίας στο σύνολό της.

Η μέθοδος προστασίας που χρησιμοποιείται είναι η προσθήκη κελύφους μόνωσης γύρω από όλη την επιφάνεια του κτηρίου. Το συνηθέστερο υλικό που επιλέγεται είναι εξυλασμένη πολυστερίνη σε διάφορες μορφές και εμπορικές ονομασίες. Πρόκειται για ένα πολυμερές θερμομονωτικό και υγρομονωτικό υλικό το οποίο τοποθετείται στην επιφάνεια του πάνελ με την χρήση ειδικών κολλητικών ουσιών. Επάνω από το κέλυφος πολυστερίνης τοποθετείται ένα αρχικό επίχρισμα, ύστερα υαλόπλεγμα και τελικό επίχρισμα με ειδικής κατασκευής χρωματιστό κονίαμα. Το κέλυφος αυτό, γνωστό και ως σύστημα θερμοπρόσοψης, προστατεύει τις μεγαλύτερες επιφάνειες των εξωτερικών πάνελ από την περιβαλλοντική υγρασία και βροχή, ενώ παράλληλα προσφέρει εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της τάξεως των 0,03-0,04 W/mK. Όμως η ίδια η σύσταση του υλικού (πολυμερές) προβληματίζει για την χρήση του. Ως πολυμερές υλικό έχει μεγάλο συντελεστή θερμικής διαστολής, πολύ μεγαλύτερο από αυτόν του ξύλου. Επίσης όπως είδαμε με την αύξηση της θερμοκρασίας το ξύλο ουσιαστικά συστέλλεται λόγω ρικνώσεως. Αυτό σημαίνει πως τα δύο υλικά δεν συνεργάζονται σωστά με την αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την πιθανότητα ρηγμάτωσης της πολυστερίνης, άρα και μηδενισμού όλων των χρήσιμων ιδιοτήτων της. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται το υαλόπλεγμα, για την αποφυγή αυτού του φαινομένου.

Ένα ακόμα αρνητικό χαρακτηριστικό είναι η ηχητική συμπεριφορά του κελύφους

πολυστερίνης.

Παρ' όλο που χρησιμοποιείται συνήθως τεχνολογία για τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα στο πολυμερές, γεγονός που βελτιώνει και την ηχομονωτική και θερμομονωτική συμπεριφορά του υλικού, ήχοι που προκαλούνται από πρόσπτωση βροχής ή γενικώς παρόμοιας φύσης ακούγονται στο εσωτερικό της κατασκευής πολύ διαφορετικά από το συνηθισμένο ήχο της συμβατικής τοιχοποιίας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αισθητική του χρήστη. Επίσης κατά το άγγιγμα δίνει την αίσθηση του κούφιου τοιχίου.

Γενικώς υπάρχουν κι άλλες τεχνικές μόνωσης τύπου κελύφους, όπως η επικάλυψη με εμφανή συνθετική ξυλεία. Όλες οι τεχνικές όμως δίχως προσοχή στην εφαρμογή τους αφήνουν κενά σημεία στην επιφάνεια του κτηρίου από όπου μπορεί να εισχωρήσει η υγρασία. Μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρία σημεία κάθε κατασκευής που πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση. Αυτά είναι η βάση πάκτωσης του τοιχίου, οι γωνίες ένωσης μεταξύ τοιχίων και οι επιφάνειες ένωσης τοιχίων και στέγης.

Η εταιρία Κοφινάς, της οποίας την τοιχοποιία εξετάζουμε, χρησιμοποιεί κυρίως το σύστημα θερμοπρόσοψης που αναπτύχθηκε πριν, επομένως η ανάλυση θα περιοριστεί σε αυτό το κέλυφος. Στις γωνίες ένωσης των τοιχίων η πολυστερίνη επικαλύπτεται με ειδική μεμβράνη και τα φύλλα της συνενώνονται με το υαλόπλεγμα καλύπτοντας πλήρως οποιαδήποτε κενά. Επίσης για την στερέωση της στέγης χρησιμοποιείτε η ίδια τεχνική με τα κλασικά σπία από σκυρόδεμα και πλινθοδομή. Δηλαδή τα δοκάρια της στέγης βιδώνονται επάνω στο τοιχίο και τα κενά γεμίζουν με μονωτικό υλικό. Αυτή η τεχνική είναι δοκιμασμένη και με σωστή εργασία δεν εμφανίζει προβλήματα.

Η εταιρία ακολουθεί την διάταξη σύνδεσης των τοιχίων με την βάση του σκυροδέματος όπως αναπτύχθηκε παραπάνω. Αμφίπλευρα του τοιχίου μετά την πάκτωση τοποθετούνται ασφαλικές μεμβράνες για την υδρομόνωση της βάσης του πάνελ και ύστερα γίνεται η σκυροδέτηση λεπτής πλάκας εσωτερικά μεγαλύτερη ύψους από ότι εξωτερικά.

Η υγροσκοπικότητα του OSB σαν βιομηχανικό προϊόν εξαρτάται πάρα πολύ από την ρητίνη συγκόλλησης. Γενικά ο ρυθμός απορρόφησης αλλά και αποβολής υγρασίας είναι πολύ μεγαλύτερος από του φυσικού ξύλου και στις δύο περιπτώσεις. Επίσης μελέτες έχουν δείξει πως το κύριο πρόβλημα του OSB είναι διόγκωση λόγω υγρασίας στην περιφέρειά του. Ακόμα το ξύλο προσβάλλεται παρουσία περιβάλλοντος υψηλής υγρασίας από διάφορους μικροοργανισμούς, που αν και

περιορίζονται σημαντικά έως εξολοκλήρου με την διαδικασία της απεντόμωσης είναι ένας κίνδυνος που πρέπει να εξετάζεται.

Με τα παραπάνω στοιχεία υπόψη παρατηρείται άμεσα το μειονέκτημα της τεχνικής πάκτωσης των τοιχίων που ακολουθείται. Σε περίπτωση αστοχίας της ασφαλικής μεμβράνης, η οποία επέρχεται συνηθέστερα στα χαμηλότερα σημεία της, η υγρασία που θα εισχωρήσει θα επηρεάσει κατά ανάλογο τρόπο την τοιχοποιία. Μία βαθιά και μικρού κόστους αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου είναι κατασκευή υπερυψωμένης βάσης σκυροδέματος και η πάκτωση σε αυτή των τοιχίων. Η διαφορά ύψους της εσωτερικής με την εξωτερική επιφάνεια εξασφαλίζει πως ακόμα και σε περίπτωση αστοχίας της υδρομόνωσης, η υγρασία θα περάσει κατευθείαν στην πλάκα και από εκεί στο έδαφος προστατεύοντας την κατασκευή. Επίσης αυτή η τεχνική επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση της υδρομόνωσης αφού δεν απαιτείται σπάσιμο του ελαφρού σκυροδέματος για την αντικατάστασή της. Ένα μειονέκτημα θα μπορούσε να αποτελέσει η κατεύθυνση της μεταλλικής ντίζας στερέωσης των μεταλλικών ελασμάτων πάκτωσης, καθώς αν αυτή εφαρμοστεί στην πλάκα κάθετα στο επίπεδο της τοιχοποιίας κατά την διάρκεια σεισμικών δονήσεων θα δέχεται πολύ ισχυρά αξονικά φορτία, λόγο ότι οι μέγιστες επιταχύνσεις που προκύπτουν από σεισμούς ενεργούν σε αυτό το επίπεδο.

Επίσης ένα ακόμα μέσω πρόληψης συσσώρευσης υγρασίας στην βάση των τοιχίων είναι η χρήση νέας τεχνολογίας υδρομονωτικές μεμβράνες, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να αναπνέουν, διατηρώντας έτσι πάντα στο ελάχιστο την υγρασία σε αυτό το κομμάτι της κατασκευής. Οι ίδιες μεμβράνες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την μόνωση των χώρων των μπάνιων, και της κουζίνας που υπάρχει μεγάλη έκθεση σε νερό. Ειδικά στην περίπτωση των μπάνιων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς, ο κίνδυνος σε αυτές τις περιοχές είναι πολλαπλάσιος και η αντιμετώπιση προβλήματος δύσκολη έως ανέφικτη.

Τέλος, σχετικά με την υγρασία, προσοχή πρέπει να δίνεται όταν η κατασκευή δεν περιλαμβάνει επικλινή στέγη παρά ταράτσα. Εκεί θα πρέπει να παρθούν τα μέγιστα μέτρα υδρομόνωσης και απαιτείται εξαιρετικός σχεδιασμός ρύσεων και έλεγχοι ποιότητας των μεμβρανών ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την πρόληψη εισροών υγρασίας.

Όπως και αναφέρθηκε στις ιδιότητες, το ξύλο αποτελεί ένα εξαιρετικό θερμομονωτικό υλικό. Συγκεκριμένα ο συντελεστής θερμικής του αγωγιμότητας κυμαίνεται περίπου σε 0,1 W/mK, ενώ το σκυρόδεμα αντίστοιχα κυμαίνεται σε 1,5 W/mK και οι οπτόπλινθοι 0,5 W/mK. Με βάση αυτές τις τιμές παρατηρούμε την

σαφή υπεροχή του ξύλου, σχετικά με την θερμομόνωση ενάντια στα συμβατικά δομικά υλικά η οποία με την προσθήκη της μόνωσης εσωτερικά των πάνελ OSB δίνει συνολικά για το τοίχιο συντελεστή θερμοπερατότητας 0,1 W/mK. Επίσης τα πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης κατάταξης A αποδεικνύουν πως στο σύνολό της μία κατασκευή από την εν λόγω τοιχοποιία έχει πολύ χαμηλό κόστος θέρμανσης και ψύξης, προσφέροντας οικονομία στον χρήστη, αλλά και δημιουργεί πιο άνετο περιβάλλον διαβίωσης καθώς δεν συντελούνται μεγάλες θερμοκρασιακές αλλαγές στον εσωτερικό του κτηρίου.

Προσοχή, ακόμα πρέπει να δοθεί κατά τον σχεδιασμό του κτηρίου σε δύο σημαντικές παραμέτρους που αφορούν την ηχομόνωση του κτηρίου. Το ξύλο δεν λειτουργεί καλά ως φράγμα ηχητικών ταλαντώσεων, κάτι το οποίο προβλέπεται για αρκετές περιπτώσεις από τον Ευροκώδικα 5, σχετικά με την αντιμετώπιση του προβλήματος. Πηγές θορύβων και ταλαντώσεων, όπως γεννήτριες, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ιδιαίτερα. Μία λύση που θα μπορούσε να περιορίσει το πρόβλημα είναι η εγκατάσταση της μηχανής σε αντικραδασμικά εφέδρανα ή και να εξαλείψει το πρόβλημα των δονήσεων με την ανεξάρτητη στήριξη της βάσης της.

Η δεύτερη σημαντική παράμετρος που πρέπει να αναφερθεί σχετικά με την λειτουργικότητα ενός σπιτιού και τις ηχητικές ταλαντώσεις, είναι το πρόβλημα της ηχομόνωσης των πατωμάτων των πολυώροφων κτηρίων. Εδώ η ηχομόνωση είναι κατά πολύ κατώτερη της πλάκας σκυροδέματος η οποία με προσθήκη πολυμερούς υλικού κάτω από το πάτωμα ουσιαστικά καταργεί το πρόβλημα. Η συνήθης αντιμετώπιση σχετικά με τις ξύλινες κατασκευές είναι η εξής. Επάνω από τα οριζόντια δοκάρια που στηρίζεται ο όροφος τοποθετείται ένα λεγόμενο ψευδοπάτωμα, δηλαδή πάνελ από κόντρα-πλακέ ή OSB. Επάνω σε αυτό καρφώνονται πηχάκια ξύλου ανά αποστάσεις ανάλογα με το πλάτος της διατομής και το μήκος του πατώματος που θα χρησιμοποιηθεί. Επάνω σε αυτό τοποθετείται ηχομονωτικό πολυμερές υλικό και τέλος τοποθετείται το κανονικό πάτωμα. Να σημειωθεί ότι το ηχομονωτικό πολυμερές είναι απαραίτητο να είναι σε επαφή με το πάτωμα, αλλιώς ελαττώνεται κατά πολύ η ηχομονωτική ικανότητά του. Δηλαδή όλη η κατασκευή θα πρέπει να λειτουργεί ως ενιαία διατομή για τα μέγιστα αποτελέσματα. Χωρίς αυτή ή παρόμοια αντιμετώπιση θα υπάρχουν πολύ έντονα ανεπιθύμητα τριξίματα και κακή ηχομόνωση. Όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί τόσο καλά όσο με την πλάκα σκυροδέματος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προκατασκευασμένης ξύλινης τοιχοποιίας σχετικά με την λειτουργικότητα ενάντια στα προκατασκευασμένα ξύλινα σπίτια με εμφανή ξυλεία είναι η τοποθέτηση των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Στο

ξύλινο τοιχίο, εσωτερικά προβλέπεται ένα διάκενο μερικών εκατοστών για την ηλεκτρολογική εγκατάσταση. Επομένως μπορούν να γίνουν παρεμβάσεις και επισκευές στο δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή κριθεί αναγκαίο χωρίς πρόβλημα. Επίσης δεν απαιτείται προσχεδιασμός για την θέση των διακόπτων, κάτι που βοηθάει ιδιαίτερα καθώς κατά τον χρόνο ζωής μιας κατασκευής γίνονται αρκετές αλλαγές. Τέλος συμβάλλει στην αισθητική του χώρου, αφού δεν υπάρχουν εμφανή καλώδια και οι διακόπτες τοποθετούνται μέσα στο τοιχίο, εν αντιθέση με τα φινλανδικού τύπου ξύλινα σπίτια που τα καλώδια ενδέχεται να είναι εμφανή και να καλύπτονται με πλαστικά πηχάκια και διακόπτες εξωτερικού τύπου.

