

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ



Διπλωματική Εργασία

Ελληνική Απόδοση και Εμπλουτισμός
Αποσπασμάτων Διαλέξεων του ESDEP

Φοιτήτρια : *Ευαγγελία Κορίτσα*

Επιβλέπων : *Δημ. Σοφιανόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής*

Βόλος, Σεπτέμβριος 2011



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 9929/1
Ημερ. Εισ.: 29-11-2011
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2011
ΚΟΡ

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγικά Στοιχεία - Σκοπός - Αντικείμενο Εργασίας		2
1	Το ESDEP και η εξέλιξη του	2
2	Σκοπός και Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	6
Κεφάλαιο 1ο : Ο ρόλος του χάλυβα στις Ευρωπαϊκές κατασκευές		7
1.1	Εισαγωγή	7
1.2	Η παραγωγή του χάλυβα	9
1.3	Τα πλεονεκτήματα του χάλυβα	10
1.4	Το μέλλον του χάλυβα: Περαιτέρω εξελίξεις	18
Κεφάλαιο 2ο : Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Απλών και Ειδικών Βιομηχανικών Κτιρίων καθώς και Πολυώροφων Κτιρίων		20
2.1	Τύποι βιομηχανικών κτιρίων	20
2.2	Δομικός χάλυβας για βιομηχανικά κτίρια	20
2.3	Τύποι ειδικών βιομηχανικών κτιρίων	21
2.4	Μερικά παραδείγματα των ειδικών κτιρίων	22
2.5	Εισαγωγή στο σχεδιασμό πολυώροφων κτιρίων	22
2.6	Μόρφωση πολυώροφου χαλύβδινου κτιρίου	23
2.7	Υποστυλώματα πολυώροφου κτιρίου	25
2.8	Δοκοί πολυώροφου κτιρίου	27
2.9	Πατώματα (δάπεδα) πολυώροφου κτιρίου	28
2.10	Ενισχύσεις μέσω Συνδέσμων Δυσκαμψίας (bracing)	30
2.11	Δομοστατικά συστήματα	32
2.12	Απαιτήσεις σχεδιασμού πολυώροφων κτιρίων	36
2.13	Από τα πολυώροφα στα «υψηλά» κτίρια και τους ουρανοξύστες	40
2.14	Τα κύρια χαρακτηριστικά των χαλύβδινων κτιρίων χαμηλού ύψους	40
2.15	Δομικά συστήματα για «υψηλά» κτίρια	43
2.16	Μοντέλα υπολογισμού	48
2.17	Συμπεριφορά υπό οριζόντια φορτία	57
Κεφάλαιο 3ο : Λυγισμός και Μορφές Αστοχίας Χαλύβδινων Κατασκευών		62
3.1	Εισαγωγή	62
3.2	Γραμμική συμπεριφορά και προϋποθέσεις	63
3.3	Θλιβόμενος κύλινδρος	65
3.4	Αξονικά θλιβόμενη ράβδος	76
3.5	Απλό προσομοίωμα τριαρθρωτού τόξου (απλή τριγωνική αψίδα - μοντέλο von Mises)	82
3.6	Δικτυωτή τριγωνική αψίδα	92
3.7	Βασικές μορφές αστοχίας χαλύβδινων κατασκευών	98
3.8	Η επιρροή των αρχικών ατελειών	102
Κεφάλαιο 4ο : Λεπτότοικα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης		106
4.1	Εισαγωγή, τυπικά προϊόντα και χρήση αυτών	106
4.2	Εφαρμογές, πλεονεκτήματα και τρόπος βιομηχανικής παραγωγής - κατεργασίας	108
4.3	Υλικά, επίδραση της ψυχρής διαμόρφωσης και συνδέσεις	111
4.4	Στοιχεία στατικής ανάλυσης	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Διαλέξεις του ESDEP και αναλυτικά περιεχόμενα αυτών		117

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΣΚΟΠΟΣ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Επιμόρφωσης στο Σχεδιασμό Χαλύβδινων Κατασκευών (ESDEP) και η εξέλιξη του

Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Δράσης για Επιμόρφωση και Εκπαίδευση στην Τεχνολογία (Community Action Programme for Education and for Technology, COMETT I) υιοθετήθηκε με βάση την απόφαση του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου 86/365/ΕΕC τις 24 Ιουλίου 1986. Μετά τον πρώτο προπαρασκευαστικό χρόνο, η λειτουργική φάση του ήταν για τρία έτη (1987 - 1989). Η δεύτερη φάση του εν λόγω προγράμματος - COMETT II - για την περίοδο 1990 - 1994 υιοθετήθηκε το Δεκέμβριο του 1988 (απόφαση 89/27/ΕΕC) και ξεκίνησε την 1^η Ιανουαρίου του 1990. Σκοπός της ήταν η ενίσχυση της εκπαίδευσης σε θέματα προχωρημένης ιδιαίτερα τεχνολογίας, η ανάπτυξη ανθρώπινου δυναμικού με υψηλές δεξιότητες και η ανταγωνιστικότητα της Ευρωπαϊκής Βιομηχανίας. Η COMETT II δεν ήταν απλά μια παράταση της COMETT I αλλά μια περαιτέρω ανάπτυξη, εμβάθυνση και διεύρυνση του όλου εγχειρήματος.

Μέσα στα πλαίσια της COMETT II υπήρξαν και ορισμένες πιλοτικές δράσεις, οι οποίες ανατέθηκαν κάθε μια σε διαφορετική χώρα της Κοινότητας. Μεταξύ αυτών ήταν και το καλούμενο *Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Επιμόρφωσης στο Σχεδιασμό Χαλύβδινων Κατασκευών (European Steel Design Education Programme - ESDEP)*, το οποίο ανατέθηκε στο *Ηνωμένο Βασίλειο*, με σκοπό και επιθυμητό αποτέλεσμα *ένα πλήρες, εύκαμπτο και οικονομικό πρόγραμμα επιμορφωτικού υλικού, για την εκπαίδευση σπουδαστών και επανεκπαίδευση Μηχανικών στο σχεδιασμό και υλοποίηση χαλύβδινων δομοστατικών κατασκευών.*

Προς τούτο δημιουργήθηκαν 18 ομάδες εργασίας (Working Groups - WGs), κάθε μια των οποίων επεξεργάστηκε ένα συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο, γεγονός που οδήγησε στη σύνταξη 201 διαλέξεων, που καλύπτουν 22 ευρείες περιοχές. Το σύνολο αυτών των διαλέξεων δημοσιεύτηκε το 1993 και αναφέρεται στις pre-Standard (ENV) εκδόσεις των Ευρωκωδίκων, οπότε το περιεχόμενό τους δεν είναι αναγκαστικά σε πλήρη αρμονία με τους εν ισχύ πλέον Ευρωκώδικες (EN), που δημοσιεύτηκαν μεταξύ 2002 και 2007. Η συμβουλή - οδηγία που δόθηκε από το ESDEP ήταν ότι η χρήση του περιεχομένου των διαλέξεων - που στην αγγλική είναι ελεύθερο στο διαδίκτυο - θα πρέπει να γίνεται **πάντοτε** σε συνδυασμό με τους πρόσφατα δημοσιευθέντες Ευρωκώδικες (EN) και τα σχετικά Εθνικά Προσαρτήματα τους.

Το περιεχόμενο των διαλέξεων του ESDEP καλύπτει θέματα που κυμαίνονται από την εφαρμοσμένη μεταλλουργία μέχρι τα δομικά συστήματα και εμπεριέχει θέματα υψηλού ενδιαφέροντος, όπως ο λυγισμός και οι σύμμικτες κατασκευές, καθώς επίσης και ειδικά θέματα, όπως η προστασία έναντι διάβρωσης και ο αντισεισμικός σχεδιασμός. Το όλο

υλικό καλύπτει όχι μόνο κτιριακές κατασκευές αλλά και γέφυρες, θαλάσσιες εξέδρες, δεξαμενές, καπνοδόχους και ιστούς. Το βάθος του υλικού κυμαίνεται από βασικές εισαγωγικές γνώσεις μέχρι πολύ προχωρημένες, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες - υπό μορφή διαλέξεων διάρκειας περίπου 50 λεπτών η κάθε μια - τόσο σε φοιτητές όσο και σε διδάσκοντες. Τα περιεχόμενα όλων των διαλέξεων παρατίθενται στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας υπό μορφή Παραρτήματος στο τέλος αυτής (κρίθηκε σκόπιμη η χρήση των αρχικών Αγγλικών όρων για λόγους εποπτείας).

Το λογισμικό και το οπτικοακουστικό υλικό που παράχθηκε στη συνέχεια, με βάση τα περιεχόμενα και την ύλη των διαλέξεων του **ESDEP**, από τον Βρετανικό Οίκο **Epistemics** (www.epistemics.co.uk) οδήγησε στην δημιουργία και ανάπτυξη των συστημάτων **WIVISS** (Wider Vocational Initiative in Structural Steelwork), **SSEDTA** (Structural Steelwork Eurocodes - Development of a Transnational Approach) και **ATR** (Architectural Teaching Resource), χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται κατωτέρω στην αγγλική, απ' ευθείας από τη σχετική ιστοσελίδα:

WIVISS

Wider Vocational Initiative in Structural Steelwork

A prototype knowledge-based CD learning system based on a sample of **ESDEP**, the authoritative set of educational material for structural steelwork. The system delivers structured courses and matches attributed material to the user's requirements.

The prototype of the WIVISS CD was developed by Epistemics in conjunction with WIVISS partners which includes institutes and universities across Europe.



WIVISS allows the user to take existing material in a variety of formats (media) and combine these separate elements into structured course documents. THE user can view the documents produced with a Web browser and mount such documents on a Web server for telematic delivery of your presentation. However, WIVISS has many extensions and enhancements over and above traditional Web browsers including:

User modelling

The user gets to see a different view of the document depending on his or her interests. Parts of the document that are of no interest to the user are automatically hidden away.

Media dictionary

A dictionary can be built for a single document or for a whole collection of documents. The dictionary is visualised as a navigation map that allows you to see the structure of all your documents and pick relevant material quickly and easily. This does away with wasted time spent 'surfing' the material.

Interactive presentation

The material can be presented to the user interactively, where more and more material is selectively revealed as the user clicks an icon or presses a key to progress. This mode of presentation is ideal for distance learning packages.

The initial version of WIVISS did not deliver the extensions when viewed within Web browsers. A second version, **WIVISS II**, delivered structured courses and matched attributed material to the user's requirements.

SSEDTA

Structural Steelwork Eurocodes - Development of a Transnational Approach

SSEDTA was a Leonardo Da Vinci funded project to prepare training modules for Civil and Structural Engineers on those design Eurocodes relating to structural steelwork. Material from these lectures was the basis of telematic documentation translated into French, Spanish, German and Hungarian.

SSEDTA was undertaken by Epistemics in partnership with the University of Sheffield (UK), the Steel Construction Institute (UK), the University of Liege (Bel), Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (Fr), the Technical Chamber of Greece, the Technical University of Budapest (Hu), and the University of Oviedo (SP) for the European Union.

The project developed a series of training modules for civil and structural engineers on those design Eurocodes relating to structural steelwork. These were presented in a variety of formats to suit the needs of different sized enterprises in each country.

The material is attributed and delivered using an internet browser. The attribution is used to allow matching of material to user requirements.

ATR

Architectural Teaching Resource

ATR was a Leonardo Da Vinci funded project to prepare training modules for Architectural students. Material from these lectures was the basis of telematic documentation translated into many European languages.

The Architectural Teaching Resource was developed by Epistemics during 1999 for the European Union.

The project was very similar to the WIVISS and SSEDTA projects, but extends the system to model architects at all levels.

Από τη συνοπτική ανωτέρω παρουσίαση είναι προφανής **ο σημαντικότερος ρόλος που έχουν μέχρι στιγμής διαδραματίσει οι διαλέξεις του ESDEP στην επιμόρφωση των Ευρωπαίων Μηχανικών σε ότι αφορά τις χαλύβδινες κατασκευές, με δυστυχώς περιθωριακό ως μηδενικό αντίκτυπο στα αντίστοιχα Ελληνικά δρώμενα. Η τελευταία αυτή διαπίστωση αποτελεί το έναυσμα για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.**

2. Σκοπός και Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Με βάση την ανωτέρω προσέγγιση, η παρούσα Εργασία επιχειρεί την επιλεκτική Ελληνική απόδοση και εμπλουτισμό ορισμένων αποσπασμάτων των διαλέξεων του ESDEP, και πιο συγκεκριμένα των 1B, 6 και 9, που έχουν ως αντικείμενο τα ακόλουθα:

1B : Κατασκευές από Χάλυβα - Εισαγωγή στο Σχεδιασμό

6 : Εφαρμοσμένη Ευστάθεια

9 : Κατασκευές με μέλη από λεπτότοιχες διατομές

Η επιλογή των παραπάνω θεμάτων υπήρξε ιδιαζόντως δύσκολη, λόγω του τεράστιου όγκου της ύλης. Η όλη εργασία αποτελείται από τέσσερα Κεφάλαια. Στο 1^ο από αυτά καταδεικνύεται ο ρόλος του χάλυβα στις Ευρωπαϊκές κατασκευές ενώ στο 2^ο Κεφάλαιο παρατίθεται εκτενής εισαγωγή σε ότι αφορά τον σχεδιασμό απλών και σύνθετων (χαμηλών και υψηλών) χαλύβδινων κτιρίων. Στο 3^ο Κεφάλαιο, που είναι και το κατ' εξοχήν εμπλουτισμένο, παρατίθενται θέματα λυγισμού και μηχανισμών απώλειας ευστάθειας και αστοχίας και τέλος, το 4^ο Κεφάλαιο πραγματεύεται λεπτότοιχα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης.

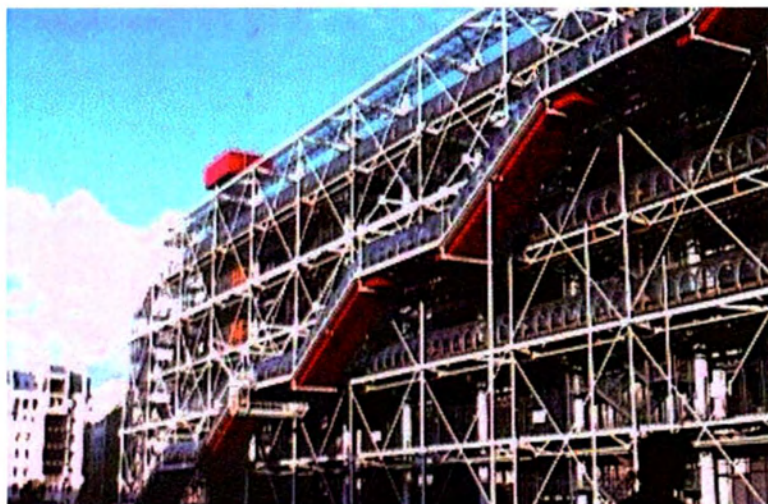
Στο τέλος της εργασίας υφίσταται Παράρτημα, στο οποίο δίδεται το αναλυτικό Περιεχόμενο των διαλέξεων του ESDEP στην Αγγλική γλώσσα.

Βόλος, Σεπτέμβριος 2011

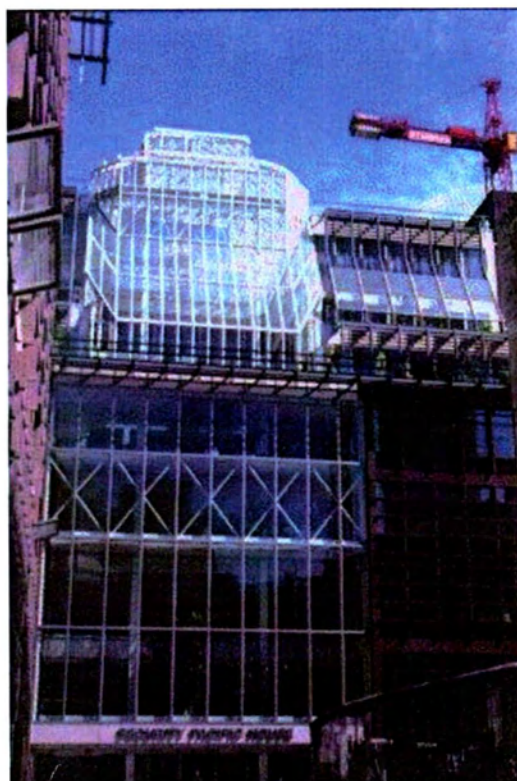
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ο ρόλος του χάλυβα στις Ευρωπαϊκές Κατασκευές

1.1. Εισαγωγή

Ο χάλυβας παράχθηκε αρχικά κατά το Μεσαίωνα, αλλά μόλις πριν από έναν αιώνα χρησιμοποιήθηκε στη Μηχανική των κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού. Σήμερα πολλές αξιόλογες κατασκευές επιδεικνύουν τις δυνατότητες αυτού του καλά εξελιγμένου υλικού με την καθαρή και διάφανη εμφάνισή τους, με χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών που φαίνονται στις Εικόνες 1 - 5.



Εικόνα 1: Κέντρο Πομπιντού, Παρίσι, Γαλλία, όψη 1



Εικόνα 2: Κέντρο Πομπιντού, Παρίσι, Γαλλία, όψη 2



Εικόνα 3: Ολυμπιακό στάδιο, Μόναχο, Γερμανία



Εικόνα 4: Γέφυρα Faro, Δανία



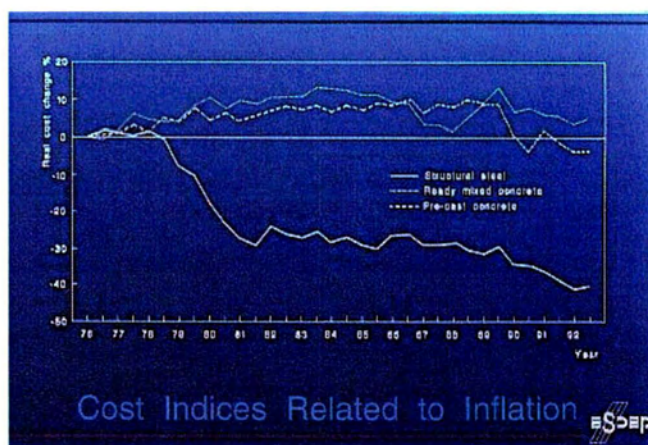
Εικόνα 5 : Πλατφόρμα Πετρελαίου, Βόρεια Θάλασσα

Η αναλογία αντοχής- όγκου, το μεγάλο εύρος πιθανών εφαρμογών, η διαθεσιμότητα πολλών τυποποιημένων διατομών μελών, η αξιοπιστία του υλικού και η δυνατότητα να δίνεται μορφή σε κάθε σχεδόν αρχιτεκτονική επιθυμία, είναι μερικοί απ' τους λόγους της επιλογής αυτού του υλικού για την κύρια δομή και για άλλα στοιχεία ενός κτιρίου ή μιας άλλης κατασκευής.

Ασφαλείς και ανθεκτικές χαλύβδινες κατασκευές εξασφαλίζονται από καλά εκπαιδευμένους Μηχανικούς, με την παραγωγή που περιλαμβάνει διασφάλιση και έλεγχο ποιότητας. Μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρό ποσοστό συντήρησης μπορεί να είναι εγγυημένη με τη χρήση καλοσχεδιασμένων λεπτομερειών, με υψηλό προπαρασκευαστικό επίπεδο σε καλά εξοπλισμένα εργοστάσια παραγωγής, στελεχωμένα από ειδικευμένους υπαλλήλους και σύγχρονα συστήματα αντίστασης σε διάβρωση.

1.2. Η παραγωγή του χάλυβα

Καθώς οι μέθοδοι παραγωγής του χάλυβα έχουν βελτιωθεί από την 1^η χρονικά υιοθέτηση του ως δομικού υλικού, ο ρυθμός της βελτίωσης αυτής είναι καταγιστικός τις τελευταίες δεκαετίες. Από τα μέσα της δεκαετίας του '70, η παραγωγικότητα του χάλυβα αυξήθηκε από 60-100 κιλά/εργατοώρα σε περισσότερα από 250 κιλά/εργατοώρα στις περισσότερες από τις σύγχρονες εργοστασιακές εγκαταστάσεις. Αυτή η βελτίωση είχε σημαντική επίδραση στο σχετικό κόστος των υλικών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Διάγραμμα σχετικού κόστους υλικών, που καταδεικνύει τη σχετική μεταβολή στις τιμές μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος τα τελευταία χρόνια

Οι βελτιώσεις στη βασική παραγωγή, εναρμονίστηκαν με την επένδυση σε καλύτερα εργοστάσια εξέλασης. Σήμερα τέτοια μοντέρνα εργοστάσια μπορούν να παράξουν διατομές μεγάλης γκάμας, σχημάτων και μορφών με σχεδόν μηδενικές αποκλίσεις διαστάσεων, πολύ καλή τελική επιφάνεια και ομοιογενή πλήρως προδιαγεγραμμένη σύνθεση.

Αυτή η επανάσταση στις κατασκευαστικές τεχνικές έχει συνοδευτεί, και έχει πιθανώς καταστεί δυνατή, μέσω μιας σημαντικής αναδιάρθρωσης σε ολόκληρη τη βιομηχανία. Αξίζει να θυμηθούμε ότι η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα ιδρύθηκε το 1952 για να εξασφαλίσει την αναδιάρθρωση αυτών των κρίσιμων βιομηχανιών

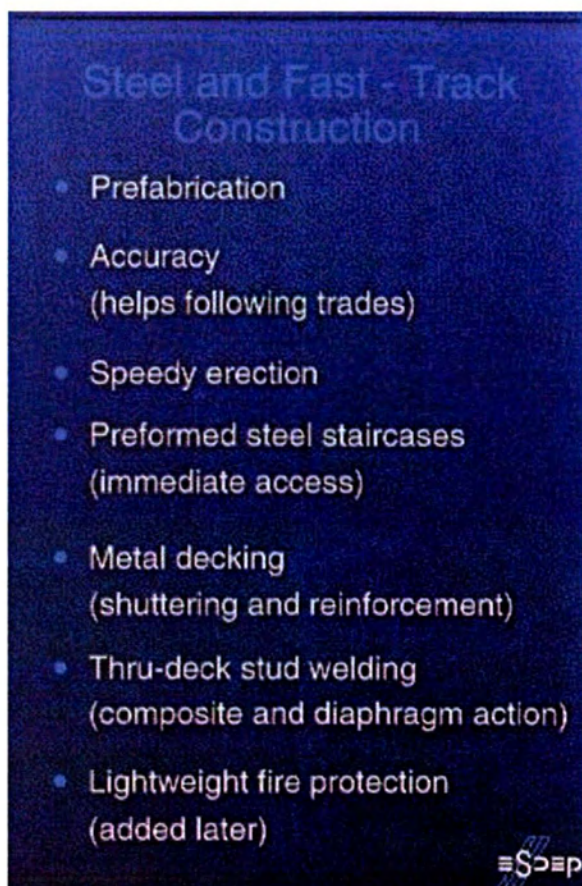
μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Υπήρξε μια δύσκολη και επίπονη διαδικασία και για τις δύο βιομηχανίες αλλά τελικά αναδύθηκε μια λιτή, κατάλληλη και σύγχρονη χαλυβουργία.

1.3. Τα πλεονεκτήματα του χάλυβα

- Ταχύτητα εκτέλεσης

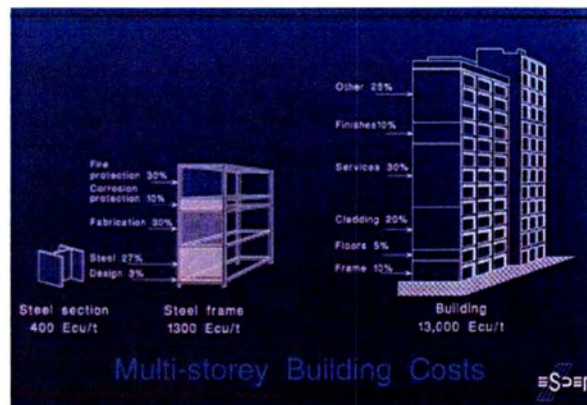
Υπάρχει μια αυξανόμενη πίεση σε όλα τα έργα Πολιτικού Μηχανικού για μείωση του χρόνου, που απαιτείται για την ολοκλήρωσή τους (δλδ. της ταχύτητας εκτέλεσης). Πουθενά δεν είχε πιο δραματική επίδραση στις μεθόδους εκτέλεσης απ' ό,τι στη βελτίωση και στην απλοποίηση ενός σύγχρονου σύνθετου κτιρίου. Η περισσότερη εκτέλεση γίνεται τώρα με βάση τη διοικητική σύμβαση, στην οποία οι συμβατικά διαδοχικές δραστηριότητες του σχεδιασμού, της εφαρμογής υποδομών, της εφαρμογής εποικοδομημάτων, της εφαρμογής τελειωμάτων επικαλύπτονται για να μειώσουν τη συμβατική προθεσμία. Ο εργολάβος γίνεται μέλος της ομάδας σχεδιασμού στα πρώτα στάδια. Σε πολλές περιπτώσεις ο πελάτης παίρνει μέρος στην υλοποίηση του προγράμματος, που διαιρείται σε ανεξάρτητα πακέτα εργασίας.

Ο δομικός χάλυβας - γρήγορος, ακριβής, προκατασκευασμένος - προσαρμόζεται φυσικά στη γρήγορη εκτέλεση, μέσω τεχνικών της Εικόνας 7.



Εικόνα 7: Δομικός χάλυβας σε ταχεία κατασκευή και ανέγερση

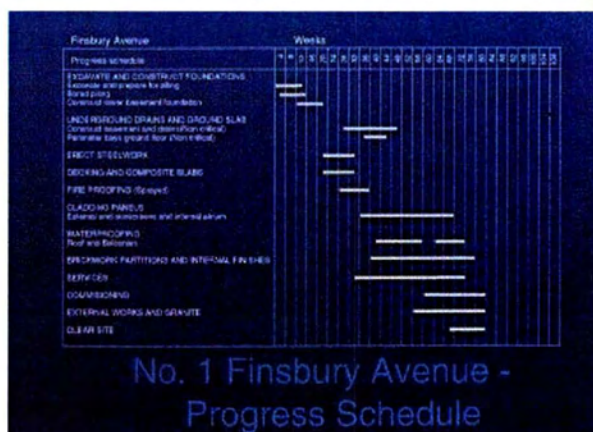
Παραδοσιακά, τα μεγαλύτερα εμπόδια στη χρήση του χάλυβα για την κατασκευή πολυώροφων πλαισίων ήταν οι συμπληρωματικές δαπάνες και ο χρόνος για την πυροπροστασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Ανάλυση του κόστους κατασκευής ενός πολυώροφου χάλυβδινου κτιρίου

Παρόλα αυτά η χρήση των νέων, χαμηλού κόστους και ελαφριών σανίδων και συστημάτων ψεκασμού κατά ένα μεγάλο μέρος έχουν αντικαταστήσει το επιτόπου σκυρόδεμα για πυροπροστασία. Οι δαπάνες πυροπροστασίας με αυτό τον τρόπο έχουν μειωθεί στο μισό και οι επιπτώσεις στα προγράμματα εκτέλεσης έχουν μειωθεί ουσιαστικά.

Σε πολλές περιπτώσεις τα οφέλη της γρηγορότερης ταχύτητας της εκτέλεσης μπορούν να μεταφραστούν στην ουσιαστική οικονομική αποταμίευση για τον πελάτη. Αυτή η αποταμίευση είναι ιδιαίτερα σημαντική στις καταστάσεις όπου έχει κάνει την ουσιαστική αρχική επένδυση στην απόκτηση της τοποθεσίας. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει πρόγραμμα εκτέλεσης που επιτεύχθηκε στο έργο λεωφόρων Finsbury στο Λονδίνο. Αυτό το πρόγραμμα παρουσιάζει μια αποταμίευση 40 εβδομάδων πέρα από τη συμβατική κατασκευή στο επιτόπιο σκυρόδεμα. Ενώ για ένα τυπικό κτίριο οι δαπάνες των δύο λύσεων είναι παρόμοιες, περίπου σε 900 ecu/m² σε τιμές του 1990, οι μελέτες των δαπανών ανάπτυξης του Λονδίνου προτείνουν τη σχετική με το χρόνο αποταμίευση μέχρι 7 εκατομμυρίων ECU την εβδομάδα (για ολόκληρο το κτίριο) για μια πρώιμη ολοκλήρωση σε μια επιπλέον αγορά ενοικίων, μειώνοντας ενδεχομένως τις συνολικές δαπάνες της κατασκευής.

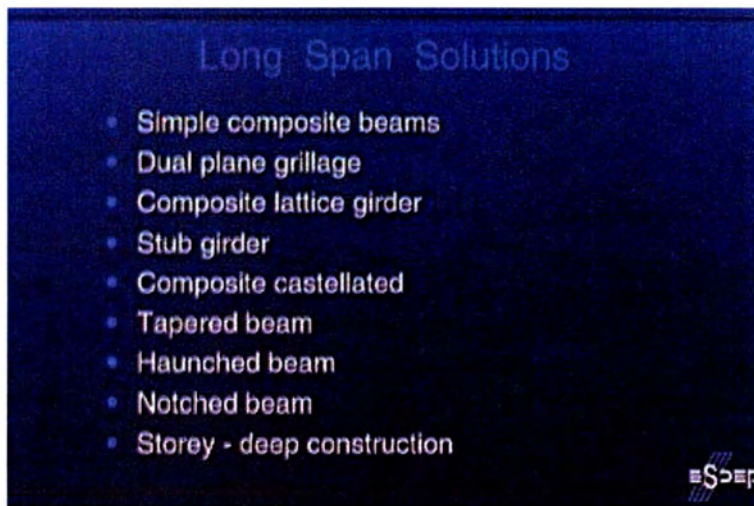


Εικόνα 9: Πρόγραμμα κατασκευής της No. 1 λεωφόρου Finsbury (Λονδίνο, 1985)

- Ελαφρότητα, δυσκαμψία και αντοχή

Οι καλύβδινες κατασκευές είναι γενικά ελαφρύτερες από αυτές με άλλα υλικά. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις αυτό το χαμηλότερο βάρος οδηγεί στο χαμηλότερο κόστος για τα θεμέλια ιδιαίτερα για τις περιοχές με ανεπαρκές έδαφος. Τα μικρότερα υποστυλώματα αυξάνουν την αποτελεσματική χρήση των πατωμάτων και όπου απαιτούνται μεγαλύτερες αποστάσεις ανάμεσα στα δύο στηρίγματα, η οικονομία που προκύπτει με τη χρήση του χάλυβα αυξάνεται αισθητά. Για μεγάλες αποστάσεις στηλών στα κτήρια, ο χάλυβας είναι η μόνη εφικτή λύση.

Για πολυώροφα κτήρια γραφείων, διάφορες νέες προσεγγίσεις σχεδιασμού εισάγονται για να επιτευχθούν μεγάλα καθαρά ανοίγματα μεταξύ στύλων, των 12-18m ή και περισσότερο, σύμφωνα με τις Εικόνες 10 και 11. Αυτές οι προσεγγίσεις περιλαμβάνουν επίσης διατάξεις σύμμικτων φερουσών δοκών και δικτυωτές δοκών στήριξης, παράλληλες δοκούς, μεταβλητής διατομής δοκούς, ενισχυμένες δοκούς, ή δοκούς με εγκοπές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 10: Συστήματα δαπέδων μεγάλων ανοιγμάτων για κτήρια γραφείων - εναλλακτικές λύσεις



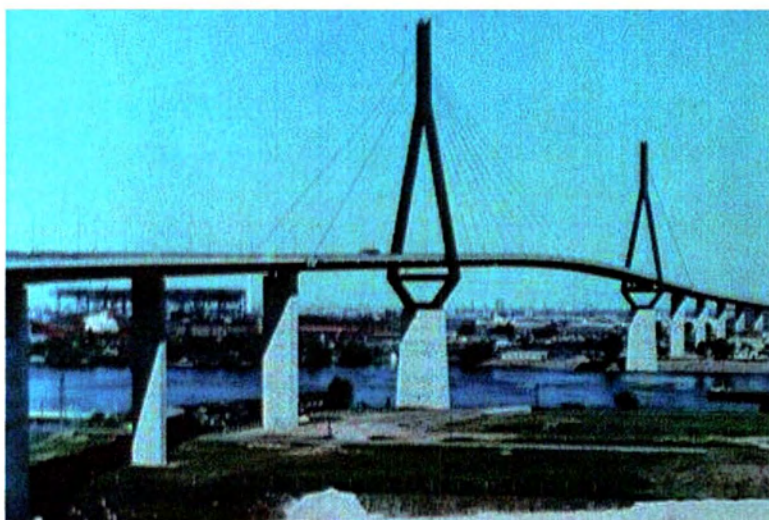
Εικόνα 11: Συστήματα δαπέδων μεγάλων ανοιγμάτων για κτήρια γραφείων - 1



Εικόνα 12: Συστήματα δαπέδων μεγάλων ανοιγμάτων για κτίρια γραφείων - 2

Αυτά οι τεχνικές μπορούν να μπορούν να αυξήσουν τα ελεύθερα ανοίγματα στα κτίρια των γραφείων, με μόνο μια μικρή αύξηση, σε πολλές περιπτώσεις λιγότερο από 15%, στις δαπάνες του φέροντα οργανισμού. Δεδομένου ότι αυτές είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό (< 20%) του συνολικού κόστους, η καθαρή απόσταση των γραφείων μπορεί να επιτευχθεί με λιγότερο από το 3% του συνολικού κόστους.. Αυτό το κόστος είναι ένα πολύ μικρό τίμημα για να πληρώσεις για την αυξανόμενη ευκαμψία στη χρήση που καταλήγει. Οι δραστηριότητες στα γραφεία αλλάζουν γρήγορα ακολουθώντας το μεγάλο εύρος της αλλαγής των πληροφοριών της τεχνολογίας. Μπορεί κανείς μόνο να εικάσει τις απαιτήσεις σε 30 χρόνια από τώρα, πόσο μάλλον στη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Ο καθαρός, χωρίς κολώνες χώρος προσφέρει την καλύτερη ευκαιρία ώστε να μπορείς να προσαρμόσεις ένα κτίριο σ' αυτές τις απαιτήσεις.

Για τις γέφυρες, η αντοχή και η ανθεκτικότητα του χάλυβα οδήγησαν στην κομψή λύση των κρεμαστών και των καλωδιωτών γεφυρών, και σε τρομερές αισθητικής μοντέρνες δικτυωτές γέφυρες, Εικόνες 13-15. Παρόμοιες λύσεις έχουν οδηγήσει στην κατασκευή εντυπωσιακών στεγών μεγάλων ανοιγμάτων.



Εικόνα 13: Καλωδιωτή γέφυρα Kohlbrand, Αμβούργο, Γερμανία

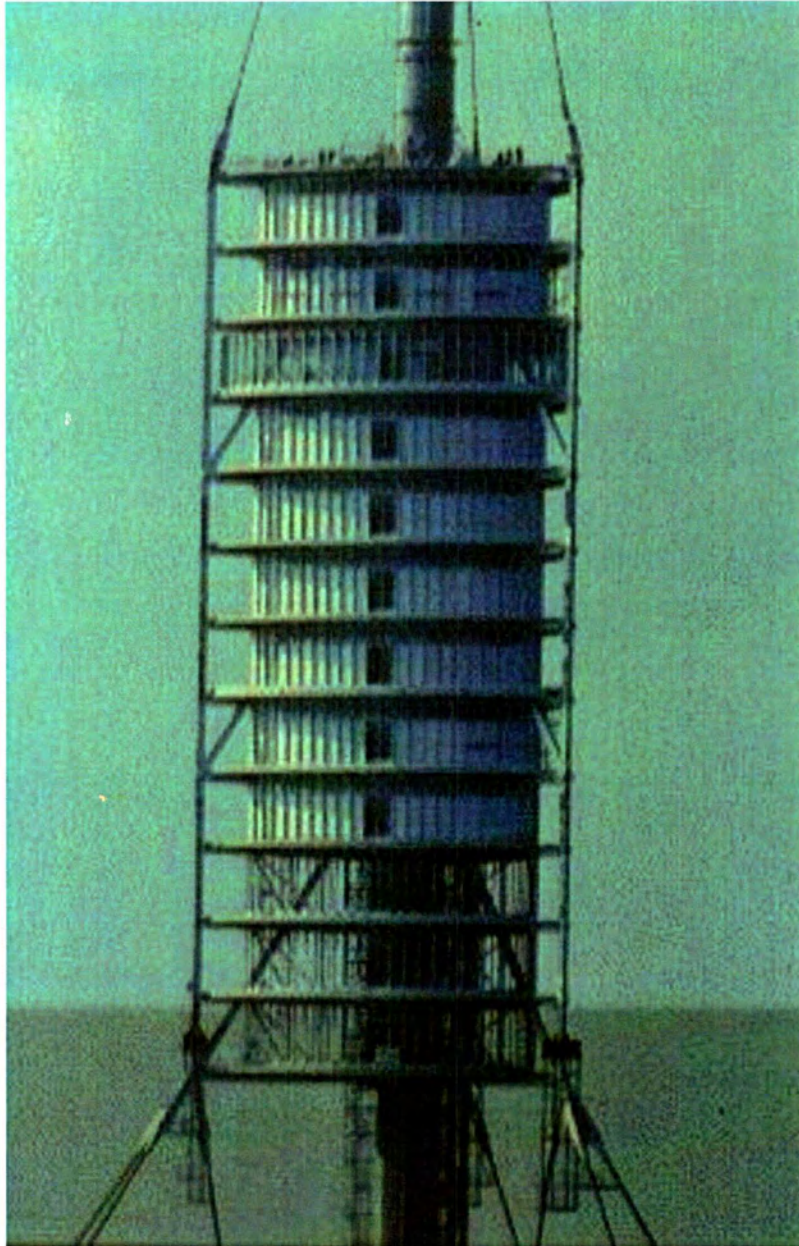


Εικόνα 14: Κρεμαστή γέφυρα Humber, Ηνωμένο Βασίλειο (1982)



Εικόνα 15: Δικτυωτή γέφυρα Tonegawa, Saitama, Ιαπωνία

Σε άλλες κατασκευές, οι τριγωνικές δομές στο χώρο έχουν εξευγενιστεί και γίνει ελαφρότερες, σε σημείο που προσομοιάζουν ένα γλυπτό, όπως π.χ. στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Ιστός τηλεπικοινωνιών, Βαρκελώνη, Ισπανία

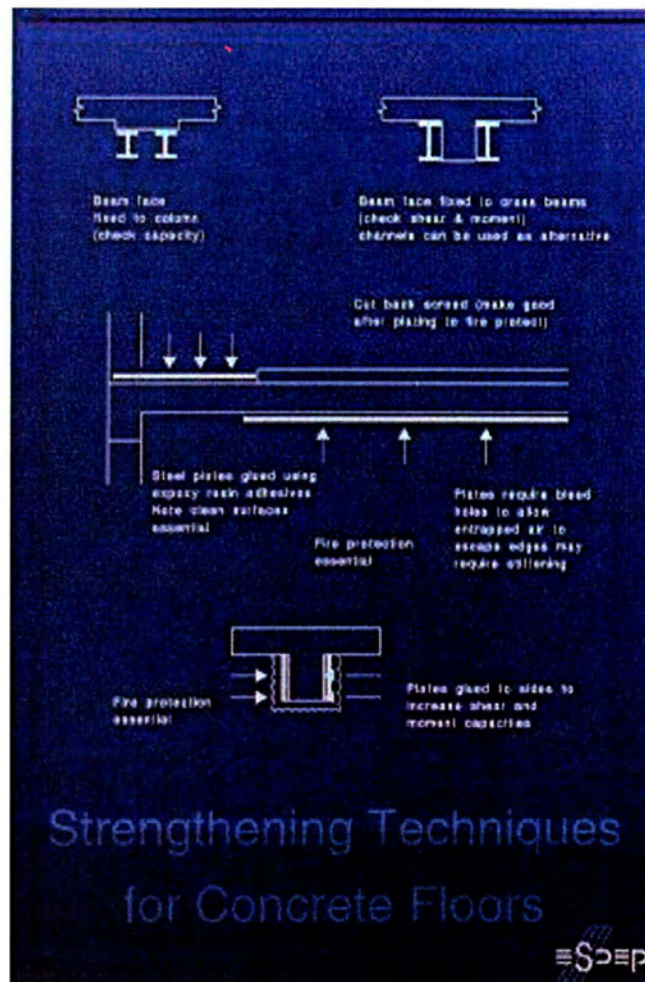
- **Η προσαρμοστικότητα της χρήσης χαλύβδινων πλαισίων για ανακαίνιση**

Ο δομικός χάλυβας παρέχει μέγιστη προσαρμοστικότητα στις αλλαγές της χρήσης ενός κτιρίου, επειδή οι δομικές αλλαγές μπορούν να πραγματοποιηθούν με σχετική ευκολία. Όπου απαιτούνται πρόσθετα μέλη, οι συνδέσεις μπορούν να γίνουν στο υπάρχον πλαίσιο με την ελάχιστη διαταραχή και το κόστος. Γι' αυτό το λόγο τα χαλύβδινα πλαίσια έχουν γίνει τόσο δημοφιλή. Η σημασία της προσαρμοστικότητας σε λειτουργία καταδεικνύεται επίσης με την παρατήρηση της μεγάλης διαφοροποίησης στη διάρκεια ζωής των συστατικών ενός σύγχρονου κτιρίου γραφείων, ως Εικόνα 17. Είναι πιθανό ότι κάποιο συστατικό να χρειαστεί ανακαίνιση ή διαφοροποίηση, λόγω αλλαγών σε τεχνολογία και απαιτούμενο εξοπλισμό στα γραφεία.