### **Συμπερασματικά**

Η ξύλινη προκατασκευασμένη τοιχοποιία, όπως είδαμε παραπάνω, έχει χαρακτηριστικά τα οποία ανταγωνίζονται άμεσα όλους τους τρόπους δόμησης, τόσο σε στατική αντοχή όσο και σε φυσικά χαρακτηριστικά και λειτουργικότητα, πάντα με την κατάλληλη εφαρμογή της τεχνολογίας και τεχνογνωσίας. Το κόστος ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα των πρώτων υλών όμως για να επιτευχθούν ανταγωνιστικές αντοχές, αυτό έπρεπε να είναι ισάξιο με την αντίστοιχη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως λόγω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας της προκατασκευής, και για αύξηση της ανταγωνιστικότητας το κόστος μειώνεται.

Στην εποχή που διανύουμε δημιουργούνται όλο και περισσότερες αμφιβολίες για το μέλλον του επαγγέλματος του πολιτικού μηχανικού. Μία συνιστώσα της εργασίας μας αποτελούν οι κατοικίες των οποίων η κατασκευή έχει μειωθεί κατά 70% περίπου τα τελευταία έτη. Κι αυτό συμβαίνει ενώ σχηματίζουν την κύρια πηγή εισοδήματος για το μεγαλύτερο μέρος των συναδέλφων μας. Σαν μηχανικοί όμως καλούμαστε να δώσουμε λύση σε αυτό το πρόβλημα και να καταστήσουμε την κατασκευή πιο προσιτή στο ευρύ κοινό με γνώμονα την ποιότητα. Εμφανίζεται λοιπόν η ανάγκη απόκλισης του ήδη υπάρχοντος μοντέλου δόμησης. Μία τέτοια πρόταση μπορεί να αποτελέσει η προκατασκευασμένη ξύλινη τοιχοποιία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΜΠΟΡΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

### 3.1 FRAME 2D EXPRESS LITE

Αρχικά στο Frame 2D<sup>7</sup> καθορίζετε τον φορέα με τις συντεταγμένες κόμβων και δεδομένα στοιχείων, στηρίξεις και φορτία (μόνιμα-κινητά). Ένα πρόσθετο βοηθητικό σύστημα σας βοηθάει να επιλέξετε και να δημιουργήσετε αυτόματα τον φορέα.

Εν συνεχεία επιλέγετε υλικό (σκυρόδεμα, χάλυβας ή ξύλο) και δίνετε τα απαραίτητα για την αντίστοιχη μελέτη στοιχεία.

Με ένα τελικό κλικ πραγματοποιείται η στατική επίλυση στο συνδυασμό φόρτισης και η διαστασιολόγηση και ο έλεγχος των μελών του φορέα σύμφωνα με τον αντίστοιχο Ευρωκώδικα και το Εθνικό κείμενο εφαρμογής.

Παράγεται πλήρες τεύχος μελέτης, σελιδοποιημένο και με όλες τις επεξηγήσεις, λεπτομέρειες υπολογισμών και αναφορές στους Ευρωκώδικες.

Σχεδιασμός στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με Ευρωκώδικα 2

Επιλέγετε υλικό κατασκευής Σκυρόδεμα και μία πρόσθετη καρτέλα Σκυρόδεμα εμφανίζεται στην ομάδα στοιχεία-υλικά. Στη καρτέλα αυτή εισάγετε τα αναγκαία στοιχεία για τη μελέτη οπλισμένου σκυροδέματος των μελών του φορέα.

Εν συνεχεία πραγματοποιείται η στατική επίλυση του φορέα και η διαστασιολόγηση των μελών του φορέα βάσει του Ευρωκώδικα 2. Υπολογίζονται οι οπλισμοί στο άνοιγμα και τις στηρίξεις κάθε στοιχείου (έλεγχοι σε κάμψη διάτμηση και αξονικό φορτίο, Ευρωκώδικας 2 §6).

Τα κατακόρυφα στοιχεία ελέγχονται σε φαινόμενα δευτέρας τάξης σύμφωνα με τη μέθοδο του πρότυπου υποστυλώματος Ευρωκώδικας 2, §5.8.

Τα μήκη λυγισμού και οι επιθυμητές διαμέτροι οπλισμού μπορεί να καθοριστούν για κάθε στοιχείο του φορέα.

<sup>7</sup> <http://www.runet.gr/frame2dexpressplus.htm>

στοιχεία διατομές φορτία στοιχ. μάζες στοιχ.-ίδιο βάρος Σκυρόδεμα

Σκυρόδεμα-Χάλυβας **C12/15 - S220**

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_c = 1.50, \gamma_s = 1.15$

Επικάλυψη οπλισμού [mm] Cnom= 0

Διάμετρος οπλισμού [mm]  $\emptyset$  4 σταθερή  $\Phi$

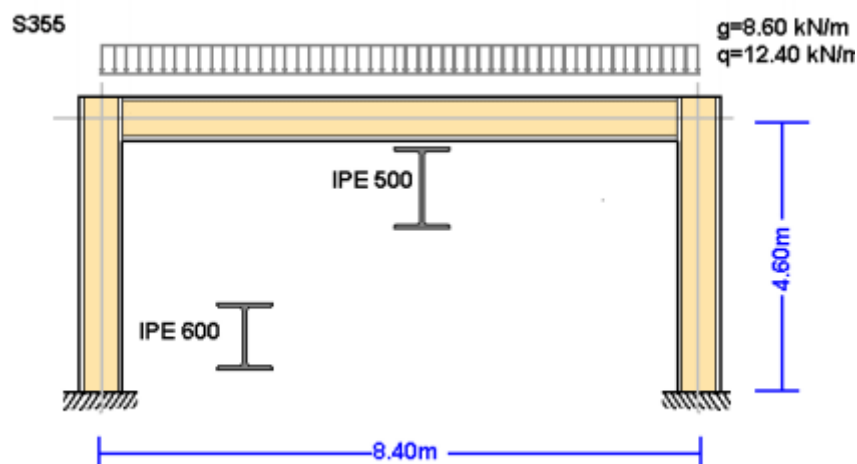
Αρχικές τιμές για στοιχεία

Στοιχ.	L[m]	Phi[mm]	Lcy[m]	Lcz[m]	Μελέτη
1	2.000	4	4.000	4.000	1
2	2.000	4	3.000	3.000	1
3	2.000	4	3.000	3.000	1
4	5.000	4	6.000	6.000	1

Εικόνα 26. Εισαγωγή δεδομένων συμβατικής κατασκευής.[7]

Σχεδιασμός στοιχείων από χάλυβα σύμφωνα με Ευρωκώδικα 3. Επιλέγεται υλικό κατασκευής Χάλυβα και μία πρόσθετη καρτέλα Χάλυβας εμφανίζεται στην ομάδα στοιχεία-υλικά. Στην καρτέλα αυτή εισάγετε τα αναγκαία στοιχεία για την μελέτη δομικού χάλυβα των μελών του φορέα.

Για επιλογή διατομής στοιχείων εμφανίζεται το παράθυρο με τις όλες πρότυπες διατομές και επιλέγεται τύπο και μέγεθος διατομής.



Εικόνα 27. Μεταλλική κατασκευή.[7]

Εν συνέχεια πραγματοποιείται η στατική επίλυση του φορέα και η διαστασιολόγηση των μελών του φορέα βάσει του Ευρωκώδικα 3. Ελέγχονται οι διατομές στο μέσον και στα άκρα κάθε στοιχείου σε κάμψη διάτμηση και αξονικό



φορτίο και συνδυασμός τους βάσει Ευρωκώδικα 3 §6.2. Κάθε στοιχείο ελέγχεται σε καμπτικό και πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό βάσει Ευρωκώδικα 3 §6.3. Τα μήκη καμπτικού και πλευρικού στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μπορεί να καθοριστούν για κάθε στοιχείο του φορέα.

στοιχεία | διατομές | φορτία στοιχ. | μάζες στοιχ.-ίδιο βάρος | Χάλυβας

Δομικός χάλυβας: **S 235**  $f_y=235\text{N/mm}^2$   $f_u=360\text{N}$

Συντελεστές ασφαλείας:  $\gamma_{M0}=1.00$   $\gamma_{M1}=1.00$   $\gamma_{M2}=1.25$

Αρχικές τιμές για στοιχεία

Στοιχ.	L[m]	L <sub>cy</sub> [m]	L <sub>cz</sub> [m]	L <sub>t</sub> [m]	Μελέτη
1	2.000	4.000	4.000	2.000	1
2	2.000	3.000	3.000	2.000	1
3	2.000	3.000	3.000	2.000	1
4	5.000	6.000	6.000	5.000	1
5	2.000	4.000	4.000	2.000	1
6	2.000	3.000	3.000	2.000	1
7	2.000	3.000	3.000	2.000	1

Εικόνα 28. Στοιχεία μεταλλικής κατασκευής.[7]

## 3.2 BETON EXPRESS

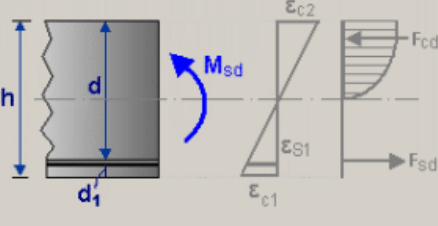
Με το beton express<sup>8</sup> γίνονται τα εξής :

- ✚ Υπολογισμός και διαστασιολόγηση τμημάτων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα, πέδιλα, τοίχοι αντιστήριξης, βραχείς πρόβολοι, υψίκορμοι δοκοί.
- ✚ Διαστασιολόγηση σε οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) και σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS), έλεγχοι ρηγμάτωσης και παραμόρφωσης. Αναλυτικοί υπολογισμοί 2ας τάξεως για υποστυλώματα.
- ✚ Αντοχές διατομών πλακών, δοκών και υποστυλωμάτων με ενίσχυση με (FRP) ανθρακονήματα και εποξειδικές.
- ✚ Τα τμήματα υπολογισμού είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για κάθε τμήμα, δίνετε διαστάσεις και φορτίσεις και προκύπτει η διαστασιολόγηση, ένα αναλυτικότερο τεύχος υπολογισμών και πίνακες οπλισμών.
- ✚ Εξειδικευμένο σχεδιαστικό πακέτο (CAD) για αυτόματη παραγωγή των σχεδίων της κατασκευής και των οπλισμών.
- ✚ Διαγράμματα και πίνακες διαστασιολόγησης βάσει του Ευρωκώδικα 2. Πίνακες  $K_d$ ,  $med \omega$ , μονοαξονικής και διαξονικής κάμψης. Διαγράμματα ελέγχου παραμορφώσεων.
- ✚ Διαστασιολόγηση πλακών και δοκών από ελαφροσκυρόδεμα.
- ✚ Δυνατότητα επιλογής μεταξύ των Ευρωκωδίκων και Ελληνικών Κανονισμών.
- ✚ Από τα τμήματα κατασκευών που υπολογίζετε, συνθέτετε το τεύχος καθώς και πίνακες οπλισμών.
- ✚ Πλήρης βοήθεια με αναφορές στους κανονισμούς και Ευρωκώδικες.
- ✚ Κείμενα κανονισμών.

<sup>8</sup> <http://www.runet.gr/Betonexpress.htm>

Υπολογισμός οπλισμού πλάκας μετόν, Διατομή συμπαγούς πλάκας σε κάμψη

✓ Υπολογισμοί OK



Όνομα τμήματος υπολογισμών ΠΛΑΚΑ-001

Σκυρόδεμα-Χάλυβας C25/30 - S500

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_c = 1.50, \gamma_s = 1.15$

Επικάλυψη οπλισμού [mm]  $d_1 = 15$  mm

Επιθυμητή διάμετρος οπλισμού [mm]  $\varnothing 10$  mm σταθ.

Πάχος πλάκας [m]  $h = 0.150$  m

Ροπή κάμψης M [kNm/m]  $M_{sd} = 20.00$  kNm/m

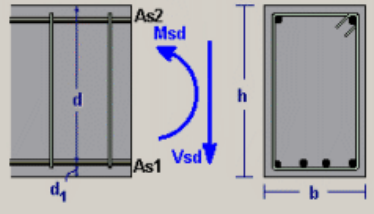
**Υπολογισμοί τμήματος κατασκευής : ΠΛΑΚΑ-001**  
 Διατομή συμπαγούς πλάκας σε κάμψη  
 $h = 0.150$  [m],  $M_{sd} = 20.00$  [kNm]  
 Σκυρόδεμα-Χάλυβας: C25/30-S500  
 Επικάλυψη οπλισμού: 15 mm  
 Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Πιν.6.5  $\gamma_c = 1.50, \gamma_s = 1.15$ )  
**Διαστασιολόγηση έναντι αστοχίας σε κάμψη (ΕΚΩΣ §9.1, §10.1, §18.1)**  
 Πάχος πλάκας  $h = 0.150$  [m], Ροπή κάμψης  $M = 20.00$  [kNm]  
 $M_{sd} = 20.00$  kNm/m,  $d = 13.5$  cm,  $K_d = 3.02, \xi = 0.11, \epsilon_c / \epsilon_s = 2.5 / 20.0, K_s = 2.40, A_s = 3.56$  cm<sup>2</sup>/m  
 Ελάχιστος οπλισμός, κύριος  $\varnothing 8 / 20.0$  (2.52 cm<sup>2</sup>/m), δευτερεύον  $\varnothing 8 / 25.0$  (2.01 cm<sup>2</sup>/m)  
**Κύριος οπλισμός πλάκας  $\varnothing 8 / 14.0$  (3.59 cm<sup>2</sup>/m), οπλισμός διατομής  $\varnothing 8 / 25.0$  (2.01 cm<sup>2</sup>/m)**

Υπολογισμοί Σκαρίφημα Τεύχος Up Πρόχειρη εκτ/ση OK Ακυρο Βοήθεια Νομ/σία

Εικόνα 29. Υπολογισμός πλακών.[8]

Υπολογισμός οπλισμού δοκού, Διατομή δοκού σε κάμψη και διάτμηση

✓ Υπολογισμοί OK



Όνομα τμήματος υπολογισμών ΔΟΚΟΣ-002

Σκυρόδεμα-Χάλυβας C25/30 - S500

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_c = 1.50, \gamma_s = 1.15$

Επικάλυψη οπλισμού [mm]  $d_1 = 20$  mm

Επιθυμητή διάμετρος οπλισμού [mm]  $\varnothing 14$  mm σταθ.

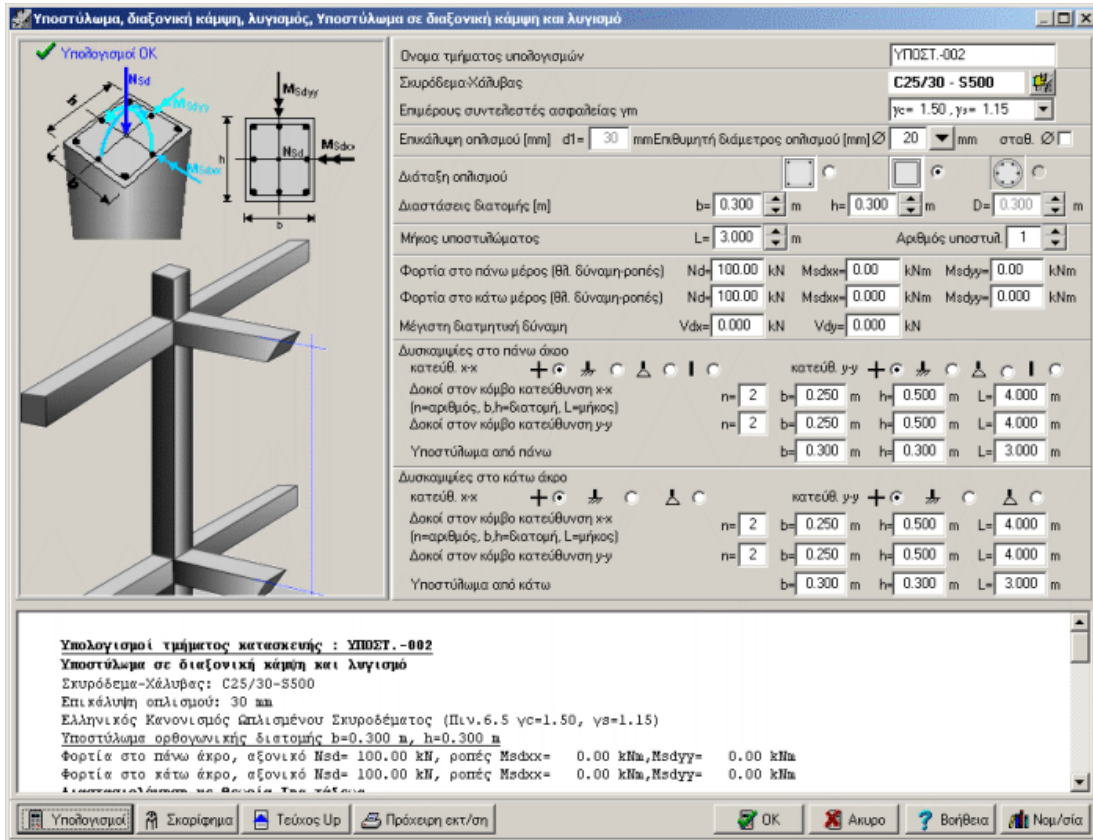
Διαστάσεις διατομής πλάτος-ύψος  $b = 0.250$  m  $h = 0.500$  m

Δυνάμεις διατομής, ροπή κάμψης-τέμνουσα  $M_{sd} = 100.00$  kNm  $V_{sd} = 10.00$  kN

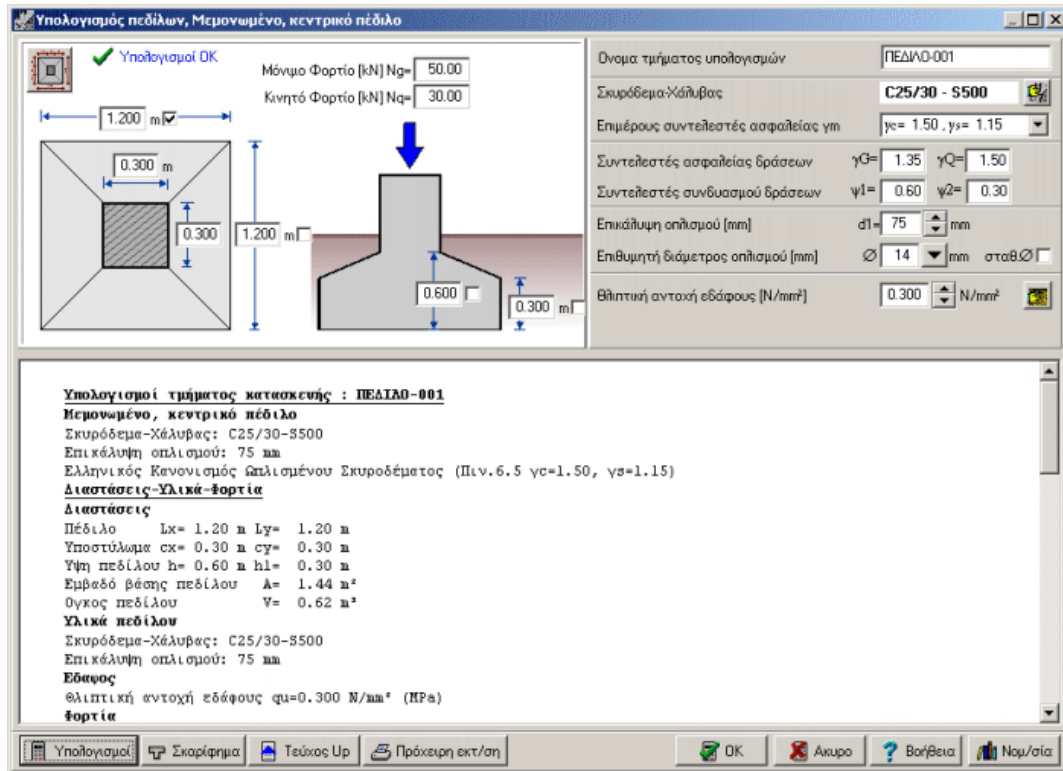
**Υπολογισμοί τμήματος κατασκευής : ΔΟΚΟΣ-002**  
 Διατομή δοκού σε κάμψη και διάτμηση  
 Σκυρόδεμα-Χάλυβας: C25/30-S500  
 Επικάλυψη οπλισμού: 20 mm  
 Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Πιν.6.5  $\gamma_c = 1.50, \gamma_s = 1.15$ )  
**Διαστάσεις, φορτία**  
 Πλάτος δοκού  $b = 0.250$  [m], ύψους  $h = 0.500$  [m]  
 Ροπή κάμψης  $M_{sd} = 100.00$  [kNm], τέμνουσα  $V_{sd} = 10.00$  [kN]  
**Διαστασιολόγηση έναντι αστοχίας σε κάμψη (ΕΚΩΣ §8.4, §10.1, §18.3)**  
 Λαμβάνουμε  $d = h - n_{opc} - \varnothing \Sigma - \varnothing / 2 = 500 - 20 - 8 - 14 / 2 = 465$  mm  
 Αναγκαίος οπλισμός έναντι κάμψης (δεν απαιτείται θλιβόμενος οπλισμός)  
 $M_{sd} = 100.00$  kNm,  $b = 25.0$  cm,  $d = 46.5$  cm,  $K_d = 2.33, \xi = 0.17, \epsilon_c / \epsilon_s = 3.5 / 16.7, K_s = 2.48, A_{s1} = 5.33$  cm<sup>2</sup>  
 Ελάχιστος διαμήκης οπλισμός για αποφυγή αστοχίας χωρίς προειδοποίηση (ΕΚΩΣ §18.3.2)  
 $\rho_{min} = 0.5 \xi \epsilon_{cp} / \epsilon_{yk} = 0.5 \times 2.6 / 500 = 0.00260$ , και  $\rho_{min} > 0.0015$ ,  $\mu_{in} A_s = 0.00260 \times 25.0 \times 46.5 = 3.02$  cm<sup>2</sup>  
**Μέγιστος διαμήκης οπλισμός (εκτός περιοχών ενώσεων) (ΕΚΩΣ §18.3.2)**  
 $\rho_{max} = 0.04 A_c$   $\mu_{in} A_s = 0.04 \times 25.0 \times 46.5 = 46.50$  cm<sup>2</sup>

Υπολογισμοί Σκαρίφημα Τεύχος Up Πρόχειρη εκτ/ση OK Ακυρο Βοήθεια Νομ/σία

Εικόνα 30. Υπολογισμός δοκών.[8]



Εικόνα 31. Υπολογισμός υποστυλωμάτων.[8]



Εικόνα 32. Υπολογισμός θεμελιώσεων.[8]

Αναλυτικοί κατάλογοι οπλισμών, καθώς και ξεχωριστοί πίνακες οπλισμών πλακών και δοκών. Ειδικός editor των πινάκων οπλισμών, με έτοιμα μενού ράβδων για κάθε περίπτωση, όπου δίνεται η δυνατότητα αλλαγών και προσθηκών ράβδων οπλισμών.