Design Life	
Building frame	60 years
Envelope	30 years
Services	15 years
Interior	5 years
Communications	2 years

Εικόνα 17: Διαφορετικές διάρκειες ζωής των συστατικών ενός κτιρίου

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της προσαρμοστικότητας είναι ιδιαίτερης σημασίας στις συμβάσεις αποκατάστασης, είτε είναι μια περίπτωση ενίσχυσης της υπάρχουσας δομής, είτε πλήρης ανακατασκευή πίσω από τις διατηρημένες προσόψεις, σύμφωνα με τις Εικόνες 18 και 19 αντίστοιχα.



Εικόνα 18: Ενίσχυση υφιστάμενων πατωμάτων από σκυρόδεμα



Εικόνα 19: Ανακατασκευή πίσω από διατηρημένες προσόψεις

Η προσαρμοστικότητα του χάλυβα βρίσκει επίσης μεγάλη εφαρμογή στη γεφυροποιία. Οι κύριοι πυλώνες της κρεμαστής γέφυρας Severn (Εικόνα 20) ενισχύθηκαν για να αναλαμβάνουν το διπλάσιο φορτίο λόγω κίνησης, μιας και αρχικά η κατασκευή είχε σχεδιαστεί 40 χρόνια πριν.



Εικόνα 20: Η γέφυρα Severn μετά την ολοκλήρωση της κύριας ενίσχυσης

- **Ποιότητα**

Τα πρότυπα εκμίσθωσης στην κατασκευή έχουν αλλάξει σημαντικά πρόσφατα. Η εργασία επί τόπου εκτελείται τώρα μόνο από λίγους υπεργολάβους που εκτελούν μόνο εργασία. Αυτές οι επιχειρήσεις έχουν μικρή μακροπρόθεσμη συμμετοχή στον τομέα της κατασκευής και δεν επενδύουν στην κατάρτιση του προσωπικού τους. Η προσπάθεια για περαιτέρω οικονομία έχει μειώσει το γενικό επίπεδο επίβλεψης επί τόπου εργασιών.

Σ' αυτό το περιβάλλον είναι δύσκολο να διατηρηθεί η ποιότητα της επιτόπου κατασκευής. Παρόλα αυτά, ένα πλαίσιο από χάλυβα, είναι ένα ακριβές εργοστασιακό προϊόν που παράγεται από ένα σταθερό, καλά εκπαιδευμένο εργατικό δυναμικό. Μόνο η ανέγερση των προκατασκευασμένων μελών αφήνεται επί τόπου - μια διαδικασία που ελέγχεται εύκολα.

1.4. Το μέλλον για το χάλυβα: Περαιτέρω εξελίξεις

Το προηγούμενο μέρος δόθηκε έμφαση στα υπάρχοντα πλεονεκτήματα του χάλυβα και στον τρόπο με τον οποίο οι πρόσφατες εξελίξεις ενισχύουν αυτά τα πλεονεκτήματα. Είναι αξιοσημείωτο ότι ένα υλικό που είναι 100 ετών να παραμείνει ακόμα ικανό για τέτοια σημαντική ανάπτυξη. Ακόμα πιο αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το εύρος της ανάπτυξης σε πολλούς τομείς φαίνεται να αυξάνεται. Οι εξελίξεις αναφέρονται στο μεγαλύτερο μέρος των αλλαγών των απαιτήσεων της κοινωνίας του δομημένου περιβάλλοντος της και στη μεγαλύτερη προθυμία μιας όλο και περισσότερο ανταγωνιστικής εμπορικής βιομηχανίας να ανταποκριθεί στις ανάγκες της κοινωνίας και των πελατών της.

Είναι πιθανό να σκεφτεί κανείς μερικές από τις κατευθύνσεις που η περαιτέρω ανάπτυξη μπορεί να πάρει:

- Οι μέθοδοι παραγωγής που εγγυώνται και ελέγχουν την ποιότητα θα έχουν φθηνότερα και καλύτερα αποτελέσματα με λιγότερες χρονοβόρες επισκευές.
- Ένας αυξανόμενος ρόλος για τους υπολογιστές θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη λεπτότητα του σχεδιασμού και για να ελαχιστοποιηθούν οι δαπάνες επεξεργασίας και κατασκευής (για τις καθημερινές δομές) και για να επιτραπεί η πιο τολμηρή χρήση του χάλυβα (για τις μνημειακές δομές).
- Εξελίξεις στην παραγωγή του χάλυβα. Αυτή τη στιγμή οι υψηλής αντοχής χάλυβες ($f_y > 500 \text{ N/mm}^2$) φέρουν ένα επιπλέον ποσό στην τιμή. Παρόλα αυτά περαιτέρω εξελίξεις στην ελεγχόμενη με υπολογιστή Θέρμο-μηχανική επεξεργασία, είναι πιθανό να μειώσουν αυτό το ποσό σημαντικά. Όσο η τιμή του χάλυβα υψηλής αντοχής πέφτει, τόσο οι σχεδιαστές θα γίνονται πιο τολμηροί στη χρησιμοποίηση της πλήρους δυνατότητας τους. Αυτό θα βάλει πλήρως σε δοκιμασία την εφευρετικότητα των Μηχανικών επειδή η δυσκαμψία του χάλυβα (μέτρο ελαστικότητας) δεν ποικίλει με την αντοχή. Οι δομικές μορφές με τη μεγαλύτερη έμφυτη δυσκαμψία θα πρέπει να αναπτυχθούν, αν αυτές οι υψηλότερες αντοχές πρόκειται να επιστρατευθούν.

- Μεγαλύτερο εύρος διατομών και προϊόντων. Οι σύγχρονες τεχνικές έλασης, και για τα θερμά και για τα ψυχρά προϊόντα, αυξάνονται στην ευελιξία της χρήσης. Κατά συνέπεια μια μεγαλύτερη ποικιλία των διατομών θα γίνει διαθέσιμη στο σχεδιαστή, ένα επιπλέον κίνητρο γι' αυτόν για τη χρήση της εφευρετικότητας του για τη μεγαλύτερη δομική αποδοτικότητα.
- Αντίσταση σε πυρκαγιά και διάβρωση. Δεδομένου ότι οι τεχνικές για την αντίσταση σε πυρκαγιά και τη διάβρωση εξελίσσονται περαιτέρω, οι σχεδιαστές θα έχουν μια μεγαλύτερη δυνατότητα να εκφράσουν με τη δουλειά από χάλυβα πιο κομψές και συναρπαστικές κατασκευές.
- Το περιβάλλον. Καθώς η κοινωνία δίνει περισσότερη σημασία σε περιβαλλοντικά θέματα, οι απαιτήσεις της για κτίρια θα εξελιχθούν. Τα πρότυπα της μόνωσης θα αυξήσουν την απαίτηση μεγαλύτερης προσοχής στις λεπτομέρειες της κατασκευής. Θα υπάρχει αυξανόμενη χρήση αποσυνδέσιμων, ανακυκλώσιμων κτιρίων και των συστατικών, για τα οποία ο χάλυβας είναι κατεξοχήν κατάλληλος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Απλών και Ειδικών

Βιομηχανικών Κτιρίων καθώς και Πολυώροφων Κτιρίων

2.1. Τύποι Βιομηχανικών κτιρίων

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τύπων κτιρίων, που κυμαίνεται από σημαντικές κατασκευές, όπως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και εγκαταστάσεις ειδικής επεξεργασίας, μέχρι μικρές μονάδες παραγωγής τροφίμων υψηλής ποιότητας.

Ο πιο κοινός τύπος είναι η απλή ορθογωνικής κάτοψης κατασκευή, τυπικά μονώροφη, η οποία παρέχει έναν αδιάβροχο και περιβαλλοντικά άνετο χώρο για την εκτέλεση της παραγωγής ή της αποθήκευσης. Το αρχικό κόστος είναι πάντα μια πρωταρχική μέριμνα, αλλά στα πλαίσια ενός λογικού προϋπολογισμού ένα κτίριο καλής εμφάνισης με μέτριες απαιτήσεις συντήρησης μπορεί να επιτευχθεί. Ενώ η ευκολία της επέκτασης και η ευελιξία είναι επιθυμητή, το αρχικό κόστος συνήθως περιορίζει τις προβλέψεις που μπορούν να περιληφθούν χρήσιμα στο σχεδιασμό για αυτές τις πιθανές απαιτήσεις. Αν και η αποταμίευση στο κόστος των συγκεκριμένων μελλοντικών τροποποιήσεων μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες προβλέψεις, οι αλλαγές στις κατασκευαστικές διαδικασίες ή στη χρήση της οικοδόμησης μπορούν να ποικίλουν στις τροποποιήσεις που απαιτούνται.

2.2. Δομικός χάλυβας για βιομηχανικά κτίρια

Συγκρινόμενος με άλλα υλικά, ειδικά με το οπλισμένο ή το προεντεταμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η μεγάλη αναλογία αντοχής-βάρους και η μεγάλη αντοχή εφελκυσμού και θλίψης επιτρέπουν στα κτίρια από χάλυβα να έχουν σχετικά ελαφριά κατασκευή. Ο χάλυβας είναι επομένως το πιο κατάλληλο υλικό για στέγες μεγάλου ανοίγματος, όπου το ίδιο βάρος είναι πρωτίστης σημασίας. Τα κτίρια από χάλυβα μπορούν ακόμα να τροποποιηθούν για επέκταση ή για αλλαγή στη χρήση λόγω της ευκολίας με την οποία η διατομές από χάλυβα μπορούν να συνδεθούν με τον υφιστάμενο φέροντα οργανισμό.

Όχι μόνο είναι ο χάλυβας ένα ευπροσάρμοστο υλικό για την κατασκευή ενός κτιρίου, αλλά έχει επινοηθεί και μια μεγάλη ποικιλία επικαλύψεων, χρησιμοποιώντας την αντοχή που αναπτύσσεται διπλώνοντας λεπτά φύλλα σε επιθυμητά προφίλ. Μονωμένα συστήματα επικάλυψης με ειδικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται τώρα ευρέως για τα υλικά της κατασκευής της στέγης και την πλαγιοκάλυψη. Έχουν καλή εμφάνιση και διάρκεια, και είναι σε θέση να τοποθετηθούν γρήγορα στη θέση που προβλέπεται.

Ένα χαλύβδινο δόμημα, και ειδικά ένα βιομηχανικό κτίριο, ανεγείρεται και επικαλύπτεται γρήγορα, παρέχοντας ένα αδιάβροχο περίβλημα, που επιτρέπει την κατασκευή πατωμάτων, τις εσωτερικές εγκαταστάσεις και τα κάθε είδους τελειώματα να προχωρήσουν σε ένα πρώιμο στάδιο. Καθώς το πρόγραμμα υλοποίησης είναι πάντα συνδεδεμένο με την πρώιμη ημερομηνία παράδοσης, που έχει καθοριστεί από το

πρόγραμμα κατασκευής, ο χρόνος που κερδίζεται στην κατασκευή είναι συνήθως αρκετά πολύτιμος.

Σε ένα προστατευμένο από υγρασία κλειστό περιβάλλον ο χάλυβας δεν σκουριάζει, και η προστασία έναντι της διάβρωσης απαιτείται μόνο κατά την περίοδο ανέγερσης. Για άλλα περιβάλλοντα τα προστατευτικά συστήματα είναι διαθέσιμα, τα οποία, ανάλογα με το κόστος και την κατάλληλη συντήρηση, αποτρέπουν επαρκώς τη διάβρωση.

Τα μονώροφα βιομηχανικά κτίρια απαλλάσσονται συνήθως από τις δομικές απαιτήσεις πυροπροστασίας. Η διάδοση της πυρκαγιάς πέρα από το όριο του κτιρίου δεν πρέπει να συμβεί, καθώς σε τέτοια περίπτωση η κατασκευή θα καταρρεύσει. Αυτή η απαίτηση μπορεί να καλυφθεί από την πρόβλεψη ύπαρξης πυράντοχων τοίχων.

2.3. Τύποι ειδικών βιομηχανικών κτιρίων

Υπάρχουν δυο τύποι ειδικών βιομηχανικών κτιρίων - εκείνα που είναι ασυνήθιστης κατασκευής και εκείνα που σχεδιάζονται για ειδική βιομηχανία. Το κύριο χαρακτηριστικό τέτοιων κτιρίων είναι ότι σχεδιάζονται ειδικά για ένα συγκεκριμένο σκοπό ή μια διαδικασία, και είναι συνεπώς ουσιαστικά αδύνατο να προσαρμοστούν σε ενός άλλου είδους χρήση.

Ανάμεσα στα κτίρια που σχεδιάζονται για ειδικές βιομηχανίες είναι βαριές εργασίες Μηχανικού, υπόστεγα αεροσκαφών, σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, εγκαταστάσεις ειδικής επεξεργασίας, μύλοι έλασης του χάλυβα και ζυθοποιίες. Κάθε ένα από αυτά τα ειδικά βιομηχανικά κτίρια έχει τις δικές του απαιτήσεις, πλην όμως υπάρχουν ορισμένες κοινές, όπως οι μέθοδοι ανύψωσης, η ανάγκη φυσικού φωτισμού, οι χώροι υγιεινής, η συντήρηση και η πυροπροστασία. Για λόγους συντομίας, αναφέρονται μερικές από αυτές:

- **Φωτισμός ημέρας (φυσικός φωτισμός)**

Μόνο λίγες βιομηχανίες έχουν ιδιαίτερες ανάγκες για φωτισμό ημέρας, καθώς οι βάρδιες εναλλάσσονται. Ο φωτισμός των πλευρικών τοίχων και της στέγης περιγράφεται σαν το ποσοστό της επιφάνειας κάτοψης, το 5% δίνει επαρκή φωτισμό για μαζική αποθήκευση, και το 20% για διαδικασίες εργασίας. Δεδομένου ότι ο τεχνητός φωτισμός υιοθετείται συχνά για να καθιερώσει ένα συνεχές υψηλό επίπεδο φωτισμού, ο φωτισμός της ημέρας μπορεί να παρασχεθεί για την οπτική άνεση ή για λόγους καθαρά αρχιτεκτονικούς.

- **Συντήρηση**

Κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή έχει περιορισμένη ζωή, η οποία μπορεί συχνά να επεκταθεί με κατάλληλη συντήρηση. Η συντήρηση είναι πιθανό να είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγων σε ειδικά κτίρια. Ο σχεδιασμός του κτιρίου πρέπει να επιτρέπει κατάλληλη πρόσβαση για τη συντήρηση που απαιτείται. Η συντήρηση της στέγης είναι ιδιαίτερα σημαντική.

- **Πυροπροστασία**

Λόγω των χαρακτηριστικών των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα σε ένα ειδικό κτίριο, μπορεί να απαιτηθούν εξαιρετικά μέτρα σε θέματα πρόληψης πυρκαγιάς και έκρηξης, και στην πυροπροστασία και τον περιορισμό βλαβών. Μπορεί να απαιτηθούν εγκαταστάσεις ψεκαστήρων εξαιρετικής χωρητικότητας, καθώς και μηχανισμοί έγχυσης διοξειδίου του άνθρακα.

Η έκρηξη σκόνης είναι ένας κίνδυνος στις διαδικασίες που βασίζονται στη μεταφορά των λεπτά διαχωρισμένων σκονών από τον μεταφορέα ή των αγωγό αέρα. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων μιας έκρηξης επιτυγχάνεται συχνά από στρατηγικά τοποθετημένα πάνελ εκτόνωσης. Οι εκρήξεις των αερίων μπορεί να είναι πολύ περισσότερο καταστροφικές και δύσκολες στον έλεγχο.

2.4. Μερικά παραδείγματα των ειδικών κτιρίων

1. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με βάση τον άνθρακα
2. Υπόστεγα συντήρησης αεροσκαφών
3. Εγκαταστάσεις παραγωγής γάλακτος σε σκόνη
4. Βιομηχανικά συγκροτήματα κτιρίων

2.5. Εισαγωγή στο σχεδιασμό πολυώροφων κτιρίων

Ένα πολυώροφο κτίριο πρέπει να ανθίσταται στην συνδυασμένη επιρροή των οριζόντιων και κατακόρυφων φορτίων και αποτελείται από θεμέλια, πλαίσια και πλάκες.

Το πλαίσιο περιλαμβάνει υποστυλώματα και δοκούς μαζί με οριζόντιους και κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας, οι οποίοι σταθεροποιούν το κτίριο με την αντίσταση τους στις οριζόντιες δράσεις (φορτία ανέμου και σεισμικά φορτία).

Οι πλάκες στηρίζονται σε δοκούς, έτσι ώστε τα κατακόρυφα φορτία να μεταφέρονται στα υποστυλώματα. Είτε κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε από σύμμικτες με πρότυπες διατομές φύλλων χάλυβα. Τα υποστυλώματα είναι συνήθως διατομής Η ή κοίλης διατομής θερμής έλασης. Η χρήση των κοίλων διατομών που γεμίζονται με σκυρόδεμα μπορεί να βελτίωση των αντίστασης τους στην πυρκαγιά. Οι δοκοί αποτελούνται συνήθως από Ι ή Η προφίλ. Εντούτοις, η χρήση των συγκολλημένων σύνθετων διατομών μπορεί να προσφέρει πιο λογικές λύσεις σε ορισμένες περιπτώσεις.

Τα συνήθη δομικά συστήματα ανήκουν συνήθως σε δυο κατηγορίες: τα συστήματα με πλαίσια που ανθίστανται σε ροπή και τα συστήματα με ενισχυμένα πλαίσια, με τα δεύτερα να είναι τα πιο απλά και άρα η πιο οικονομική λύση.

Στα ενισχυμένα πλαίσια, οι κατακόρυφες ενισχύσεις μορφώνονται από διαγώνια μέλη μέσα στο πλαίσιο του χάλυβα. Αυτές οι συνδέσεις μπορεί να έχουν διαφορετική μορφή (διαγώνιος συνδετήρας σχήματος Χ, V ή σχήματος ανεστραμμένου V, συμμετρικής ή μη συμμετρικής μορφής). Οι εναλλακτικές στους χαλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας

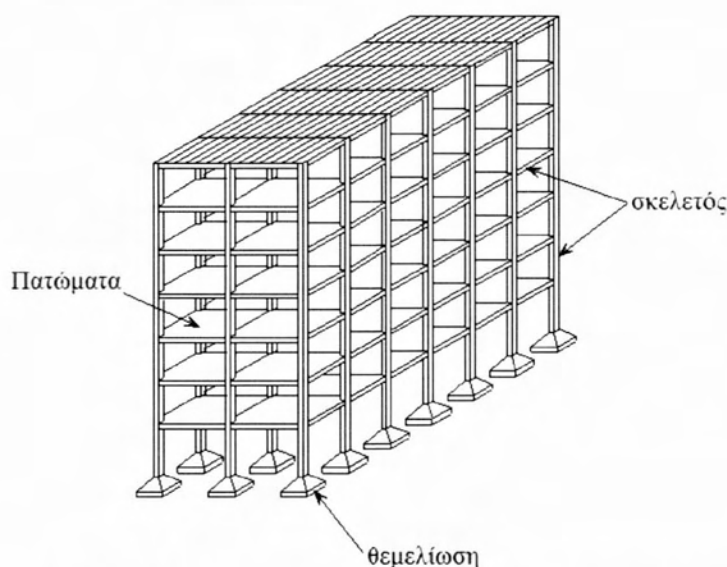
είναι τα διατμητικά τοιχώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα ή οι πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.6. Μόρφωση πολυώροφου χαλύβδινου κτιρίου

Ένα πολυώροφο κτίριο περιλαμβάνει τα ακόλουθα δομικά συστατικά:

- i. Θεμέλια
- ii. Σκελετός
- iii. Πατώματα

όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 21.



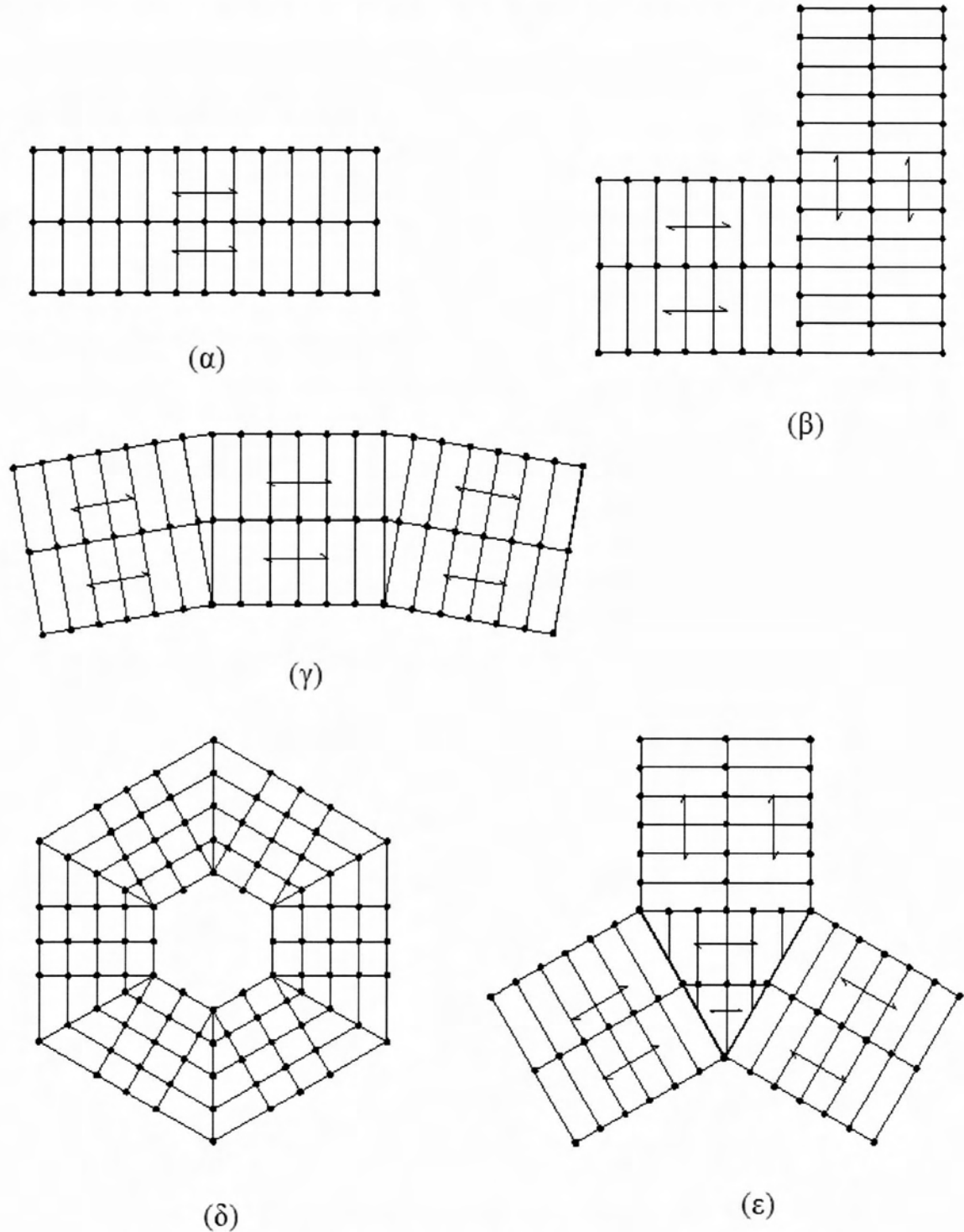
Εικόνα 21: Κύρια δομικά στοιχεία ενός πολυώροφου κτιρίου

Τα θεμέλια είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο τύπος του θεμελίου επιλέγεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και των συνθηκών αυτού. Ο χαλύβδινος σκελετός παρέχει την αντοχή της κατασκευής στα φορτία και στηρίζει τα δευτερεύοντα στοιχεία όπως η πλάκα του πατώματος και η επικάλυψη.

Όλα τα εξωτερικά φορτία, και τα οριζόντια και τα κατακόρυφα, μεταφέρονται στα θεμέλια με τη βοήθεια του σκελετού του χάλυβα. Αποτελείται κυρίως από κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα) και οριζόντια στοιχεία (δοκούς), τα οποία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με διαφορετικούς τρόπους. Σύμφωνα με το βαθμό δυσκαμψίας στις συνδέσεις δοκών- υποστυλωμάτων, το πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί ως 'δύσκαμπτο', 'ημι-άκαμπτο' ή αρθρωτό.

Οι πλάκες των πατωμάτων απαιτείται να ανθίστανται στα κατακόρυφα φορτία που δρουν απευθείας σ' αυτές και να μεταφέρουν αυτά τα φορτία στις δοκούς των πατωμάτων που τις στηρίζουν. Μεταφέρουν ακόμα τα οριζόντια φορτία στα σημεία του πλαισίου όπου υπάρχουν σύνδεσμοι δυσκαμψίας.

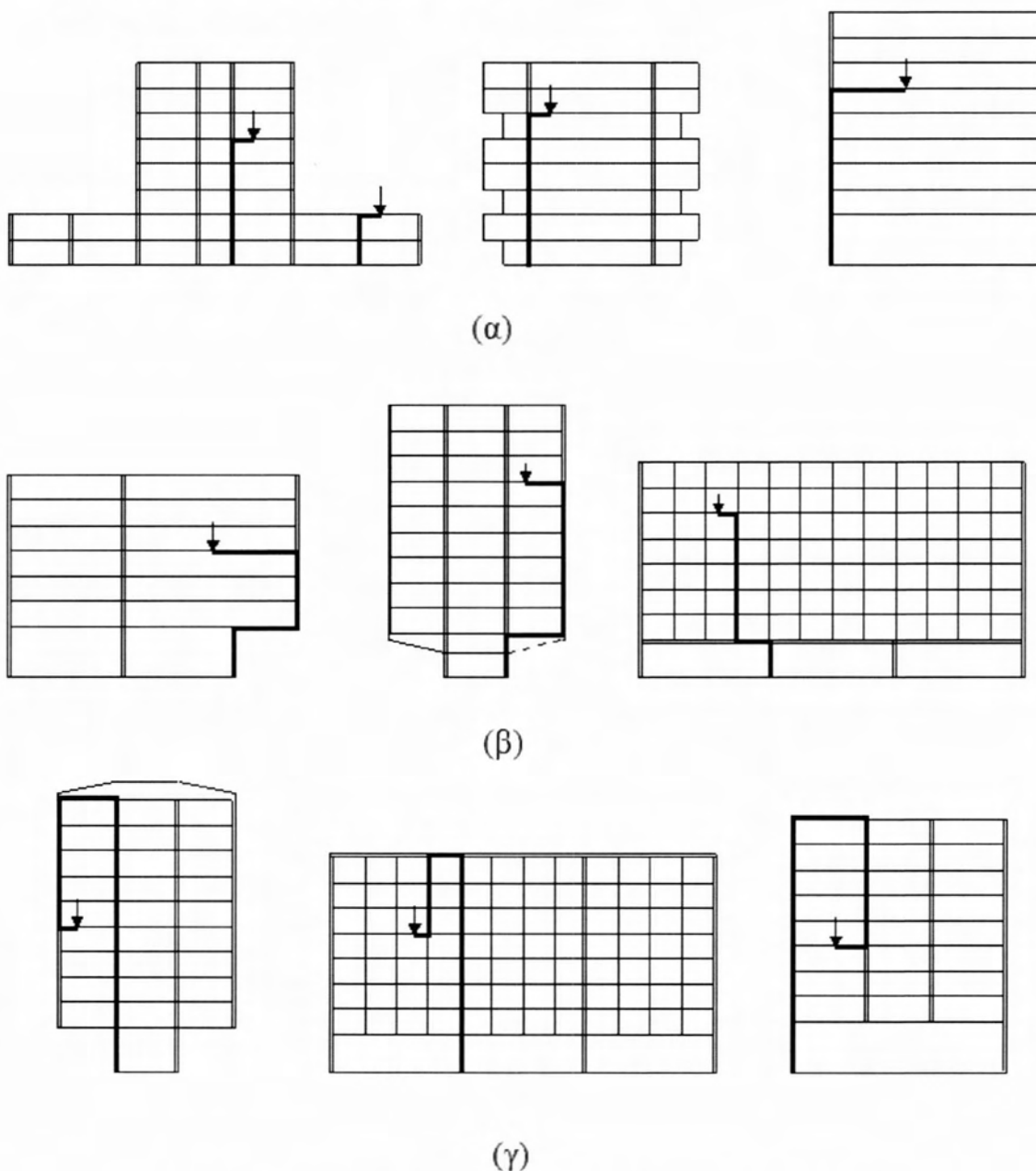
Η δομική ρύθμιση των πολυώροφων κτιρίων εμπνέεται συχνά από το σχήμα της κάτοψης των κτιρίων, που καταλήγει σε διαφορετικές λύσεις. Το σχέδιο μπορεί να είναι ορθογώνιο, σχήματος L, καμπυλόγραμμο, πολυγωνικό ή ίσως μπορεί να αποτελείται από ορθογωνικά και τριγωνικά στοιχεία. Αυτές οι ρυθμίσεις φαίνονται στην Εικόνα 22(α-ε).



Εικόνα 22: Διάφορες δομικές ρυθμίσεις ανάλογα με το σχήμα της κάτοψης

2.7. Υποστυλώματα πολυώροφου κτιρίου

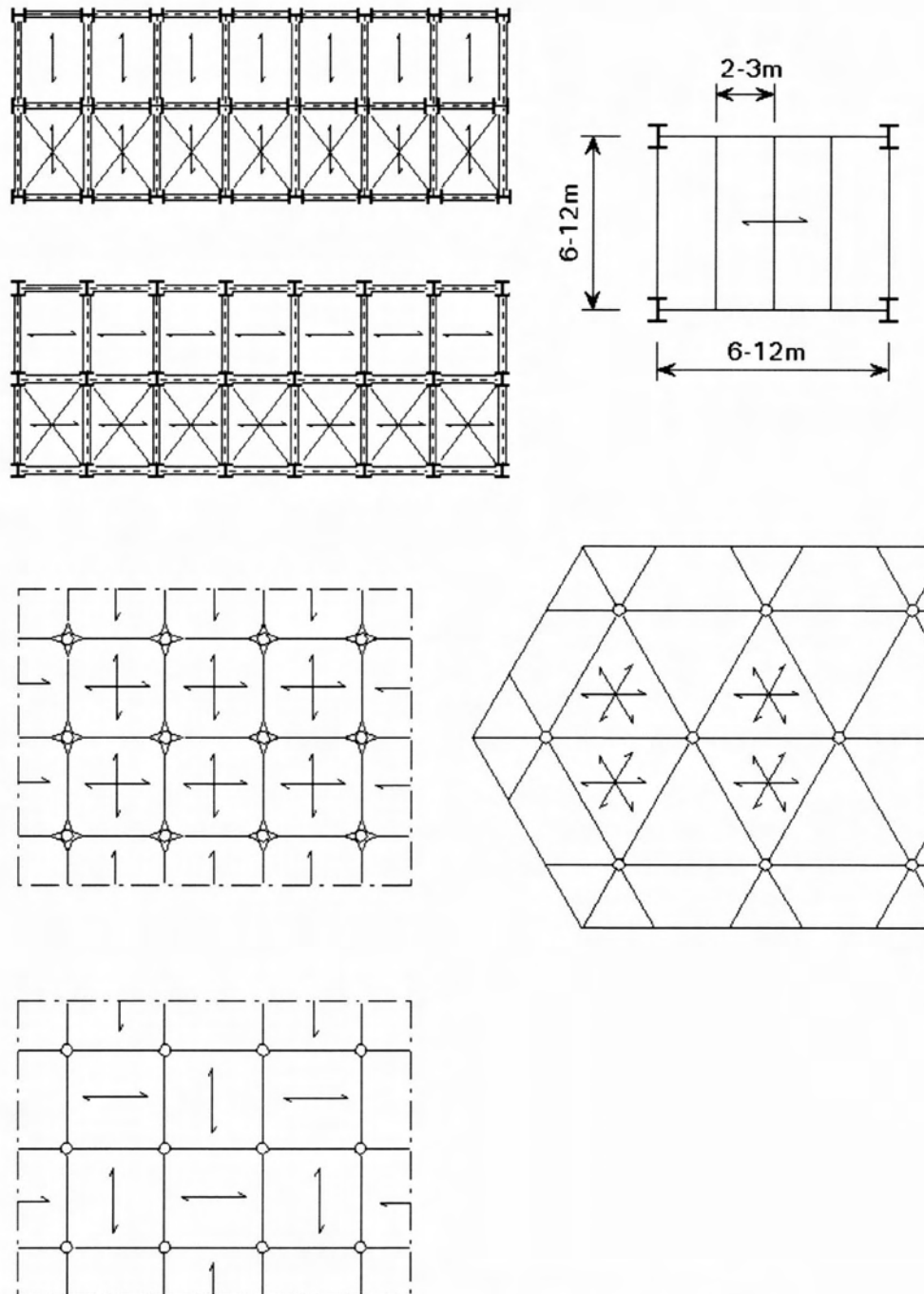
Τα υποστυλώματα είναι εκείνα τα δομικά στοιχεία, τα οποία μεταφέρουν όλα τα κατακόρυφα φορτία από τα πατώματα στις θεμελιώσεις. Ο τρόπος της μεταφοράς του κατακόρυφου φορτίου σχετίζονται με το δομικό σύστημα που χρησιμοποιείται στο σκελετό, σύμφωνα και με τα περιεχόμενα της Εικόνας 23.



Εικόνα 23: Διάφορες μέθοδοι μεταφοράς κατακόρυφων δυνάμεων

Η θέση των υποστυλωμάτων στη κάτοψη κατευθύνεται από το δομικό σχεδιάγραμμα. Οι πιο κοινές ρυθμίσεις του πλέγματος είναι τετράγωνα, ορθογώνια, ή περιστασιακά τριγωνικά, σύμφωνα με επιλογή του γενικού δομικού συστήματος. Η απόσταση των υποστυλωμάτων βασίζεται στην αντοχή σε φόρτιση των δοκών και των

δομών των πατωμάτων. Μπορεί να ποικίλει από 3 έως 20m, αλλά τυπικά κυμαίνεται από 6 έως 10m, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Διάφορες θέσεις υποστυλωμάτων

Η μεταφορά του φορτίου από τα πατώματα στα υποστυλώματα μπορεί να συμβεί απευθείας από τις δοκούς των πατωμάτων στα υποστυλώματα ή μπορεί να είναι έμμεση. Η έμμεση μεταφορά περιλαμβάνει τη χρήση μεγάλων δοκών 'μεταφοράς' οι οποίες αντέχουν όλα τα φορτία που μεταφέρονται από τα υπερκείμενα υποστυλώματα.

Η επιλογή της θέσης και της απόστασης των υποστυλωμάτων εξαρτάται από το δομικό σύστημα, το οποίο πρέπει να εναρμονίζει τις λειτουργικές και οικονομικές απαιτήσεις.

Οι διατομές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τα υποστυλώματα μπορούν να διαιρεθούν σε:

- ανοιχτές διατομές
- κοίλες διατομές

Οι ανοιχτές διατομές είναι βασικά τυπικά I και H προφίλ θερμής έλασης. Οι διατομές διπλού-ταυ μπορούν επίσης να ενισχυθούν με τη συγκόλληση. Οι διατομές μπορούν να δημιουργηθούν από συγκολλημένα προφίλ L, ελάσματα και προφίλ T.

Οι κοίλες διατομές είναι κυκλικής, τετράγωνης ή ορθογώνιας διατομής. Μπορούν ακόμα να κατασκευαστούν από ελάσματα ή προφίλ διπλού-ταυ με συγκόλληση. Οι κυκλικές και τετράγωνες διατομές έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν την ίδια αντοχή στις δυο κύριες διευθύνσεις, επιτρέποντας να επιτευχθούν οι ελάχιστες διαστάσεις. Ορισμένες φορές οι κοίλες διατομές γεμίζονται με σκυρόδεμα, δίνοντας μια αύξηση στην αντοχή και, την ίδια στιγμή, επιτυγχάνοντας σημαντική αντίσταση στην πυρκαγιά. Εντούτοις οι συνδέσεις δοκών- υποστυλωμάτων είναι πιο πολύπλοκες απ' ό,τι ανάμεσα στις διατομές I.

2.8. Δοκοί πολυώροφου κτιρίου

Οι δοκοί στηρίζουν τα στοιχεία των πατωμάτων και μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία στα υποστυλώματα. Σε ένα τυπικό ορθογώνιο πλαίσιο κτιρίου οι δοκοί περιλαμβάνουν τα οριζόντια μέρη το οποία εκτείνονται ανάμεσα στα παρακείμενα υποστυλώματα ενώ δευτερεύουσες δοκοί μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά της φόρτισης των πατωμάτων στις κύριες (πρωτεύουσες) δοκούς.

Στα πολυώροφα κτίρια τα πιο κοινά σχήματα των διατομών για τις δοκούς είναι τα σχήματα I ή H θερμής έλασης με ύψος που ποικίλει από 80 έως 600mm. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατομές C (είτε μονοί είτε διπλοί). Όπου είναι απαραίτητο ένα μεγαλύτερο ύψος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνθετες διατομές. Οι διατομές που κατασκευάζονται με συγκόλληση μπορούν να έχουν διπλά συμμετρικό ή μη συμμετρικό σχήμα, με το τελευταίο να είναι πιο επωφελές για σύνθετες διατομές σκυροδέματος-χάλυβα. Συνδυάζοντας ελάσματα ή/και προφίλ, μπορούν να κατασκευαστούν ή κυβωτοειδείς ή ανοιχτές διατομές.