π/α	Δομικό Στοιχ.	C	αξB	σπαρσίματα	L1 cm	L2 cm	L3 cm	L4 cm	L5 cm	L6 cm	L7 cm	τεμ.	Φ (mm)	ρ/τη (kg/τη)	μήκος (m)	η	βόρος (kg)
22	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-1]	B	2		528							4	20	2.470	5.29		52.17
23	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-1]	B	2		573							1	24	3.990	5.73		20.34
24	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-2]	B	5		426							3	14	1.210	4.26		15.46
25	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-3]	B	2		494							6	20	2.470	4.94		73.21
26	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-3]	B	5		412							1	14	1.210	4.12		4.99
27	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-3]	B	2		457							5	18	2.030	4.57		45.70
28	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-3]	B	2		412							1	14	1.210	4.12		4.99
29	ΔΟΚΟΣ-001[Στ-4]	B	2		308							5	14	1.210	3.08		20.45
30	ΔΟΚΟΣ-001[Av-1]	B	9			8	19	44	19	44	8	36	8	0.395	1.42		19.63
31	ΔΟΚΟΣ-001[Av-2]	B	9			8	19	44	19	44	8	71	8	0.395	1.42		39.82
32	ΔΟΚΟΣ-001[Av-3]	B	9			8	19	44	19	44	8	75	8	0.395	1.42		42.07
33	ΔΟΚΟΣ-001[Av-4]	B	9			8	19	44	19	44	8	31	8	0.395	1.42		17.39
34	ΔΟΚΟΣ-001[Av-5]	B	9			8	19	44	19	44	8	26	8	0.395	1.42		14.58
35	ΠΕΔΑΝΟ-001	F	1		17	215	17					14	12	0.888	2.49		30.96
36	ΠΕΔΑΝΟ-001	F	2		17	185	17					16	12	0.888	2.19		31.12
37	ΒΡ-ΠΡ-001	Q	1		51	63	28	63	51			3	14	1.210	2.56		9.29
38	ΒΡ-ΠΡ-001	Q	2		8	63	28	63	28	8		5	8	0.395	1.98		3.91
39	ΒΡ-ΠΡ-001	Q	3		65	63	42	53				2	10	0.617	2.23		2.75
40	ΥΨΔΩ-001	D	1		94	646	94					7	24	3.990	8.34		207.25
41	ΥΨΔΩ-001	D	2		94	646	94					2	24	3.990	8.34		59.21
42	ΥΨΔΩ-001	D	3		646							30	14	1.210	6.46		234.50
43	ΥΨΔΩ-001	D	4		256							60	14	1.210	2.96		214.90
44	ΥΨΔΩ-001	D	5		79	18	79					90	14	1.210	1.76		191.66

Εικόνα 33. Κατάλογος οπλισμών.[8]

Προεπισκόπηση Τευχών. Υψηλή ποιότητα εκτύπωσης τευχών σε όλους τους εκτυπωτές. Υπάρχει δυνατότητα προεπισκόπησης του τεύχους μαζί με τα σκαριφήματα, πριν την εκτύπωση. Το τεύχος μπορεί επίσης να μεταφερθεί στο Word για περαιτέρω επεξεργασία.

12	ΠΑΡΚΑ-004	(P7)	32	8	0.395	4.29	20.33									
13	ΥΠΟΣΤ.-001	(C1)	4	16	1.580	3.00	18.96									
14	ΥΠΟΣΤ.-001	(C2)	21	10	0.617	1.20	15.55									
15	ΥΠΟΣΤ.-004	(C1)	4	16	1.580	3.00	18.96									
16	ΥΠΟΣΤ.-004	(C2)	21	10	0.617	1.20	15.55									
17	ΠΕΔΑΝΟ-001	(F1)	9	12	0.888	1.39	11.11									
18	ΠΕΔΑΝΟ-001	(F2)	9	12	0.888	1.39	11.11									
19	ΒΡ-ΠΡ.-001	(Q1)	1	14	1.210	2.24	2.71									
20	ΒΡ-ΠΡ.-001	(Q2)	2	10	0.617	2.10	2.59									
21	ΒΡ-ΠΡ.-001	(Q3)	2	10	0.617	2.51	3.10									
22	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D1)	5	20	2.470	7.66	94.60									
23	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D1)	1	22	2.980	7.66	22.83									
24	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D2)	6	14	1.210	7.66	55.61									
25	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D3)	30	10	0.617	6.46	139.57									
26	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D4)	60	10	0.617	2.96	189.58									
27	ΥΨ-ΔΩ.-001	(D5)	90	10	0.617	0.98	54.42									
Σύνολικό βόρος [kg]															1 095.93	

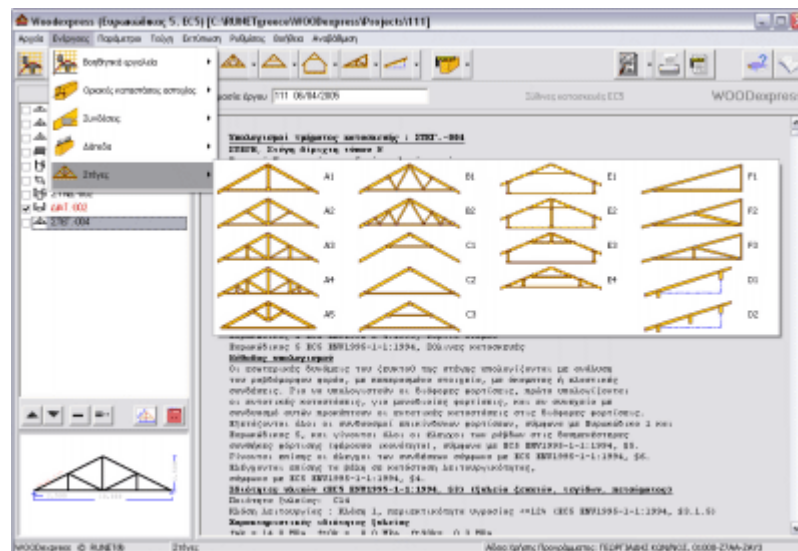
Αριθμηση οπλισμών πλαισίου

Εικόνα 34. Πίνακας οπλισμών.[8]

### 3.3 WOOD EXPRESS

Με το πρόγραμμα WOODexpress<sup>9</sup> υπολογίζετε και διαστασιολογείτε ξύλινες κατασκευές σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5 (EC5). Περιλαμβάνονται όλες οι καταστάσεις αστοχίας, οι συνδέσεις ξύλων, ξύλινα δάπεδα, ενισχύσεις παλιών δαπέδων και κυρίως ξύλινες στέγες. Εξειδικευμένο σχεδιαστικό πακέτο (CAD) για αυτόματη δημιουργία λεπτομερών σχεδίων ζευκτών και συνδέσεων. Παράγεται πλήρες και αναλυτικό τεύχος υπολογισμών.

Μια πλήρης βοήθεια με αναφορές στους κανονισμούς και Ευρωκώδικες, σας βοηθάει στην εργασία σας με το πρόγραμμα.



Εικόνα 35. Προεπιλογές ζευκτών. [9]

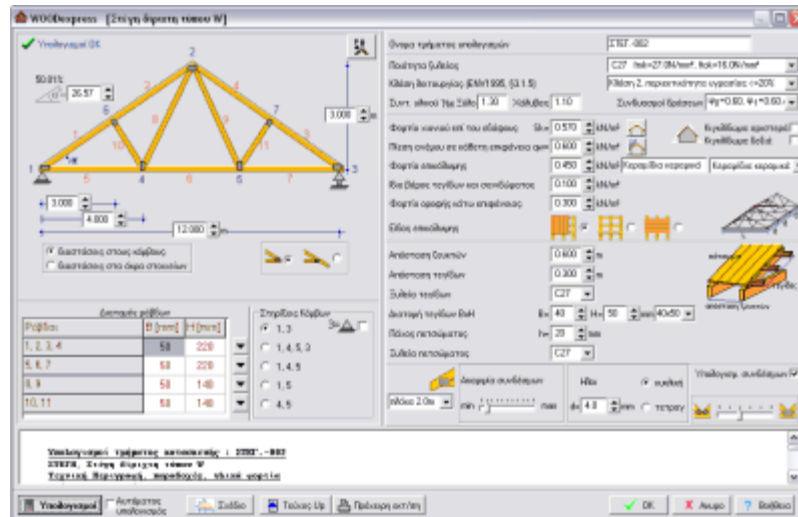
Περιέχονται 20 διαφορετικές μορφές στεγών

- ✚ δίριχτες
- ✚ μονόριχτες
- ✚ βατές σοφίτες
- ✚ τετράριχτες
- ✚ μη συμμετρικές στέγες

<sup>9</sup> <http://www.runet.gr/woodexpress.htm>

🚧 Στέγη με ελκυστήρα μη συνδεδεμένο στο μέσο.

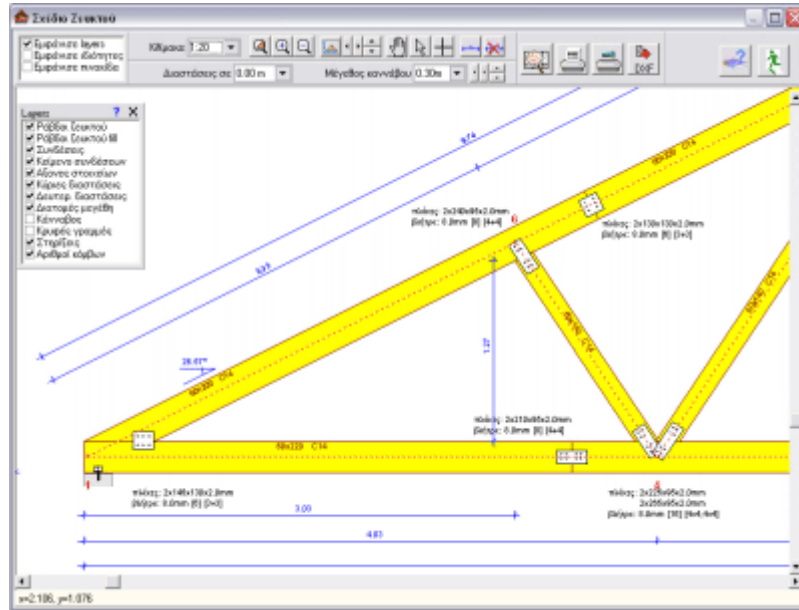
Αντισεισμικός έλεγχος στεγών βάσει του ΝΕΑΚ και Ευρωκώδικα 8 EN 1998-1-2003. Δυνατότητα επιλογής κόμβων στήριξης του ζευκτού. Γίνονται αυτόματα όλοι οι συνδυασμοί φορτίσεων και πολλαπλές επιλύσεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5. Έλεγχοι παραμορφώσεων σε κατάσταση λειτουργικότητας.



Εικόνα 36. Υπολογισμοί επίλυσης στατικών. [9]

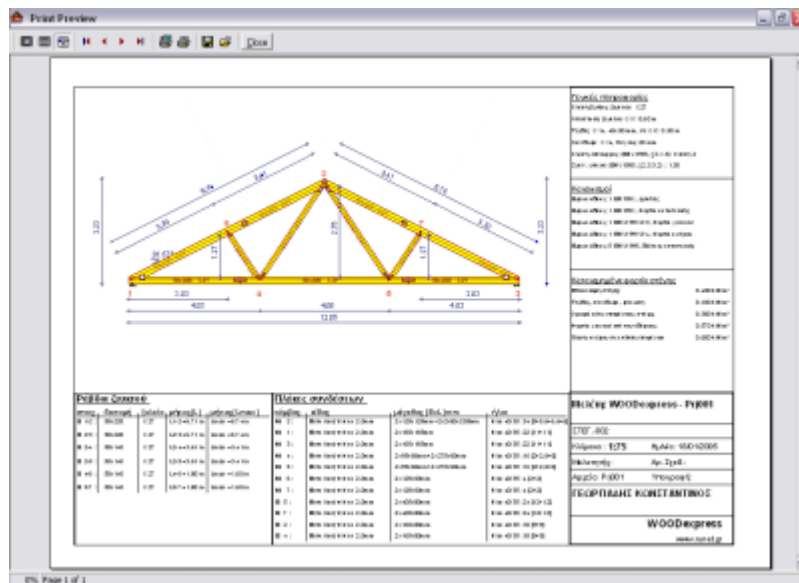
Για κάθε στέγη μπορούν να προστεθούν πρόβολοι στα άκρα της στέγης. Κιγκλιδώματα συγκράτησης χιονιού στο δεξιό/αριστερό άκρο της στέγης.

Υπολογισμοί συνδέσμων (ανάληψη δύναμης και ροπής), από χαλύβδινα ελάσματα και ήλους. Συνδέσεις με βλήτρα, ήλους, βίδες στις στέγες. Επιλέγετε διπλή, μονή εξωτερική ή εσωτερική πλάκα, πάχος πλάκας και διάμετρος βλήτρου, ήλου, βίδας. Επιλογή πάχους και είδους πλακών σύνδεσης, καρφιών καθώς και επιλογή για πολλαπλές πλάκες. Εξειδικευμένη ανάλυση (ελαστική ή πλαστική) για συνδέσεις ζευκτών καθώς και αυτόματη μελέτη συνδέσεων (ματίσματα) ξύλων. Δυνατότητα επιλογής βαθμού ακαμψίας συνδέσμων ζευκτού.



Εικόνα 37. Λεπτομέρειες κατασκευής. [9]

Εξειδικευμένο σχεδιαστικό πακέτο (CAD), για εμφάνιση, εκτύπωση και επεξεργασία σχεδίων. Αυτόματη δημιουργία λεπτομερών σχεδίων ζευκτών και συνδέσεων. Σχέδια σε οποιαδήποτε κλίμακα, zoom, επιλογές είδους γραμμών και χρώματος, επιλογή εμφάνισης αντικειμένων, ρύθμιση κειμένου. Ακριβής σχεδίαση υπό κλίμακα των συνδέσεων στο τεύχος. Υπομνήματα με παραδοχές και κανονισμούς, φορτία, διατομές και μήκη ράβδων, πλάκες και ήλους συνδέσεων και πινακίδα σχεδίου.

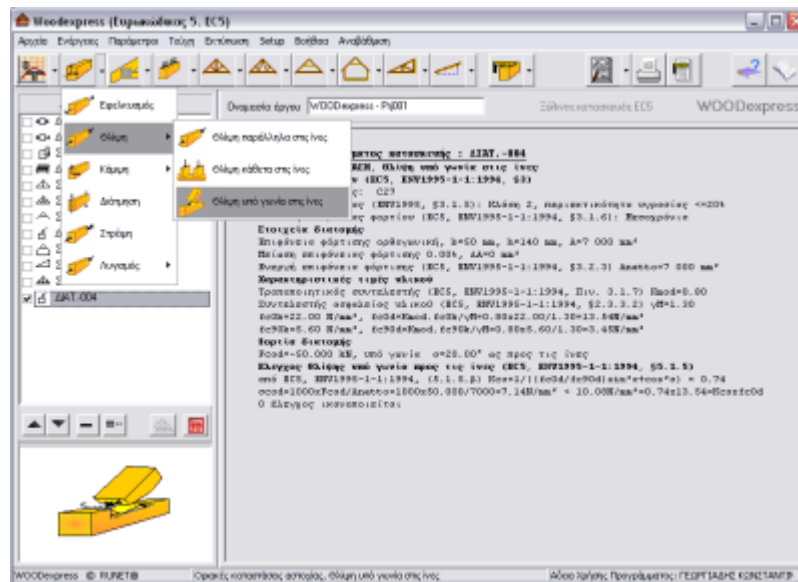


Εικόνα 38. Συνολική εικόνα μελέτης. [9]



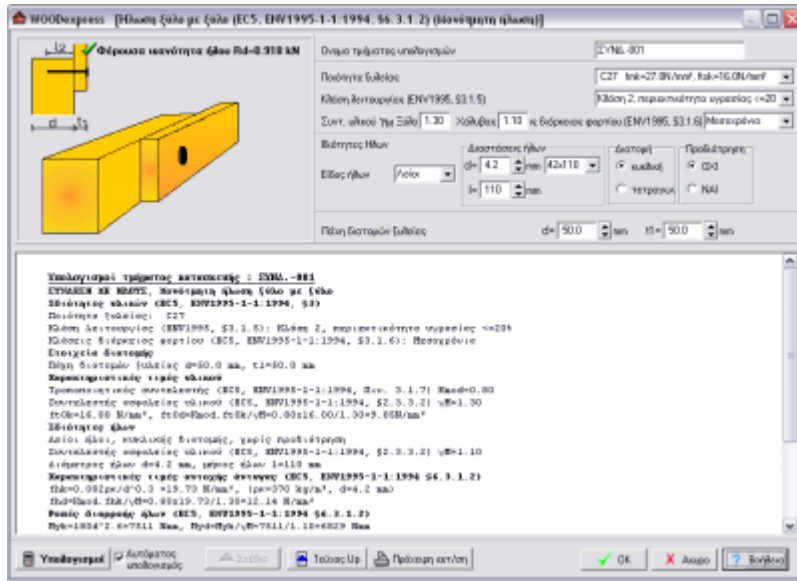
Όλοι οι έλεγχοι οριακών καταστάσεων αστοχίας διατομών, ορθογωνική και κυκλική διατομή.

- ☛ εφελκυσμός
- ☛ θλίψη, διάτμηση
- ☛ κάμψη
- ☛ κάμψη και αξονική δύναμη
- ☛ λυγισμός
- ☛ Έλεγχος έναντι πυρκαγιάς, EC 5-2



Εικόνα 39. Έλεγχου αντοχής. [9]

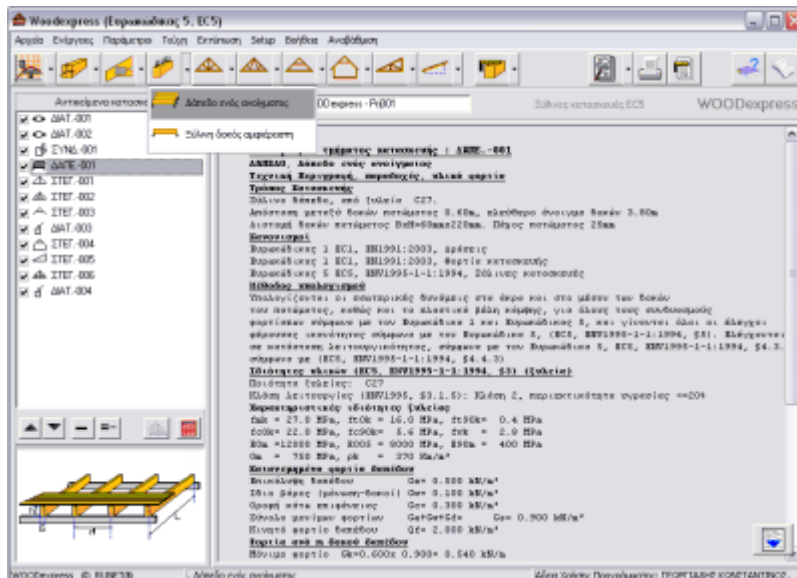
Υπολογισμοί φέρουσας ικανότητας συνδέσμων. Ηλώσεις, συνδέσεις με βλήτρα, συνδέσεις με βίδες. Συνδέσεις ξύλο με ξύλο, ξύλο με ξυλόπλακα, ξύλο με χάλυβα, ηλώσεις μονότμητες, πολύτμητες. Ξυλουργικές συνδέσεις.



Εικόνα 40. Ηλυσίες. [9]

### Υπολογισμοί Δαπέδων

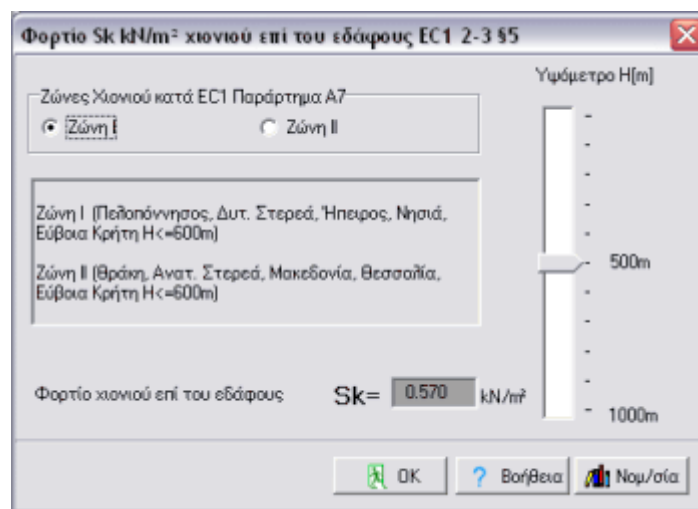
Γίνονται όλοι οι έλεγχοι των δοκών του πατώματος σε κάμψη, διάτμηση και στρεπτικό λυγισμό, στους συνδυασμούς φορτίων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5. Ελέγχονται επίσης οι ταλαντώσεις, υπολογίζοντας την πρώτη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα που πρέπει σύμφωνα με Ευρωκώδικα 5, §4.4.3 να είναι μεγαλύτερη των 8 Hz. Σύνθετο πάτωμα (μπετόν – ξύλο), για ενισχύσεις πατωμάτων. Δάπεδο δυο ανοιγμάτων



Εικόνα 41. Υπολογισμός ξύλινου δαπέδου. [9]

Φορτία χιονιού και ανέμου σύμφωνα με Ευρωκώδικα 1.

- ✚ Αντοχές ξυλείας
- ✚ Συντελεστές ασφαλείας
- ✚ Διατομές ξυλείας
- ✚ Φορτία επικάλυψης στεγών
- ✚ Φορτίο χιονιού
- ✚ Φορτίο ανέμου



Εικόνα 42. Γεωγραφικά στοιχεία. [9]

Πρότυπα ξυλείας, EN338:1995, EN338:2003, EN1194:2000 . Νέα πρότυπα με διατομές ξυλείας. Δημιουργία δικών σας προτύπων. Πρότυπα αντοχών και ιδιοτήτων ξυλείας (EN 1995, EN 2003). Δημιουργία δικών σας προτύπων.

Κατηγορίες αντιστοιχών ξυλείας ΕΝ 338:1995

Επιλεγμένη είδηση ξυλείας	ID	f <sub>yk</sub> (MPa)	f <sub>tdk</sub> (MPa)	f <sub>yk0</sub> (MPa)	f <sub>tdk0</sub> (MPa)	f <sub>yk90k</sub> (MPa)	f <sub>tdk90k</sub> (MPa)	E <sub>0m</sub> (MPa)	E <sub>05</sub> (MPa)	E <sub>90m</sub> (MPa)	G <sub>0m</sub> (MPa)	ρ <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
C14	0	14.00	8.00	0.30	16.00	4.30	1.70	7000	4700	230	440	290
C16	0	16.00	10.00	0.30	17.00	4.60	1.80	8000	5400	270	500	310
C18	0	18.00	11.00	0.30	18.00	4.80	2.00	9000	6000	300	560	320
C22	0	22.00	13.00	0.30	20.00	5.10	2.40	10000	6700	330	630	340
C24	0	24.00	14.00	0.40	21.00	5.30	2.50	11000	7400	370	690	350
C27	0	27.00	16.00	0.40	22.00	5.60	2.80	12000	8000	400	750	370
C30	0	30.00	18.00	0.40	23.00	5.70	3.00	12000	8000	400	750	380
C35	0	35.00	21.00	0.40	25.00	6.00	3.40	13000	8700	430	810	400
C40	0	40.00	24.00	0.40	26.00	6.30	3.80	14000	9400	470	880	420
D30	1	30.00	18.00	0.60	23.00	8.00	3.00	10000	8000	640	600	530
D33	1	35.00	21.00	0.60	25.00	8.40	3.40	10000	8700	690	650	560
D40	1	40.00	24.00	0.60	26.00	8.80	3.80	11000	9400	750	700	590
D50	1	50.00	30.00	0.60	29.00	9.70	4.60	14000	11800	930	880	650
D60	1	60.00	36.00	0.70	32.00	10.50	5.30	17000	14300	1130	1060	700
D70	1	70.00	42.00	0.90	34.00	13.90	6.00	20000	16800	1330	1250	900
GL24h	2	24.00	16.90	0.40	24.00	2.70	2.70	11600	9400	390	720	380
GL28h	2	28.00	19.90	0.45	26.90	3.00	3.20	12600	10200	420	780	410
GL32h	2	32.00	22.90	0.50	29.90	3.30	3.60	13700	11100	460	850	430

Default επιλογή ξυλείας : C27

OK Εκτύπωση Βοήθεια

Εικόνα 43. Κατηγορίες ξύλου. [9]

Ευρωκώδικας 1 EC1 (Δράσεις)

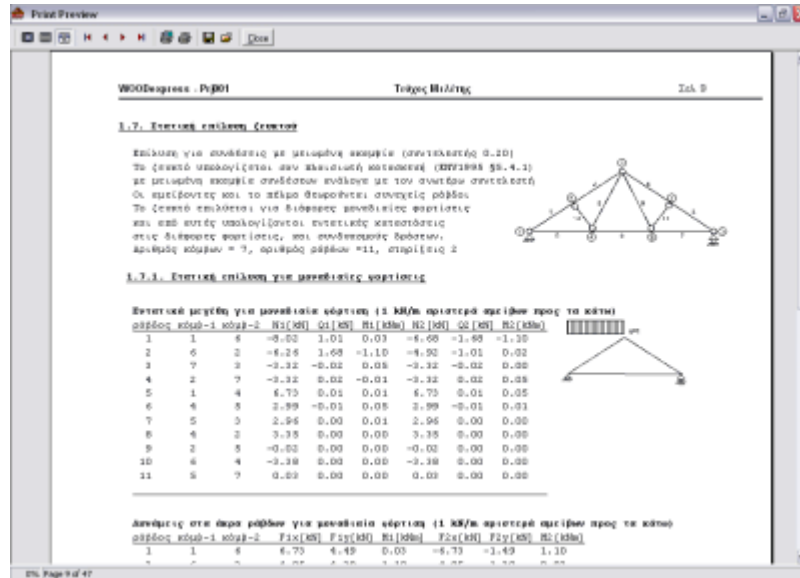
Συντ. Δράσεων | Συντ. ασφαλείας υλικού | Συνδυασμοί δράσεων