Ορισμένες φορές απαιτούνται ανοίγματα στους κορμούς των δοκών με σκοπό να επιτρέπουν το πέρασμα των οριζόντιων ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, όπως οι αγωγοί (για νερό και αέριο), καλώδια (για ηλεκτρισμό και τηλέφωνο), αεραγωγοί (για κλιματισμό) κλπ. Τα ανοίγματα μπορεί να είναι κυκλικά ή τετραγωνικά με κατάλληλες ενισχύσεις στο πέλμα. Μια άλλη λύση στο πρόβλημα δίνεται χρησιμοποιώντας οδοντωτές δοκούς.

Για τα κτίρια, η συνήθης διακύμανση της αναλογίας ανοίγματος προς ύψος είναι 15 με 30 με σκοπό να επιτευχθεί αποτελεσματικότερος σχεδιασμός.

Εκτός από την αντοχή, οι δοκοί πρέπει να παρέχουν επαρκή δυσκαμψία για την αποφυγή μεγάλων μετατοπίσεων που μπορεί να είναι ασύμβατες με μη - δομικά στοιχεία (όπως τα χωρίσματα).

Οι διατομές από χάλυβα μπορούν να εγκλειστούν μερικώς στο σκυρόδεμα γεμίζοντας ανάμεσα στα πέλατα των διατομών. Οι μερικώς εγκλειστές διατομές είναι ανθεκτικές στην πυρκαγιά χωρίς τη συμβατική πυροπροστασία. Για μεγαλύτερες περιόδους αντίστασης στην πυρκαγιά, απαιτούνται επιπρόσθετες ενισχυτικές ράβδοι.

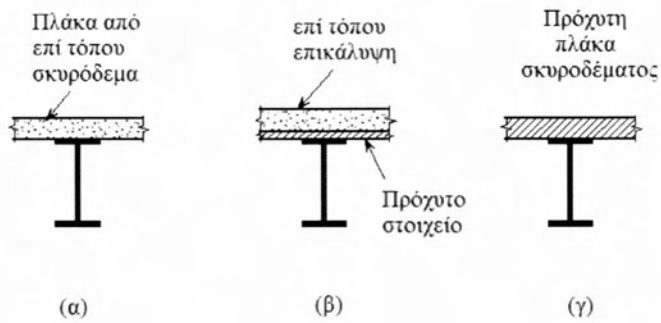
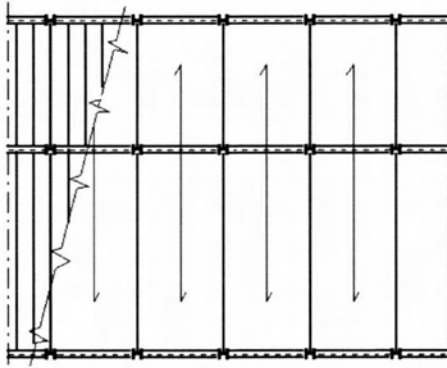
2.9. Πατώματα (δάπεδα) πολυώροφου κτιρίου

Τα πατώματα απαιτείται να ανθίστανται στα κατακόρυφα φορτία που δρουν απευθείας σ' αυτά. Αποτελούνται συνήθως από πλάκες, οι οποίες στηρίζονται σε δευτερεύοντες δοκούς από χάλυβα. Το διάστημα των δοκών στήριξης πρέπει να είναι συμβατό με την αντοχή των πλακών των πατωμάτων. Οι πλάκες των πατωμάτων μπορεί να είναι κατασκευασμένες από σκυρόδεμα που έχει καλουπωθεί από πριν, σκυρόδεμα επί τόπου παρασκευής ή σύνθετες πλάκες που χρησιμοποιώντας χαλύβδινο υλικό επίστρωσης. Διάφορες επιλογές είναι διαθέσιμες:

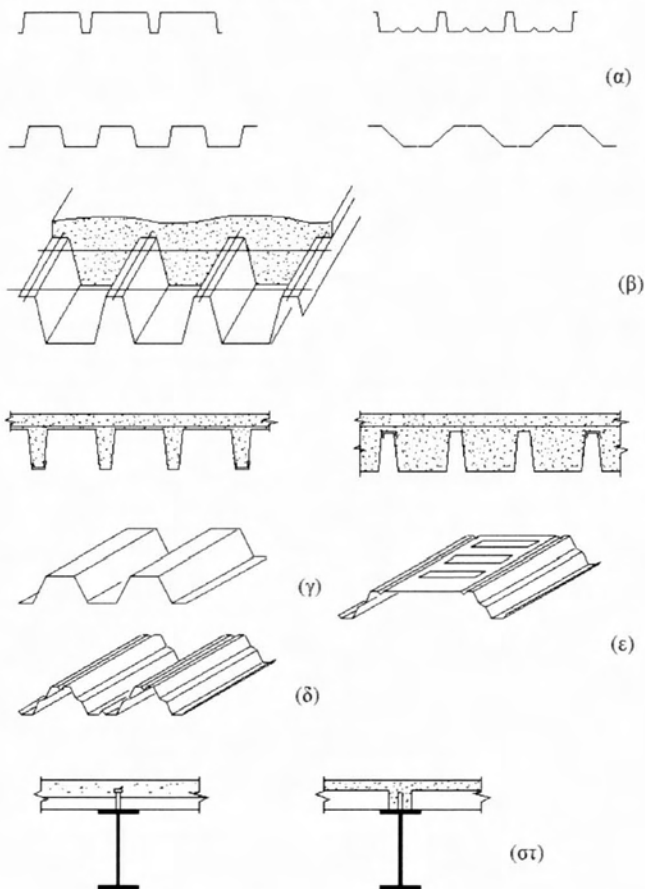
- συμβατικό σκυρόδεμα επί τόπου παρασκευής σε προσωρινό ξυλότυπο (Εικόνα 25α)
- λεπτά προ-καλουπωμένα στοιχεία (40-50mm παχιά) με ένα επί τόπου παρασκευής δομικό κάλυμμα από σκυρόδεμα (Εικόνα 25β)
- παχύτερα προ-καλουπωμένα στοιχεία από σκυρόδεμα που δεν απαιτούν δομικό κάλυμμα (Εικόνα 25γ)
- επίστρωση από χαλυβδόφυλλα που δρα σαν μόνιμος ξυλότυπος (Εικόνα 26α)
- επίστρωση από χάλυβα με κατάλληλους συνδέσμους / εγκοπές ώστε να δρα υπάρχει σύμμικτη λειτουργία (Εικόνα 26β)

Τα τυπικά ανοίγματα για τις πλάκες από σκυρόδεμα είναι 4 με 7m, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για δευτερεύοντες δοκούς. Για σύμμικτες πλάκες υπάρχουν διάφορες μορφές χαλύβδινων επιστρώσεων (Εικόνα 26α). Ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την φέρουσα ικανότητα τους:

- προφίλ με επίπεδη τραπεζοειδή μορφή χωρίς ενισχύσεις με ύψος μέχρι 80 mm (Εικόνα 26γ)
- προφίλ τραπεζοειδούς μορφής με κατά μήκος ενισχύσεις τόσο στο κορμό όσο και στο πέλαμα, ύψους έως 100 mm (Εικόνα 26δ)
- προφίλ με κατά μήκος αλλά και εγκάρσιες ενισχύσεις με ύψος έως 220 mm (Εικόνα 26γ).



Εικόνα 25: Δάπεδο με χρήση πλάκας από σκυρόδεμα



Εικόνα 26: Διάφοροι τύποι χαλυβδόφυλλων

Τα ανοίγματα των δαπέδων ποικίλουν σε μήκος από 2 έως 4m στην πρώτη κατηγορία, από 3 έως 5m στη δεύτερη κατηγορία και από 5 έως 7m για την τρίτη κατηγορία. Οι δευτερεύουσες δοκοί των πατωμάτων μπορούν να αποφευχθούν στην τελευταία περίπτωση.

Τα επιτρεπτά ανοίγματα για τα χαλυβδόφυλλα επηρεάζονται από τις συνθήκες της εκτέλεσης, ιδιαίτερα εάν χρησιμοποιείται προσωρινή στήριξη.

Για την αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας των δοκών των πατωμάτων, μπορεί να επιτευχθεί ένα σύνθετο σύστημα χάλυβα-σκυροδέματος με τη βοήθεια των κατάλληλων στηριγμάτων που συγκολλούνται στην κορυφή του πέλματος (Εικόνα 26στ).

2.10. Ενισχύσεις μέσω Συνδέσμων Δυσκαμψίας (bracing)

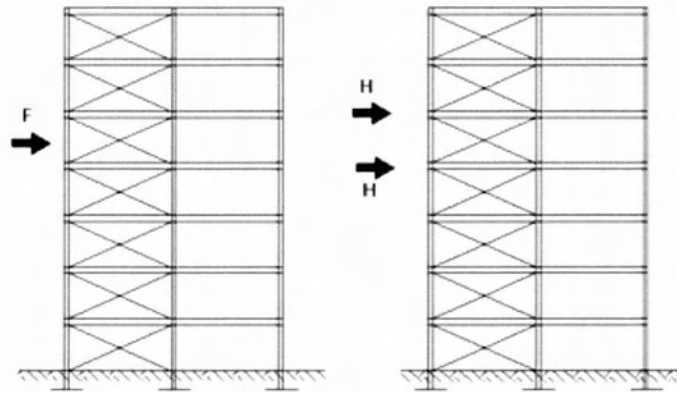
Τα συστήματα ενίσχυσης μέσω συνδέσμων δυσκαμψίας χρησιμοποιούνται για να ανθίστανται στις οριζόντιες δυνάμεις (φορτία ανέμου, σεισμικές δράσεις) και να τις μεταβιβάζουν στα θεμέλια, και διακρίνονται σε κατακόρυφα και οριζόντια. Όπου είναι απαραίτητες οι οριζόντιες ενισχύσεις, βρίσκονται στη μορφή διαγώνιων μελών στη διάταξη του κάθε πατώματος.

Και οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες ενισχύσεις αντιπροσωπεύουν το καθολικό σύστημα δυσκαμψίας που παρέχει τη μεταφορά όλων των οριζόντιων δυνάμεων στις θεμελιώσεις.

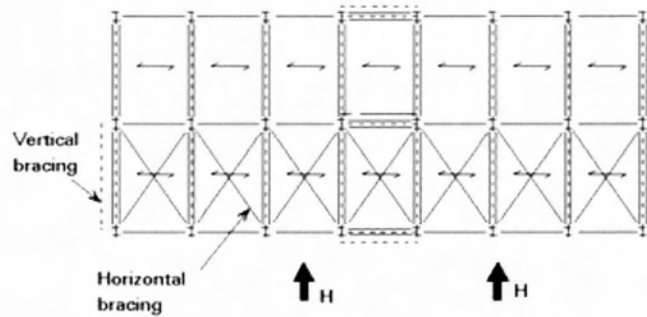
Οι κατακόρυφες ενισχύσεις χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ρυθμίσεις των διαγώνιων μελών στο πλαίσιο από χάλυβα. Είναι:

- a. απλές διαγώνιες
- b. σχήματος Χ
- c. σχήματος ανεστραμμένου V
- d. ασύμμετρη portal
- e. συμμετρική portal
- f. σχήματος V

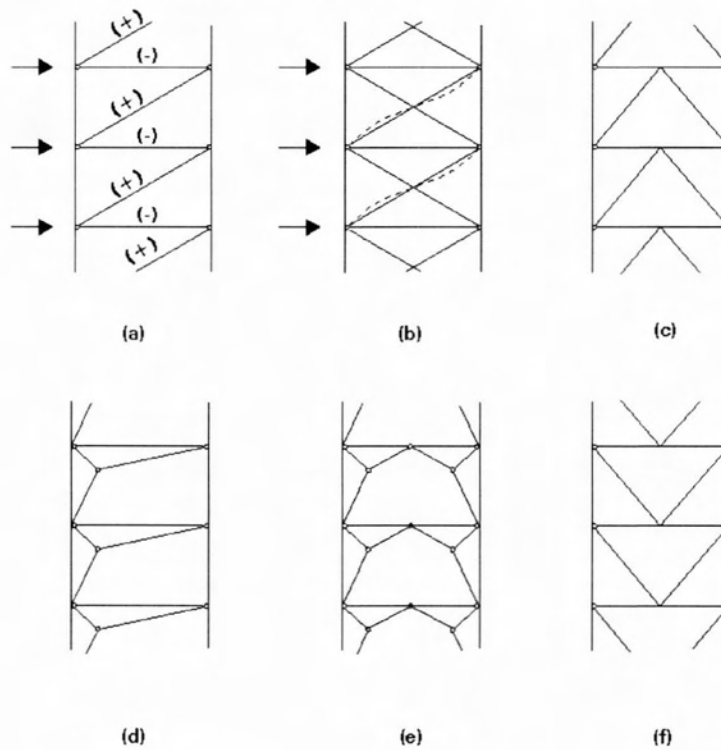
Μια εναλλακτική στις ενισχύσεις από χάλυβα παρέχεται με τους τοίχους ή τους πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίοι σχεδιάζονται για να ανθίστανται στις οριζόντιες δυνάμεις, τα αποκαλούμενα διπλά συστήματα. Εποπτικά, ο μηχανισμός ανάληψης και μεταφοράς οριζόντιων δράσεων δλδ. της λειτουργίας των συστημάτων δυσκαμψίας, οι διάφορες μορφές των συστημάτων δυσκαμψίας και τα μικτά συστήματα φαίνονται στις Εικόνες 27, 28, 29 και 30 αντίστοιχα, μετά από απ' ευθείας μεταφορά τους από τη σχετική διάλεξη του ESDEP (χωρίς μετάφραση των σχετικών όρων).



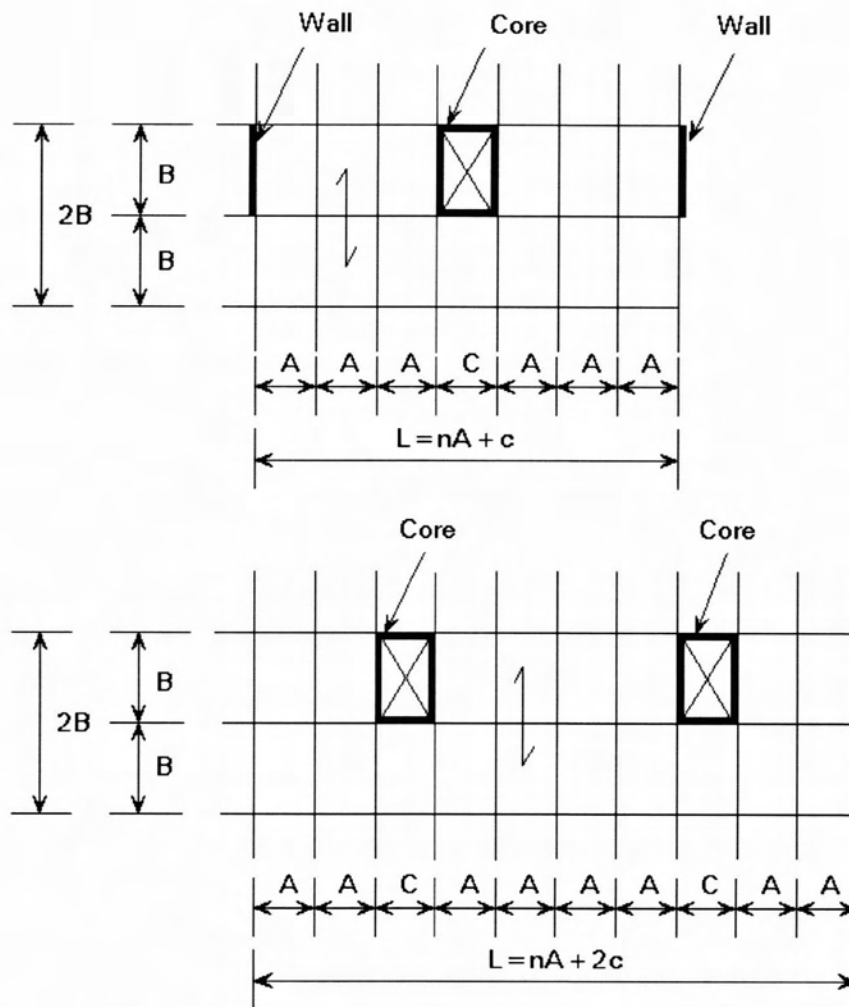
Εικόνα 27: Συστήματα δυσκαμψίας



Εικόνα 28: Λειτουργία συστημάτων δυσκαμψίας



Εικόνα 29: Διάφοροι τύποι συστημάτων δυσκαμψίας



Εικόνα 30: Τοιχώματα και πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα

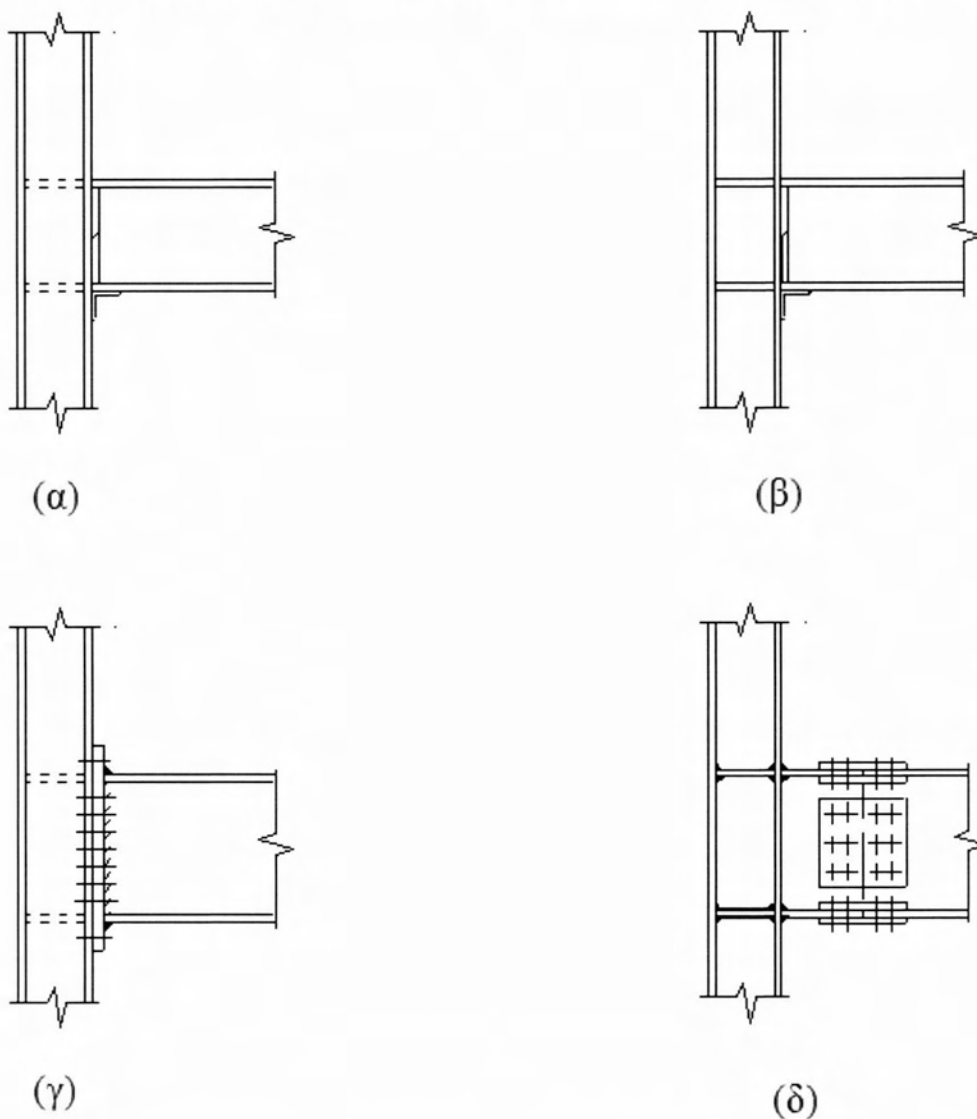
2.11. Δομοστατικά συστήματα

Δυο εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι δυνατές για να παρέχουν αντίσταση στα συνδυασμένα αποτελέσματα των οριζόντιων και κατακόρυφων φορτίων στα πολυώροφα κτίρια.

Η πρώτη, το αποκαλούμενο 'σύστημα πλαισίου αντίστασης ροπής', είναι ένας συνδυασμός οριζόντιων (δοκοί) και κατακόρυφων (υποστυλώματα) στοιχείων που είναι σε θέση να αντισταθούν σε αξονικές, καμπτικές και διατμητικές δράσεις. Σε αυτό το σύστημα δεν είναι απαραίτητα στοιχεία ενίσχυσης. Η συμπεριφορά του πλαισίου αντίστασης ροπής λαμβάνεται μόνο αν οι συνδέσεις δοκών- υποστυλωμάτων είναι άκαμπτες, οδηγώντας σε μια πλαισιωμένη δομή με έναν υψηλό βαθμό υπεραντοχής. Σαν συνέπεια αυτής της επιλογής:

- οι συνδέσεις / κόμβοι ανάμεσα στα μέλη είναι περίπλοκες
- η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις αξονικές δυνάμεις και τις καμπτικές ροπές είναι κρίσιμη στο σχεδιασμό των υποστυλωμάτων

- η συνολική παραμορφωσιμότητα σε μετάθεση της δομής μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, καθώς εξαρτάται μόνο στην αδράνεια των υποστυλωμάτων
Τυπικές λεπτομέρειες τέτοιων δύσκαμπτων συνδέσεων περιέχονται στην Εικόνα 31.

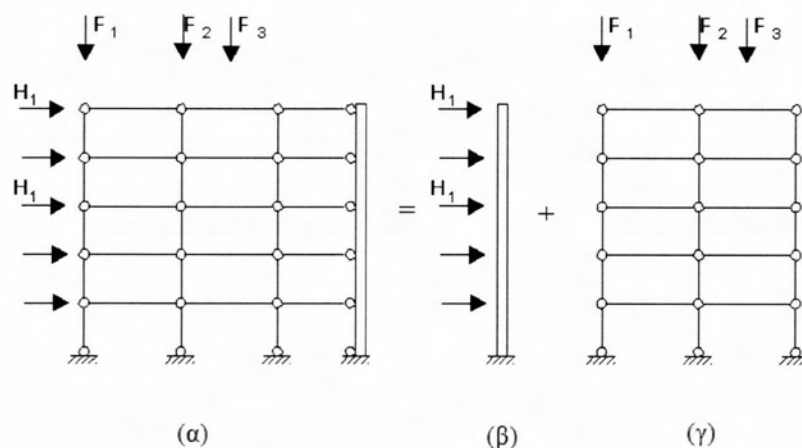


Εικόνα 31: Διάφοροι τύποι δύσκαμπτων κόμβων δοκών-στύλων

Ο τύπος (α) μπορεί να μεταφέρει μόνο περιορισμένο ποσοστό καμπτικής ροπής από τη δοκό στο στύλο, καθόσον ο κορμός του στύλου μπορεί να λυγίσει λόγω τοπικής συγκέντρωσης τάσεων. Η παρουσία ενισχυτικών ελασμάτων στον κορμό του στύλου, όπως στον τύπο (β) επαναμορφώνει τη διατομή της δοκού, οπότε ο κορμός του στύλου καλείται πλέον να αναλάβει μόνο τέμνουσα δύναμη. Οι δύο αυτοί τύποι απαιτούν επί τόπου συγκολλήσεις, οι οποίες ποτέ δεν είναι πλήρως αξιόπιστες, είναι ιδιαίτερα δαπανηρές αλλά και χρονοβόρες.

Μια καλύτερη εναλλακτική λύση είναι η χρήση κοχλιωτών συνδέσεων, που επιτρέπουν τη μόρφωση δύσκαμπτων συνδέσεων χωρίς τα μειονεκτήματα επί τόπου συγκολλήσεων, καθόσον οι ραφές που απαιτούνται πραγματοποιούνται όλες στο εργοστάσιο, ενώ οι κοχλιώσεις επί τόπου. Τέτοιου είδους συνδέσεις είναι αυτές των τύπων (γ) και (δ), που είναι γνωστές ως «κοχλιωτή με προεξέχουσα μετωπική πλάκα» και ως «κοχλιωτή με ελάσματα κάλυψης» αντίστοιχα.

Προς αποφυγή των πρακτικών προβλημάτων κατασκευής δύσκαμπτων πλαισίων, μπορεί να αποκτηθεί μια πιο βολική λύση, μέσω της θεώρησης της δομικής απόκρισης με διαφορετικό τρόπο. Οι λειτουργίες ανάληψης κατακόρυφων και οριζόντων δυνάμεων διαχωρίζονται σε δύο «οικογένειες» μελών, που ομαδοποιούνται σε δύο υπο-δομήματα, σύμφωνα με την Εικόνα 32.



Εικόνα 32: Μοντέλο υπολογισμού ενισχυμένου πλαισίου

Πρόκειται για ένα απλό πλαίσιο, που αποτελείται από αμφιαρθρωτές δοκούς, που μπορεί να αναλάβει την μεταφορά των κατακόρυφων δυνάμεων στη θεμελίωση και Έναν πακτωμένο στο έδαφος πρόβολο, που ανθίσταται των οριζοντίων δράσεων και μεταφέρει τις επιρροές τους στη θεμελίωση.

Το υπο-δόμημα (α) είναι υπερστατικό. Οι δοκοί κάμπτονται εντός κατακόρυφου επιπέδου, οι στύλοι απλά θλίβονται και οι αρθρωτοί κόμβοι αναλαμβάνουν μόνο τέμνουσες δυνάμεις.

Αντίθετα, το υπο-δόμημα (β) είναι ισοστατικό. Η ενισχυτική λειτουργία του μπορεί να αποκτηθεί είτε μέσω χαλύβδινων δικτυωμάτων είτε μέσω τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ενισχύσεις αυτές φορτίζονται κύρια από τέμνουσα και ροπή και πρέπει να ελεγχθούν οι παραμορφώσεις τους σε οριζόντια μετάθεση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

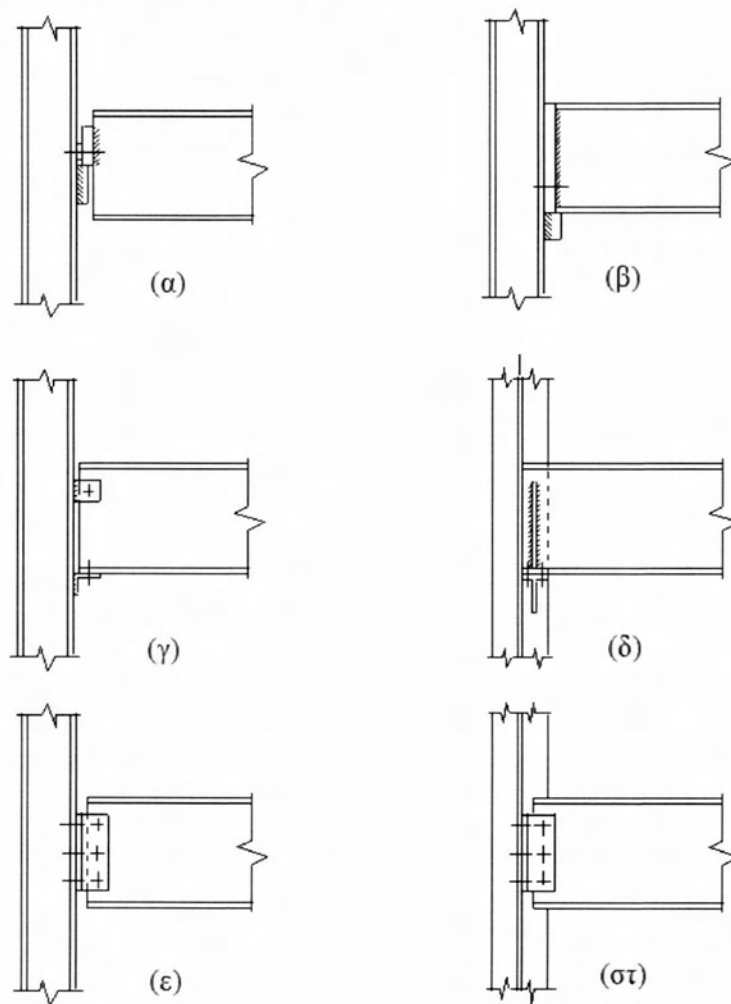
Ο συνδυασμός αμφότερων των υπο-δομημάτων οδηγεί στο πλήρες δόμημα, που μπορεί να αναλάβει τόσον οριζόντιες όσο και κατακόρυφες δυνάμεις.

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της λύσης, που επονομάζεται «σύστημα ενισχυμένου πλαισίου» είναι:

- Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των κόμβων είναι απλές, καθόσον δρουν ως αρθρώσεις,
- Η μετάθεση της κατασκευής περιορίζεται από το σύστημα ενίσχυσης (β),
- Ουσιαστικά δεν υφίσταται αλληλεπίδραση μεταξύ αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών στα υποστυλώματα.

Μπορούν όμως να εμφανιστούν κάποια προβλήματα στη θεμελίωση των συνδέσμων δυσκαμψίας, που πρέπει να ανθίστανται το σύνολο των οριζόντιων δυνάμεων με πολύ μικρή αξονική θλίψη. Μπορεί να παρατηρηθούν μεγάλες τιμές εκκεντρότητας, που στη συνέχεια απαιτούν μεγάλες διαστάσεις θεμελίων.

Στο δομοστατικό αυτό σύστημα οι κόμβοι δοκών - υποστυλωμάτων θα πρέπει να μπορούν να αναλάβουν μόνο αξονικές και τέμνουσες δυνάμεις. Κάποιες τυπικές λύσεις «αρθρωτών» κόμβων φαίνονται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 33: Μερικές τυπικές «αρθρωτές» συνδέσεις δοκών - υποστυλωμάτων

2.12. Απαιτήσεις σχεδιασμού πολυώροφων κτιρίων

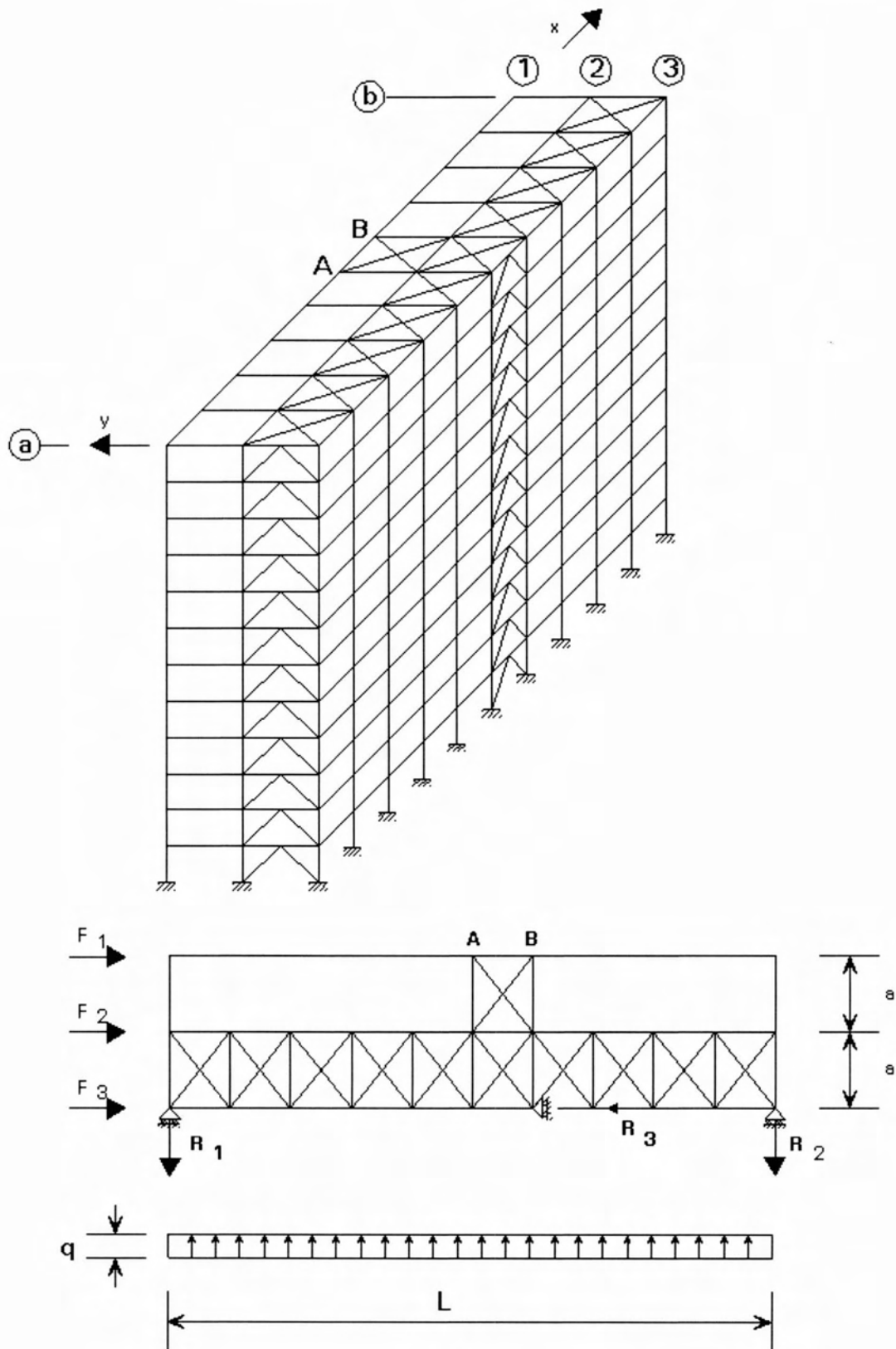
Ο μόνρφωση και ο σχεδιασμός του δομικού συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη την χωρική του συμπεριφορά. Για το «σύστημα ενισχυμένου πλαισίου», που φαίνεται να είναι περισσότερο οικονομικό και αξιόπιστο, είναι απαραίτητο να προβλεφθεί ικανοποιητικός αριθμός συνδέσμων δυσκαμψίας, που να επιτρέπει την αντίσταση έναντι οριζόντιων φορτίων οποιασδήποτε διεύθυνσης. Οι απαιτήσεις προς τούτο είναι:

- 1) Πρέπει να καταστεί εφικτό κάθε σύστημα πατώματος (δαπέδου) να θεωρηθεί σαν μια κατασκευή στο επίπεδο, που περιορίζεται από κατακόρυφους συνδέσμους.
- 2) Οι σύνδεσμοι, σαν εξωτερικοί περιορισμοί των πατωμάτων θα πρέπει να αποδίδουν τουλάχιστον τρεις βαθμούς περιορισμού.
- 3) Το σύστημα δαπέδου θα πρέπει να είναι ικανό να ανθίσταται τις εσωτερικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται λόγω της δράσεως των οριζόντιων φορτίων.

Για να επιτευχθεί η απαίτηση (1) θα πρέπει να παραβλεφθούν διαγώνιοι σύνδεσμοι στο επίπεδο του πατώματος, μετασχηματίζοντας το σύστημα του δαπέδου σε οριζόντιο δικτύωμα. Εναλλακτικά, η πλάκα από πρόχυτα στοιχεία σκυροδέματος του δαπέδου θα πρέπει να υποτεθεί ότι ανθίσταται άμεσα (απ' ευθείας) τις οριζόντιες δυνάμεις ως επίπεδη πλάκα, καθώς είναι πρακτικά απαραμόρφωτη. Όταν όντως γίνεται χρήση πλακών από σκυρόδεμα, η ανέγερση του καλύβδινου σκελετού απαιτεί ειδική προσοχή, καθόσον είναι ασταθής μέχρι την τοποθέτηση των στοιχείων δαπέδου. Κατά συνέπεια απαιτούνται προσωρινές ενισχύσεις κατά την εκτέλεση των εργασιών.

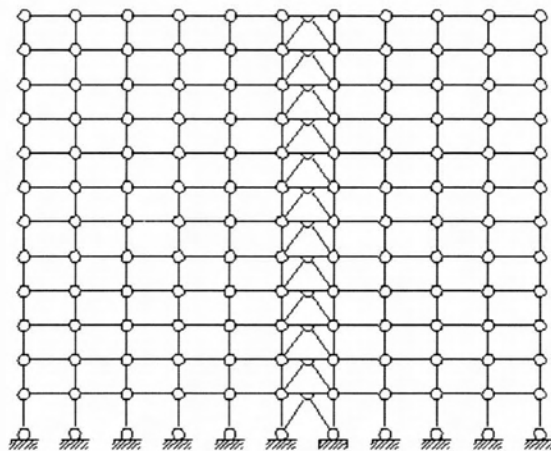
Για την επίτευξη της απαίτησης (2), οι καλύβδινοι δικτυωτοί σύνδεσμοι είναι ενεργοί μόνο στο επίπεδο τους και έτσι αντιπροσωπεύουν έναν απλό περιορισμό του συστήματος δαπέδου. Αν χρησιμοποιηθούν ενισχύσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορεί να προσδίδουν έναν, δύο ή και τρεις βαθμούς περιορισμού, εξαρτώμενους από την αντίσταση τους σε μονοαξονική κάμψη (τοίχωμα), διαξονική κάμψη ή διαξονική κάμψη και στρέψη (πυρήνας) αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 34 καταδεικνύεται μια τρισδιάστατη κατασκευή ενός πολυώροφου κτιρίου με καλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας. Κάθε σημείο του συστήματος δαπέδου είναι περιορισμένο και στις δύο διευθύνσεις. Ειδικότερα, οι διαγώνιοι που συνδέων τα σημεία Α και Β περιορίζουν όλα τα σημεία της γραμμής «1» στην «x» διεύθυνση. Οι σύνδεσμοι δαπέδου μπορούν να αναλάβουν εξωτερικές δυνάμεις και από την «x» και από την «y» διεύθυνση και να τις μεταφέρουν στους κατακόρυφους συνδέσμους.

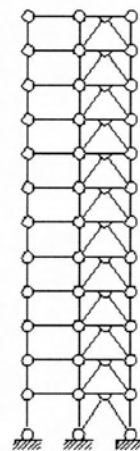


Εικόνα 34: Πολυώροφο κτίριο με οριζόντιους καλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας

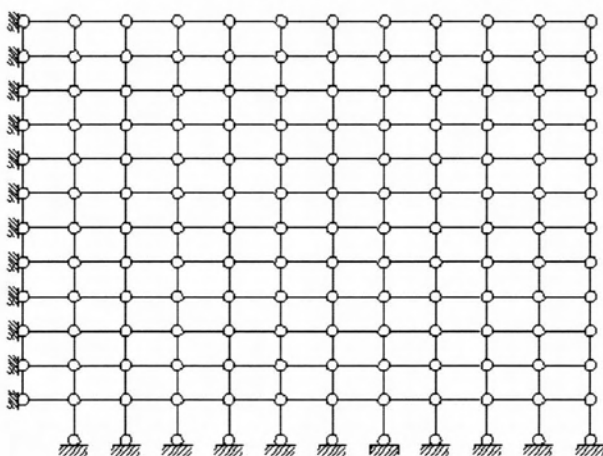
Η χωρική κατασκευή μπορεί να αντικατασταθεί με επίπεδες υπο-κατασκευές, το στατικό σύστημα των οποίων δίδεται στην Εικόνα 35. Η διαμήκης πρόσοψη κατά τη γραμμή «3» ενισχύεται απ' ευθείας στο επίπεδο της καθώς επίσης και οι πλευρικές όψεις μέσω των εγκάρσιων συνδέσμων στους άξονες «a» και «b».



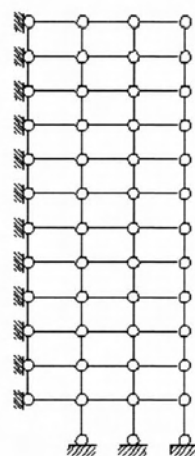
Γραμμή ③



Γραμμές ① και ②



Γραμμές ① και ②

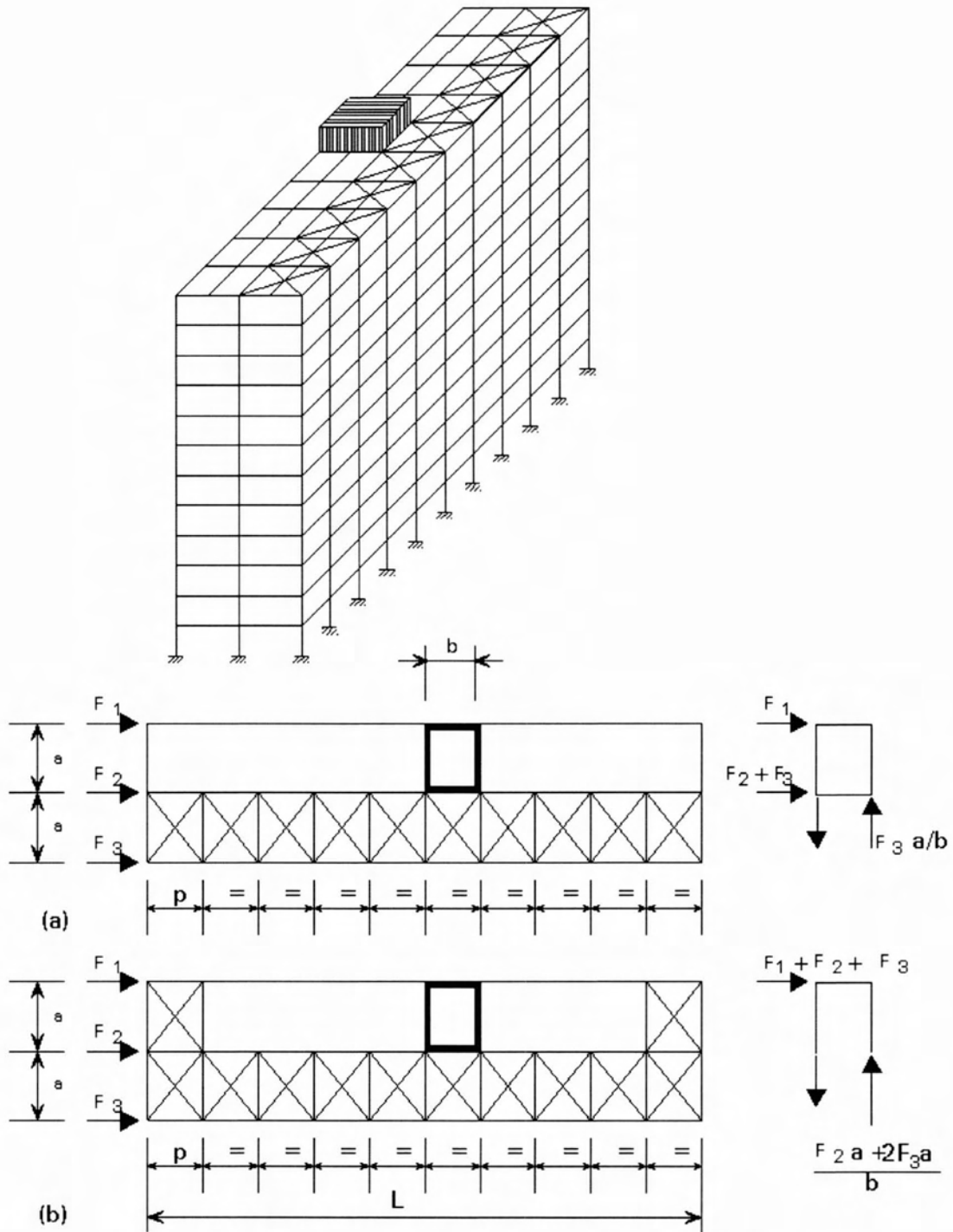


Ενδιάμεσες
εγκάρσιες
γραμμές

Εικόνα 35: Διαμήκη και εγκάρσια πλαίσια

Οι αρθρώσεις των ενδιάμεσων εγκάρσιων πλαισίων και των διαμήκων πλαισίων των αξόνων «1» και «2» εμποδίζονται να μετακινηθούν οριζόντια καθώς είναι όλες συνδεδεμένες με τους κατακόρυφους συνδέσμους μέσω των συνδέσμων δαπέδου. Για το λόγο αυτό μπορούν να θεωρηθούν ως αμετάθετα πλαίσια.

Στην Εικόνα 36 αναπαρίσταται η χωρική δομική συμπεριφορά ενός πολυώροφου κτιρίου με ενίσχυση μέσω πυρήνα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μπορεί να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση του προηγούμενου κτιρίου, με τον πυρήνα να αντικαθιστά όλους τους διαμήκεις και εγκάρσιους καλύβδινους συνδέσμους.



Εικόνα 36: Πολυώροφο κτίριο με πυρήνα από οπλισμένο σκυρόδεμα

2.13. Από τα πολυώροφα στα «υψηλά» κτίρια και τους ουρανοξύστες

Τα τελευταία εκατό χρόνια ο άνθρωπος έχει δεχτεί την πρόκληση να αυξήσει το μέγεθος των πολυώροφων κτιρίων. Το ύψος έχει αυξηθεί επιτυχώς χάρη στη χρήση του δομοστατικού χάλυβα ο οποίος μπορεί να δώσει τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες σε θέματα αντοχής και ολκιμότητας.

Το επακόλουθο εύρος των κτιρίων εκτείνεται από τα πολυώροφα κτίρια στα ψηλά κτίρια και στους 'ουρανοξύστες'. Η αύξηση του ύψους αλλάζει σταδιακά τον ορίζοντα πολλών πόλεων. Η ανάπτυξη ψηλότερων κτιρίων έχει υποκινήσει τη δημιουργία νέων δομικών συστημάτων, τα οποία είναι πλέον σε θέση να παρέχουν την αυξανόμενη αντίσταση που χρειάζεται λόγω των επιδράσεων του ύψους. Η δυναμική δράση του ανέμου δεν είναι πλέον αμελητέα καθώς ο αριθμός των ορόφων αυξάνεται και γίνεται τόσο σημαντικός όσο και οι οριζόντιες σεισμικές δράσεις εξαιτίας του σεισμού.

2.14. Τα κύρια χαρακτηριστικά των χαλύβδινων κτιρίων χαμηλού ύψους

Ο απλούστερος τρόπος για να επιτευχθεί επαρκής αντίσταση στα οριζόντια και κατακόρυφα φορτία είναι η χρήση πλαισίων που ανθίστανται στη ροπή, με δομές πατωμάτων που προσανατολίζονται στις εγκάρσιες και διαμήκεις διευθύνσεις αντίστοιχα (περιπτώσεις 1 και 5 της Εικόνας 37). Αυτή η λύση δεν είναι λογική, και επομένως όχι και η πιο οικονομική, καθώς απαιτεί δοκούς και υποστυλώματα με διαφορετικές διατομές στα διάφορα επίπεδα. Επιπλέον, είναι επιρρεπής σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις λυγισμού όταν ο αριθμός των ορόφων είναι μεγαλύτερος από 4 ή 5.

Μια καλύτερη λύση αποκτάται με τη χρήση δυο διαφορετικών δομικών συστημάτων στο ίδιο κτίριο (περιπτώσεις 2-4, 6-8 της Εικόνας 37):

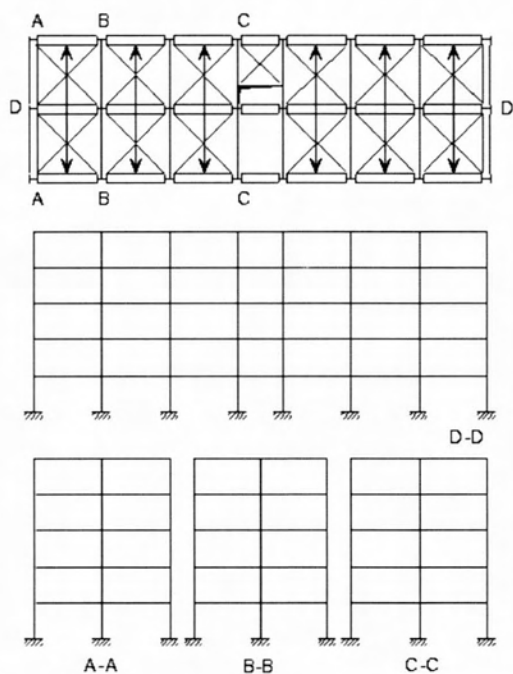
- ημι-άκαμπα ή αρθρωτά πλαίσια τα οποία ανθίστανται σε κατακόρυφες δράσεις μόνο
- ενισχύσεις από χάλυβα ή τοίχοι και πυρήνες από σκυρόδεμα, που ανθίστανται σε οριζόντιες δράσεις.

Και τα δυο συστήματα συνδέονται με τη βοήθεια των δομών πατωμάτων, που παρέχουν ένα άκαμπτο διάφραγμα στο επίπεδο του κάθε ορόφου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι ότι το καθιστά πιθανή τη χρήση δοκών ίδιας διατομής, ανεξάρτητα από το επίπεδο των πατωμάτων.

Η χρήση ίδιας διατομής στα υποστυλώματα είναι επίσης πιθανή, καθόσον μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, ανάλογα με την αναπτυσσόμενη ένταση. Τούτο έχει επικρατήσει να καλείται «τέταρτη διάσταση στις χαλύβδινες κατασκευές» και οδηγεί σε φθηνότερες λύσεις με ταχύτητα και αξιοπιστία κατά την ανέγερση. Χαρακτηριστικό το παράδειγμα του κτιρίου της IBM στο Pittsburgh (1965).

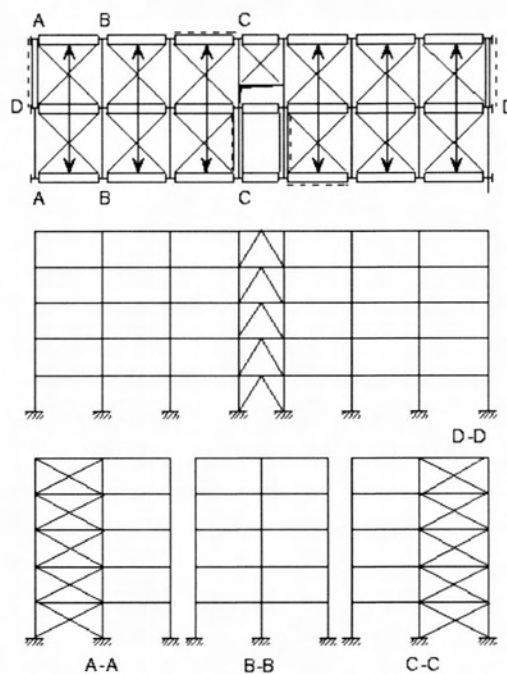
Περίπτωση 1

Διαμήκη δύσκαμπτα πλαίσια
Δάπεδα στην εγκάρσια διεύθυνση



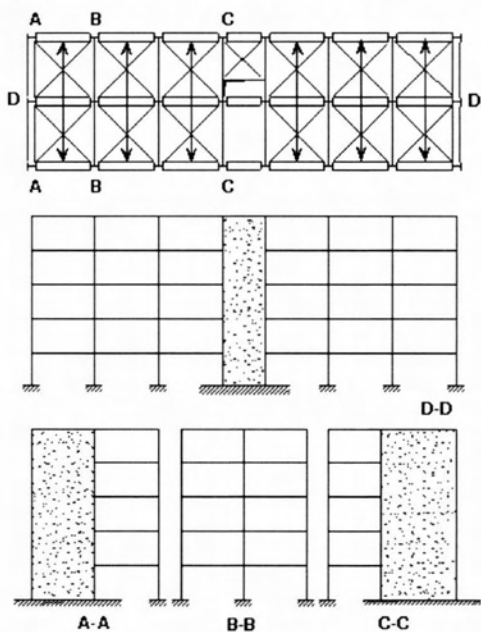
Περίπτωση 2

Διαμήκη πλαίσια με
ενισχυμένους προβόλους
Δάπεδα ως Περίπτωση 1



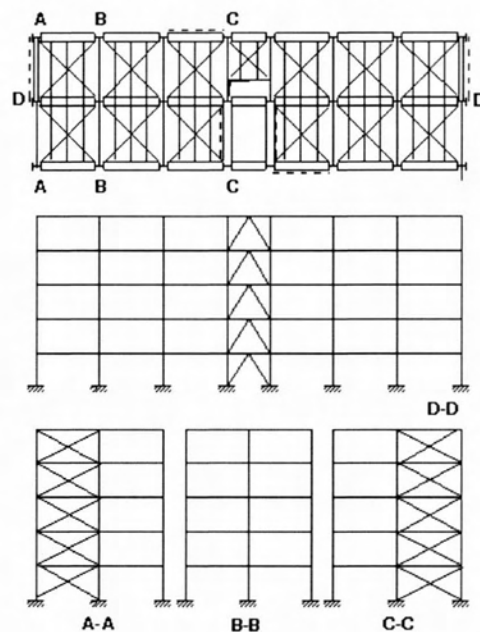
Περίπτωση 3

Διαμήκη πλαίσια με τοιχώματα ή πυρήνα ΟΣ
Δάπεδα στην εγκάρσια διεύθυνση



Περίπτωση 4

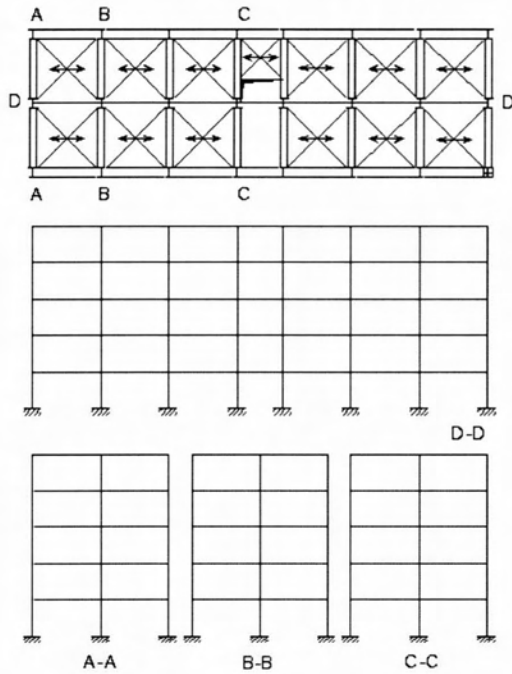
Διαμήκη πλαίσια με ενισχύσεις ως 1, 2, 3
Δάπεδα στη διαμήκη διεύθυνση



Εικόνα 37: Δομικά συστήματα για χαλύβδινα κτίρια χαμηλού ύψους (συνεχίζεται)

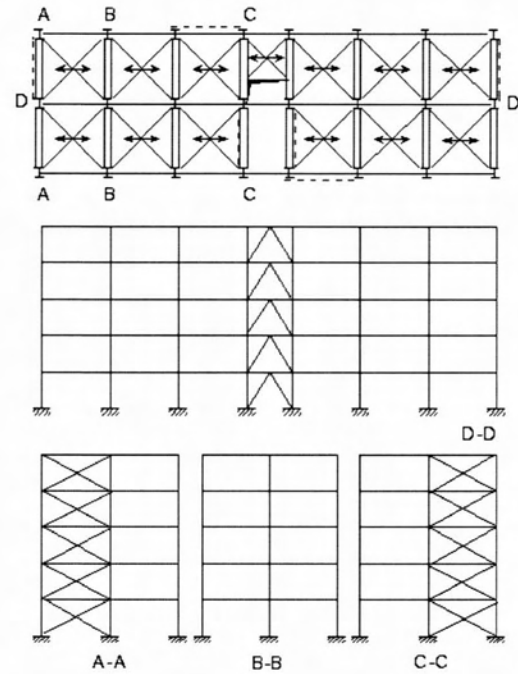
Περίπτωση 5

Εγκάρσια δύσκαμπτα πλαίσια
Δάπεδα στη διαμήκη διεύθυνση



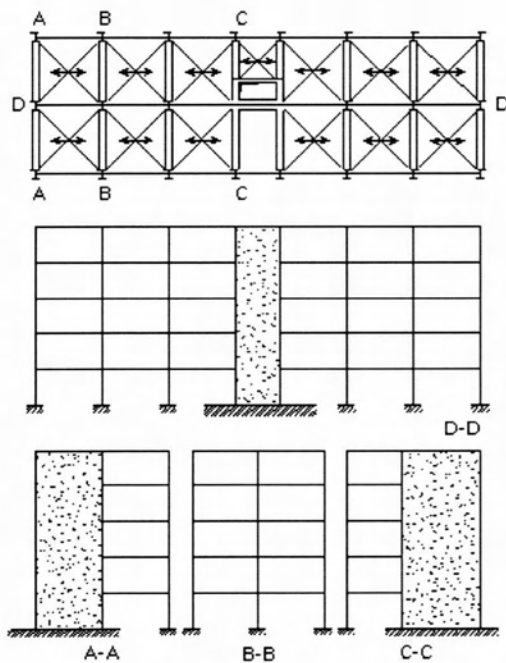
Περίπτωση 6

Εγκάρσια πλαίσια με ενισχυμένους προβόλους
Δάπεδα στη διαμήκη διεύθυνση



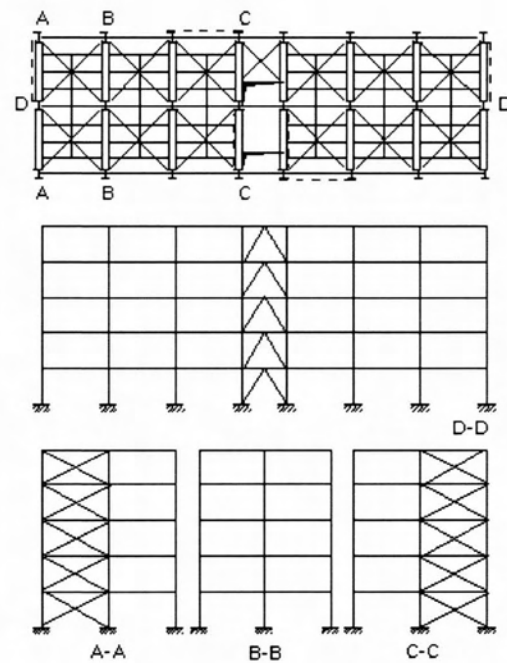
Περίπτωση 7

Εγκάρσια πλαίσια με τοιχώματα
ή πυρήνες ΟΣ
Δάπεδα στη διαμήκη διεύθυνση



Περίπτωση 8

Διαμήκη πλαίσια με ενισχύσεις ως 6, 7
Δάπεδα στην εγκάρσια διεύθυνση



Εικόνα 37: Δομικά συστήματα για χαλύβδινα κτίρια χαμηλού ύψους

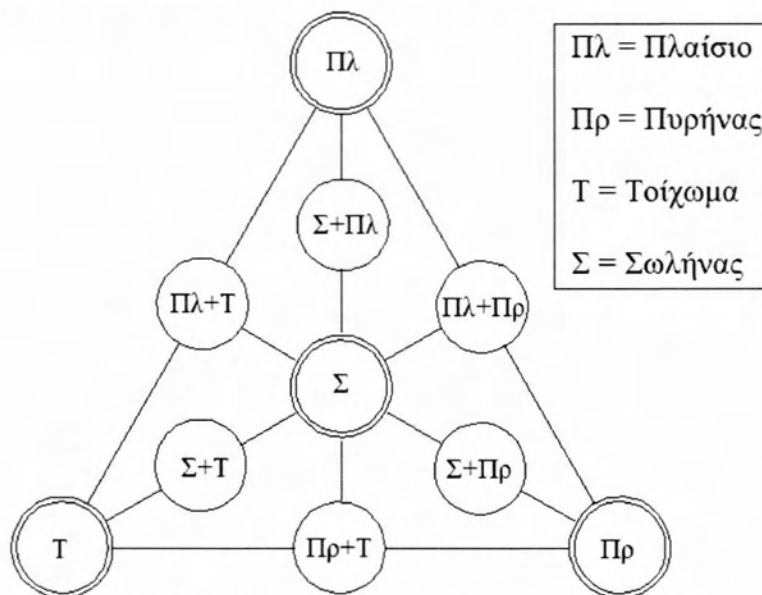
2.15. Δομικά συστήματα για «υψηλά» κτίρια

Το δομικό σύστημα ενός «υψηλού» κτιρίου πρέπει να ανθίστανται και στη βαρύτητα και στα πλευρικά φορτία, λόγω των φαινομένων όπως ο άνεμος και ο σεισμός. Καθώς το ύψος του κτιρίου αυξάνεται, τα πλευρικά φορτία σταδιακά κυριαρχούν στο δομοστατικό σχεδιασμό. Τα πλευρικά φορτία λόγω ανέμου και σεισμού παράγουν πλευρικές επιταχύνσεις. Καθώς οι άνθρωποι φυσιολογικά αισθάνονται τις επιταχύνσεις αυτές κατά τη διάρκεια λειτουργίας, ο πρωταρχικός παράγων για κτίρια μεγάλου ύψους δεν είναι η αντοχή αλλά η δυσκαμψία.

Τέσσερις γενικές ομάδες δομικών συστημάτων μπορούν να αναγνωριστούν. Αυτές είναι:

- Σύστημα φερόντων τοιχωμάτων
- σύστημα πυρήνων
- σύστημα πλαισίων
- σύστημα σωληνωτών μορφών

και ταξινομούνται - συνδυάζονται σύμφωνα με την Εικόνα 38.



Εικόνα 38: Ταξινόμηση δομικών συστημάτων υψηλών κτιρίων

Κάθε σύστημα έχει διαφορετικές ιδιότητες στη αντίσταση πλευρικών φορτίων και τείνει έτσι να είναι πιο αποδοτικό πέρα από ένα διαφορετικό εύρος ύψους.

Τα συστήματα φερόντων τοιχωμάτων εξαιτίας του ίδιου βάρους των δομικών στοιχείων (συνήθως από σκυρόδεμα), γίνονται κανονικά ανεπαρκή για κτίρια από 15-30 ορόφους και πάνω σε ύψος. Το σύστημα του πυρήνα από σκυρόδεμα έχει το ίδιο μειονέκτημα με το σύστημα των φερόντων τοιχωμάτων, δηλαδή το ίδιο βάρος είναι ένας περιοριστικός παράγοντας.

Η αποδοτικότητα του συστήματος πλαισίων εξαρτάται από την δυσκαμψία των συνδέσεων και το μέγεθος των ενισχύσεων. Το ανώτερο όριο εφαρμογής του 60 ορόφοι.

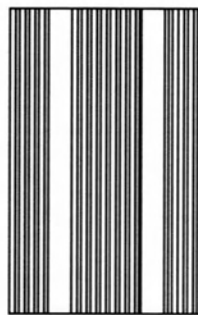
Γενικά το σύστημα σωλήνων μπορεί να θεωρηθεί σαν χωρικό πλαίσιο με τα κατακόρυφα στοιχεία τοποθετημένα εξωτερικά. Είναι πιο επαρκής μορφή για τα ψηλότερα κτίρια, για παράδειγμα πάνω από 60 ορόφους.

Τα ανωτέρω τέσσερα βασικά συστήματα περιγράφονται εν συντομία ως εξής:

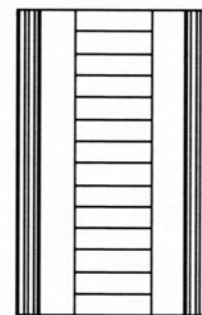
1. Η δομή των φερόντων τοιχωμάτων αποτελείται από επίπεδα κατακόρυφα στοιχεία τα οποία σχηματίζουν όλο ή μέρος των εξωτερικών τοίχων και σε ορισμένες περιπτώσεις οι εσωτερικοί τοίχοι επίσης. Ανθίστανται τόσο σε οριζόντια όσο και σε κατακόρυφα φορτία και κατασκευάζονται κύρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα και με το περιεχόμενο της Εικόνας 39.



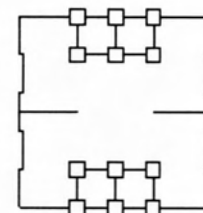
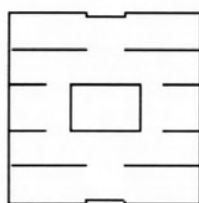
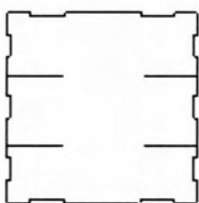
φέρον τοίχωμα



φέρον τοίχωμα
με πυρήνα

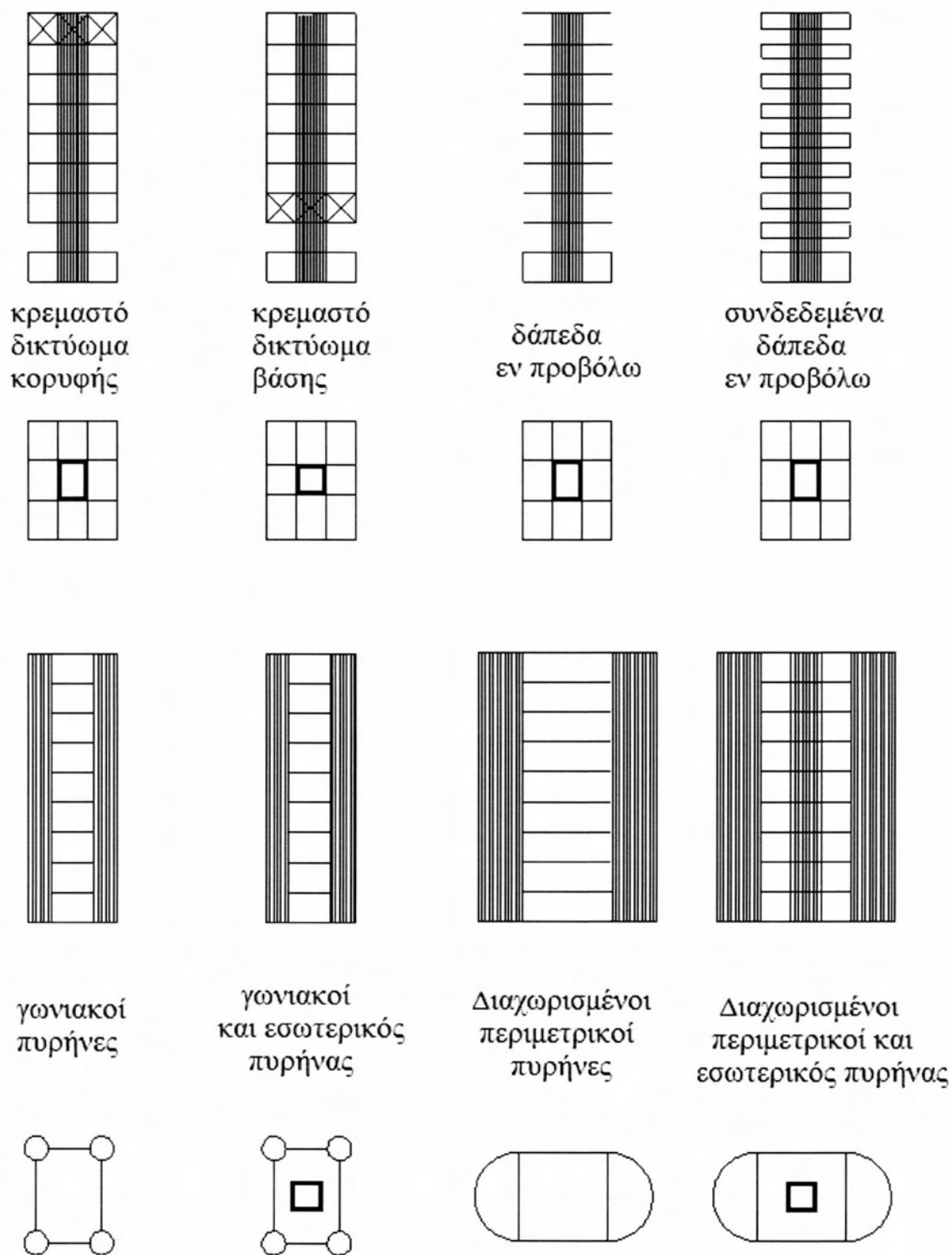


φέρον τοίχωμα
με δύσκαμπτο
πλαίσιο



Εικόνα 39: Συστήματα φερόντων τοιχωμάτων

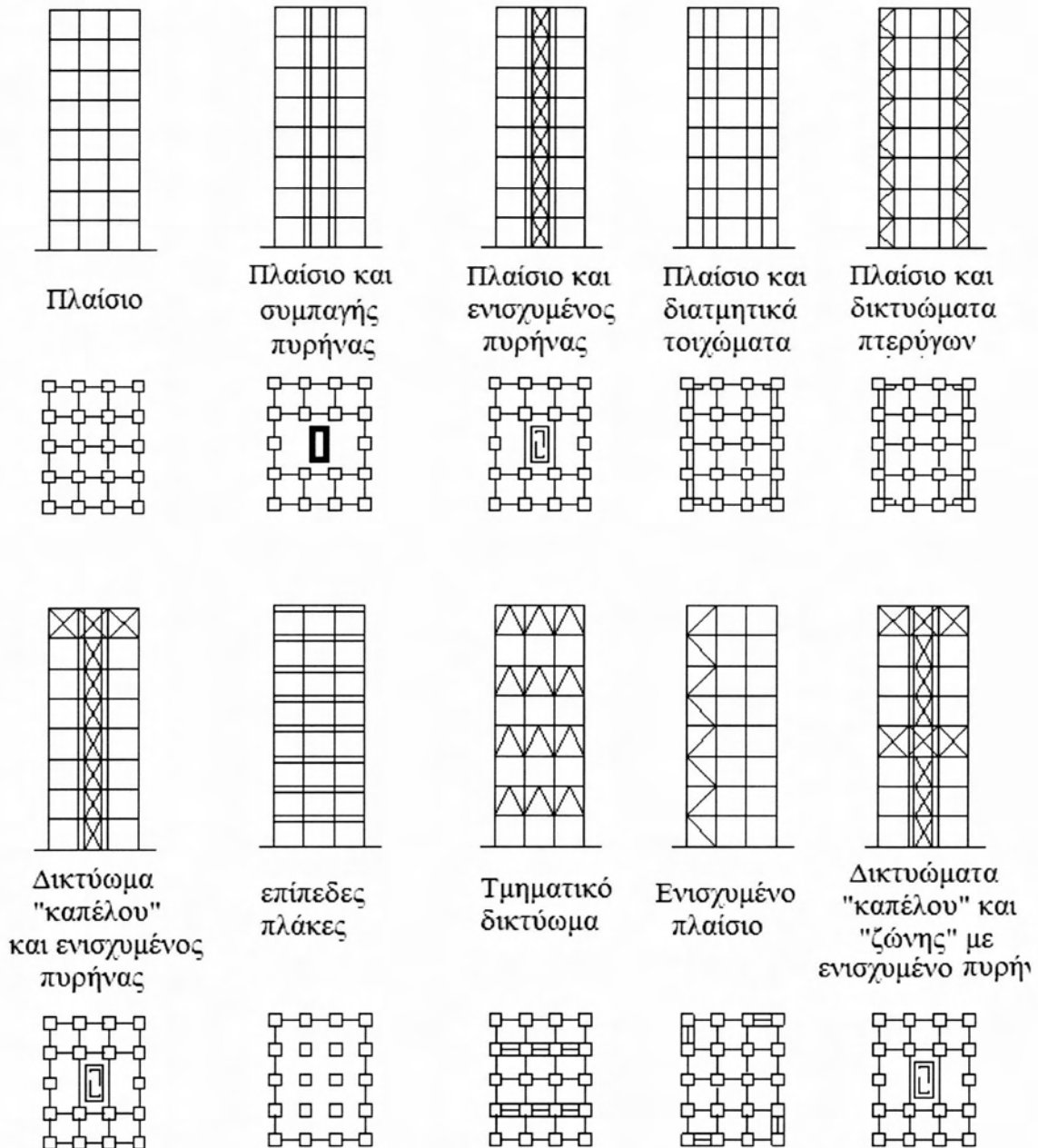
2. Η δομή των πυρήνων αποτελείται από φέροντα τοιχώματα τακτοποιημένα σε μια κλειστή μορφή, όπου συγκεντρώνονται τα κατακόρυφα συστήματα μεταφοράς (ανεγκυστήρες). Αυτή η διεύθυνση επιτρέπει την ευελιξία στη χρήση του χώρου του κτιρίου έξω από τον πυρήνα. Ο πυρήνας μπορεί να σχεδιαστεί για να ανθίσταται και σε κατακόρυφα και σε οριζόντια φορτία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής του συστήματος αυτού φαίνονται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Συστήματα πυρήνων

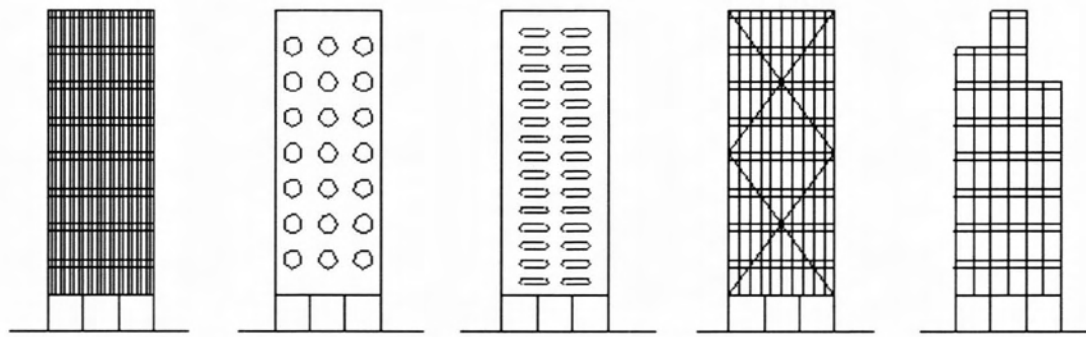
3. Η πλαισιακή δομή αποτελείται συνήθως από υποστυλώματα, δοκούς και πλάκες πατωμάτων τοποθετημένα ώστε να ανθίστανται και στα οριζόντια και στα κατακόρυφα φορτία. Το πλαίσιο είναι ίσως η πιο ευπροσάρμοστη δομική μορφή σχετικά με το υλικό και το σχήμα, λόγω των πολλών τρόπων των συνδυασμένων

δομικών στοιχείων με σκοπό να προσδώσουν επαρκή στήριξη στη δεδομένη φόρτιση. Στα παραδείγματα της Εικόνας 41, καλύβδινα πλαίσια συνδυάζονται με τοιχώματα και πυρήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα, ή με καλύβδινους συνδέσμους και οριζόντια δικτυώματα.



Εικόνα 41: Συστήματα πλαισίων

4. Η δομή των σωληνωτών συστημάτων (ΣΣ) χαρακτηρίζεται συνήθως εξωτερικά δομικά στοιχεία με μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, που σχεδιάζονται για να ανθίστανται στα πλευρικά φορτία σαν σύνολο, παρά σαν μεμονωμένα στοιχεία. Κλασσικά και εναλλακτικά παραδείγματα εφαρμογής των ΣΣ περιέχονται στην Εικόνα 41Α.



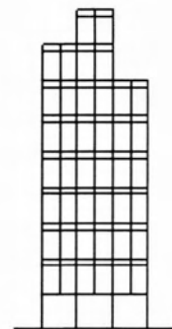
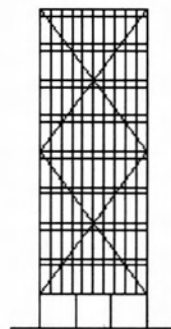
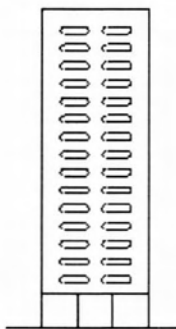
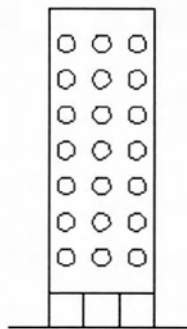
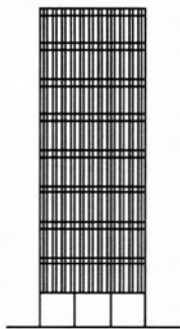
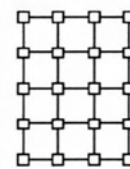
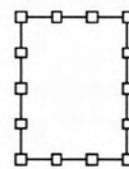
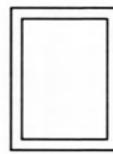
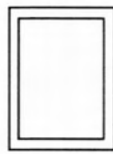
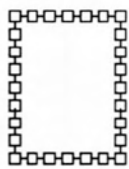
πλαισιωτό
ΣΣ

ΣΣ μορφής
διάτρητου
κελύφους

ΣΣ με βαθειές
εγκοπές

δικτυωτό
ΣΣ

ΣΣ με
δέσμες



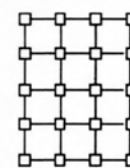
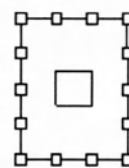
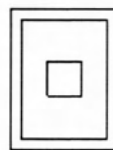
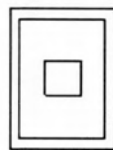
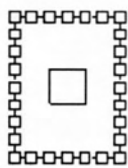
πλαισιωτό ΣΣ
εντός άλλου ΣΣ

2 ΣΣ διάτρητου
κελύφους ένα
εντός του άλλου

ΣΣ βαθέων
εγκοπών με
εσωτερικούς
στήλους

δικτυωτά ΣΣ
το ένα εντός
του άλλου

πλαισιωτό ΣΣ
με δικτυώματα
άνω και κάτω

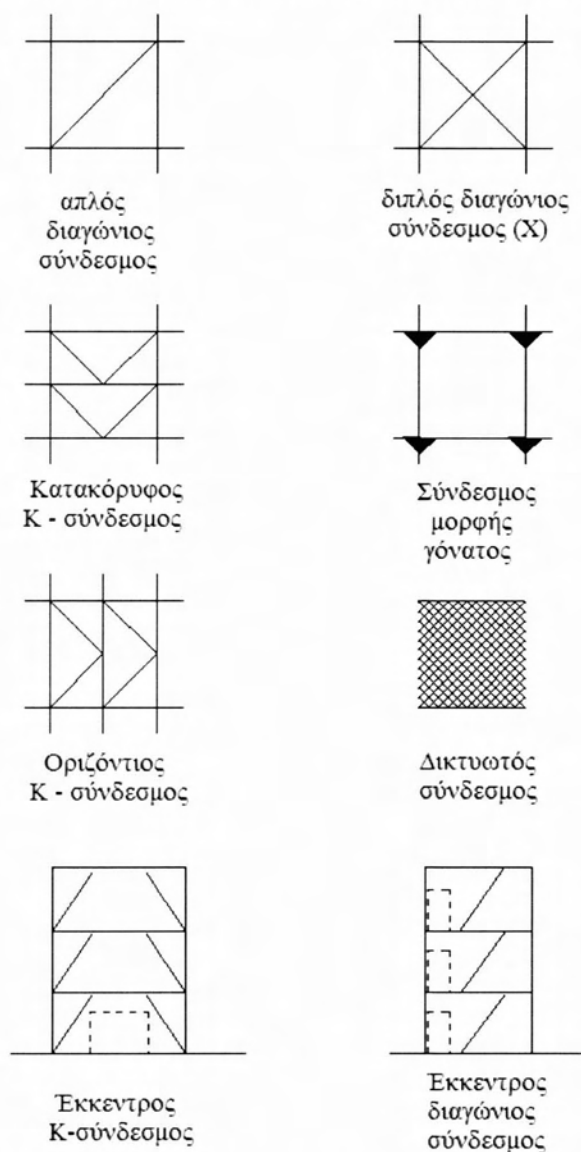


Εικόνα 41Α: Σωληνωτά Συστήματα (ΣΣ)

Τα πλαίσια από χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με πυρήνες από σκυρόδεμα, και/ή τοιχώματα, που οδηγούν σε σύνθετες δομές οι οποίες μπορούν να ονομαστούν 'διπλές δομές'. Σε περίπτωση δε που τα πλαίσια ενισχύονται με συνδέσμους δυσκαμψίας, υφίστανται διάφοροι τύποι τέτοιων συνδέσμων, ανάλογα με τις δομοστατικές αλλά και τις λειτουργικές ανάγκες. Οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι:

- μονές ή διπλές διαγώνιες ενισχύσεις
- κατακόρυφες ή οριζόντιες ενισχύσεις- K
- δικτυωτές ενισχύσεις

Τόσον οι K-σύνδεσμοι όσο και οι απλοί διαγώνιοι σύνδεσμοι μπορεί να είναι έκκεντροι, δηλαδή το διαγώνιο μέλος δεν συντρέχει σε κόμβους του πλαισίου. Σχηματικά, οι σύνδεσμοι των ανωτέρω τύπων παρουσιάζονται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42: Διάφοροι τύποι συνηθών συνδέσμων δυσκαμψίας

2.16. Μοντέλα υπολογισμού

2.16.1 Βασικές Παραδοχές

Στο σχεδιασμό πολυώροφων κτιρίων συνήθως αναφερόμαστε σε ένα μοντέλο υπολογισμού, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ιδεατό μοντέλο με τέλειες στηρίξεις. Όμως, οι πραγματικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες καταδεικνύουν ότι οι συνδέσεις μεταξύ διαφόρων μελών, που απαρτίζουν την κατασκευή, έχουν σημαντικές διαφορές σε

συμπεριφορά από ότι αυτής των ιδεατά παραδεκτών. Πρέπει κατά συνέπεια να τονιστεί με έμφαση ότι οποιαδήποτε προσέγγιση δομοστατικού σχεδιασμού πρέπει να βασίζεται σε απλοποιητικές παραδοχές και συμβάσεις, οι οποίες καθιστούν εφικτό το συσχετισμό μεταξύ του μοντέλου και της πραγματικής κατασκευής. Όσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης πλησιάζουν την πραγματική απόκριση, τόσο πιο αντιπροσωπευτικό είναι το μοντέλο.