Δράση	ψ0	ψ1	ψ2
Κατηγορία Α (κατοικίες)	0.60	0.60	0.30
Κατηγορία Β (γραφεία)	0.60	0.60	0.30
Κατηγορία C (χώροι συνάθροισης)	0.80	0.80	0.50
Κατηγορία D (καταστήματα)	0.80	0.80	0.50

Reset OK Κλειστό Εκτύπωση Βοήθεια

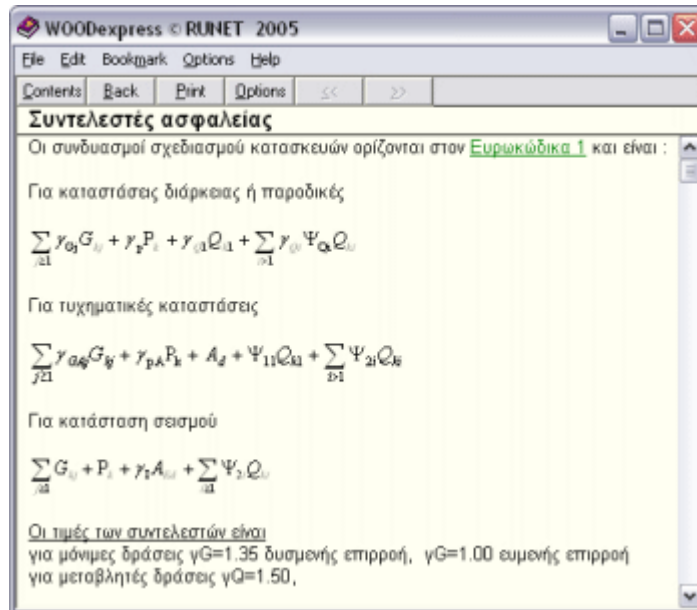
Εικόνα 44. Συντελεστές ασφαλείας και συνδυασμών φορτίσεων, Ευρωκώδικα 0, 1, 5. [9]

Υψηλή ποιότητα εκτύπωσης τευχών σε όλους τους εκτυπωτές. Υπάρχει δυνατότητα προεπισκόπησης του τεύχους μαζί με τα σκαριφήματα, πριν την εκτύπωση. Το τεύχος μπορεί επίσης να μεταφερθεί στο Word για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 45. Τεύχος υπολογισμός. [9]

Περιέχεται πλήρης βοήθεια σε κάθε σημείο του προγράμματος με αντίστοιχες αναφορές στους κανονισμούς και στο θεωρητικό υπόβαθρο, το σχετικό με το αντικείμενο που επεξεργάζεστε.



Εικόνα 46. Βοήθεια. [9]

## 3.4 FEDRA

Το πρόγραμμα FEDRA<sup>10</sup> είναι ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πακέτο, για επίλυση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6 EN 1996-1-1:2006 και το Εθνικό κείμενο εφαρμογής. Πλήρη ανάλυση τοίχων με πεπερασμένα στοιχεία. Διαστασιολόγηση στεγών, με δυνατότητα υπολογισμού των συνδέσμων και ξύλινων πατωμάτων με Ευρωκώδικα 5.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για νέες μελέτες καθώς και για μελέτες ενίσχυσης ή αποκατάστασης παλιών κτιρίων από τοιχοποιία. Ειδικό modulus για υπολογισμό gunites.

Με το πρόγραμμα FEDRA μπορείτε επίσης να διαστασιολογήσετε κτίρια από προκατασκευασμένους τοίχους σκυροδέματος σύμφωνα με το Εθνικό Κείμενο εφαρμογής «Σχεδιασμός έργων από προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος», κτίρια από τοίχους σκυροδέματος σύμφωνα με Ευρωκώδικα 2, κτίρια από ξύλινους τοίχους με οριζόντιους κορμούς δένδρων και από ξύλινα πάνελ σύμφωνα με Ευρωκώδικα 5.

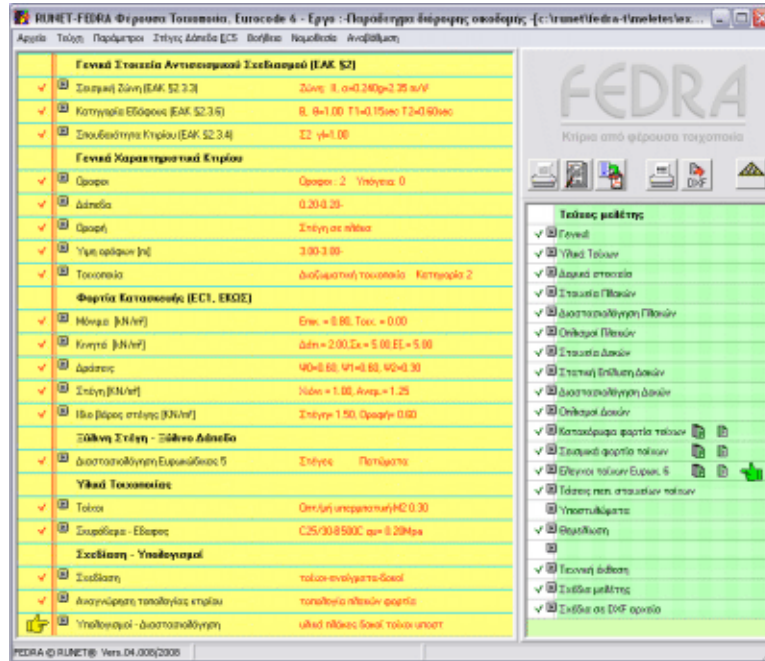
Αυτόματη δημιουργία μελέτης θερμομονωτικής επάρκειας με KENAK. Εύκολη εισαγωγή δεδομένων με αυτοδύναμο σχεδιαστικό. Πλήρες και αναλυτικότατο τεύχος υπολογισμών με αναφορές στον Ευρωκώδικα.

Βασισμένο εξ ολοκλήρου στον Ευρωκώδικα 6 για τα αφορούντα την τοιχοποιία. Για την ολοκλήρωση της επίλυσης του κτιρίου επιλύονται και διαστασιολογούνται επίσης τα δάπεδα, τα υποστυλώματα και η θεμελίωση από μπετόν βάσει του Ευρωκώδικα 2, η στέγη βάσει του Ευρωκώδικα 5.

Ο υπολογισμός και η κατανομή των σεισμικών δυνάμεων γίνεται βάσει του Ευρωκώδικα 8. Επιλύετε και διαστασιολογείτε πλήρως κτίρια, των οποίων ο σεισμός παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από τους τοίχους.

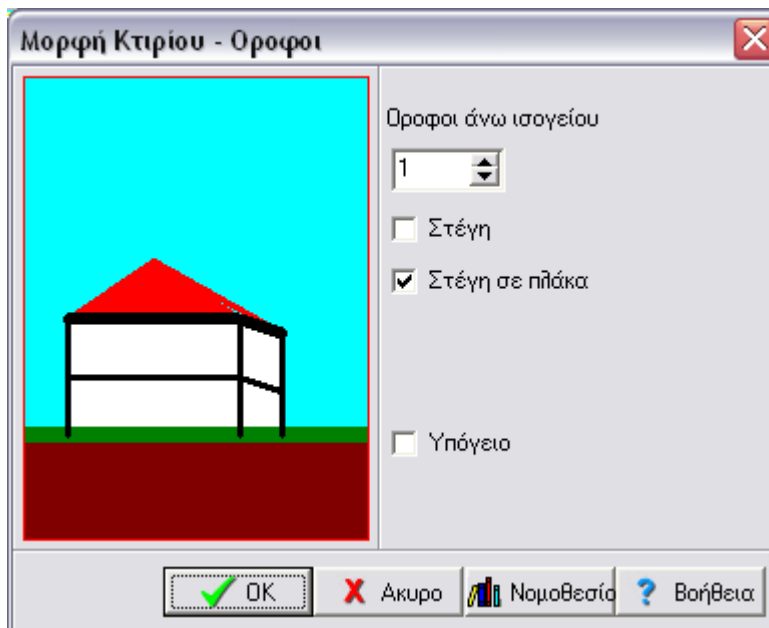
---

<sup>10</sup> <http://www.runet.gr/fedra.htm>



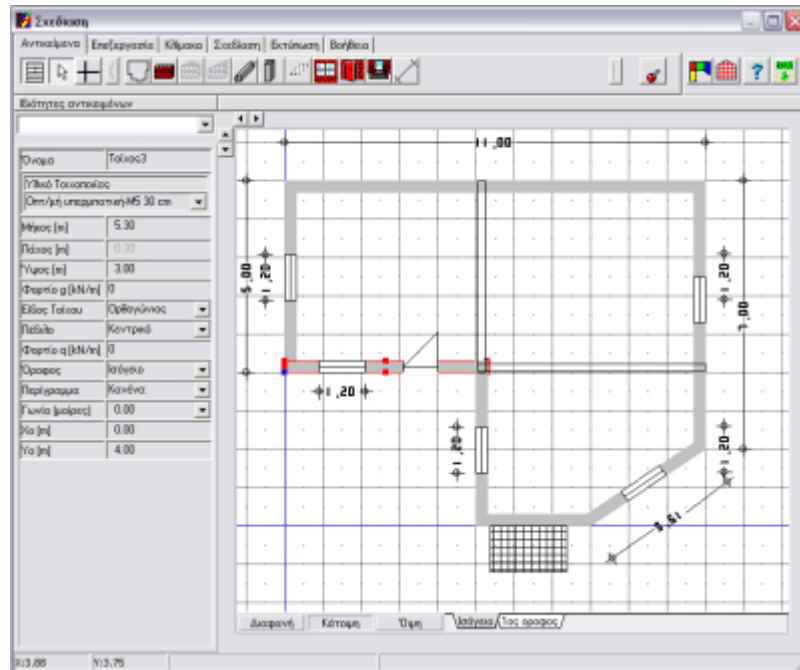
Εικόνα 47. Βασικό μενού προγράμματος. [10]

Με το πρόγραμμα παράγεται ένα πλήρες και ολοκληρωμένο τεύχος μελέτης, με σχέδια κατόψεων και ξυλοτύπων. Το έμπειρο σύστημα του προγράμματος, αναλαμβάνει να κάνει με ασφάλεια την αναγνώριση του στατικού μοντέλου από τα σχέδια απαλλάσσοντας έτσι τον χρήστη από την αντίστοιχη χρονοβόρα και επιρρεπή σε λάθη διαδικασία. Το στατικό μοντέλο και η μεθοδολογία επίλυσης επιλέχθηκαν για να αποδώσουν τα πιο ακριβή αποτελέσματα εντατικών μεγεθών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών και τις πιο προηγμένες μεθόδους επίλυσης όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 48. Εισαγωγή βασικών στοιχείων. [10]

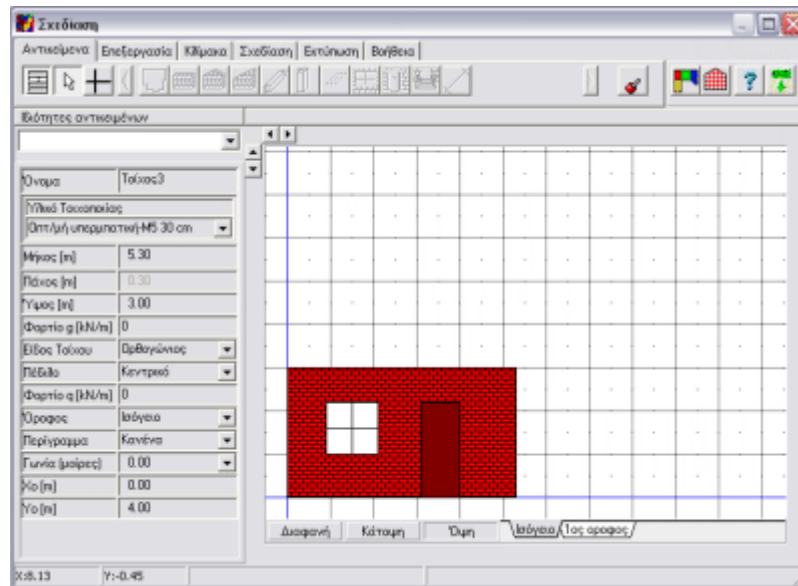
Ενσωματωμένο σχεδιαστικό με το οποίο μπορείτε εύκολα να δώσετε τα δεδομένα (τοιχούς, ανοίγματα, δοκούς) σε απλά σχέδια κατόψεων. Το σχεδιαστικό τμήμα του προγράμματος είναι φτιαγμένο με τη φιλοσοφία "right to the point" δηλαδή εύχρηστο και χωρίς περιττές διαδικασίες, έτσι μέσα σε ελάχιστο χρόνο να μπορεί κανείς να δίνει με ακρίβεια όλα τα απαραίτητα δομικά στοιχεία.