Βασικό ερώτημα που προκύπτει είναι αν το μοντέλο που υιοθετείται οδηγεί σε συμπεριφορά υπέρ της ασφαλείας ή όχι. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο έλεγχος του αν τα αποτελέσματα από το μοντέλο, για το κρίσιμο φορτίο κατάρρευσης είναι ασφαλή ή όχι.

Απάντηση στο παραπάνω ερώτημα μπορεί να δοθεί σύμφωνα με το **βασικό στατικό θεώρημα σχεδιασμού**. Σε μια κατασκευή που υπόκειται σε ένα σύνολο εξωτερικών φορτίων F_j , τότε $a_u F_j$ είναι οι τιμές των φορτίων, τα οποία, αν επιβληθούν, θα οδηγήσουν στην κατάρρευση της κατασκευής, με το a_u να είναι ο πραγματικός πολλαπλασιαστής κατάρρευσης. Αν, για ένα γενικό φορτίο $a F_j$ καταστεί δυνατόν να βρεθεί μια κατανομή εσωτερικών δυνάμεων που ισορροπεί τις εξωτερικές, και αν η κατασκευή είναι συμβατή εντός ενός δεδομένου κριτηρίου πλαστικότητας, τότε $\alpha \leq \alpha_u$.

Το θεώρημα αυτό ισχύει αν ικανοποιούνται οι κάτωθι υποθέσεις:

- Απουσιάζουν επιρροές τοπικού λυγισμού
- Φαινόμενα 2^{ης} τάξης είναι αμελητέα
- Οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής είναι μικρότερες αυτών που αντιστοιχούν σε θραύση του υλικού.

Άρα, ένα μοντέλο υπολογισμού, θα είναι πιο κοντά στη πρόβλεψη της πραγματικής απόκρισης, εάν ικανοποιούνται αυστηρά οι συνθήκες συμβιβαστού.

Πάντως, αν ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις, οποιαδήποτε λύση οδηγεί σε αποτελέσματα στην πλευρά της ασφαλείας, ανεξάρτητα αν δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες αυτές:

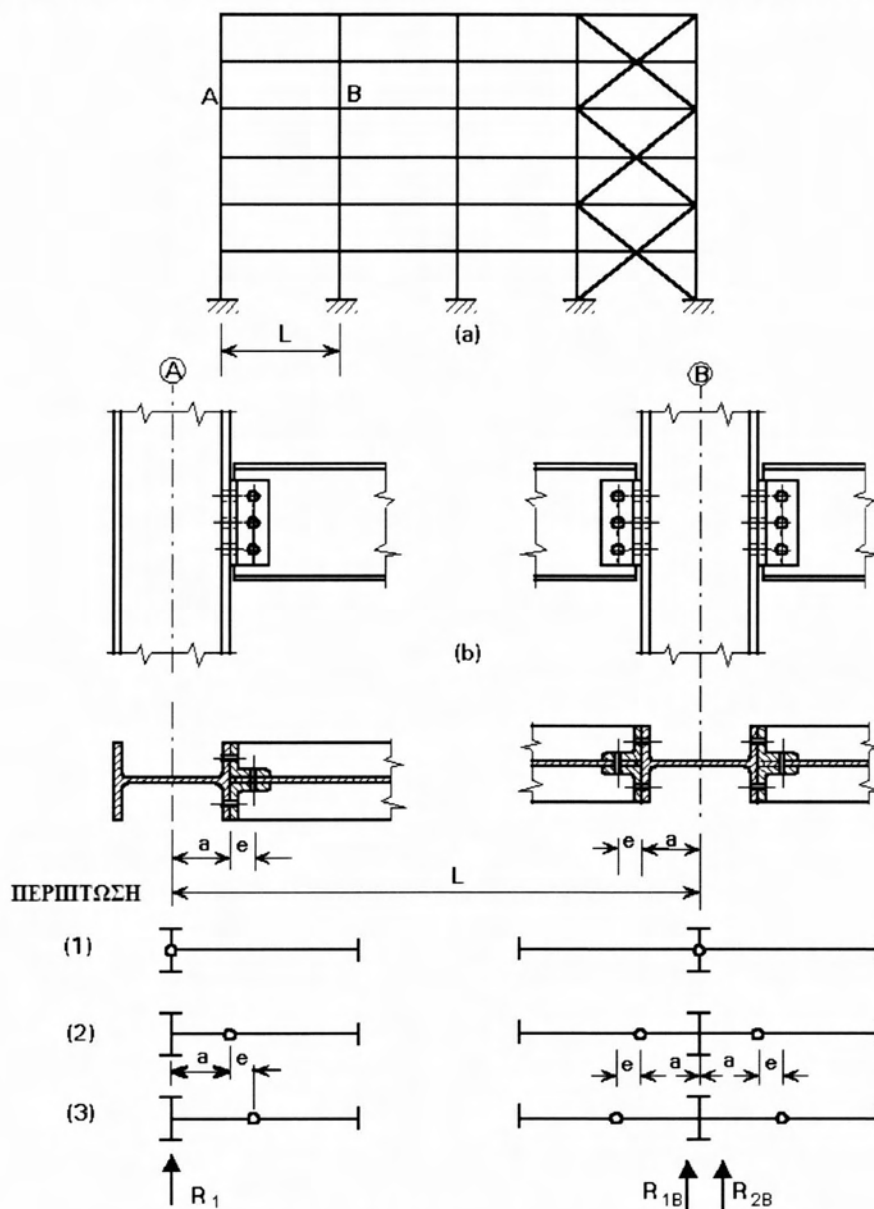
- Αν η λύση αντιπροσωπεύει την ισορροπία μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων,
- Αν παρακολουθεί την αντοχή του υλικού και
- Αν η κατασκευή διαθέτει αρκετή ολκιμότητα, που είναι απαραίτητη για την αποφυγή τοπικών φαινομένων θραύσης, για φορτία μικρότερα αυτών της τοπικής ή καθολικής κατάρρευσης της κατασκευής.

Προφανώς, μόλις οριστεί το μοντέλο υπολογισμού, πρέπει να λάβει χώραν έλεγχος της ευστάθειας των μελών και σε περιπτώσεις κατασκευών με δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων, θα πρέπει επίσης να βρεθεί η επιρροή φαινομένων

2^{ης} τάξης επί των κατακόρυφων φορτίων. Σε ότι ακολουθεί, περιγράφονται ορισμένα τυπικά παραδείγματα μοντέλων υπολογισμού για χαλύβδινες κατασκευές.

2.16.2. Η αμφιαρθρωτή κατασκευή

Το μοντέλο μιας γενικής αμφιαρθρωτής κατασκευής, που φαίνεται στην Εικόνα 43, μπορεί να μελετηθεί αναφορικά με τις διάφορες θέσεις των ιδεατών αρθρώσεων, οι οποίες μπορεί να τεθούν σε οποιαδήποτε από τις τρεις θέσεις της Εικόνας αυτής. Τα αποτελέσματα θα βρίσκονται από την ασφαλή πλευρά, εφόσον οι διαστάσεις των διαφόρων δομικών στοιχείων είναι συμβατές με το υποτεθέν μοντέλο. Από τις τρεις περιπτώσεις που δείχνονται, εξάγονται τα ακόλουθα κριτήρια για τον υπολογισμό των ροπών και των δυνάμεων στους στύλους, τις δοκούς και τις συνδέσεις (X-X, Y-Y).



Εικόνα 43: Μοντέλα υπολογισμού για αμφιαρθρωτή κατασκευή

Περίπτωση 1:

Οι στύλοι A και B απλά θλίβονται, ενώ L είναι το άνοιγμα για τον υπολογισμό της ροπής της δοκού. Η διατομή κόμβου κατά X-X πρέπει να ανθίσταται όχι μόνο τέμνουσα $V = R_1$ αλλά και ροπή $M = R_1 a$, ενώ κατά Y-Y όχι μόνο τέμνουσα $V=R_1$ αλλά και ροπή $M = R_1(a+e)$.

Περίπτωση 2:

Ο στύλος B θλίβεται ($N = R_{1B} + R_{2B}$) και υπόκειται σε ροπή $M = a(R_{1B} + R_{2B})$ περί τον κεντροβαρικό του άξονα, ενώ ο στύλος A επίσης θλίβεται ($N = R_1$) και υπόκειται και σε ροπή $M = R_1 a$ περί τον κεντροβαρικό του άξονα. Το άνοιγμα για τον υπολογισμό των ροπών της δοκού θα είναι $L - 2a$, οπότε:

X - X : Μόνο τέμνουσα $V = R_1$

Y - Y : Τέμνουσα $V = R_1$ και ροπή $M = eR_1$

Περίπτωση 3:

Ο στύλος B θλίβεται ($N = R_{1B} + R_{2B}$) και υπόκειται σε ροπή $M = (a+e)(R_{1B} + R_{2B})$ περί τον κεντροβαρικό του άξονα, ενώ ο στύλος A επίσης θλίβεται ($N = R_1$) και υπόκειται και σε ροπή $M = R_1(a+e)$ περί τον κεντροβαρικό του άξονα. Το άνοιγμα για τον υπολογισμό των ροπών της δοκού θα είναι $L - 2(a+e)$, οπότε:

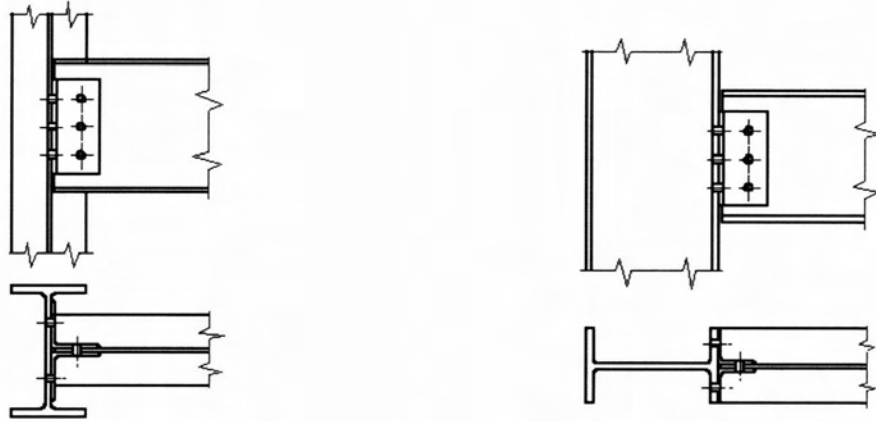
X - X : Τέμνουσα $V = R_1$ και ροπή $M = eR_1$

Y - Y : Μόνο τέμνουσα $V = R_1$

Κάθε ένα από τα τρία μοντέλα είναι υπέρ της ασφαλείας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς. Η επιλογή μεταξύ τους γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το δομικό στοιχείο ή τον κόμβο που αποτελεί το ασθενέστερο μέρος της κατασκευής. Το μοντέλο που ελαχιστοποιεί τις εσωτερικές δυνάμεις στο μέρος αυτό είναι εκείνο που επιλέγεται, όντας το πλέον ασφαλές.

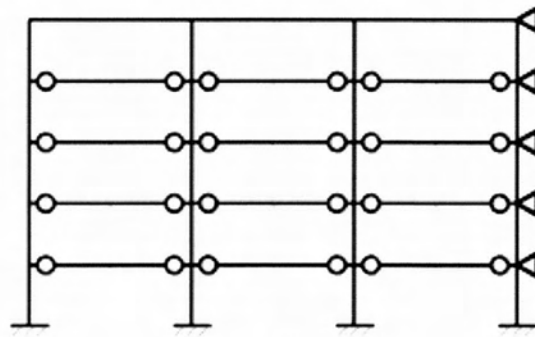
Στην 1^η περίπτωση οι τάσεις στο στύλο είναι οι χαμηλότερες. Άρα μπορεί να επιλεγεί, αν οι στύλοι προσανατολίζονται σύμφωνα με τον ασθενή τους άξονα (Εικόνα 44α). Όντως οι καμπτικές επιρροές στους στύλους εκμηδενίζονται, παρόλη την ύπαρξη μιας μικρής ροπής στους κόμβους λόγω της σχετικά μικρής εκκεντρότητας της κοχλιωτής σύνδεσης.

Η 2^η περίπτωση είναι συχνά συντηρητική, αν οι στύλοι προσανατολίζονται σύμφωνα με τον ισχυρό τους άξονα (Εικόνα 44β). Εδώ η εκκεντρότητα είναι μεγαλύτερη από το μισό του ύψους του στύλου και μπορεί έτσι να χρειαστεί αύξηση στην αντοχή της σύνδεσης. Η εκκεντρότητα αυτή επίσης οδηγεί σε αύξηση των τάσεων στα υποστυλώματα λόγω καμπτικών ροπών. Η κατανομή τους μπορεί να βρεθεί θεωρώντας αρθρώσεις στα μέσα των ανοιγμάτων μεταξύ δαπέδων και θεωρώντας τους στύλους εμποδιζόμενους από την ενισχυτική κατασκευή (Εικόνα 45α). Έτσι, κάθε κατακόρυφη σειρά μπορεί να θεωρηθεί μέσω μιας ισοστατικής προσέγγισης, που φαίνεται στην Εικόνα 45β.

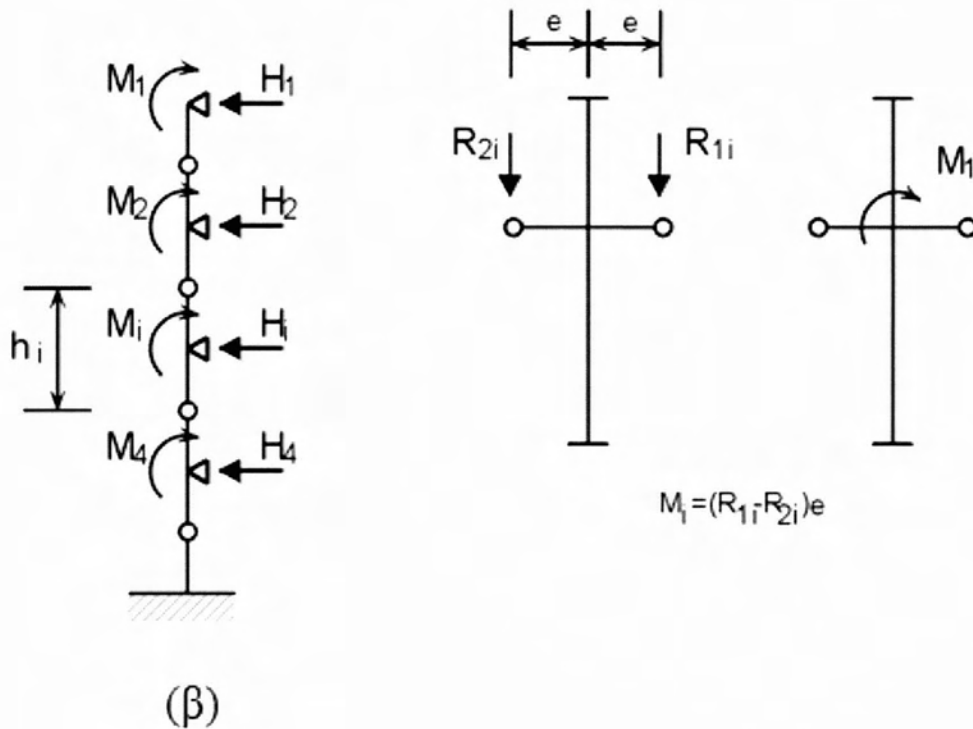


(α) Προσανατολισμός στύλου προς τον ασθενή άξονα (β) Προσανατολισμός στύλου προς τον ισχυρό άξονα

Εικόνα 44: Συνδέσεις δοκών - στύλων



(α)



Εικόνα 45: Μοντέλα υπολογισμού για στύλους αμφιαρθρωτών κατασκευών

Η οριζόντια αντίδραση H_i δίδεται από ισορροπία ροπών περί τον κόμβο i :

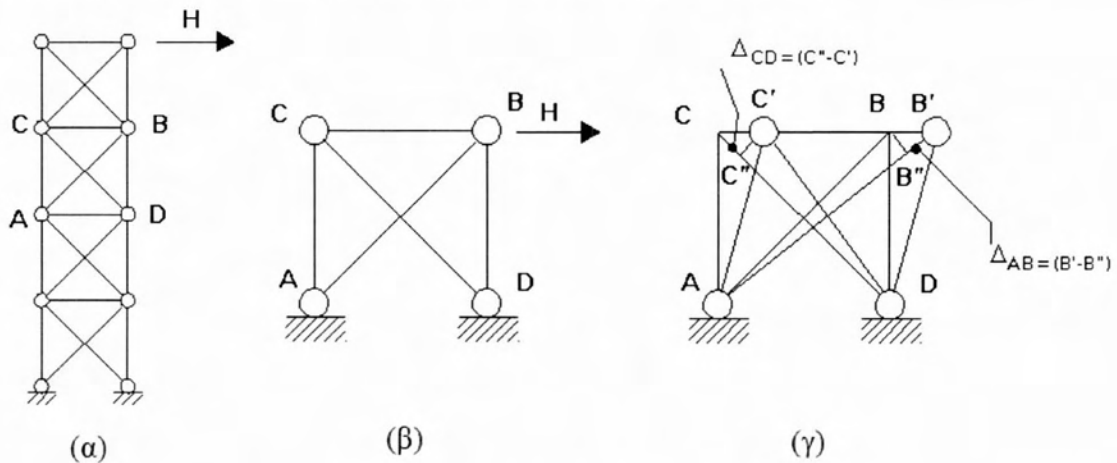
$$H_i = \frac{2M_i}{h_i} - \sum_0^{i-1} H_k$$

Οι επιρροές των δυνάμεων H_i για κάθε όροφο και κάθε στύλο, αναλαμβάνονται από τους κατακόρυφους συνδέσμους στο σύστημα του ορόφου. Η ένταση τους ισούται περίπου με $\Delta R \approx e/h$, όπου ΔR είναι η διαφορά μεταξύ των αντιδράσεων των δύο δοκών που συντρέχουν στο στύλο και e/h ο λόγος μεταξύ της εκκεντρότητας του κόμβου και του ύψους του ορόφου. Για τους θεωρούμενους τύπους κατασκευών, καθώς τα ανοίγματα των στύλων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, η τιμή του ΔR εξαρτάται κύρια από οποιεσδήποτε μη εξισορροπηθείσες τυχηματικές δράσεις. Επιπρόσθετα, καθώς ο λόγος e/h είναι γενικά μικρός, αυτές οι επιρροές είναι αμελητέες συγκρινόμενες με τις επιρροές των εξωτερικών φορτίων. Αντίθετα, δεν μπορούν να αμεληθούν οι επιρροές των καμπτικών ροπών επί των στύλων. Η αντίστοιχη αύξηση τάσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

2.16.3 ΔΙΚΤΥΩΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ

Οι δυνάμεις που δρουν σε ενισχυτικές κατασκευές, όπως οι επιρροές του ανέμου, του σεισμού και των γεωμετρικών ατελειών, δεν δρουν σε συγκεκριμένη διεύθυνση. Προς τούτο, ο σχεδιασμός του συστήματος ενίσχυσης αλλά και ο υπολογισμός του θα πρέπει να καλύπτει μεγάλη γκάμα συνθηκών φόρτισης.

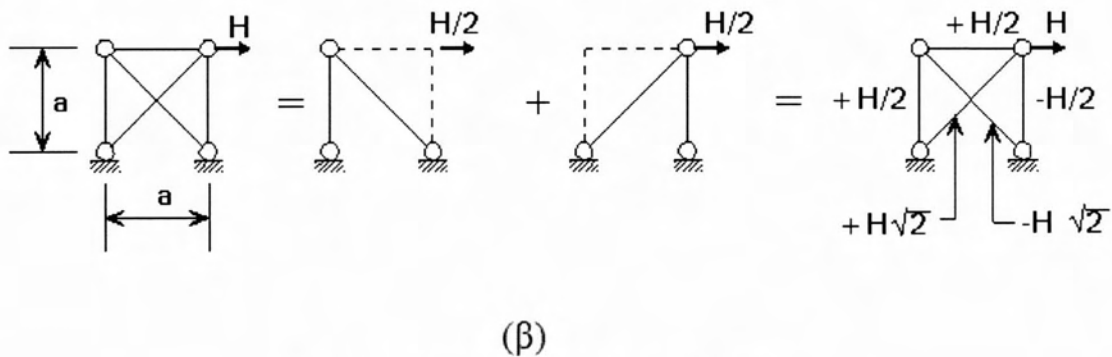
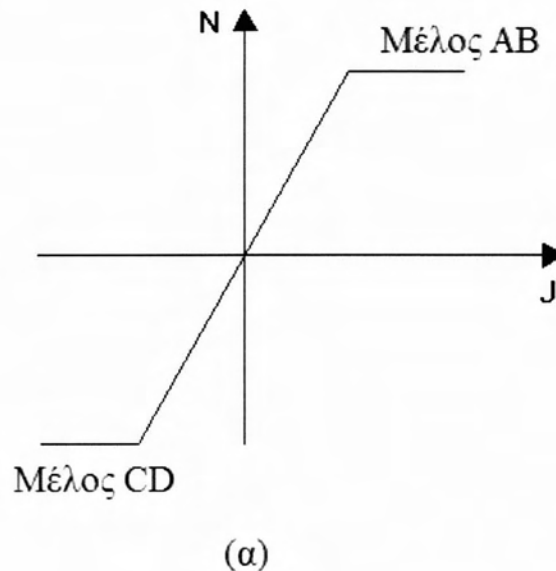
Αναφερόμενοι στην απλή δικτυωτή ενίσχυση της Εικόνας 46α, εξετάζεται η συμπεριφορά ενός μεμονωμένου διαγώνιου συστήματος (Εικόνα 46β).



Εικόνα 46: Συμπεριφορά δικτυωτής ενίσχυσης

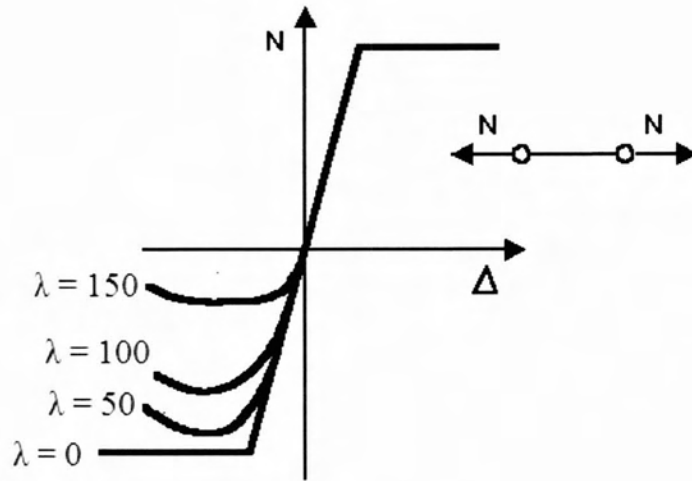
Η κατασκευή είναι υπερστατική. Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων μετάθεσης εφαρμόζεται η συνθήκη συμβατότητας (Εικόνα 46γ), θεωρουμένου του μέλους \overline{CB} δύσκαμπτου. Αυτή η παραδοχή οδηγεί στην ισότητα $\Delta_{AB} = \Delta_{CD}$ μεταξύ της επιμήκυνσης

της εφελκόμενης διαγωνίου AB και της μείωσης του μήκους της θλιβόμενης διαγωνίου CD. Αν η σχέση $N - \Delta$ μεταξύ του αξονικού φορτίου N και της μεταβολής Δ του μήκους (Εικόνα 47) είναι ίδια τόσο για εφελκυσμό όσο και για θλίψη, τότε η αξονική δύναμη των δύο διαγωνίων έχει την ίδια απόλυτη τιμή. Η κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί ως η επαλληλία δύο ισοστατικών κατασκευών που λειτουργούν παράλληλα, οπότε η λύση δίδεται απ' ευθείας.

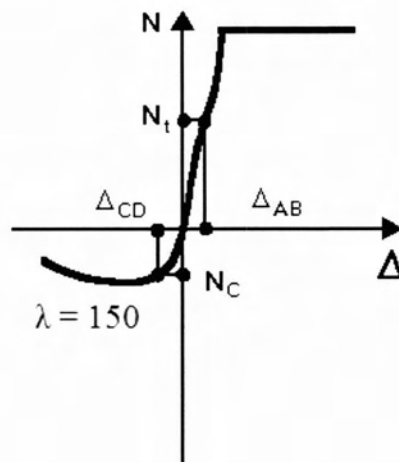


Εικόνα 47: Δράσεις στις διαγώνιες ράβδους

Παρά ταύτα, υπάρχει σημαντική διαφορά συμπεριφοράς μεταξύ των δύο διαγωνίων. Η θλιβόμενη ράβδος CD μπορεί να μην επιδεικνύει γραμμική συμπεριφορά επειδή, παρόλο που παραμένει στην ελαστική περιοχή, υπόκειται σε λυγισμό, οπότε αλλάζει άρδην η συμπεριφορά της σε σχέση με την αντίστοιχη ελαστική όσο αυξάνεται η λυγηρότητα της λ (Εικόνα 48α). Για μεγάλες λυγηρότητες (Εικόνα 48β) η γεωμετρική συνθήκη $\Delta_{AB} = \Delta_{CD}$ απαιτεί ένα αξονικό φορτίο N_c στο θλιβόμενο μέλος πολύ μικρότερο από το αξονικό φορτίο N_i στο εφελκόμενο.



(α)



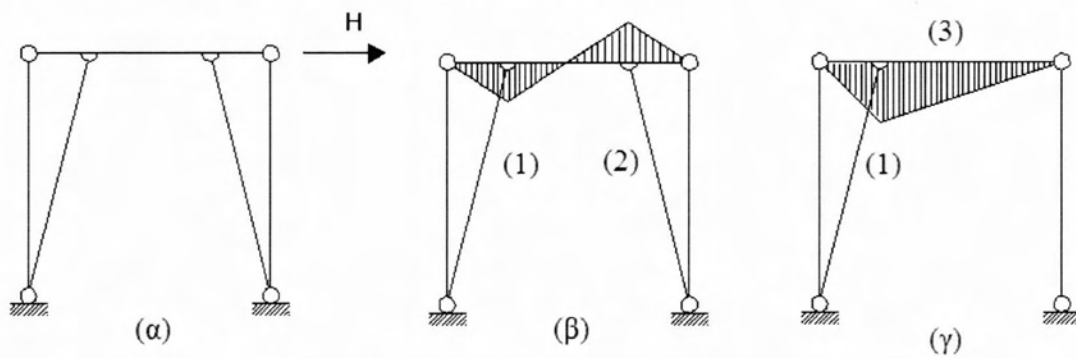
(β)

Εικόνα 48: Διαφορετική συμπεριφορά ράβδου σε εφελκυσμό και θλίψη

Συνεπώς, υπάρχουν δύο τρόποι αντιμετώπισης των συνδέσμων δυσκαμψίας. Η διατομή τους μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε αμφότερες οι διαγώνιοι να έχουν επαρκή αντοχή τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Για το σκοπό αυτό απαιτείται χαμηλή λυγηρότητα ($\lambda < 100$), έτσι ώστε η διαφορά συμπεριφοράς σε εφελκυσμό και θλίψη να είναι αμελητέα. Η λύση αυτή φαίνεται στην Εικόνα 47B, όπου και οι δύο διαγώνιοι συνεργάζονται στην ανάληψη τεμνουσών δυνάμεων. Εναλλακτικά, οι σύνδεσμοι μπορούν να διαστασιολογηθούν με βάση μόνο την εφελκυσόμενη διαγώνιο. Απαιτείται μεγάλη λυγηρότητα (>200) με σκοπό να εξασφαλιστεί ότι, όταν εναλλάσσονται οι τάσεις, και τα δύο μέλη θα παραμείνουν στην ελαστική παρόλο που λυγίζουν. Υπό τη συνθήκη αυτή η θλιβόμενη ράβδος διαθέτει υπεραντοχή και οι δυνάμεις ανθίστανται στο σύνολο τους από την εφελκυσόμενη ράβδο. Σύνδεσμοι σχεδιαζόμενοι με τον τρόπο αυτό είναι γενικά

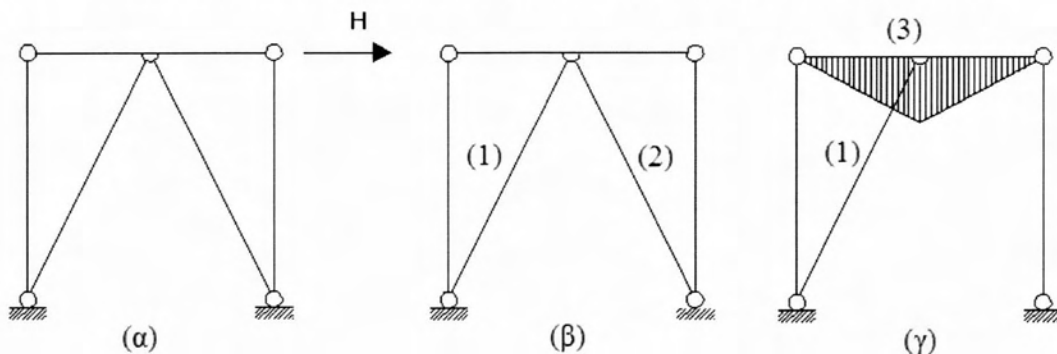
πιο οικονομικοί, αλλά οι παραμορφώσεις της κατασκευής είναι μεγαλύτερες. Επίσης, η πιθανότητα λυγισμού των θλιβόμενων διαγωνίων είναι ανεπιθύμητη, ειδικά όταν το σύστημα βρίσκεται σε επίπεδο πρόσοψης. Τα ανωτέρω ισχύουν επίσης και σε άλλους τύπους συνδέσμων δυσκαμψίας.

Η ενίσχυση που περιέχεται στην Εικόνα 49α, για παράδειγμα, αποτελείται από δύο κεκλιμένες ράβδους συνδεδεμένες με μια δοκό που ανθίσταται σε ροπή. Η δοκός μπορεί να υπολογιστεί μέσω της μεθόδου της Εικόνας 49β ή αυτής της Εικόνας 49γ. Οι σύνδεσμοι της Εικόνας 49β αντιστοιχούν σε μέλη δικτυώματος υπό αξονικά μόνο φορτία. Ένα διαγώνιο μέλος είναι τη μια σε εφελκυσμό και την άλλη σε θλίψη. Καθώς τα δύο μέλη είναι ίδια, πρέπει να ελεγχθεί αν μπορούν να αντέξουν το φορτίο θλίψης. Στην Εικόνα 49γ θεωρείται ότι δρα μόνο η εφελκυσμένη ράβδος. Κατά συνέπεια, η δοκός πρέπει επίσης να αναλάβει επιτυχώς ροπή που προέρχεται από την εξωτερική δύναμη H . Στην περίπτωση αυτή μπορεί επίσης οι σύνδεσμοι να είναι οικονομικοί, εφόσον η θλιβόμενη ράβδος είναι αρκετά λυγηρή ώστε να λυγίζει στην ελαστική περιοχή.



Εικόνα 49: Συμπεριφορά έκκεντρου συνδέσμου

Με τον ίδιο τρόπο μπορεί κανείς να αναλύσει τους συνδέσμους δυσκαμψίας του συστήματος της Εικόνας 50α. Οι ράβδοι ενίσχυσης έχουν σχεδιαστεί να δρουν τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη, ενώ ο σχεδιασμός ελαχιστοποιεί ροπές στη δοκό. Εναλλακτικά, στην Εικόνα 50γ οι σύνδεσμοι σχεδιάζονται για ανάληψη μόνο εφελκυσμού, αγνοώντας το θλιβόμενο μέλος. Αυτή η μέθοδος όμως αυξάνει τη ροπή της δοκού.



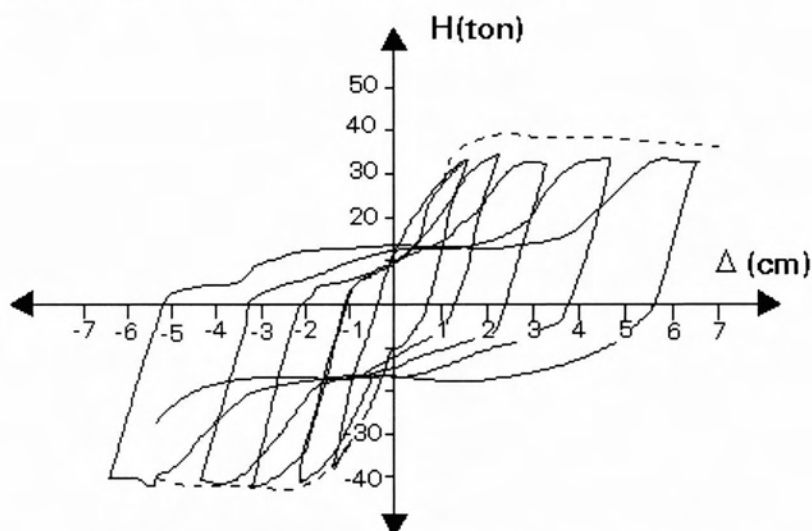
Εικόνα 50: Συμπεριφορά V-συνδέσμου

2.17. Συμπεριφορά υπό οριζόντια φορτία

Παραδοσιακά, δύο οικογένειες δομικών συστημάτων έχουν εφαρμοστεί σε πολυώροφα κτίρια για την ανάληψη σημαντικών οριζόντιων δυνάμεων (ανέμου και σεισμού). Πρόκειται για τα πλαίσια με μη έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας και για τα πλαίσια ανθεκτικά σε ροπή.

Η πρώτη οικογένεια χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε απλά όσο και σε αντισεισμικά καλύβδινα κτίρια. Μορφώνονται κατακόρυφα εν προβόλω δικτυώματα μέσω διαγώνιων συνδέσμων με ταυτιζόμενους κεντροβαρικούς άξονες. Ανθίστανται πλευρικά φορτία (τόσον ανέμου όσο και οριζόντιων συνιστωσών σεισμού) μέσω αξονικών δυνάμεων στα ενισχυτικά μέλη (συνδέσμους), με αποτέλεσμα μεγάλη δυσκαμψία στην ελαστική περιοχή. Σε αυτές τις κατασκευές οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας κυρίως βρίσκονται στις εφελκόμενες διαγώνιους, καθόσον συνήθως υποτίθεται ότι οι θλιβόμενες διαγώνιοι λυγίζουν.

Η ανελαστική ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά μη έκκεντρων συνδέσμων είναι μάλλον μη ικανοποιητική, λόγω επαναλαμβανόμενου λυγισμού των διαγώνιων μελών. Το φαινόμενο αυτό παράγει μια σημαντική μείωση της ικανότητας της κατασκευής στο να απορροφά και να αποσβένει ενέργεια. Η εν λόγω απόκριση φαίνεται στους βρόγχους υστέρησης ενός μη έκκεντρου συνδέσμου της Εικόνας 51.

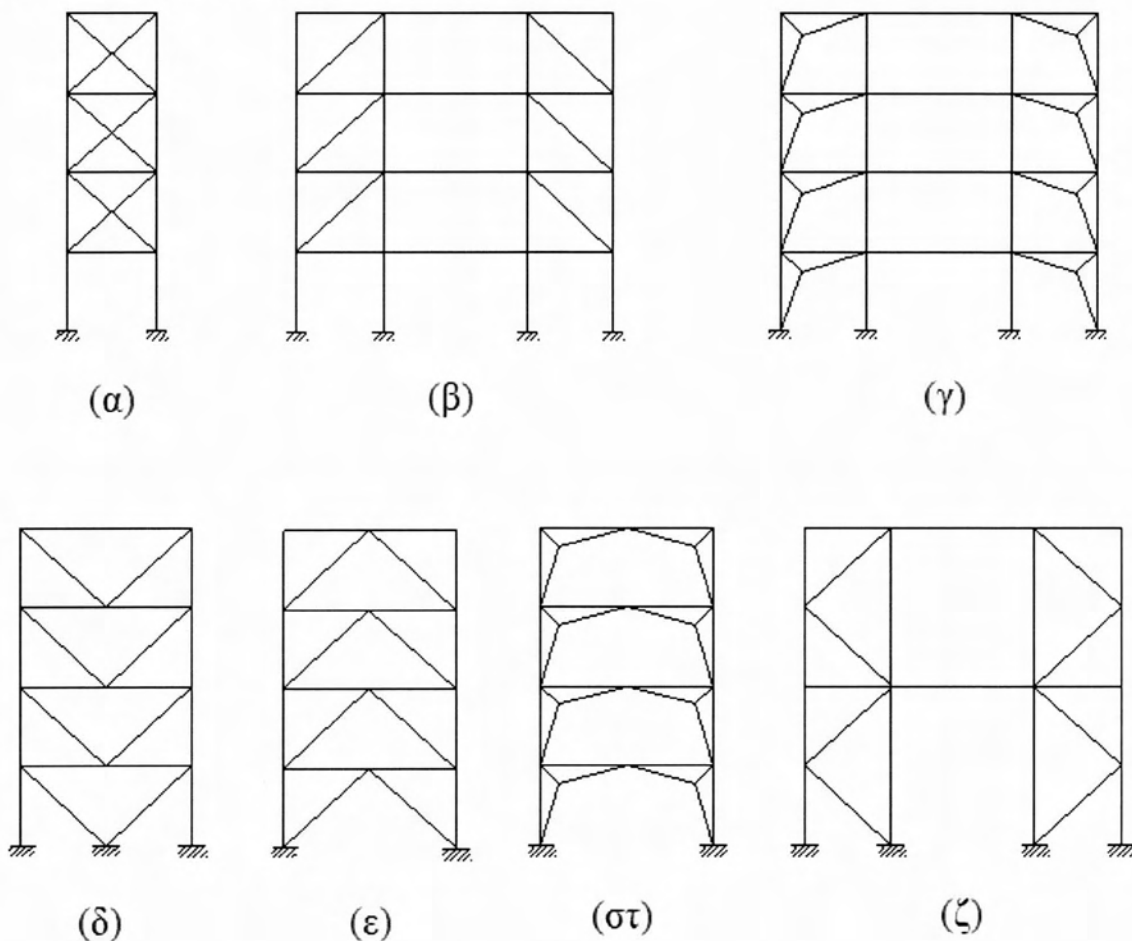


Εικόνα 51: Βρόγχοι υστέρησης ενός μη έκκεντρου συνδέσμου

Υφίσταται διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τον τύπο του συνδέσμου. Οι τύποι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: Διαγώνιοι Χ-σύνδεσμοι (Εικόνα 52α,β,γ), V-σύνδεσμοι (Εικόνα 52γ,δ,ε) και Κ-σύνδεσμοι (Εικόνα 52στ). Οι Χ-σύνδεσμοι απορροφούν ενέργεια μέσω πλαστικοποίησης τόσο των θλιβόμενων όσο και των εφελκόμενων διαγωνίων και η μείωση της αντοχής οφείλεται στον εκτός επιπέδου λυγισμό, ο οποίος αλληλεπιδρά με φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Από αυτή την οπτική γωνία, συμμετρικές διατομές (όπως διπλά C, RHS, CHS) επιδεικνύουν καλλίτερη απόκριση

από μη συμμετρικές διατομές (π.χ. διπλά γωνιακά). Στους V-συνδέσμους, οι οριζόντιες δυνάμεις αναλαμβάνονται και από τις θλιβόμενες και από τις εφελκυσμένες διαγώνιους, εκ των οποίων οι πρώτες είναι απαραίτητες για την ισορροπία. Από την οπτική γωνία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, μόνο οι θλιβόμενες διαγώνιοι αποσβένουν ενέργεια, ενώ οι εφελκυσμένες παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Οι K-συνδέσμοι αντίθετα δεν μπορούν να θεωρηθούν ως αποσβεννύοντες, καθώς οι διαγώνιοι τέμνουν το στύλο σε ενδιάμεσο σημείο, με αποτέλεσμα αυτός να συμπεριλαμβάνεται στο μηχανισμό απόσβεσης.

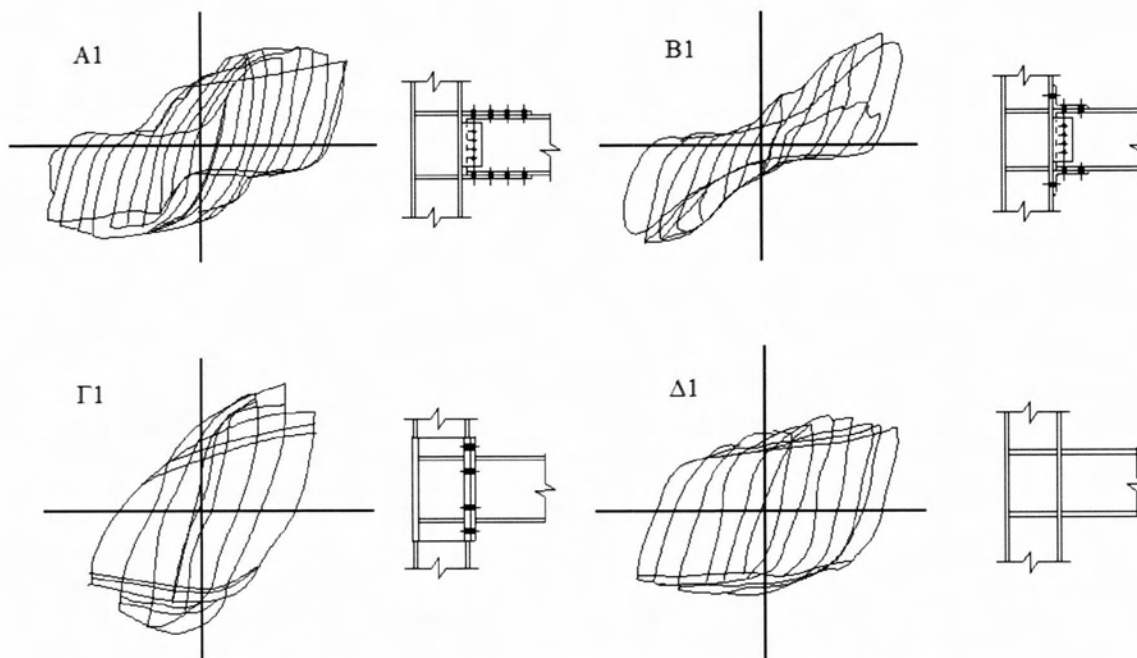
Επιγραμματικά, για όλους τους τύπους μη έκκεντρα ενισχυμένων πλαισίων μπορεί να συμβούν μεγάλες σχετικές μεταξύ ορόφων πλευρικές μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα μη δομικές βλάβες λόγω αστοχίας των συνδέσμων.



Εικόνα 52: Διάφοροι τύποι μη έκκεντρων συνδέσμων δυσκαμψίας

Τα πλαίσια ανθεκτικά σε ροπή διαθέτουν μεγάλο αριθμό περιοχών απορρόφησης και απόσβεσης ενέργειας, οι οποίες βρίσκονται πλησίον των συνδέσεων δοκών - στύλων. Αντίστανται των οριζοντίων δυνάμεων βασικά μέσω κάμψης και η απόσβεση της ενέργειας λαμβάνει χώρα μέσω ανακυκλιζόμενης καμπτικής δράσης.

Οι συνδέσεις δοκών-στύλων σχεδιάζονται συνήθως βάσει τεσσάρων κυρίων τύπων κόμβων (Α, Β, Γ Δ), που απεικονίζονται κατωτέρω, στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53: Βρόγχοι υστέρησης διαφόρων τύπων κόμβων δοκών-στύλων

Ο τύπος Α σχετίζεται με τρία ελάσματα συγκολλημένα στο στύλο και κοχλιωμένα στα πέλματα και τον κορμό της δοκού,

Ο τύπος Β, όπου γωνιακά κοχλιώνονται τόσο στο στύλο όσο και στη δοκό,

Ο τύπος Γ, με μετωπικές πλάκες συμμετρικής προεξοχής και

Ο τύπος Δ, που είναι μια πλήρως συγκολλητή σύνδεση.

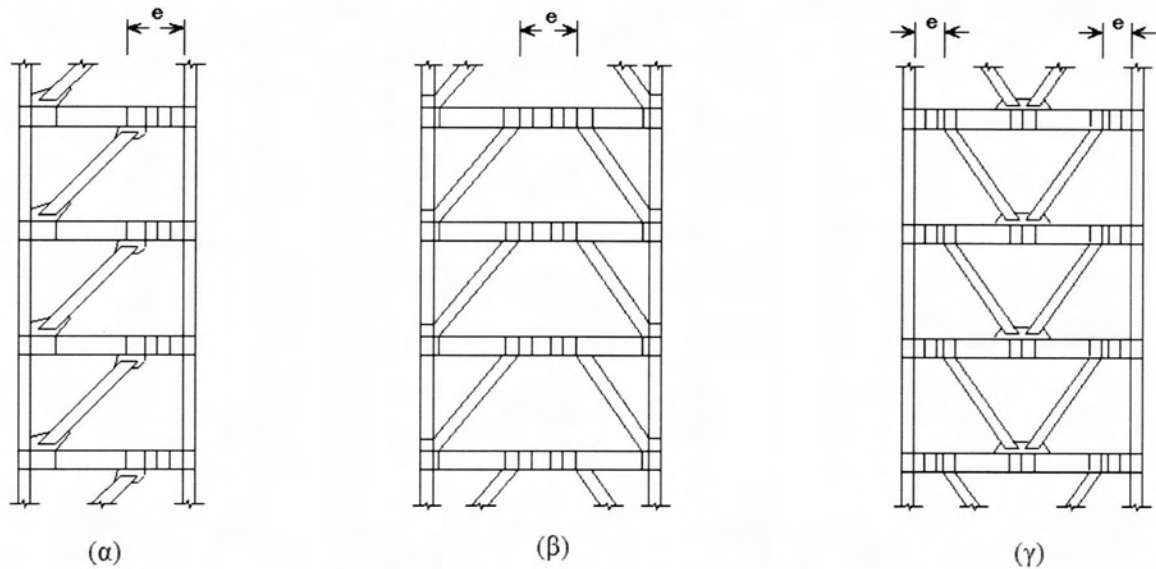
Έχει βρεθεί μέσω πειραμάτων ότι και οι τέσσερις αυτοί τύποι διαθέτουν επαρκή ολκιμότητα (πλαστιμότητα).

Κατά τα λοιπά, τα πλαίσια ανθεκτικά σε ροπή χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε χαμηλά κτίρια, αλλά είναι γενικά πιο δαπανηρά από το προηγούμενο σύστημα για δεδομένο ύψος κατασκευής. Για μέτριου και μεγάλου ύψους κτίρια (μεταξύ 6 και 40 ορόφων) οι πλαισιωτές δομές παρουσιάζουν πολύ μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις υπό τη επήρεια μικρών σεισμών ή μικρής έντασης ανέμων, παράγοντας βλάβες σε μη δομικά στοιχεία. Μπορεί πάντως να επιτευχθεί ικανοποιητική δυσκαμψία προσθέτοντας διαγώνιους συνδέσμους στα δύσκαμπτα πλαίσια.

Αν συγκρίνει κανείς τα δύο προαναφερθέντα συστήματα, κανένα από αυτά ικανοποιεί τις τρεις επιθυμητές οριακές καταστάσεις, τουτέστιν λειτουργικότητας, βλάβης και κατάρρευσης.

Μια κατάλληλη εναρμόνιση μεταξύ της πλευρικής δυσκαμψίας των συνδέσμων και της ολκιμότητας (πλαστιμότητας) των πλαισίων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός υβριδικού συστήματος πλαισίων (Εικόνα 54). Σε αυτό οι οριζόντιες δυνάμεις αναλαμβάνονται κύρια από αξονικά φορτιζόμενα μέλη, ενώ η εκκεντρότητα της διάταξης

επιτρέπει την απόσβεση ενέργειας μέσω ανακυκλιζόμενης καμπτικής και διατμητικής συμπεριφοράς σε ένα μέλος, γνωστό ως **ενεργός σύνδεσμος**.



Εικόνα 54: Διάφοροι τύποι έκκεντρων συνδέσμων

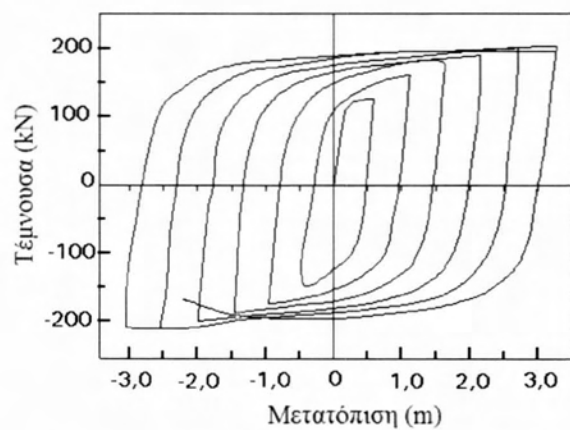
Οι συνήθεις τύποι έκκεντρα ενισχυμένων πλαισίων είναι οι D-σύνδεσμοι (Εικόνα 54α), οι K-σύνδεσμοι (Εικόνα 54β) και οι V-σύνδεσμοι (Εικόνα 54γ). Το επίπεδο απορρόφησης ενέργειας τους είναι παρόμοιο με αυτό των πλαισίων ροπής.

Επιπρόσθετα, τα συστήματα έκκεντρα ενισχυμένων πλαισίων ως άνω έχουν πλεονεκτήματα σε ότι αφορά τον έλεγχο πλευρικής μετατόπισης ορόφων και δίδουν οικονομικές λύσεις για κτίρια μέτριου και μεγάλου ύψους. Ο ενεργός σύνδεσμος είναι η βασική μονάδα απορρόφησης ενέργειας. Πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε η οριακή αντοχή τους σε ροπή και τέμνουσα εξαντληθεί πριν φθάσει κανείς στην οριακή αντοχή εφελκυσμού και θλίψης των υπόλοιπων ράβδων.

Το μήκος του ενεργού συνδέσμου ευθύνεται για το μηχανισμό κατάρρευσης, ο οποίος αποσβένει ενέργεια. Οι κοντοί σύνδεσμοι το κάνουν κύρια μέσω ανελαστικής διατμητικής παραμόρφωσης του κορμού (διατμητικός σύνδεσμος) ενώ οι μακροί μέσω ανελαστικών κύριων τάσεων στα πέλματα (καμπτικοί σύνδεσμοι). Ο προσεκτικός σχεδιασμός των συνδέσμων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ικανοποιητικούς βρόγχους υστέρησης με μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, και παράλληλα διατηρούν ικανοποιητική δυσκαμψία (Εικόνα 55).

Τα έκκεντρα ενισχυμένα πλαίσια ικανοποιούν όλες τις προαναφερθείσες τρεις οριακές καταστάσεις, που απαιτεί ο αντισεισμικός σχεδιασμός χαλύβδινων κατασκευών. Ειδικότερα διαθέτουν εξαιρετική αντοχή και δυσκαμψία στην ελαστική περιοχή, οπότε αποφεύγονται μη δομικές βλάβες και δυσφορία στους χρήστες. Επίσης διαθέτουν αρκετή

ολκιμότητα (πλαστιμότητα) για να απορροφήσουν και να αποσβέσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας στην ανελαστική περιοχή.



Εικόνα 55: Βρόγχοι υστέρησης ενός συνδέσμου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Λυγισμός και Μορφές Αστοχίας Χαλύβδινων Κατασκευών

3.1. Εισαγωγή

Βασικό μέλημα του μηχανικού είναι ο σχεδιασμός ασφαλών κατασκευών με τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση υλικού και, κατ' επέκταση, κόστους. Τα μέσα, ωστόσο, που διαθέτει ο μηχανικός για την επίτευξη αυτού του στόχου συνεχώς εξελίσσονται. Σήμερα, η ύπαρξη δομικών υλικών υψηλής αντοχής και η εξέλιξη των μεθόδων κατεργασίας, δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής δομικών μελών με κάθε επιθυμητό σχήμα και πάχος διατομής. Παράλληλα, η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του σχετικού λογισμικού επιτρέπει την εφαρμογή ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων μεθόδων ανάλυσης, και επομένως τη χρησιμοποίηση μικρότερων συντελεστών ασφαλείας. Τα παραπάνω οδηγούν σε ελαφρύτερα δομικά στοιχεία, με πιο οριακή εκμετάλλευση του υλικού.

Αποτέλεσμα αυτής της τάσης είναι οι σημερινές κατασκευές να είναι περισσότερο εύκαμπτες, τόσο συνολικά, σε επίπεδο φορέα, όσο και τοπικά, σε επίπεδο μέλους ή και διατομής, και επομένως να παραμορφώνονται εντονότερα όταν φορτίζονται. Αυτή η έντονη παραμόρφωση έχει δύο σημαντικές συνέπειες, μία πρωταρχική, στη στατική συμπεριφορά, και μία που προκύπτει από την πρώτη, στις μεθόδους στατικής ανάλυσης. Η πρώτη συνέπεια είναι ότι η κατασκευή ενδέχεται να οδηγηθεί σε μορφές αστοχίας που είναι γνωστές με το γενικό όρο «αστάθεια» ή «λυγισμός» και συνδέονται με απότομη και έντονη αύξηση της παραμόρφωσης για μικρή αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Η δεύτερη συνέπεια είναι ότι πλέον η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη, επομένως η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας στην απαραμόρφωτη γεωμετρία, όπως γίνεται στις κλασικές μεθόδους στατικής ανάλυσης, οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα και πρέπει να αποφεύγεται. Η ανάγκη διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία, η οποία δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους στατικής ανάλυσης, και οδηγεί σε κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης, που είναι γνωστή ως γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά.

Παλαιότερα, οι έλεγχοι αντοχής των κατασκευών γίνονταν με τη μέθοδο των επιτρεπόμενων τάσεων, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε οποιαδήποτε θέση δεν έπρεπε να υπερβαίνουν κάποιες μέγιστες τιμές, ίσες με το όριο διαρροής του υλικού διαιρεμένο με κάποιον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας. Επομένως δεν επιτρεπόταν η υπερφόρτιση των κατασκευών που θα οδηγούσε τα δομικά υλικά σε μετελαστική συμπεριφορά σε οποιαδήποτε θέση. Πλέον, οι έλεγχοι γίνονται με τη μέθοδο συνολικής αντοχής και για ακραίες περιπτώσεις φόρτισης επιτρέπεται η είσοδος των υλικών στην μετελαστική περιοχή, σε προκαθορισμένες βεβαίως θέσεις και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Και αυτή η τοπική υπέρβαση του ορίου διαρροής του δομικού υλικού απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους στατικής ανάλυσης, και επίσης οδηγεί σε κατάργηση της

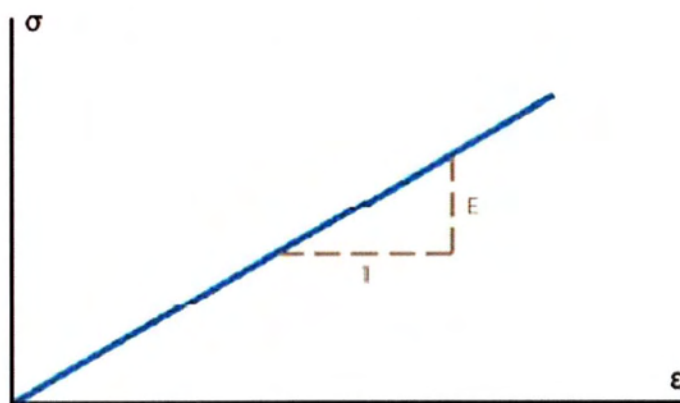
αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης, που είναι γνωστή ως μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.

Συμπερασματικά, μία κατασκευή μπορεί να αστοχήσει είτε λόγω μη γραμμικότητας υλικού είτε λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Στο σχεδιασμό πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι δύο αυτές μορφές μη γραμμικότητας των κατασκευών, ώστε να προσδιορίζεται η συνολική αντοχή τους. Η μη γραμμικότητα υλικού εμφανίζεται συνήθως σε δύσκαμπτους φορείς, π.χ. κτίρια με συνδέσμους δυσκαμψίας, που δεν είναι επιρρεπείς σε έντονες παραμορφώσεις. Η γεωμετρική μη γραμμικότητα μπορεί να είναι κρίσιμη σε εύκαμπτους φορείς, π.χ. τοξωτούς φορείς στέγασης μεγάλων ανοιγμάτων. Σε φορείς ενδιάμεσης δυσκαμψίας μπορεί να εμφανιστεί συνδυασμένη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας.

3.2. Γραμμική συμπεριφορά και προϋποθέσεις

Εάν δεν υπάρχει, ή αγνοηθεί, η μη γραμμική συμπεριφορά ενός μέλους ή μίας κατασκευής, τότε λέμε ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται γραμμικά, και επιτρέπεται να εφαρμόζεται γραμμική ανάλυση. Είναι σκόπιμο να τονιστούν οι προϋποθέσεις υπό τις οποίες η συμπεριφορά είναι γραμμική, που αποτελούν και παραδοχές που γίνονται στη γραμμική ανάλυση, για να κατανοηθεί το πεδίο εφαρμογής της, αλλά και να αποφευχθούν σφάλματα σε περιπτώσεις που αυτές οι προϋποθέσεις δεν ισχύουν. Οι βασικές λοιπόν προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς και ταυτόχρονα βασικές παραδοχές της γραμμικής ανάλυσης είναι οι ακόλουθες:

(1) Το υλικό συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό. Επομένως, οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ είναι ανάλογες των τάσεων σ (Εικόνα 56). Η κλίση της γραφικής παράστασης τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων είναι το μέτρο ελαστικότητας E που εκφράζει τη δυσκαμψία του υλικού, δηλαδή τη αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε παραμόρφωση υπό συγκεκριμένη τάση. Ισχύει δηλαδή ο νόμος του Hooke, που συνδέει γραμμικά τις τάσεις με τις ανηγμένες παραμορφώσεις $\sigma = E\epsilon$.

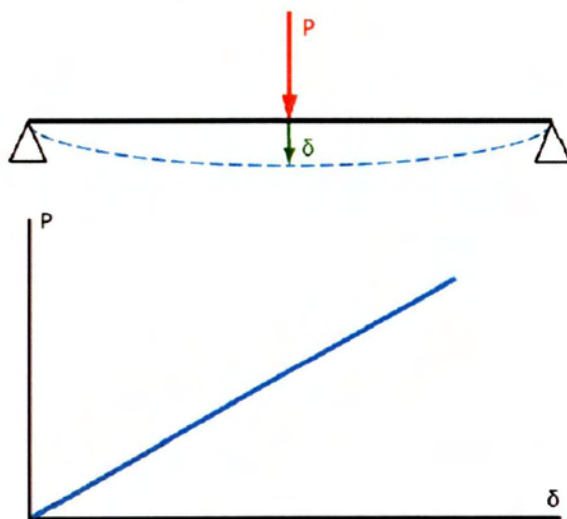


Εικόνα 56: Αναλογία τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων

Για όλα τα συνηθισμένα δομικά υλικά η παραδοχή αυτή ισχύει για το αρχικό μόνον τμήμα του νόμου τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων, ενώ πέραν κάποιου μεγέθους τάσεων η σχέση σ - ϵ παύει να είναι σχέση γραμμικής αναλογίας και η αντίστοιχη γραφική παράσταση δεν είναι πλέον ευθύγραμμη. Επομένως η παραπάνω παραδοχή ουσιαστικά αναφέρεται στην απαίτηση να είναι το επίπεδο φόρτισης επαρκώς χαμηλό, ώστε σε όλες τις θέσεις του φορέα οι αναπτυσσόμενες τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις να παραμένουν στην περιοχή γραμμικής αναλογίας.

(2) Οι πραγματοποιούμενες μετατοπίσεις όλων των σημείων του φορέα είναι πολύ μικρές. Επομένως η γεωμετρία του φορέα στην παραμορφωμένη του κατάσταση μοιάζει πολύ με την αντίστοιχη απαραμόρφωτη, ώστε κατά τους υπολογισμούς να μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτές οι δύο γεωμετρίες ταυτίζονται. Έτσι κατά τη στατική ανάλυση αγνοείται η παραμόρφωση και οι εξισώσεις ισορροπίας γράφονται στην απαραμόρφωτη κατάσταση, αν και στην πραγματικότητα κάθε φορτιζόμενος φορέας παραμορφώνεται και ισορροπεί στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Εφόσον ισχύουν και οι δύο αυτές παραδοχές, ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες εντάσεις και μετατοπίσεις είναι γραμμικώς ανάλογες των επιβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων. Η γραφική παράσταση της επιβαλλόμενης εξωτερικής φόρτισης P και κάποιας χαρακτηριστικής αναπτυσσόμενης μετατόπισης δ είναι ευθεία γραμμή. Μία τέτοια γραφική παράσταση φαίνεται στην Εικόνα 57 για το απλό παράδειγμα μίας αμφιέρειστης δοκού με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον και ονομάζεται δρόμος ισορροπίας, διότι κάθε σημείο της δείχνει μία κατάσταση ισορροπίας του στατικού συστήματος. Η ισχύς της αρχής της επαλληλίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή όλων των μεθόδων της κλασικής στατικής ανάλυσης, όπως είναι η μέθοδος των δυνάμεων και η μέθοδος των μετατοπίσεων.



Εικόνα 57: Δρόμος ισορροπίας αμφιέρειστης δοκού με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο

Σε πολλές περιπτώσεις μία ή και οι δύο αυτές παραδοχές δεν ισχύουν. Εφόσον καταλύεται η πρώτη παραδοχή η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα υλικού. Εφόσον καταλύεται η δεύτερη παρατηρείται μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Εάν καταλύονται και οι δύο, υπάρχει ταυτόχρονα μη γραμμικότητα υλικού και μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι δρόμοι ισορροπίας δεν είναι πλέον ευθύγραμμοι αλλά καμπύλοι (Εικόνα 58), δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας, και απαιτείται η εφαρμογή ειδικών μεθόδων ανάλυσης.

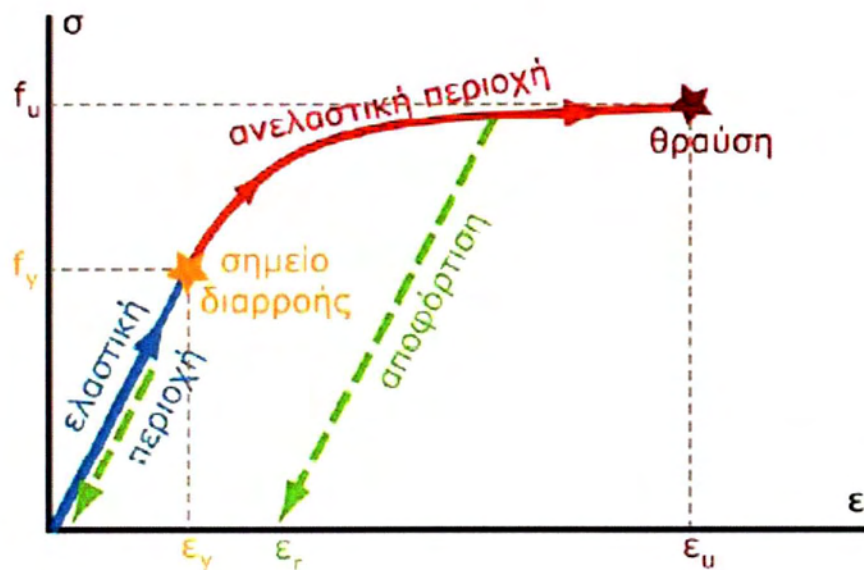


Εικόνα 58: Δρόμος ισορροπίας αμφιέριστης δοκού με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο

Τα παραπάνω περιγράφονται μέσω των παραδειγμάτων φορέων που παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, τα οποία δίδονται κατωτέρω.

3.3. Θλιβόμενος κύλινδρος

Εξετάζεται το πρόβλημα θλιβόμενου μέλους μήκους L με διατομή κυκλικού δακτυλίου με εξωτερική ακτίνα R και πάχος t , από κάποιο όλκιμο υλικό, όπως ο χάλυβας. Ο καταστατικός νόμος του υλικού, δηλαδή το διάγραμμα τάσεων σ - ανηγμένων παραμορφώσεων ε , φαίνεται στην Εικόνα 59 και χαρακτηρίζεται από ένα αρχικό ευθύγραμμο τμήμα, που αντιπροσωπεύει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, ως το λεγόμενο σημείο διαρροής, που αντιστοιχεί σε τάση ίση προς το όριο διαρροής f_y και στην λεγόμενη ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής ε_y . Στη συνέχεια ο καταστατικός νόμος αποτελείται από ένα καμπύλο τμήμα που αντιπροσωπεύει μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο θραύσης, που αντιστοιχεί σε τάση ίση προς το όριο θραύσης f_u και στην λεγόμενη ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης ε_u . Αποφόρτιση του δοκιμίου από τάση μικρότερη από το όριο διαρροής f_y ακολουθεί την ίδια ευθεία όπως η αντίστοιχη φόρτιση, και πλήρης αποφόρτιση μέχρι μηδενική επιβαλλόμενη τάση οδηγεί σε μηδενικές ανηγμένες παραμορφώσεις. Εάν γίνει αποφόρτιση από τάση μεγαλύτερη από το όριο διαρροής ακολουθείται μία ευθεία παράλληλη με την αρχική ευθεία της ελαστικής περιοχής και για πλήρη αποφόρτιση παρατηρούνται παραμένουσες παραμορφώσεις ε_r .

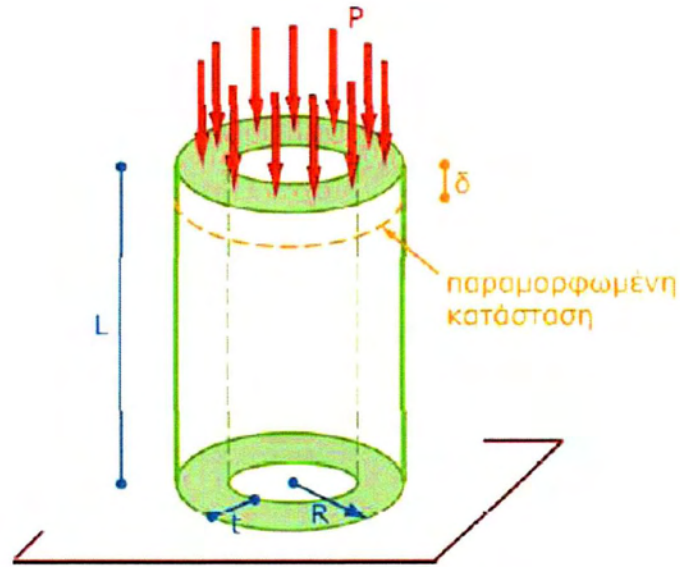


Εικόνα 59: Καταστατικός νόμος του υλικού του κυλίνδρου

Χάριν απλότητας γίνεται η παραδοχή ότι το σημείο διαρροής, δηλαδή εκείνο πέραν του οποίου η συμπεριφορά γίνεται ανελαστική και πλήρης αποφόρτιση οδηγεί σε παραμένουσες παραμορφώσεις, συμπίπτει με το όριο αναλογίας, που είναι το σημείο όπου παύει να ισχύει ο νόμος του Hooke και να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων. Σε πραγματικά δομικά υλικά τα δύο αυτά σημεία είναι μεν κοντά, αλλά συνήθως δεν συμπίπτουν. Η διαφορά όμως αυτή μεταξύ ορίου διαρροής και ορίου αναλογίας κατά κανόνα αμελείται κατά τους υπολογισμούς. Στη συνέχεια περιγράφεται η συμπεριφορά του θλιβόμενου κυλίνδρου για σταδιακά αυξανόμενο φορτίο, όπως αυτή θα μπορούσε να προκύψει από την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών στο εργαστήριο ή από την αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου, και την καταγραφή της αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης. Θεωρούνται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας του κυλίνδρου, ανάλογα με τη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών L , R και t :

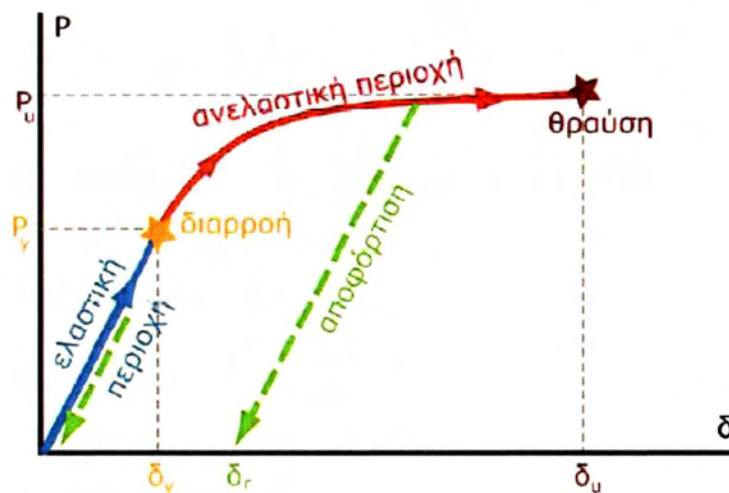
3.3.1 Βραχύς κύλινδρος με παχιά τοιχώματα

Ο κύλινδρος της Εικόνας 60 χαρακτηρίζεται ως βραχύς με παχιά τοιχώματα, διότι τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη L , R , t είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Ο κύλινδρος εδράζεται ομοιογενώς στην κάτω επιφάνειά του και υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο P που επιβάλλεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνειά του και έχει σταδιακά αυξανόμενο μέγεθος. Οι εγκάρσιες μετακινήσεις στο άνω άκρο του κυλίνδρου θεωρούνται δεσμευμένες, ενώ οι αξονικές είναι ελεύθερες. Η παραμόρφωση περιγράφεται μέσω της αξονικής βράχυνσης του κυλίνδρου δ .



Εικόνα 60: Βραχύς κύλινδρος με παχιά τοιχώματα

Η στατική συμπεριφορά του θλιβόμενου κυλινδρικού δοκιμίου περιγράφεται με το διάγραμμα φορτίου P - μετατόπισης δ , που, όπως προαναφέρθηκε, ονομάζεται δρόμος ισορροπίας, γιατί κάθε σημείο του δείχνει μία κατάσταση ισορροπίας του συστήματος (Εικόνα 61). Παρατηρούμε ότι ο δρόμος ισορροπίας είναι παρόμοιος με το διάγραμμα τάσεων σ - ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ για θλίψη του υλικού (Εικόνα 59). Αρχικά δηλαδή υπάρχει μία γραμμική περιοχή, όπου το δοκίμιο συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά και οι μετατοπίσεις δ αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του φορτίου P . Αυτό συνεπάγεται παραμόνη του υλικού στη γραμμική ελαστική περιοχή, οπότε, αν κάποια στιγμή το φορτίο αρχίσει σταδιακά να μειώνεται, τότε παρατηρείται ότι ακολουθείται κατά την αποφόρτιση ο ίδιος γραμμικός κλάδος με αυτόν της φόρτισης, με αντίθετη φορά. Για μηδενισμό του φορτίου ο φορέας επιστρέφει στην αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση του.



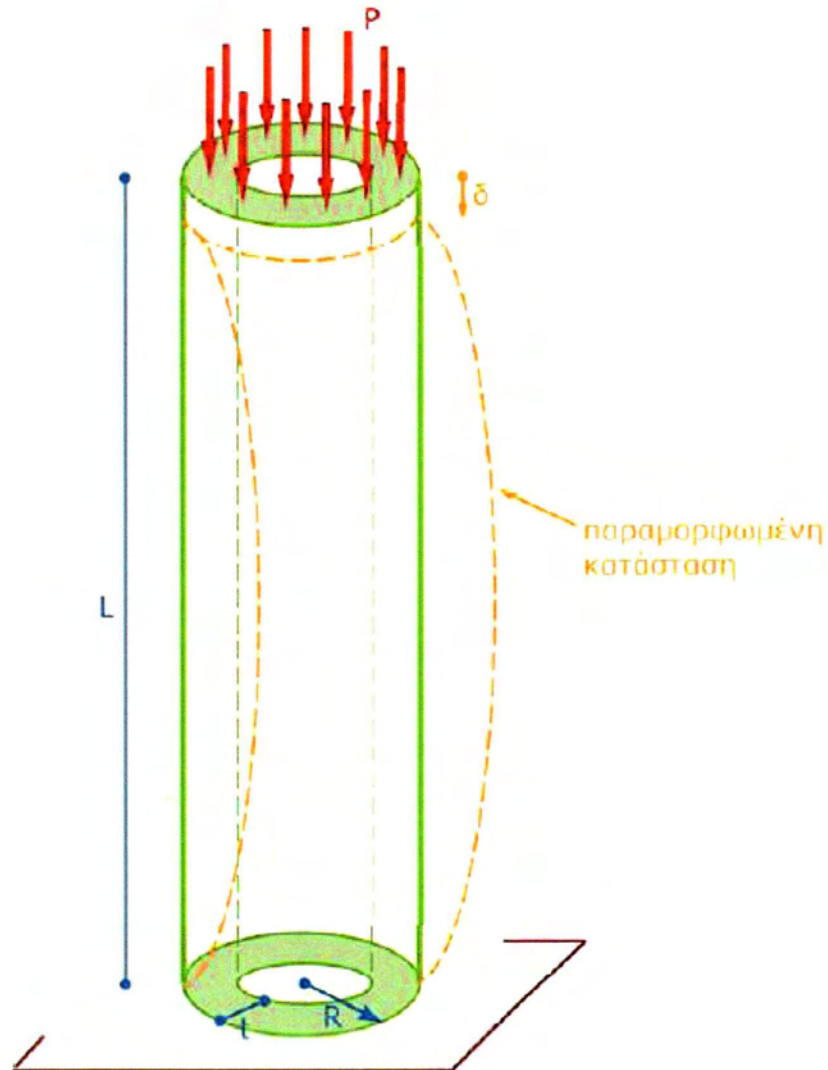
Εικόνα 61: Δρόμος ισορροπίας βραχέως κυλίνδρου με παχιά τοιχώματα

Από κάποια τιμή P_y του φορτίου και άνω παρατηρείται ότι η αύξηση της βράχυνσης δ είναι ταχύτερη από την αύξηση του φορτίου. Αυτό οφείλεται στην υπέρβαση του ορίου διαρροής του υλικού και την είσοδό του στην μετελαστική ή ανελαστική ή πλαστική περιοχή. Η τιμή P_y του φορτίου είναι ίση προς το όριο διαρροής f_y του υλικού πολλαπλασιασμένη επί το εμβαδόν A της διατομής του δοκιμίου. Για φορτίο επομένως μεγαλύτερο του P_y καταλύεται η πρώτη από τις δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς που αφορά γραμμικά ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Το είδος μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι **μη γραμμικότητα υλικού** και η τελική αστοχία του δοκιμίου οφείλεται σε θραύση του υλικού, που θα συμβεί όταν για περαιτέρω αύξηση του φορτίου η τάση του υλικού θα φθάσει το όριο θραύσης f_u . Αυτό συμβαίνει για τιμή του φορτίου P_u , ίση προς το όριο διαρροής f_u του υλικού πολλαπλασιασμένη επί το εμβαδόν A της διατομής του δοκιμίου.

Στην περίπτωση που πριν τη στιγμή της θραύσης το φορτίο αρχίσει σταδιακά να μειώνεται (αποφόρτιση δοκιμίου), τότε παρατηρείται ότι η σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων είναι και πάλι γραμμική. Μάλιστα, παρατηρείται ότι η γραμμή του κλάδου αποφόρτισης είναι παράλληλη με τη γραμμή της ελαστικής περιοχής του κλάδου φόρτισης. Τέλος, αν αφαιρεθεί πλήρως το φορτίο ενός δοκιμίου, το υλικό του οποίου είχε περάσει στη μετελαστική του περιοχή, θα παρατηρηθεί μία παραμένουσα μετακίνηση δ_r και το δοκίμιο θα διαφέρει από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση του. Παρατηρείται δηλαδή πλήρης αντιστοιχία της συμπεριφοράς του δοκιμίου με τη συμπεριφορά του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Αυτή η αντιστοιχία είναι χαρακτηριστική μελών με μικρή λυγηρότητα, δηλαδή με γεωμετρία που εμφανίζει ίδιας τάξης μεγέθους χαρακτηριστικές διαστάσεις και κατά τους τρεις άξονες.