Εικόνα 49. Κάτοψη κτηρίου. [10]

Στο πρόγραμμα υπάρχει ενσωματωμένο πρωτοποριακό έμπειρο σύστημα με το οποίο από το σχεδιαστικό αναγνωρίζονται πλήρως όλα τα στοιχεία του κτιρίου, τοπολογία και συνεκτικότητα δομικών στοιχείων, αυτόματη αναγνώριση πλακών, αυτόματη κατανομή και μεταφορά φορτίων, αυτόματος χωρισμός σε πεπερασμένα στοιχεία, όλα στο χρόνο που διαρκεί το κλικ του ποντικιού σας.

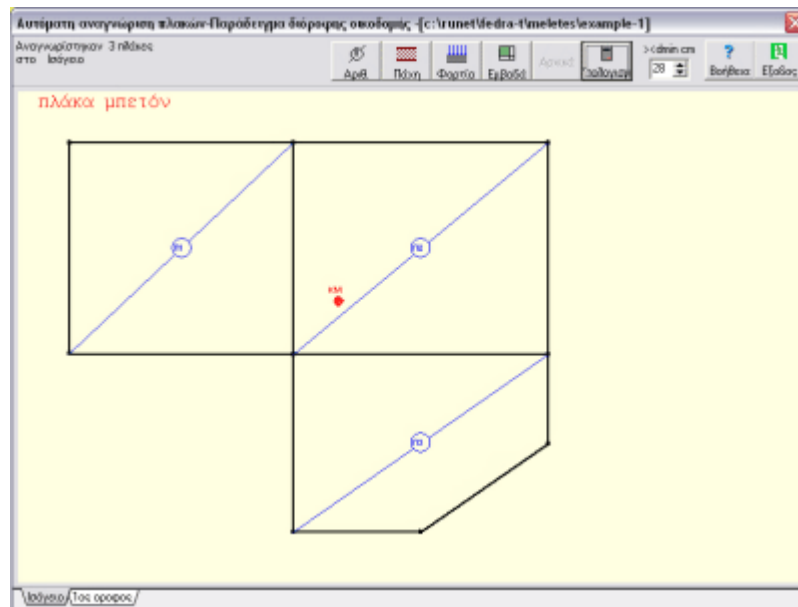




Εικόνα 50. Γλικά κατασκευής. [10]

Η επίλυση βασίζεται σε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Για την ολοκλήρωση της επίλυσης του κτιρίου επιλύονται και διαστασιολογούνται επίσης τα δάπεδα, τα υποστυλώματα και η θεμελίωση από μπετόν βάσει του Ευρωκώδικα 2, καθώς και η στέγη βάσει του Ευρωκώδικα 5.

Ο υπολογισμός και κατανομή των σεισμικών δυνάμεων γίνεται βάσει του Ευρωκώδικα 8.



Εικόνα 51. Υπολογισμός πλάκων. [10]

Μεθοδολογία επίλυσης και διαστασιολόγησης

Γίνονται όλοι οι έλεγχοι της τοιχοποιίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6 και όλοι οι έλεγχοι των στοιχείων από μπετόν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2.

Γίνεται ακριβής κατανομή των σεισμικών δυνάμεων σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8, αφού οι ακαμψίες των τοίχων υπολογίζονται ακριβέστατα με επίλυση πεπερασμένων στοιχείων. Οι τάσεις σε κάθε σημείο του τοίχου υπολογίζονται, για κάθε φόρτιση, ακριβώς με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι μπορεί άμεσα να γίνουν υπολογισμοί ενισχύσεων σε υπάρχοντα κτίρια τοιχοποιίας, καθώς και gunites.

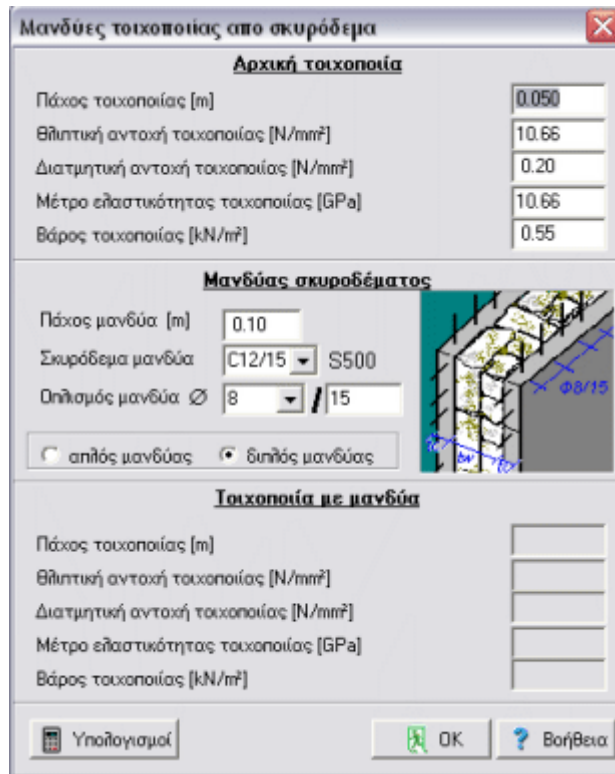
Πλήρης βάση ενσωματωμένη στο πρόγραμμα με υλικά τοιχοποιίας (λιθοσώματα, κονιάματα, τοίχοι) που με πολύ εύχρηστο μενού μπορεί να ενημερώνεται.

Όνομασία	Πάχος [m]	Ελαστική Αντοχή $f_k$	Διατμ/κή Αντοχή $f_{tk}$
Οπτ/μή μαστιχ/Μ2 25 cm	0.250 [m]	0.89 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Οπτ/μή υπερμαστιχ/Μ2 30 cm	0.300 [m]	1.87 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Οπτ/μή υπερμαστιχ/Μ5 30 cm	0.300 [m]	2.46 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.20 [N/mm <sup>2</sup> ]
Οπτ/μή υπερμαστιχ/Μ5 25 cm	0.250 [m]	2.50 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.20 [N/mm <sup>2</sup> ]
Οπτ/μή υπερμαστιχ/Μ5 30 cm	0.300 [m]	2.46 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.20 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος ΥΤΟΝΓ-Μ5 25 cm	0.250 [m]	1.70 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.15 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος ΥΤΟΝΓ-κόλλα 25 cm	0.250 [m]	1.98 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.30 [N/mm <sup>2</sup> ]
DB - HELLAS 140 mm *	0.140 [m]	6.00 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.20 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος ΥΤΟΝΓ-Μ5 30 cm	0.300 [m]	1.70 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.15 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος ΥΤΟΝΓ-κόλλα 30 cm	0.300 [m]	1.98 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.30 [N/mm <sup>2</sup> ]
Λιθοδομή Μ2 50 cm	0.500 [m]	2.62 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Λιθοδομή Μ5 50 cm	0.500 [m]	2.76 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.15 [N/mm <sup>2</sup> ]
Λιθοδομή Μ2 60 cm	0.600 [m]	2.62 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Λιθοδομή Μ2 70 cm	0.700 [m]	2.62 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τσιμεντολιθοδομή 25 cm	0.250 [m]	0.83 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τσιμεντολιθοδομή 40 cm	0.400 [m]	0.83 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος μπλετόν 25 cm *	0.250 [m]	14.93 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.30 [N/mm <sup>2</sup> ]
Τοίχος 3δ-0.7-0.7-0.7 *	0.210 [m]	10.67 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.22 [N/mm <sup>2</sup> ]
Λιθοδομή 50 cm με μονόα	0.570 [m]	2.62 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
ΙΣΟΡΙΑΣΤ 25 cm *	0.250 [m]	14.68 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.24 [N/mm <sup>2</sup> ]
ΠΡΟΕΛΙΑΣ 25 cm *	0.250 [m]	19.83 [N/mm <sup>2</sup> ]	2.66 [N/mm <sup>2</sup> ]
ΠΡΟΕΛΙΑΣ 30 cm *	0.300 [m]	10.44 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.30 [N/mm <sup>2</sup> ]
BETOBLOCK 30 cm *	0.300 [m]	17.78 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.31 [N/mm <sup>2</sup> ]
ΑΡΓΙΣΙΔΙ 30 cm *	0.300 [m]	12.46 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.22 [N/mm <sup>2</sup> ]
Κορφοί δένδρων *	0.250 [m]	1.79 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]
Εύλινα Πάινελ 25 cm *	0.250 [m]	4.29 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.10 [N/mm <sup>2</sup> ]

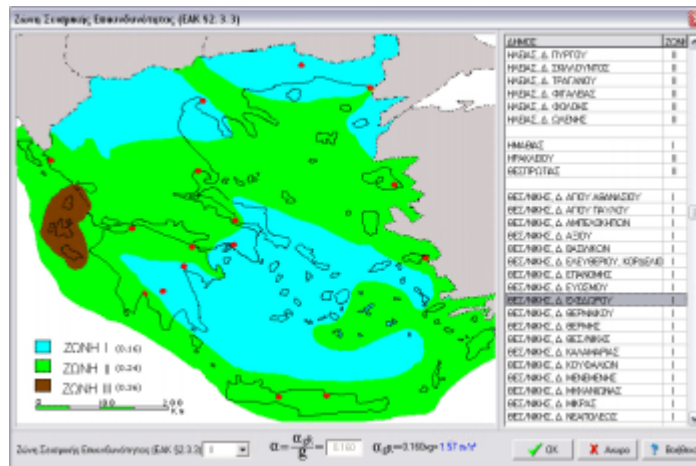
Εικόνα 52. Είδη τοιχοποιών. [10]

Μπορείτε να προσθέσετε μανδύες σκυροδέματος, gunites στους τοίχους και αυτόματα να λαμβάνεται υπόψη η πρόσθετη θλιπτική και διατμητική αντοχή. Στην πρόσθετη διατμητική αντοχή του μανδύα λαμβάνεται υπ' όψιν και η συμμετοχή του οπλισμού.

Πατώντας OK βγαίνετε και έχουν αλλάξει οι χαρακτηριστικές τιμές  $f_k$ ,  $f_{nk}$ ,  $E$  και το πλάτος, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση του μανδύα. Με το «Υπολογισμοί» γίνονται οι υπολογισμοί και βλέπετε το κείμενο των υπολογισμών της πρόσθετης αντοχής του μανδύα.



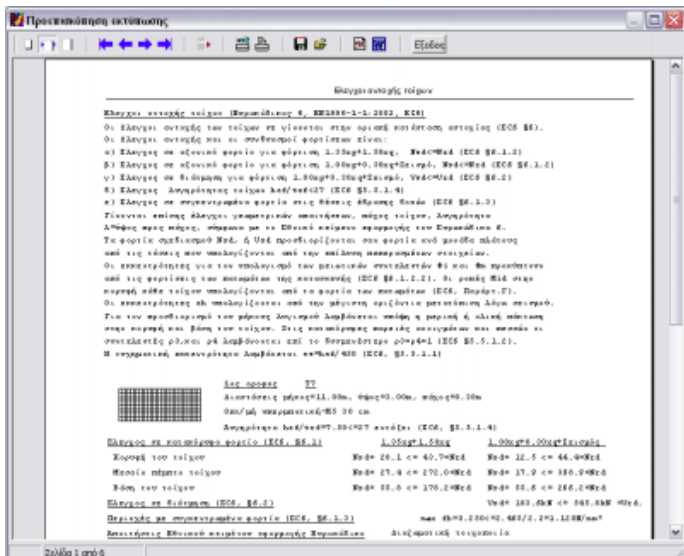
Εικόνα 53. Επένδυση τοιχοποιίας. [10]



Εικόνα 54. Σεισμικές ζώνες. [10]

Τα τεύχη της μελέτης, είναι αναλυτικότερα, με όλους τους υπολογισμούς και τις λεπτομέρειες, επεξηγήσεις, θεωρητικές συσχετίσεις και αναδρομές στους κανονισμούς.

Τα σχέδια κατόψεων και ξυλοτύπων που παράγονται ολοκληρώνουν τις απαιτήσεις μιας μελέτης. Ο χρήστης έχει πλήρη εποπτεία με γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων.

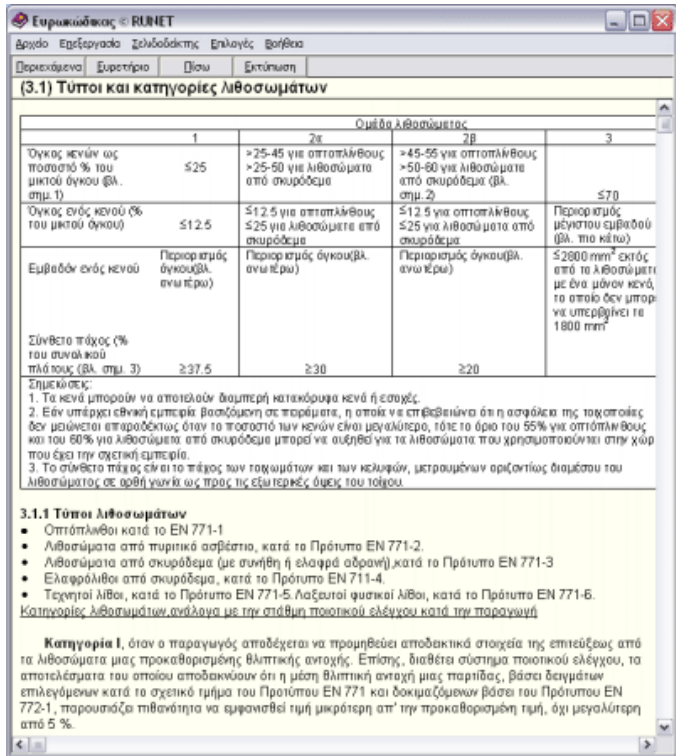


Εικόνα 55. Τεύχος εκτύπωσης (υπολογισμοί). [10]

Περιέχονται οι Κανονισμοί

- Ευρωκώδικας 6, Εθνικό κείμενο εφαρμογής
- Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος
- Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος
- Κανονισμός φορτίσεων
- Αντισεισμικός Κανονισμός

Από κάθε σημείο του προγράμματος, πηγαίνετε αυτόματα στο αντίστοιχο σημείο των κανονισμών.



Εικόνα 56. Νομοθεσία. [10]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή αποσκοπεί στη διερεύνηση μηχανισμών αστοχίας σε δομικά υλικά και κατασκευές.

Με τη βοήθεια εμπορικών κωδικών π.χ. runnet, εξετάσαμε τη συμπεριφορά εμπειριάστατων πλαισίων με το πρόγραμμα frame (το οποίο είναι τμήμα του runnet), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τους ευρωκώδικες, οι οποίοι περιλαμβάνουν όλους τους κανονισμούς που απαιτούνται για την επίλυση δομικών κατασκευών και έργα πολιτικών μηχανικών.

Με το πρόγραμμα αυτό, μπορούμε να υπολογίσουμε τα μήκη λυγισμού και τις επιθυμητές διαμέτρους οπλισμού για κάθε στοιχείο του φορέα κατασκευής. Για παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε σκυρόδεμα C12/15 και χάλυβα S200 με επιμέρους συντελεστή ασφαλείας 1,5 (σκυρόδεμα) και 1,15 (χάλυβα). Τα αποτελέσματα του προγράμματος ελήφθησαν με βάση τον Ευρωκώδικα 3. Λύσαμε το πρόβλημα μεταλλικού πλαισίου με ομοιόμορφη κατανομή φορτίου. Ο δομικός χάλυβας που χρησιμοποιήσαμε είναι S235 ( $f_y=235$  Mpa και  $f_u=360$  Mpa).

Επιλέξαμε το πρόγραμμα beton express από τον ίδιο εμπορικό κώδικα για τον υπολογισμό και διαστασιολόγηση τμημάτων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, το πρόγραμμα μπορεί να επιλύσει δομικά στοιχεία ενισχυμένα με ανθρακονήματα και ρητίνες. Τα δομικά στοιχεία, π.χ. πλάκες, εξετάστηκαν σε κάμψη και τα αποτελέσματα αναγράφονται στον πίνακα αποτελεσμάτων του beton express.

Με τη χρήση του wood express υπολογίσαμε και διαστασιολογήσαμε ξύλινες κατασκευές σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 5. Επιλέξαμε ξύλινες κατασκευές για στέγες (δίρικτες, μονόρικτες). Επίσης, με το ίδιο πρόγραμμα μελετήσαμε τα χαρακτηριστικά των δοκών ξύλινων πατωμάτων σε κάμψη κ.ο.κ. Επιλέξαμε τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας και συνδυασμούς φόρτισης για ξύλινες κατασκευές. Τα αποτελέσματα δίδονται σε έντυπη μορφή τα οποία επισυνάπτονται στην πτυχιακή.

Το fedra διαθέτει κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα, αντίστοιχο με το autocad και πίνακα των ιδιοτήτων διαφόρων υλικών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Μηχανική συμπεριφορά των υλικών», [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/mhx\\_symp\\_ylik\\_1.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_1.pdf)
2. «Τα Κριτήρια Αστοχίας των Υλικών -Μια Περιήγηση στην Ιστορία», **Ν. Π. ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ**, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε. Μ. Π.
3. «Γενικά το σκυρόδεμα – Καλούπια», <http://www.ktiriaka.gr/Default.aspx?ch=20>
4. Ξύλινη προκατασκευασμένη τοιχοποιία», ΕΜΠ, Πουλιάσης Γεώργιος, Ψυχάρης Νικόλαος, Ντιγκάκης Χαράλαμπος, Φιλαρέτου Φιλάρετος.
5. «ΤΟ ΓΥΑΛΙ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ», Αλέξανδρος Τόλης, Πολιτικός μηχανικός Π.Θ. MSc ΔΣΑΚ ΕΜΠ».
6. «Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία», ΤΕΕ, Σοφία Κωνσταντινίδου.
7. <http://www.runet.gr/frame2dexpressplus.htm>
8. <http://www.runet.gr/Betonexpress.htm>
9. <http://www.runet.gr/woodexpress.htm>
10. <http://www.runet.gr/fedra.htm>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Σκαρίφημα. [1] .....	10
Εικόνα 2. Σκαρίφημα δυνάμεων και ροπών. [1].....	10
Εικόνα 3. Πακτωμένη ράβδος. [1].....	12
Εικόνα 4. Δυνάμεις στον κύβο ανά άξονα. [1] .....	14
Εικόνα 5. Διατμητικές τάσεις στον κύβο. [1].....	16
Εικόνα 6. Δοκίμια σκυροδέματος [3] .....	27
Εικόνα 7. Καλούπωμα κολώνας.[3].....	30
Εικόνα 8. Καλούπωμα πλάκας.[3].....	32
Εικόνα 9. Καλώπουμα τοιχείου.[3] .....	33
Εικόνα 10. Καλούπωμα κολώνας.[3].....	34
Εικόνα 11. <i>Τυπική θεμελίωση με ξύλινους πασσάλους σε βενετσιάνικη κατασκευή</i> [4].....	35
Εικόνα 12. Τομή κάθετη στον άξονα κορμού δένδρου [4].....	36
Εικόνα 13.Μικροσκοπική δομή δένδρου [4] .....	37
Εικόνα 14. Διάφορες παραμορφώσεις ξύλου λόγω απότομης ξήρανσης. [4]...41	
Εικόνα 15. Οι τρεις διευθύνσεις του ξύλου [4] .....	46
Εικόνα 16. Δοκίμια ξύλου από θλιπτική καταπόνηση. Από αριστερά α) ακτινική, β) εφαπτωμενική, γ) αξονική [4].....	48
Εικόνα 17. <i>Γωνία θ μεταξύ διεύθυνσης φόρτισης και ινών.</i> [4].....	49
Εικόνα 18. Αστοχία δοκιμίου D40 σε κάμψη τεσσάρων σημείων. [4] .....	50
Εικόνα 19. Γυάλινες κατασκευές, Λούβρο, Γαλλία [5].....	55
Εικόνα 20. Γυάλινες κατασκευές, Λούβρο, Γαλλία [5].....	56
Εικόνα 21. <i>Μορφή θραύσης γυαλιού. Από αριστερά ανοπτημένο , heat strengthened, toughened</i> [5] .....	63
Εικόνα 22. <i>Παρίσι λεωφόρος Ηλυσίων Πεδίων</i> [5].....	65
Εικόνα 23. <i>Τρισδιάστατη τομή εξωτερικής τοιχοποιίας Κοφινάς</i> [4].....	83
Εικόνα 24. Σκαρίφημα ξύλινων ορθοστατών.[4] .....	86
Εικόνα 25. <i>Μεταλλικά ελάσματα σύνδεσης</i> [4] .....	88
Εικόνα 26. Εισαγωγή δεδομένων συμβατικής κατασκευής.[7].....	96
Εικόνα 27. Μεταλλική κατασκευή.[7].....	96
Εικόνα 28. Στοιχεία μεταλλικής κατασκευής.[7] .....	97
Εικόνα 29. Υπολογισμός πλακών.[8] .....	99
Εικόνα 30. Υπολογισμός δοκών.[8].....	99
Εικόνα 31. Υπολογισμός υποστυλωμάτων.[8] .....	100
Εικόνα 32. Υπολογισμός θεμελιώσεων.[8].....	100

Εικόνα 33. Κατάλογος οπλισμών.[8].....	101
Εικόνα 34. Πίνακας οπλισμών.[8] .....	101
Εικόνα 35. Προεπιλογές ζευκτών. [9] .....	102
Εικόνα 36. Υπολογισμοί επίλυσης στατικών. [9].....	103
Εικόνα 37. Λεπτομέρειες κατασκευής. [9] .....	104
Εικόνα 38. Συνολική εικόνα μελέτης. [9].....	104
Εικόνα 39. Έλεγχοι αντοχής. [9] .....	105
Εικόνα 40. Ηλώσεις. [9] .....	106
Εικόνα 41. Υπολογισμός ξύλινου δαπέδου. [9].....	106
Εικόνα 42. Γεωγραφικά στοιχεία. [9].....	107
Εικόνα 43. Κατηγορίες ξύλου. [9].....	108
Εικόνα 44. Συντελεστές ασφαλείας και συνδυασμών φορτίσεων, Ευρωκώδικα 0, 1, 5. [9].....	108
Εικόνα 45. Τεύχος υπολογισμός. [9] .....	109
Εικόνα 46. Βοήθεια. [9].....	109
Εικόνα 47. Βασικό μενού προγράμματος. [10] .....	111
Εικόνα 48. Εισαγωγή βασικών στοιχείων. [10].....	111
Εικόνα 49. Κάτοψη κτηρίου. [10] .....	112
Εικόνα 50. Υλικά κατασκευής. [10] .....	113
Εικόνα 51. Υπολογισμός πλακών. [10] .....	113
Εικόνα 52. Είδη τοιχοποιιών. [10].....	114
Εικόνα 53. Επένδυση τοιχοποιίας. [10] .....	115
Εικόνα 54. Σεισμικές ζώνες. [10] .....	115
Εικόνα 55. Τεύχος εκτύπωσης (υπολογισμοί). [10] .....	116
Εικόνα 56. Νομοθεσία. [10].....	116
Πίνακας 1. Τύποι εύρεσης παραμορφώσεων. [1] .....	14
Πίνακας 2. Ελάχιστη επικάλυψη του χάλυβα οπλισμού και ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος. [3].....	28
Πίνακας 3. Εσωτερική υγρασία σε σχέση με την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία περιβάλλοντος.....	39
Πίνακας 4. Θερμοαγωγιμότητα υλικών. [4] .....	43
Διάγραμμα 1. Θερμοκρασίες καιόμενης διατομής [4].....	44
Διάγραμμα 2. % της μέγιστης αντοχής του ξύλου σε σχέση με την γωνία $\theta$ μεταξύ διεύθυνσης φόρτισης και ινών [4] .....	49
Διάγραμμα 3. Σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και καμπτικής αντοχής, κατά	



EN338 [4].....	51
Διάγραμμα 4. Θλιπτική αντοχή συναρτήσει της περιεχόμενης υγρασίας Υγρασία (%) [4].....	52
Διάγραμμα 5. Παραμένουσες τάσεις από την επαναφορά [5].....	62
Διάγραμμα 6. Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και διατμήσεως με την θερμοκρασία στο PVB [5]. .....	63
Διάγραμμα 7. Μεταβολή της ταχύτητας αστοχίας σε συνάρτηση με τον συντελεστή ΚΙ [5].....	67