3.3.2 Μακρύς κύλινδρος με παχιά τοιχώματα

Ο κύλινδρος της Εικόνας 62 έχει παχιά τοιχώματα, δηλαδή το πάχος των τοιχωμάτων του t και η ακτίνα R είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, αλλά είναι επιμήκης, δηλαδή, το μήκος του είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από την ακτίνα και το πάχος. Επομένως το δοκίμιο έχει τη μία διάστασή του πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δύο, κάτι που συχνά περιγράφεται λέγοντας ότι το δοκίμιο έχει μεγάλη λυγηρότητα. Και αυτός ο κύλινδρος εδράζεται ομοιογενώς στην κάτω επιφάνειά του και υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο P που επιβάλλεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνειά του και έχει σταδιακά αυξανόμενο μέγεθος. Οι εγκάρσιες μετακινήσεις στο άνω άκρο θεωρούνται δεσμευμένες, ενώ οι αξονικές είναι ελεύθερες. Η παραμόρφωση του κυλίνδρου περιγράφεται και πάλι μέσω της αξονικής του βράχυνσης δ .



Εικόνα 62: Μακρύς κύλινδρος με παχιά τοιχώματα

Η συμπεριφορά περιγράφεται και πάλι με τον δρόμο ισορροπίας, δηλαδή ένα διάγραμμα που συνδέει το φορτίο P με τη μετατόπιση δ (Εικόνα 63). Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι αρχικά οι μετατοπίσεις δ είναι ανάλογες του φορτίου. Στο διάγραμμα P - δ αυτή η κατάσταση του φορέα περιγράφεται με μία ευθεία γραμμή, η οποία ονομάζεται κύριος ή πρωτεύων δρόμος ισορροπίας. Η μορφή παραμόρφωσης του δοκιμίου που αντιστοιχεί στον κύριο δρόμο ισορροπίας είναι καθαρή αξονική βράχυνση, δηλαδή ο άξονας του δοκιμίου παραμένει ευθύγραμμος. Από κάποια τιμή P_{Δ} του φορτίου, η οποία είναι μικρότερη από την τιμή που αντιστοιχεί στη διαρροή, παρατηρείται ότι αλλάζει η μορφή παραμόρφωσης του φορέα, ο οποίος απότομα εγκαταλείπει την ευθύγραμμη κατάσταση και αρχίζει να καμπυλώνεται (Εικόνα 61), και ότι οι μετατοπίσεις δ παύουν να είναι ανάλογες του φορτίου (Εικόνα 62). Για αυτήν την τιμή P_{Δ} του φορτίου, και για αντίστοιχη μετατόπιση δ_{Δ} , λέμε ότι συμβαίνει λυγισμός του δοκιμίου, δηλαδή πραγματοποιείται πολύ μεγάλη και ξαφνική αύξηση των μετατοπίσεων για μικρή αύξηση

του φορτίου. Μάλιστα ο λυγισμός αυτός χαρακτηρίζεται ως «καθολικός», διότι αφορά παραμόρφωση ολόκληρου του μέλους.



Εικόνα 62: Δρόμος ισορροπίας μακρού κυλίνδρου με παχιά τοιχώματα

Για φορτίο επομένως μεγαλύτερο του P_{Δ} , λόγω της έντονης αύξησης των μετατοπίσεων, η παραμορφωμένη γεωμετρία του δοκιμίου διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη και καταλύεται η δεύτερη από τις δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς. Το είδος μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι **γεωμετρική μη γραμμικότητα**. Το υπόλοιπο τμήμα του δρόμου ισορροπίας (μετά το σημείο όπου συνέβη λυγισμός) ονομάζεται δευτερεύων δρόμος ισορροπίας. Η συμπεριφορά του υλικού του δοκιμίου σε αυτήν την περιοχή εξακολουθεί αρχικά να είναι γραμμική ελαστική, διότι δεν έχει ξεπεραστεί ακόμη το όριο διαρροής. Για περαιτέρω αύξηση του φορτίου οι αναπτυσσόμενες τάσεις αυξάνονται, και μάλιστα με γρήγορους ρυθμούς, διότι στις ορθές τάσεις λόγω βράχυνσης προστίθενται και ορθές τάσεις λόγω καμπτικής παραμόρφωσης, και τελικά φθάνουν το όριο διαρροής στο σημείο B του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας.

Μετά το σημείο B η συμπεριφορά του υλικού γίνεται πλαστική, ενώ και οι μετατοπίσεις του δοκιμίου παραμένουν μεγάλες και μάλιστα συνεχώς αυξάνονται. Καταλύονται λοιπόν και οι δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς και εμφανίζεται **ταυτόχρονα τόσο γεωμετρική μη γραμμικότητα όσο και μη γραμμικότητα υλικού**. Πέραν του σημείου B παρατηρούμε ότι η κλίση του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας σταδιακά μειώνεται, μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου.

Το σημείο τομής Δ μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, που αντιστοιχεί και σε απότομη μετάβαση του φορέα από ευθύγραμμη σε καμπυλωμένη

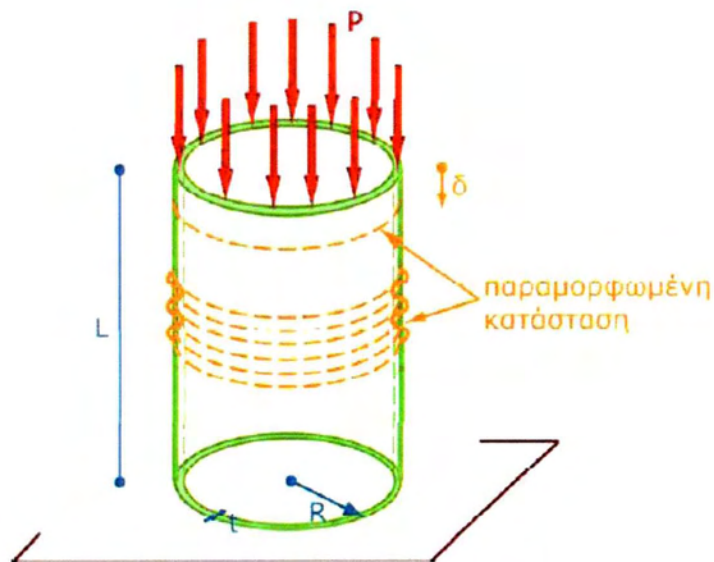
μορφή ισορροπίας, ονομάζεται σημείο διακλάδωσης, και ο παρατηρούμενος λυγισμός λέγεται και λυγισμός μέσω σημείου διακλάδωσης. Ο κύριος δρόμος ισορροπίας ονομάζεται και προλυγισμικός κλάδος, ενώ ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας ονομάζεται και μεταλυγισμικός κλάδος. Η ικανότητα του φορέα να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο από εκείνο που προκαλεί λυγισμό λέγεται μεταλυγισμική αντοχή και παριστάνεται γραφικά από την ανοδική μορφή του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας μετά το σημείο διακλάδωσης.

Τέλος, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του δοκιμίου σε αποφόρτιση εξαρτάται από το αν οι τάσεις έχουν υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού. Έτσι, αν το υλικό έχει παραμείνει στην ελαστική περιοχή, ο κλάδος αποφόρτισης θα είναι ο ίδιος με αυτόν της φόρτισης. Αυτό ισχύει τόσο για το τμήμα ΟΔ (κύριος δρόμος ισορροπίας), όπου η συμπεριφορά του δοκιμίου είναι γραμμική ελαστική, όσο και για το τμήμα ΔΒ του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας, όπου η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως μη γραμμική ελαστική. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, μετά από πλήρη αποφόρτιση, δηλαδή μηδενισμό του επιβαλλόμενου φορτίου P , το δοκίμιο επιστρέφει στην αρχική ευθύγραμμη κατάστασή του, χωρίς παραμένουσες παραμορφώσεις. Εάν η αποφόρτιση γίνει μετά το λυγισμό, δηλαδή από το τμήμα ΔΒ του δευτερεύοντος κλάδου ισορροπίας, ο λυγισμός λέγεται ελαστικός. Μετά όμως από το σημείο Β, όταν δηλαδή το υλικό έχει περάσει στην πλαστική του περιοχή, ο κλάδος αποφόρτισης είναι ευθύγραμμος και παράλληλος με τον αρχικό γραμμικό κλάδο φόρτισης. Η συμπεριφορά εδώ είναι μη γραμμική ανελαστική και μετά από πλήρη αποφόρτιση παρατηρείται στο δοκίμιο παραμένουσα μετακίνηση δ_r . Στην περίπτωση αυτή ο λυγισμός λέγεται **ανελαστικός**.

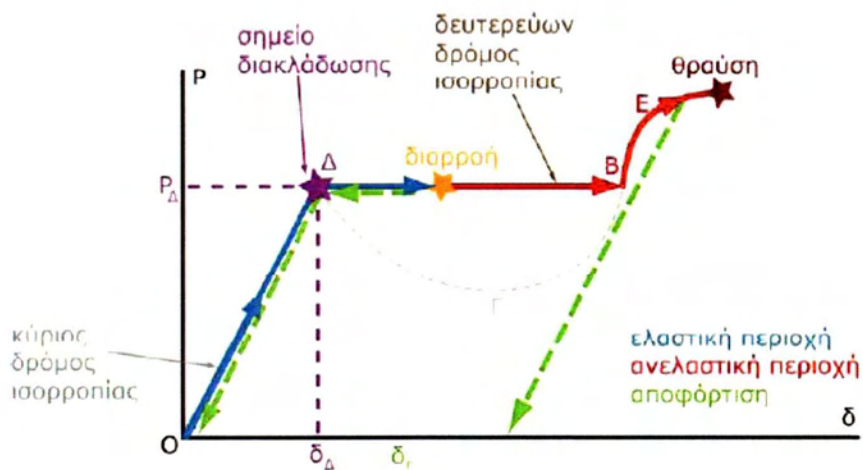
3.3.3 Λεπτότοιχος κύλινδρος

Ο κύλινδρος στην Εικόνα 63 έχει μήκος L και ακτίνα R της ίδιας τάξης μεγέθους, αλλά είναι λεπτότοιχος, δηλαδή το πάχος του t είναι πολύ μικρότερο από τα L και R . Επομένως το δοκίμιο έχει μία διάστασή του πολύ μικρότερη από τις άλλες δύο, κάτι που επίσης συχνά περιγράφεται λέγοντας ότι το δοκίμιο έχει μεγάλη λυγηρότητα. Και αυτός ο κύλινδρος εδράζεται ομοιογενώς στην κάτω επιφάνειά του και υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο P που επιβάλλεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνειά του και έχει σταδιακά αυξανόμενο μέγεθος. Οι εγκάρσιες μετακινήσεις στο άνω άκρο θεωρούνται δεσμευμένες, ενώ οι αξονικές είναι ελεύθερες. Η παραμόρφωση του κυλίνδρου περιγράφεται μέσω της αξονικής του βράχυνσης δ .

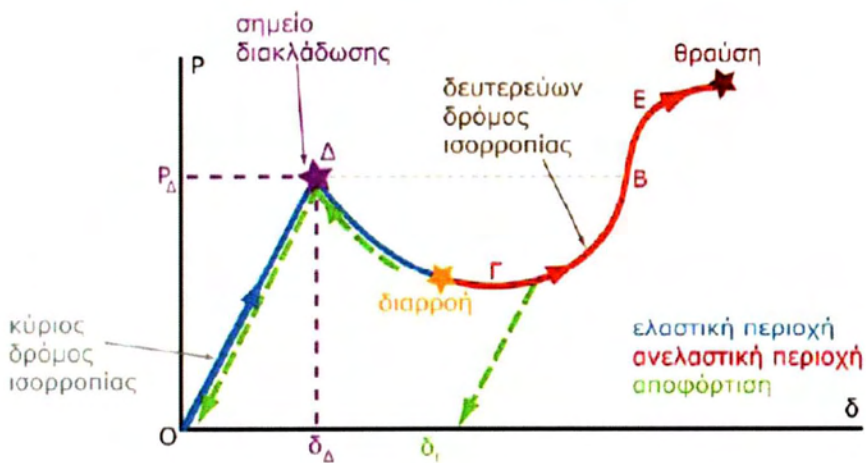
Αρχικά, η συμπεριφορά και αυτού του δοκιμίου για μικρές τιμές του φορτίου P είναι η ίδια. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα P - δ καταγράφεται ο ευθύγραμμος κλάδος ΟΔ, όπου οι μετατοπίσεις δ είναι ανάλογες του φορτίου P (Εικόνα 64). Αυτός είναι ο κύριος ή πρωτεύων δρόμος ισορροπίας και η μορφή παραμόρφωσης του δοκιμίου που αντιπροσωπεύει είναι καθαρή αξονική βράχυνση, δηλαδή ο άξονας του δοκιμίου παραμένει ευθύγραμμος και το σχήμα του παραμένει κυλινδρικό.



Εικόνα 63: Λεπτότοιχος κύλινδρος



(α) Δοκιμή με «έλεγχο του φορτίου»



(β) Δοκιμή με «έλεγχο της μετατόπισης»

Εικόνα 64: Δρόμος ισορροπίας λεπτότοιχου κυλίνδρου

Για κάποια τιμή όμως P_{Δ} του φορτίου, διάφορη από την αντίστοιχη τιμή P_{Δ} της δεύτερης περίπτωσης και μικρότερη από το φορτίο διαρροής, και για τιμή δ_{Δ} της μετατόπισης, παρατηρείται ότι αλλάζει η μορφή παραμόρφωσης του φορέα, ο οποίος απότομα εμφανίζει τοπική ρυτίδωση των τοιχωμάτων (Εικόνα 63), και ότι οι μετατοπίσεις δ παύουν να είναι ανάλογες του φορτίου (Εικόνα 64). Για αυτήν δηλαδή την τιμή P_{Δ} του φορτίου συμβαίνει και πάλι λυγισμός του δοκιμίου, δηλαδή αυξάνονται πολύ οι μετατοπίσεις για μικρή αύξηση του φορτίου. Αυτή τη φορά ο λυγισμός αυτός χαρακτηρίζεται ως «τοπικός», διότι αφορά τοπική παραμόρφωση μίας περιορισμένης περιοχής του μέλους.

Εφόσον η πειραματική δοκιμή ή η αριθμητική ανάλυση διεξάγονται με «έλεγχο του φορτίου», δηλαδή επιβάλλοντας και προσαυξάνοντας σταδιακά το φορτίο, π.χ. στο εργαστήριο προσθέτοντας σταδιακά μικρά βάρη, και καταγράφοντας την προκύπτουσα μετατόπιση, τότε για μικρή προσαύξηση του φορτίου πέραν της τιμής P_{Δ} ο φορέας αναζητεί θέση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή του φορτίου. Τέτοια θέση δεν υπάρχει πλησίον του σημείου Δ , οπότε, χωρίς προειδοποίηση και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οι παραμορφώσεις του φορέα αυξάνονται πολύ, και πραγματοποιείται μεταπήδηση στο μακρινό σημείο ισορροπίας B (Εικόνα 64α), το μόνο που υπάρχει για αυτή την τιμή του φορτίου. Η μετάβαση από το Δ στο B γίνεται μέσω του οριζόντιου κλάδου ΔB , που θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αποτελεί τον *δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας* για την περίπτωση «ελέγχου του φορτίου». Στην πραγματικότητα, όλα τα σημεία του κλάδου ΔB , εκτός των άκρων Δ και B , δεν είναι θέσεις στατικής ισορροπίας, αλλά θέσεις δυναμικής ισορροπίας, από τις οποίες ο φορέας διέρχεται με μεγάλη ταχύτητα αναζητώντας θέση στατικής ισορροπίας, την οποία και βρίσκει στο B . Λόγω αδράνειας το σύστημα δεν θα σταματήσει στη θέση ισορροπίας B , αλλά θα την προσπεράσει, θα εκτελέσει ταλάντωση περί το B , όπου και τελικά θα ισορροπήσει, λόγω απόσβεσης. Αυτό το είδος λυγισμού ονομάζεται **ακαριαίος λυγισμός** (snap-through buckling), και είναι πολύ επικίνδυνος και καταστροφικός λόγω του δυναμικού του χαρακτήρα.

Για μετατοπίσεις μεγαλύτερες της δ_{Δ} η παραμορφωμένη γεωμετρία του δοκιμίου διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη, οπότε καταλύεται η δεύτερη από τις δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς. Το είδος μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι επομένως **γεωμετρική μη γραμμικότητα**. Η συμπεριφορά του υλικού του δοκιμίου κατά τον ακαριαίο λυγισμό εξακολουθεί αρχικά να είναι γραμμική ελαστική, διότι οι τάσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις δεν έχουν υπερβεί ακόμη το όριο διαρροής. Για περαιτέρω αύξηση των μετατοπίσεων οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις αυξάνονται και, συνήθως, φθάνουν το όριο διαρροής πριν το σημείο B . Τότε η συμπεριφορά του υλικού γίνεται πλαστική, ενώ και οι μετατοπίσεις παραμένουν μεγάλες και μάλιστα συνεχώς αυξάνονται. Καταλύονται λοιπόν

και οι δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς και το είδος μη γραμμικότητας που εμφανίζεται είναι **ταυτόχρονη γεωμετρική μη γραμμικότητα και μη γραμμικότητα υλικού**.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ακαριαίου λυγισμού από την καθημερινή μας ζωή είναι η αναστροφή που μπορεί να συμβεί σε μια ομπρέλα, όταν αυτή χρησιμοποιείται υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν η ομπρέλα στρέφεται έτσι, ώστε να άνεμος να προσβάλλει το κοίλο τμήμα της. Συνήθως ο λυγισμός της ομπρέλας είναι ελαστικός, δηλαδή μπορεί ο χρήστης να τραβήξει με το χέρι του τις αντένες της ομπρέλας προς τα κάτω, και να την επαναφέρει στη σωστή της θέση, χωρίς να υπάρξουν παραμένουσες παραμορφώσεις. Σε περιπτώσεις όμως βιαιότερης καταπόνησης, είναι πιθανόν κάποιες αντένες να στραβώσουν και η ομπρέλα να μην μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί. Τότε έχει συμβεί ανελαστικός λυγισμός.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα ακαριαίου λυγισμού από την καθημερινή μας ζωή είναι αυτό που συμβαίνει αν συμπιέσουμε κουτάκια αναψυκτικού (Εικόνα 65), που άλλωστε από στατική άποψη συμπεριφέρονται ως λεπτότοιχα κυλινδρικά κελύφη. Στην περίπτωση αυτή ο ακαριαίος λυγισμός είναι έντονα ανελαστικός, και εκδηλώνονται εμφανείς παραμένουσες παραμορφώσεις.



Εικόνα 65: Κουτί αναψυκτικού που έχει υποστεί ανελαστικό λυγισμό

Επανερχόμενοι στην περιγραφή της συμπεριφοράς του λεπτότοιχου κυλίνδρου της Εικόνας 63, εναλλακτικά, η πειραματική δοκιμή ή η αριθμητική ανάλυση μπορούν να διεξαχθούν με «έλεγχο της μετατόπισης», δηλαδή επιβάλλοντας και προσαυξάνοντας σταδιακά τη μετατόπιση δ , π.χ. στο εργαστήριο μέσω ενός γρύλου, και καταγράφοντας την προκύπτουσα αντίδραση που θα ισούται με το φορτίο P . Στην περίπτωση αυτή, για μικρή προσαύξηση της μετατόπισης πέραν της τιμής δ_{Δ} ο φορέας αναζητεί θέση ισορροπίας που να αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή της μετατόπισης. Τέτοια θέση υπάρχει πλησίον του σημείου Δ , και αντιστοιχεί σε μικρότερη τιμή του φορτίου. Το

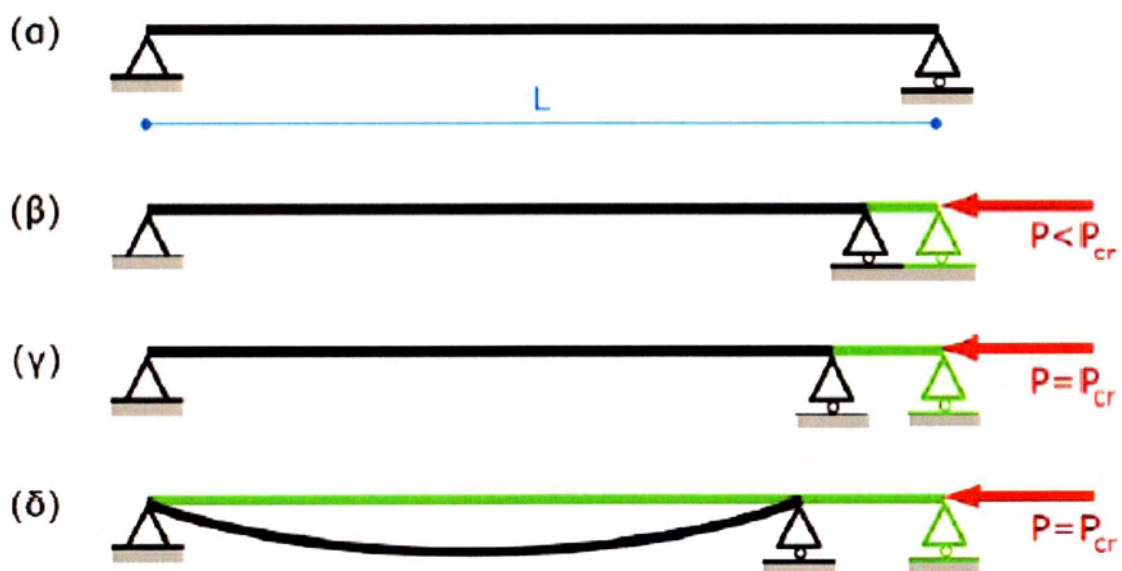
σύστημα λοιπόν αρχίζει να ακολουθεί τον καθοδικό κλάδο ΔΓ που αντιστοιχεί σε μείωση του φορτίου και σταδιακή, όχι πλέον απότομη, αύξηση των, επιβαλλόμενων τώρα, μετατοπίσεων δ (Εικόνα 64β). Από κάποιο σημείο Γ και πέρα ο κλάδος αυτός γίνεται ανοδικός και τελικά καταλήγει στο ίδιο σημείο ισορροπίας Β, όπου είχε οδηγηθεί ο φορέας στην περίπτωση ελεγχόμενου φορτίου, που αντιστοιχεί σε φορτίο P_{Δ} . Η μετάβαση λοιπόν από το Δ στο Β γίνεται μέσω του καμπύλου κλάδου ΔΓΒ, που αποτελεί τον δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας για την περίπτωση «ελέγχου της μετατόπισης». Όλα τα σημεία του κλάδου ΔΓΒ είναι θέσεις στατικής ισορροπίας. Για μετατοπίσεις μεγαλύτερες της δ_{Δ} η παραμορφωμένη γεωμετρία του δοκιμίου διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη, οπότε καταλύεται η δεύτερη βασική προϋπόθεση γραμμικής συμπεριφοράς. Το είδος μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι επομένως **γεωμετρική μη γραμμικότητα**. Η συμπεριφορά του υλικού του δοκιμίου κατά μήκος του δευτερεύοντος δρόμου ΔΓΒ είναι και πάλι αρχικά γραμμική ελαστική, διότι οι τάσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις δεν έχουν υπερβεί το όριο διαρροής. Για περαιτέρω αύξηση των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις αυξάνονται και, συνήθως, φθάνουν το όριο διαρροής πριν το σημείο Β. Τότε η συμπεριφορά του υλικού γίνεται πλαστική, ενώ και οι μετατοπίσεις παραμένουν μεγάλες και μάλιστα συνεχώς αυξάνονται. Καταλύονται λοιπόν και εδώ οι δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς και το είδος μη γραμμικότητας που εμφανίζεται είναι **ταυτόχρονη γεωμετρική μη γραμμικότητα και μη γραμμικότητα υλικού**.

Το σημείο τομής Δ μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, που αντιστοιχεί και σε απότομη μετάβαση του φορέα από κυλινδρική σε ρυτιδωμένη μορφή ισορροπίας, ονομάζεται και εδώ σημείο διακλάδωσης, και ο παρατηρούμενος λυγισμός είναι και πάλι λυγισμός μέσω σημείου διακλάδωσης. Ο κύριος δρόμος ισορροπίας ονομάζεται και προλυγισμικός κλάδος, ενώ ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας ονομάζεται και μεταλυγισμικός κλάδος. Σε αυτή την περίπτωση ο φορέας δεν είναι ικανός να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο από εκείνο που προκαλεί λυγισμό, όπως προκύπτει γραφικά και από την καθοδική μορφή του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας μετά το σημείο διακλάδωσης, επομένως ο φορέας δεν διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Για περαιτέρω αύξηση του φορτίου πέραν της τιμής P_{Δ} , ανεξαρτήτως εάν το σύστημα έχει φθάσει στο σημείο Β μέσω ακαριαίου λυγισμού ή μέσω σταδιακής επιβολής μετατοπίσεων και του κλάδου ΔΓΒ, ακολουθείται ο ανοδικός κλάδος ΒΕ. Η κλίση αυτού του κλάδου φθίνει σύντομα λόγω εξάπλωσης της πλαστικοποίησης και σύντομα οδηγούμαστε στη θραύση του δοκιμίου. Κατά την αποφόρτιση του δοκιμίου, εφόσον αυτή ξεκινήσει από κάποιο σημείο του αρχικού γραμμικού κλάδου ΟΔ, τότε ο κλάδος αποφόρτισης είναι και πάλι ο ΟΔ, με αντίθετη φορά, και για τις δύο περιπτώσεις ελέγχου, είτε φορτίου είτε μετατόπισης. Η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως **γραμμική ελαστική**. Η πλήρης αποφόρτιση οδηγεί στον

αρχικό, απαραμόρφωτο φορέα. Μετά το σημείο Δ, η επιβολή φορτίου οδηγεί ακαριαία στην πλαστική περιοχή και στο σημείο Β, μετά από το οποίο, αν αφαιρεθεί φορτίο, ο κλάδος αποφόρτισης θα είναι γραμμικός και παράλληλος στον αρχικό γραμμικό κλάδο φόρτισης, με αποτέλεσμα να υπάρξουν πολύ μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις. Η συμπεριφορά είναι τώρα *μη γραμμική ανελαστική*. Στην περίπτωση επιβολής μετατόπισης, εάν το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή και γίνει αποφόρτιση (δηλαδή απομείωση της επιβαλλόμενης μετατόπισης), θα ακολουθηθεί ο ίδιος δρόμος ισορροπίας με αυτόν της φόρτισης, και η συμπεριφορά θα είναι *μη γραμμική ελαστική*. Εάν το υλικό έχει εισέλθει στην πλαστικοποίηση θα παρατηρηθεί ευθύγραμμος δρόμος αποφόρτισης, παράλληλος με εκείνον της αρχικής φόρτισης, και θα υπάρξουν παραμένουσες παραμορφώσεις. Η συμπεριφορά θα είναι *μη γραμμική ανελαστική*.

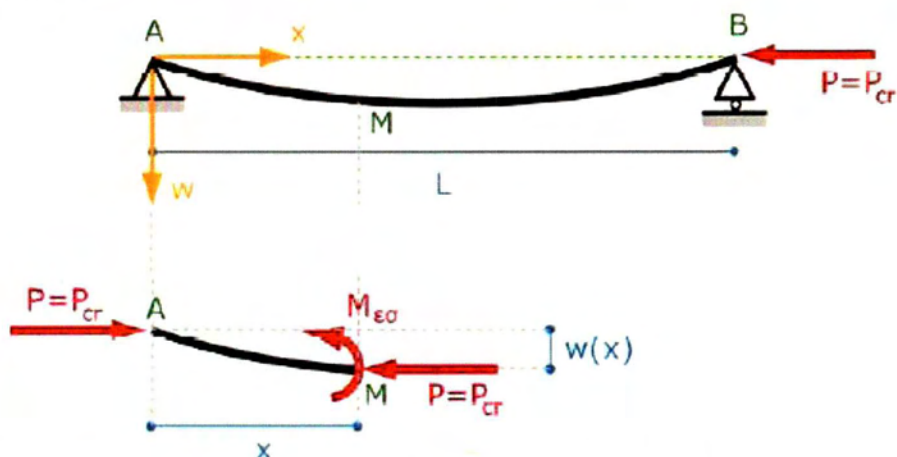
3.4. Αξονικά θλιβόμενη ράβδος

Στην Εικόνα 66α φαίνεται μία αμφιέριστη ράβδος μήκους L , που καταπονείται με αξονικό θλιπτικό φορτίο P . Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 66β, για μικρές τιμές του θλιπτικού φορτίου P η ράβδος παρουσιάζει απλή βράχυνση διατηρώντας την ευθυγραμμία της. Η βράχυνση παραμένει ανάλογη του επιβαλλόμενου φορτίου, μέχρι το φορτίο να φτάσει μία κρίσιμη τιμή $P_{cr} = P$. Πέραν αυτής της τιμής, η ράβδος παρουσιάζει εκτός από αξονικές παραμορφώσεις και καμπύλωση, και για πολύ μικρή αύξηση του φορτίου έχουμε πολύ απότομη αύξηση των παραμορφώσεων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται καμπτικός λυγισμός και η τιμή P_{cr} του φορτίου ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Στην τιμή αυτή αντιστοιχούν δύο μορφές παραμόρφωσης του φορέα, μία ευθύγραμμη και μία καμπυλωμένη, οι οποίες φαίνονται αντίστοιχα στην Εικόνα 66γ, δ.



Εικόνα 66: Αξονικά θλιβόμενη αμφιέριστη δοκός

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μπορεί να υπολογιστεί αν διατυπώσουμε τις τρεις βασικές κατηγορίες εξισώσεων που περιγράφουν οποιοδήποτε πρόβλημα της μηχανικής, δηλαδή τις εξισώσεις ισορροπίας, καταστατικού νόμου του υλικού και συμβιβαστού των παραμορφώσεων, στην παραμορφωμένη κατάσταση της ράβδου αμέσως μετά το λυγισμό (Εικόνα 67). Αυτό είναι απαραίτητο για την ακρίβεια της λύσης, διότι λόγω της απότομης αύξησης των παραμορφώσεων, η παραμορφωμένη κατάσταση διαφέρει πολύ από την απαραμόρφωτη.



Εικόνα 67: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος αμφιέριστης δοκού μετά το λυγισμό

Η παραμόρφωση κατά μήκος της ράβδου περιγράφεται με τη συνάρτηση $w(x)$ του εγκάρσιου βέλους. Σε μια τυχαία θέση x εφαρμόζοντας τη συνθήκη ισορροπίας εσωτερικών και εξωτερικών ροπών καταλήγουμε στην διαφορική εξίσωση ισορροπίας:

$$\left. \begin{aligned} M_{\varepsilon\sigma} &= Pw(x) \\ M_{\varepsilon\sigma} &= EI\kappa \end{aligned} \right\} \Rightarrow EI\kappa = Pw(x) \quad (1)$$

όπου κ η καμπυλότητα, και EI η δυσκαμψία της, με προϋπόθεση **γραμμικής ελαστικής** συμπεριφοράς υλικού και ισχύος του νόμου του Hooke. Με εφαρμογή των σχέσεων συμβιβαστού των παραμορφώσεων η ακριβής έκφραση της καμπυλότητας δίδεται από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{-\frac{d^2w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = -\frac{w''}{\left[1 + (w')^2\right]^{3/2}} \quad (2)$$

Θεωρώντας μικρές μετατοπίσεις, που ισχύει αμέσως μετά το λυγισμό, η σχέση (2) απλουστεύεται και λαμβάνει την ακόλουθη προσεγγιστική μορφή:

$$\kappa = -w'' \quad (3)$$

που αν αντικατασταθεί στην (1) λαμβάνουμε

$$EIw'' + Pw = 0 \quad (4)$$

Αν τεθεί $k^2 = P/EI$ η (4) γράφεται ως

$$w'' + k^2 w = 0 \quad (5)$$

Πρόκειται για μια γραμμική διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξης με σταθερούς συντελεστές, η γενική λύση της οποίας ισούται με

$$w(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (6)$$

Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες της αμφιέριστης

$$w(0) = w(L) = 0 \quad (7)$$

και για μη τετριμμένη λύση (ισορροπία στην παραμορφωμένη κατάσταση) καταλήγουμε στη γνωστή εξίσωση λυγισμού:

$$\sin kL = 0 \Rightarrow kL = n\pi \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

που δίδει τα λεγόμενα κρίσιμα φορτία λυγισμού

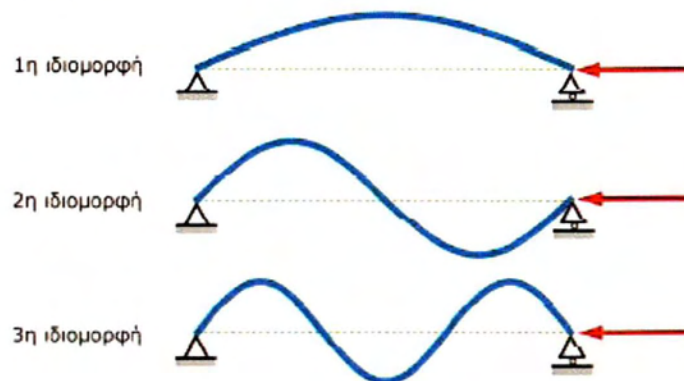
$$k^2 = \frac{P}{EI} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \quad (9)$$

Από την (9) για $n=1$ προκύπτει το μικρότερο από αυτά τα φορτία, $P_{cr} = \pi^2 EI/L^2$, το γνωστό φορτίο Euler, P_E .

Η παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού μετά το λυγισμό, βάσει των (6) και (7) είναι πλέον απλή ημιτονοειδής, δηλαδή

$$w(x) = A \sin \frac{n\pi}{L} x \quad (10)$$

που για διάφορες τιμές του n οδηγεί στις ιδιομορφές λυγισμού. Οι τρεις πρώτες εξ αυτών περιέχονται στην Εικόνα 68.

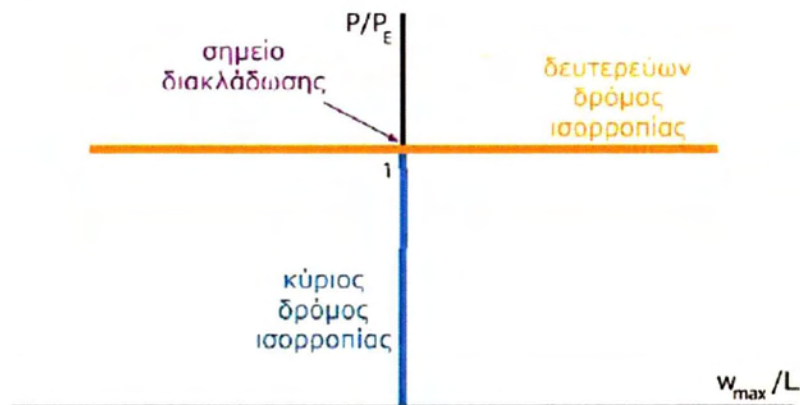


Εικόνα 68: Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού της θλιβόμενης αμφιέριστης ράβδου

Συνήθως οι ανώτερες ιδιομορφές λυγισμού και τα αντίστοιχα κρίσιμα φορτία είναι μόνον μαθηματικές λύσεις χωρίς πρακτική σημασία, αφού το φορτίο Euler θα είναι το κρίσιμο, ως ελάχιστο. Πράγματι, αυτό συμβαίνει, αν δεν υπάρχουν πλευρικές εξασφαλίσεις, δηλαδή παρεμπόδιση εγκάρσιας μετατόπισης σε κάποιες θέσεις κατά μήκος της ράβδου. Πολλές φορές, όμως, υπάρχει πλευρική εξασφάλιση του μέλους, πράγμα που

εμποδίζει την εκδήλωση της πρώτης ή κάποιων από τις πρώτες ιδιομορφές και “οδηγεί” το μέλος σε λυγισμό σύμφωνα με μία από τις ανώτερες ιδιομορφές του. Αυτό σημαίνει ότι τελικά το μέλος θα λυγίσει για μεγαλύτερο φορτίο από ότι αυτό που θα λυγίζε χωρίς την πλευρική εξασφάλιση. Επισημαίνεται λοιπόν, και θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια, η μεγάλη σημασία των ανώτερων ιδιομορφών λυγισμού, και της αξιοποίησής τους κατά το σχεδιασμό με τη δημιουργία πλευρικών εξασφαλίσεων.

Η παραδοχή (3) για την καμπυλότητα της ράβδου οδήγησε σε σημαντική μαθηματική απλοποίηση της διαφορικής εξίσωσης ισορροπίας, και έτσι επέτρεψε τον υπολογισμό των φορτίων λυγισμού, καθώς και των αντίστοιχων ιδιομορφών λυγισμού. Επισημαίνεται όμως ότι από τη διαδικασία υπολογισμού που ακολουθήθηκε δεν προκύπτουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της ράβδου μετά τον λυγισμό. Πράγματι, αν προσπαθήσουμε να περιγράψουμε τη στατική συμπεριφορά της ράβδου, όταν αυτή λυγίζει με την πρώτη ιδιομορφή της, μέσω ενός δρόμου ισορροπίας που συνδέει το επιβαλλόμενο φορτίο P με κάποια χαρακτηριστική μετατόπιση, π.χ. την εγκάρσια μετατόπιση $w_{max}=w(L/2)$, οδηγούμαστε στην Εικόνα 69.

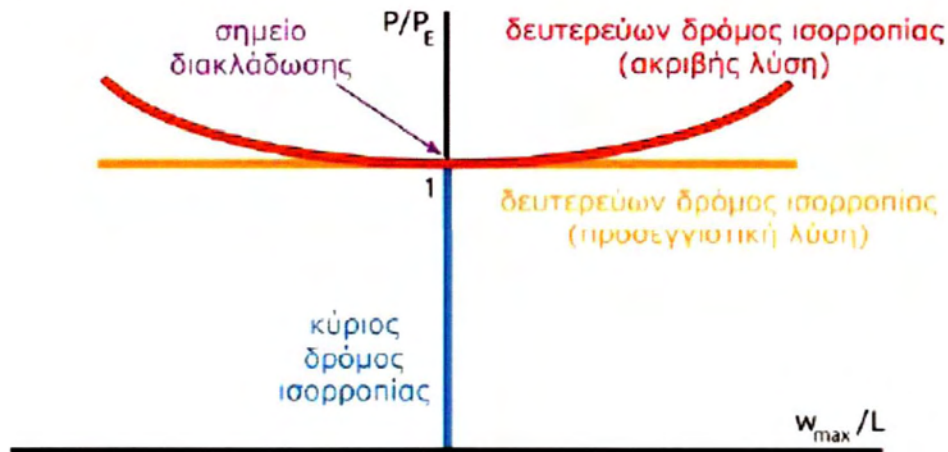


Εικόνα 69: Δρόμοι ισορροπίας με την παραδοχή $\kappa = -w''$

Για φορτία μικρότερα από το φορτίο Euler η ράβδος απλώς βραχύνεται, επομένως το εγκάρσιο βέλος είναι μηδέν και ο κύριος δρόμος ισορροπίας είναι μία κατακόρυφη γραμμή που συμπίπτει με τον άξονα των φορτίων. Για φορτίο ίσο με P_E η ράβδος λυγίζει και ξαφνικά αποκτά εγκάρσιο βέλος, το οποίο σύμφωνα με την έκφραση (10) για $n=1$ και $x=L/2$ έχει τιμή A , δηλαδή είναι άγνωστου προσήμου και μεγέθους. Αυτό παριστάνεται γραφικά με μία οριζόντια γραμμή που αποτελεί το δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας και σημαίνει ότι από την ανάλυση που προηγήθηκε δεν προκύπτουν πληροφορίες ούτε για τη φορά του λυγισμού ούτε για το μέγεθος των μετατοπίσεων που συνδέονται με αυτόν.

Το γεγονός αυτό δεν περιγράφει βεβαίως το πραγματικό φυσικό φαινόμενο, αλλά είναι αποτέλεσμα των απλοποιητικών παραδοχών που έγιναν κατά την ανάλυση. Η ανάλυση αυτή που βασίζεται σε διατύπωση των εξισώσεων στην παραμορφωμένη

γεωμετρία, αλλά με την παραδοχή ότι οι μετατοπίσεις είναι μικρές, λέγεται γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Η επίδραση αυτής της παραδοχής στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων φαίνεται ποιοτικά στην Εικόνα 70. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται επιπλέον η λύση της διαφορικής εξίσωσης ισορροπίας της ράβδου που θα είχε προκύψει με χρήση της ακριβούς έκφρασης της καμπυλότητας της σχέσης (2), δηλαδή με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης.



Εικόνα 70: Σύγκριση ακριβών και προσεγγιστικών ελαστικών δρόμων ισορροπίας

Παρατηρείται ότι ο κύριος δρόμος ισορροπίας ταυτίζεται με αυτόν της γραμμικοποιημένης ανάλυσης λυγισμού της Εικόνας 69, δηλαδή δεν επηρεάζεται από την παραδοχή για την καμπυλότητα. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού ο κύριος δρόμος περιγράφει απλή βράχυνση και όχι καμπύλωση της ράβδου, επομένως περιγράφει μία κατάσταση, κατά την οποία η ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης έκφρασης για την καμπυλότητα δεν έχει σημασία. Αντίθετα, ο δευτερεύων δρόμος που αφορά τη φάση μετά το λυγισμό, όπου η ράβδος έχει καμπυλωθεί, εξαρτάται άμεσα από την παραδοχή που γίνεται για την καμπυλότητα. Η ακριβής λύση δείχνει ότι στην πραγματικότητα η ράβδος διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή και ο δευτερεύων δρόμος είναι ανοδικός και στρέφει τα κοίλα προς τα άνω. Παρατηρούμε επίσης ότι για μικρές τιμές των μεταλυγισμικών μετατοπίσεων οι λύσεις της μη γραμμικής και της γραμμικοποιημένης ανάλυσης για τον δευτερεύοντα δρόμο είναι παραπλήσιες, κάτι επίσης αναμενόμενο, αφού η προσεγγιστική έκφραση της καμπυλότητας της σχέσης (3) είναι ικανοποιητικά ακριβής για μικρές μετατοπίσεις.

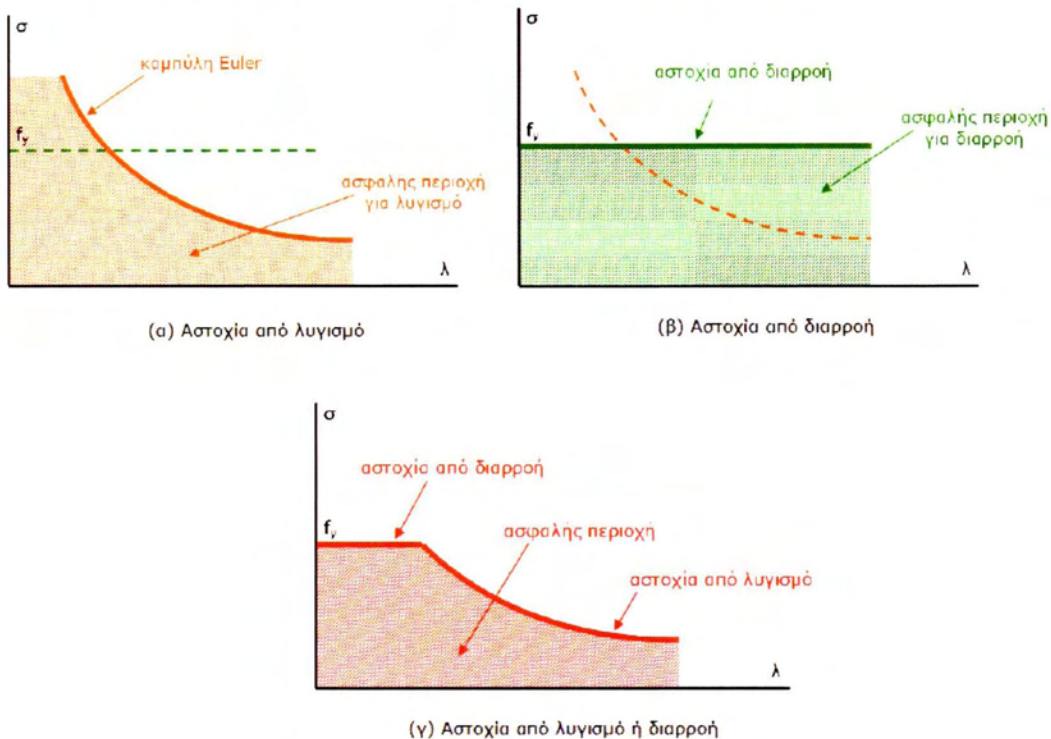
Επισημαίνεται ότι και με την ακριβή λύση δεν προσδιορίζεται η φορά προς την οποία θα λυγίσει η ράβδος. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή ότι η ράβδος δεν έχει ατέλειες, δηλαδή είναι απολύτως ευθύγραμμη, με φορτίο απολύτως κεντρικό και αξονικό και από απολύτως ομοιογενές υλικό. Σε κάθε πραγματικό δομικό μέλος θα υπάρχουν κάποιες

ατέλειες, οι οποίες θα είναι και εκείνες που θα οδηγήσουν τη ράβδο να λυγίσει προς τη μία ή την άλλη πλευρά.

Θα διερευνηθεί τέλος η άλλη βασική παραδοχή της ανάλυσης που προηγήθηκε, δηλαδή εκείνη της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Για να γίνει αυτό σε ένα αρχικό επίπεδο αξιολόγησης του κινδύνου λυγισμού μίας θλιβόμενης ράβδου σε σύγκριση με τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού της, είναι σκόπιμο να συγκρίνουμε την κρίσιμη τάση λυγισμού με το όριο διαρροής του υλικού. Υπολογίζεται λοιπόν αρχικά η τάση σ_{cr} που αντιστοιχεί στο κρίσιμο φορτίο P_{cr} , διαιρώντας το με το εμβαδόν A της διατομής της ράβδου, και αν λ είναι η λυγηρότητα της δοκού ($\lambda^2 = AL^2/I$) ισούται με:

$$\sigma_{cr} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (11)$$

Στην Εικόνα 71α απεικονίζεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης (11), που ονομάζεται καμπύλη Euler. Η περιοχή κάτω από αυτή την καμπύλη είναι ασφαλής για λυγισμό. Περιέχει ζεύγη τιμών λυγηροτήτων και τάσεων που δεν οδηγούν σε λυγισμό, δηλαδή ράβδοι με αυτή τη λυγηρότητα που θλίβονται με αυτή την τάση δεν λυγίζουν. Στην Εικόνα 71β χαράσσεται αντίστοιχα μία οριζόντια γραμμή στην τιμή του ορίου διαρροής του υλικού της ράβδου. Η περιοχή κάτω από αυτή τη γραμμή είναι ασφαλής σε διαρροή, δηλαδή ράβδοι θλιβόμενες με τάσεις μικρότερες από f_y δεν διαρρέουν. Τέλος, η Εικόνα 71γ συνδυάζει τις ως άνω πληροφορίες και επισημαίνει την περιοχή που είναι ασφαλής και από τις δύο πιθανές μορφές αστοχίας, λυγισμό και διαρροή.



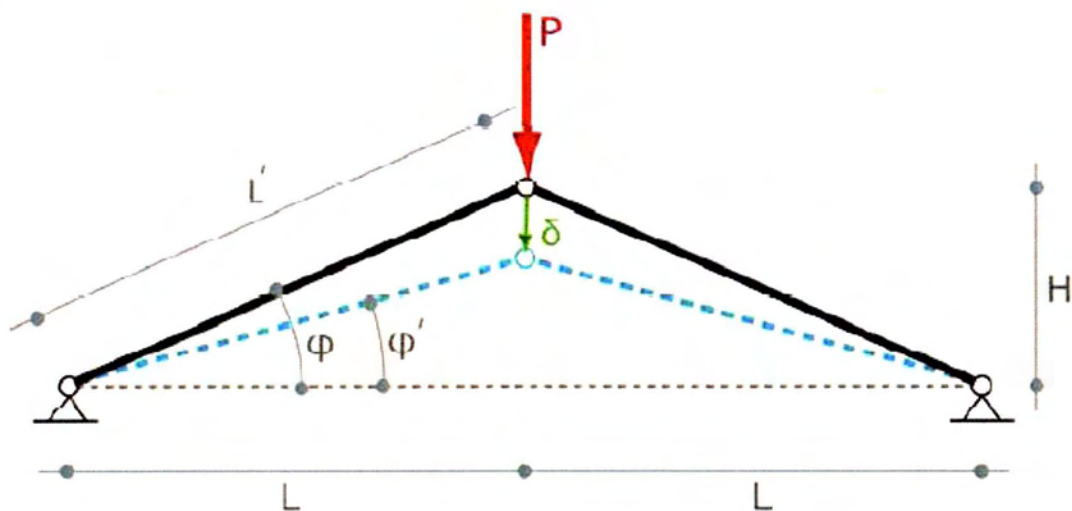
Εικόνα 71: Αλληλεπίδραση λυγισμού της δοκού και διαρροής του υλικού της

Παρατηρούμε ότι η λυγηρότητα είναι η κρίσιμη παράμετρος για το αν ένα θλιβόμενο μέλος θα είναι πιο επιρρεπές σε λυγισμό, δηλαδή σε μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ή σε διαρροή, δηλαδή σε μη γραμμικότητα υλικού. Για μικρή λυγηρότητα, κρίσιμη είναι η διαρροή, ενώ για μεγάλες τιμές της λυγηρότητας ο λυγισμός αποτελεί την κρίσιμη μορφή αστοχίας της ράβδου. Για ενδιάμεσες τιμές της λυγηρότητας και λόγω και της επίδρασης από την παρουσία αναπόφευκτων κατασκευαστικών ή άλλων ατελειών, συμβαίνει μία σύνθετη μορφή αστοχίας, που θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

3.5. Απλό προσομοίωμα τριαρθρωτού τόξου

(απλή τριγωνική αψίδα - μοντέλο von Mises)

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται το κλασικό μοντέλο von Mises της Εικόνας 72, ανοίγματος $2L$ και ύψους H , η οποία αποτελείται από δύο αβαρείς ράβδους με δυστένια EA . Η αψίδα φορτίζεται από κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο P , με σημείο εφαρμογής την αρθρωτή σύνδεση των δύο ράβδων, η οποία θεωρείται εξασφαλισμένη έναντι οριζοντίων μετατοπίσεων.



Εικόνα 72: Απλουστευμένο μοντέλο von Mises

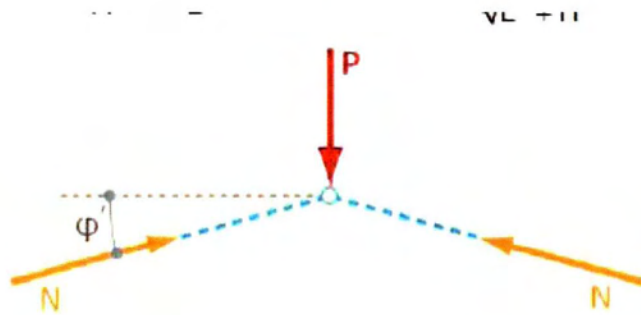
Καθολικός λυγισμός : Κατ' αρχήν αναλύεται ο παραπάνω φορέας με βάση την παραδοχή γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού του. Όταν το ύψος H είναι μικρό σε σύγκριση με το άνοιγμα $2L$, δηλαδή όταν η αψίδα είναι «ρηχή», η συμπεριφορά της χαρακτηρίζεται από μικρή δυσκαμψία, και επομένως έντονη παραμόρφωση. Δηλαδή στην περίπτωση αυτή υπάρχει έντονη γεωμετρική μη γραμμικότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση. Αυτό γίνεται διατυπώνοντας τις εξισώσεις ισορροπίας στην παραμορφωμένη κατάσταση, που απεικονίζεται στην Εικόνα 73 με διακεκομμένη γραμμή.

Αν θεωρηθεί ότι και στις δύο ράβδους αναπτύσσεται ίση, λόγω συμμετρίας, θλιπτική δύναμη N , τότε, από την εξίσωση ισορροπίας του ενδιάμεσου κόμβου στην

παραμορφωμένη κατάσταση (Εικόνα 73) και τη γραμμική σχέση τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων καταλήγουμε εύκολα στην ακόλουθη σχέση:

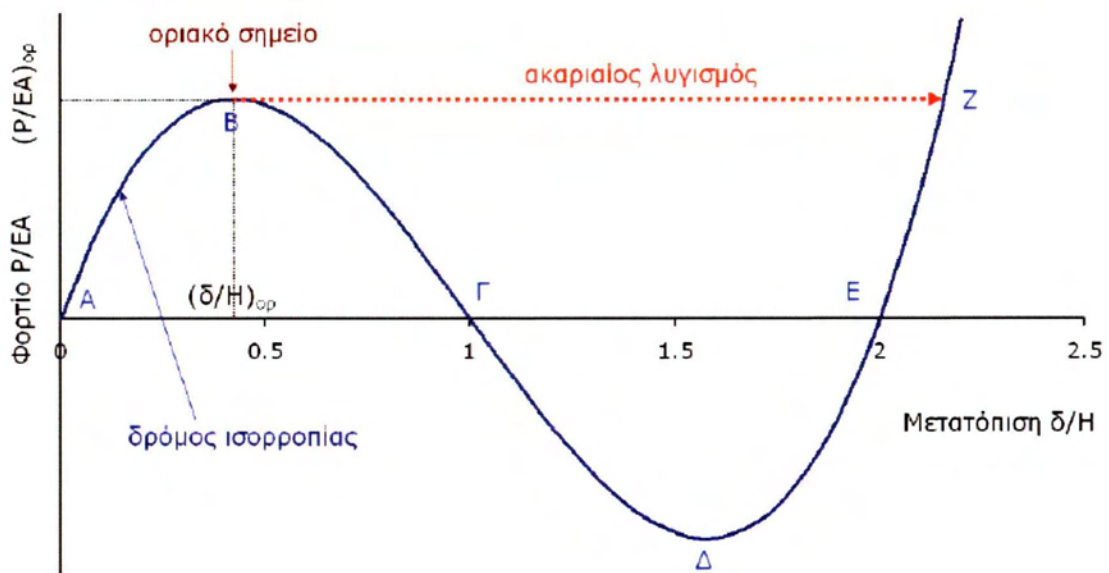
$$\frac{P}{EA} = 2 \left[1 - \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)^2 + \left(1 - \frac{\delta}{H}\right)^2}}{\left(\frac{L}{H}\right)^2 + 1} \right] \frac{1 - \frac{\delta}{H}}{\sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)^2 - \left(1 - \frac{\delta}{H}\right)^2}} \quad (12)$$

η οποία συνδέει το επιβαλλόμενο φορτίο με το αναπτυσσόμενο βέλος δ και αποτελεί την εξίσωση ισορροπίας.



Εικόνα 73: Ισορροπία του κόμβου κορυφής

Πρόκειται για μια μη γραμμική σχέση, που είναι κατ' ουσία ο δρόμος ισορροπίας του μοντέλου, η οποία συνδέει το αδιάστατο φορτίο P/EA με την αδιάστατη κατακόρυφη μετατόπιση της κορυφής. Ο εν λόγω δρόμος δίδεται ποιοτικά στην Εικόνα 74.



Εικόνα 74: Δρόμος ισορροπίας του μοντέλου

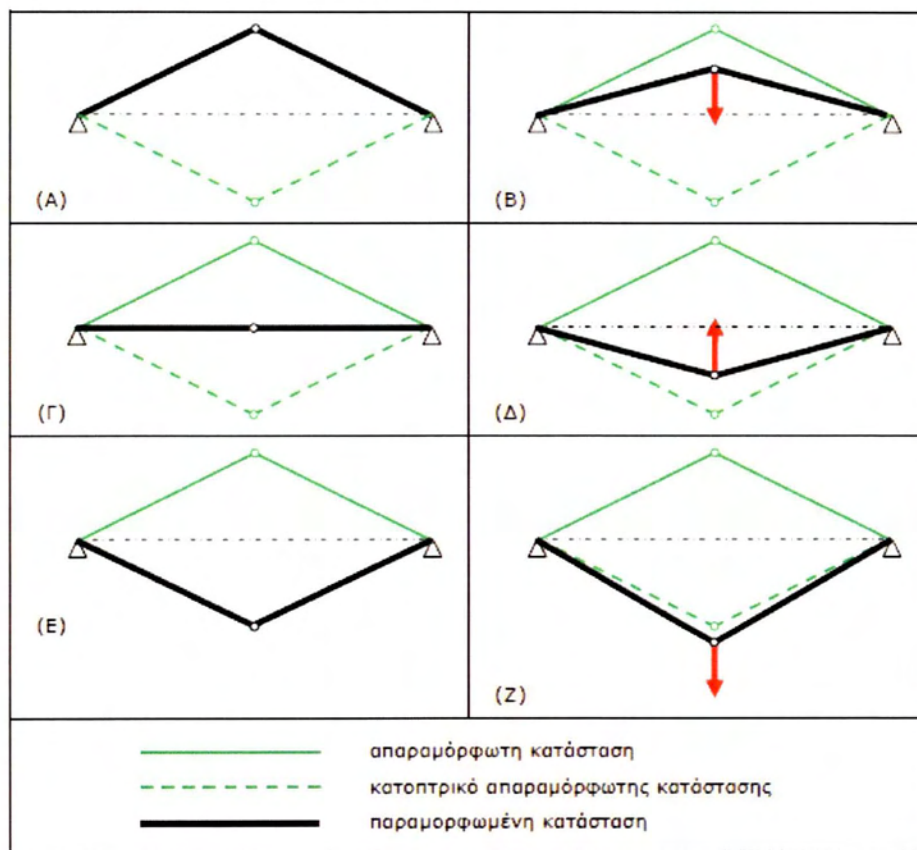
Παρατηρούμε καταρχήν ότι δεν υπάρχουν κύριος και δευτερεύων δρόμος ισορροπίας, αλλά ένας ενιαίος δρόμος ισορροπίας ΑΒΓΔΕΖ. Η κλίση του δρόμου ισορροπίας σε τυχόν σημείο δείχνει τη δυσκαμψία που έχει η ασίδα όταν έχει φορτιστεί με το φορτίο και αναπτύξει την παραμόρφωση που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο σημείο. Στο αρχικό τμήμα ΑΒ του δρόμου ισορροπίας η κλίση αυτή μειώνεται σταδιακά καθώς το φορτίο αυξάνεται. Η ποιοτική ερμηνεία είναι ότι για αυξανόμενο φορτίο και επομένως αυξανόμενη μετατόπιση του μεσαίου κόμβου, μειώνεται η κλίση των δύο ράβδων ως προς την οριζόντια, συνεπώς μειώνονται οι κατακόρυφες συνιστώσες των θλιπτικών δυνάμεων των ράβδων, η συνισταμένη των οποίων εξισορροπεί το επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο. Δηλαδή ο φορέας γίνεται λιγότερο αποτελεσματικός, με άλλα λόγια λιγότερο δύσκαμπτος.

Η συνεχώς μειούμενη κλίση του δρόμου ισορροπίας τελικώς μηδενίζεται και στη συνέχεια, στο τμήμα ΒΓΔ, γίνεται αρνητική, δηλαδή ο δρόμος ισορροπίας γίνεται καθοδικός και το φορτίο μειώνεται ενώ η μετατόπιση αυξάνεται. Το κορυφαίο σημείο Β που χαρακτηρίζεται από μηδενική δυσκαμψία λέγεται οριακό σημείο. Εφόσον στην ασίδα επιβάλλουμε και προσαυξάνουμε σταδιακά το φορτίο και καταγράφουμε την προκύπτουσα μετατόπιση, τότε για μικρή προσαύξηση του φορτίου πέραν εκείνου που αντιστοιχεί στο οριακό σημείο, ο φορέας αναζητεί θέση ισορροπίας που να αντιστοιχεί σε αυτή τη νέα τιμή του φορτίου. Τέτοια θέση δεν υπάρχει πλησίον του οριακού σημείου, οπότε και πάλι συμβαίνει ακαριαίος λυγισμός, δηλαδή χωρίς προειδοποίηση και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οι παραμορφώσεις του φορέα αυξάνονται πολύ, και πραγματοποιείται μεταπήδηση στο μακρινό σημείο ισορροπίας Ζ, το μόνο που υπάρχει για αυτή την τιμή του φορτίου, το οποίο αντιστοιχεί σε παραμόρφωση της ασίδας κάτω από το οριζόντιο επίπεδο (διακεκομμένη κόκκινη οριζόντια ευθεία γραμμή στην Εικόνα 74). Αυτή η μορφή λυγισμού λέγεται ακαριαίος λυγισμός μέσω οριακού σημείου και το φορτίο που τον προκαλεί λέγεται οριακό φορτίο P_{op} ή και κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Όλα τα σημεία του οριζόντιου κλάδου μετάβασης από το οριακό σημείο Β στην απέναντι θέση Ζ είναι θέσεις δυναμικής ισορροπίας, από τις οποίες ο φορέας διέρχεται με μεγάλη ταχύτητα αναζητώντας θέση στατικής ισορροπίας, την οποία και βρίσκει στο Ζ. Λόγω αδράνειας το σύστημα δεν θα σταματήσει στη θέση ισορροπίας Ζ, αλλά θα την προσπεράσει, θα εκτελέσει ταλάντωση περί το Ζ, και τελικά θα ισορροπήσει, αφού η ταλάντωση αποσβεστεί.

Εφόσον στην ασίδα επιβάλλουμε και προσαυξάνουμε σταδιακά τη μετατόπιση και καταγράφουμε το απαιτούμενο φορτίο (έλεγχος μετατοπίσεων), για μικρή προσαύξηση της μετατόπισης πέραν της τιμής δ_{op} , που αντιστοιχεί στο οριακό σημείο Β, ο φορέας αναζητεί θέση ισορροπίας που να αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή της μετατόπισης. Τέτοια θέση υπάρχει πλησίον του οριακού σημείου, και αντιστοιχεί σε μικρότερη τιμή του φορτίου από την τιμή P_{op} . Το σύστημα λοιπόν αρχίζει να ακολουθεί τον καθοδικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας μετά το οριακό σημείο, που αντιστοιχεί σε μείωση του φορτίου και σταδιακή,

όχι πλέον απότομη, αύξηση των, επιβαλλόμενων τώρα, μετατοπίσεων δ (συνεχής μπλε καμπύλη γραμμή). Πέραν του σημείου Γ, που αντιστοιχεί σε $\delta=H$, δηλαδή σε οριζοντιωμένη αψίδα, το πρόσημο του φορτίου αντιστρέφεται, δηλαδή για να ισορροπεί η αψίδα πρέπει να ασκείται στο μεσαίο κόμβο φορτίο προς τα άνω. Από κάποιο κατώτατο σημείο Δ και πέρα ο κλάδος αυτός γίνεται ανοδικός, τέμνει τον οριζόντιο άξονα για $\delta=2H$, και τελικά καταλήγει, για φορτίο $P=P_{op}$, στο ίδιο σημείο ισορροπίας Z, όπου είχε οδηγηθεί ο φορέας στην περίπτωση ελεγχόμενου φορτίου. Για την περίπτωση λοιπόν «ελέγχου της μετατόπισης» ακολουθείται ο πλήρης δρόμος ισορροπίας, όλα τα σημεία του οποίου είναι θέσεις στατικής ισορροπίας.

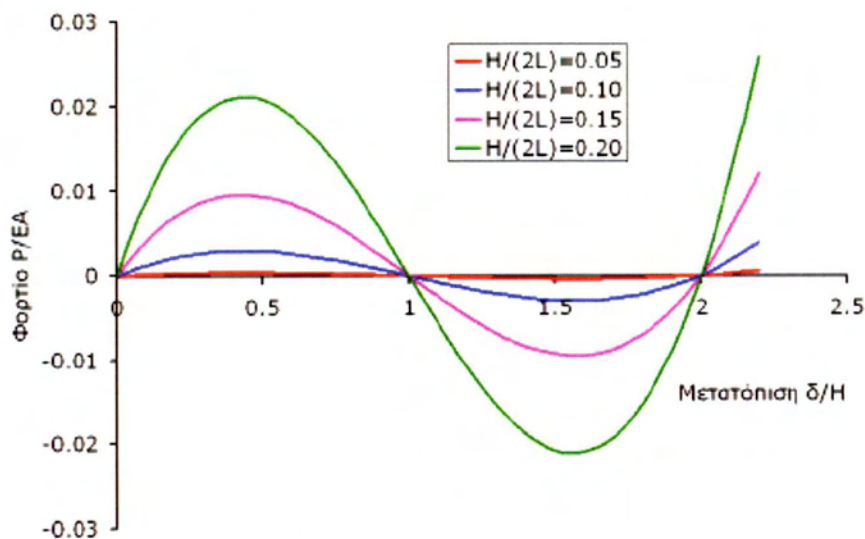
Η μορφή του δρόμου ισορροπίας που απεικονίζεται στην Εικόνα 74 μπορεί να συνδεθεί με την παραμόρφωση που υφίσταται η αψίδα. Στο σχήμα της Εικόνας 75 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση της αψίδας στα χαρακτηριστικά σημεία A, B, Γ, Δ, E και Z. Το σημείο A αντιστοιχεί στην απαραμόρφωτη κατάσταση. Το οριακό σημείο B αντιστοιχεί σε βύθιση $\delta_B = \delta_{op} = 0.435H$, τιμή που μπορεί να υπολογιστεί μηδενίζοντας την παράγωγο της εξίσωσης (12) του δρόμου ισορροπίας. Στο σημείο Γ η βύθιση είναι $\delta_r = H$, ο φορέας έχει γίνει οριζόντιος, οι δύο ράβδοι θλίβονται με ίσες και αντίθετες οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες αλληλοαναιρούνται, και επομένως η ισορροπία του μεσαίου κόμβου απαιτεί μηδενικό κατακόρυφο φορτίο P.



Εικόνα 75: Παραμόρφωση του μοντέλου σε χαρακτηριστικές θέσεις

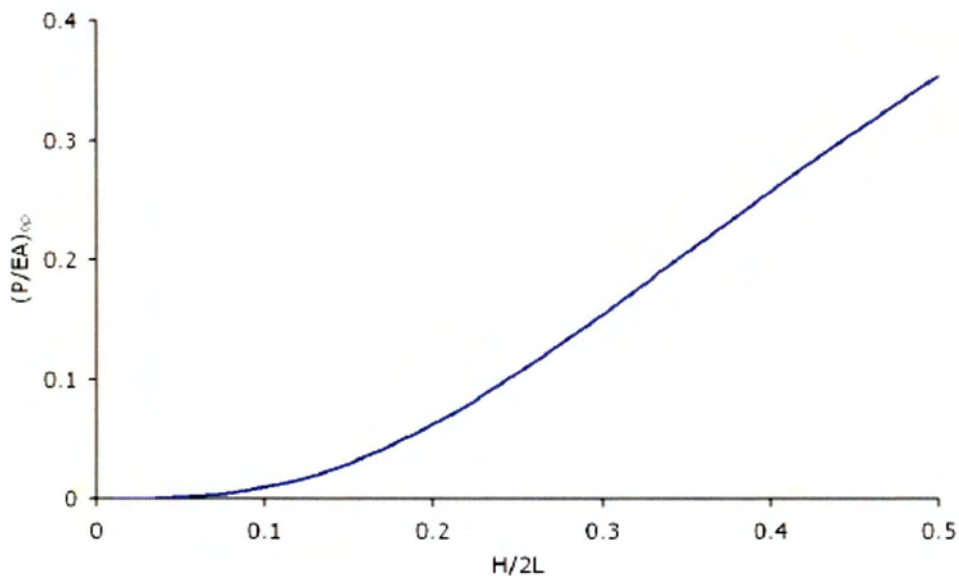
Το κατώτατο σημείο Δ του δρόμου ισορροπίας προκύπτει από τη δεύτερη λύση μηδενισμού της παραγώγου της εξίσωσης (12) του δρόμου ισορροπίας και αντιστοιχεί σε βύθιση $\delta_{\Delta}=1.565H$, δηλαδή σε γεωμετρία κατοπτρική εκείνης του σημείου Β. Στο σημείο Ε η βύθιση είναι $\delta_E=2H$, δηλαδή η γεωμετρία είναι συμμετρική της αρχικής ως προς τον οριζόντιο άξονα. Από απλή γεωμετρική θεώρηση προκύπτει ότι τα μήκη των δύο ράβδων είναι ίσα με τα αρχικά απαραμόρφωτα μήκη τους, επομένως δεν υπάρχει ένταση στις ράβδους, συνεπώς δεν απαιτείται κατακόρυφο φορτίο για την ισορροπία του μεσαίου κόμβου. Τέλος, στον κλάδο ΕΖ και στον συνεχιζόμενο μετά το Ζ ανοδικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας, η βύθιση δ είναι μεγαλύτερη του $2H$ και τα μήκη των δύο ράβδων είναι μεγαλύτερα από τα αρχικά απαραμόρφωτα μήκη τους. Συνεπώς οι δύο ράβδοι εφελκύνονται και η κλίση τους ως προς την οριζόντια γίνεται συνεχώς εντονότερη. Το αποτέλεσμα είναι πλέον η δυσκαμψία του συστήματος συνεχώς να αυξάνεται, δηλαδή ο δρόμος ισορροπίας να στρέφει τα κοίλα προς τα άνω, σε αντίθεση με το αρχικό τμήμα ΑΒ, όπου οι ράβδοι θλίβονται και η δυσκαμψία μειώνεται, οπότε ο δρόμος ισορροπίας στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω.

Το χαρακτηριστικό γεωμετρικό μέγεθος που επηρεάζει σημαντικά τη στατική συμπεριφορά της αψίδας είναι ο λόγος ύψους H προς άνοιγμα $2L$. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 76, που απεικονίζει συγκριτικά δρόμους ισορροπίας για διάφορες τιμές αυτού του λόγου, όσο μικρότερος είναι ο λόγος $H/2L$, δηλαδή όσο πιο «ρηχή» είναι η αψίδα, τόσο πιο εύκαμπτα θα αποκρίνεται, αφού μικρό μέρος της θλιπτικής δύναμης που αναπτύσσεται στις δύο ράβδους θα χρησιμεύει για την εξισορρόπηση του κατακόρυφου εξωτερικού φορτίου, και τόσο μικρότερο θα είναι το οριακό φορτίο, και επομένως και η φέρουσα ικανότητα του φορέα.



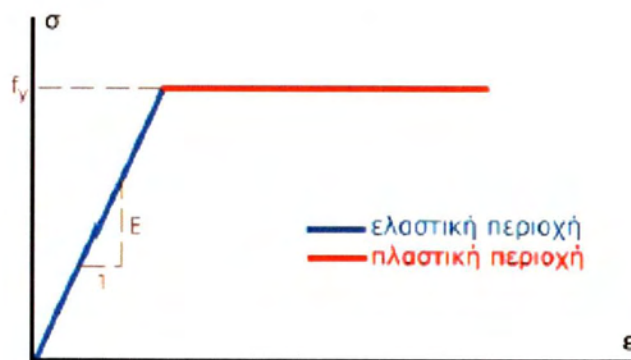
Εικόνα 76: Επίδραση του λόγου $H/2L$ στο δρόμο ισορροπίας της αψίδας

Αυτό αποδίδεται ποσοτικά στην Εικόνα 77, που δίνει την τιμή του οριακού φορτίου, αδιαστατοποιημένου ως προς την δυστένια EA κάθε ράβδου, συναρτήσεως του λόγου $H/2L$. Παρατηρούμε ότι η μείωση της οριακής αντοχής της αψίδας είναι ραγδαία καθώς μειώνεται ο λόγος $H/2L$, δηλαδή καθώς η αψίδα γίνεται πιο «ρηχή». Παράλληλα, αυτό οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας να είναι κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας της αψίδας ο οριακός λυγισμός, έναντι των άλλων πιθανών μορφών αστοχίας που θα εξεταστούν στη συνέχεια.



Εικόνα 77: Επίδραση του λόγου $H/2L$ στο οριακό φορτίο της αψίδας

Διαρροή ενός μέλους : Η προηγούμενη ανάλυση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της αψίδας που οδηγεί σε αστοχία της μέσω ακαριαίου λυγισμού βασίστηκε σε παραδοχή γραμμικής ελαστικής απόκρισης του υλικού. Μία δεύτερη όμως πιθανή μορφή αστοχίας της αψίδας είναι η διαρροή ενός από τα μέλη που την αποτελούν, ή μάλλον και των δύο ταυτόχρονα, λόγω συμμετρίας. Υποθέτοντας ελαστική - απολύτως πλαστική συμπεριφορά του υλικού (Εικόνα 78), η διαρροή σε ένα μέλος του φορέα εμφανίζεται όταν η αξονική τάση του μέλους γίνει ίση με την τάση διαρροής f_y .



Εικόνα 78: Καταστατικός νόμος ελαστικού - απολύτως πλαστικού υλικού

Ανατρέχοντας στην Εικόνα 73 (ισορροπία κόμβου κορυφής) μπορούμε να γράψουμε:

$$P = 2N \sin \varphi' \quad (13)$$

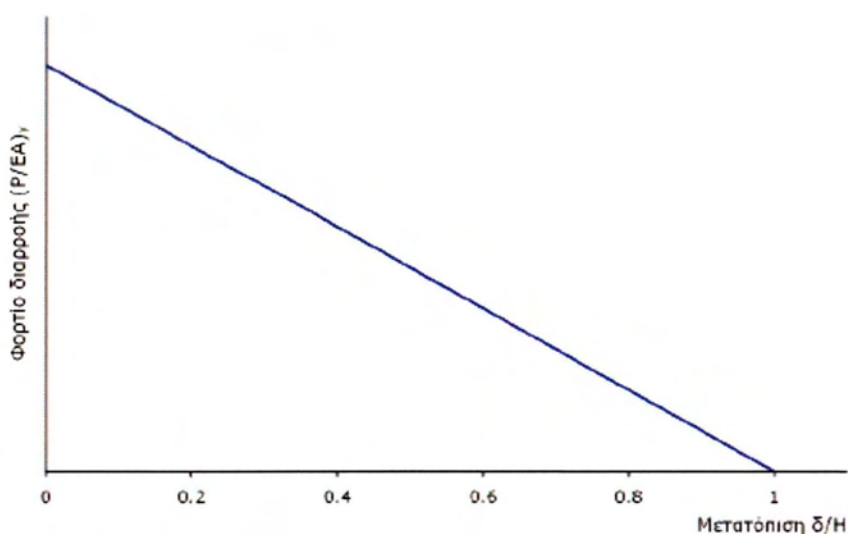
και καθόσον ισχύει ότι

$$\sin \varphi' = \frac{H - \delta}{\sqrt{L^2 + (H - \delta)^2}} \quad (14)$$

τη στιγμή της διαρροής (όπου $N = f_y A$) τελικά θα πρέπει

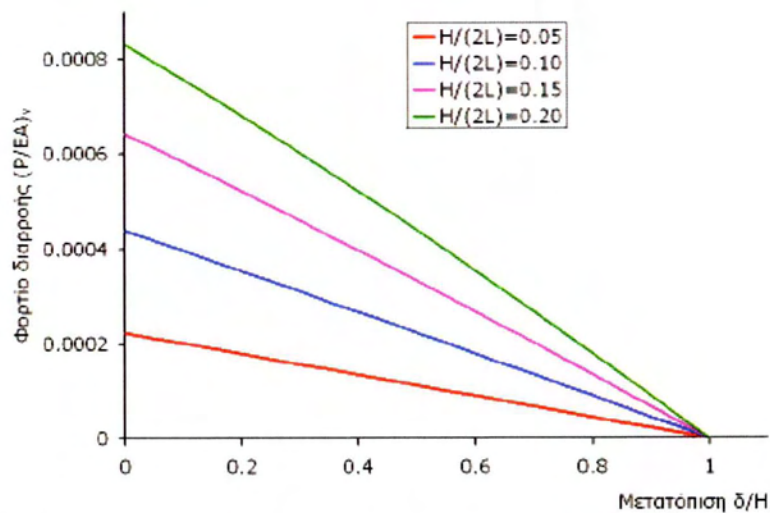
$$\frac{P}{EA} = 2 \frac{f_y}{E} \frac{1 - \frac{\delta}{H}}{\sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)^2 + \left(1 - \frac{\delta}{H}\right)^2}} \quad (15)$$

Στην Εικόνα 79 έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της εξίσωσης (15), για έναν τυπικό χάλυβα με όριο διαρροής $f_y=235\text{MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E=200\text{GPa}$. Παρατηρούμε πως επηρεάζεται η τιμή του φορτίου που προκαλεί αστοχία μέσω διαρροής του υλικού από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα. Η τιμή του φορτίου διαρροής για $\delta=0$ είναι αυτή που προκύπτει αν αγνοήσουμε τις μετατοπίσεις, ενώ εάν αυτές ληφθούν υπόψη προκύπτει μία περίπου γραμμική μείωση.



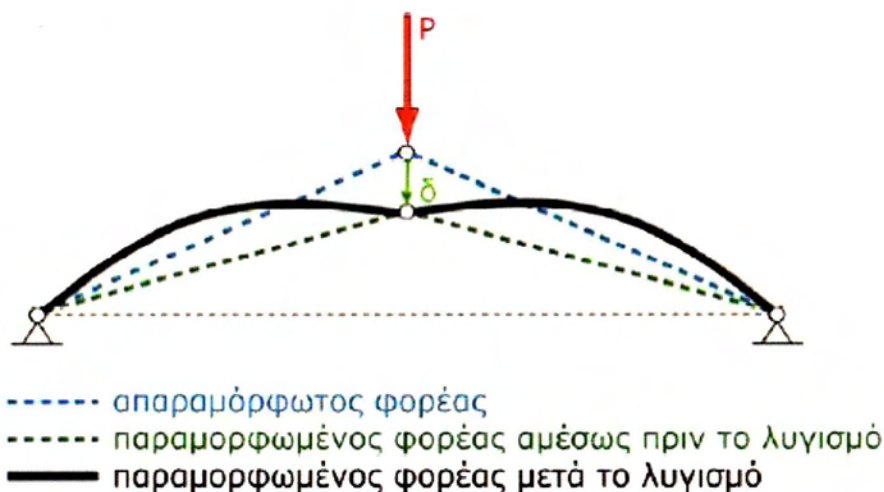
Εικόνα 79: Εξάρτηση φορτίου διαρροής μέλους από τη μετατόπιση

Μπορούμε επίσης από την Εικόνα 80 και σε αυτήν την περίπτωση να παρατηρήσουμε πως ο λόγος ύψους προς άνοιγμα της αψίδας επηρεάζει το φορτίο αστοχίας, δηλαδή όσο πιο ρηχή είναι η αψίδα, τόσο μικρότερη είναι η αντοχή της. Η επίδραση όμως αυτή είναι μικρότερη από την περίπτωση του ακαριαίου λυγισμού, όπως προκύπτει από την περίπου σταθερή απόσταση μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών της Εικόνας 80.



Εικόνα 80: Επίδραση του λόγου $H/2L$ στο φορτίο διαρροής

Λυγισμός ενός μέλους : Εκτός από τους δύο μηχανισμούς αστοχίας που έχουν ήδη εξεταστεί, η αψίδα μπορεί να αστοχήσει λόγω λυγισμού, όχι τύπου καθολικού ακαριαίου λυγισμού όλης της αψίδας, αλλά τύπου τοπικού ελαστικού λυγισμού μίας ράβδου ή μάλλον και των δύο ταυτόχρονα λόγω συμμετρίας (Εικόνα 81).



Εικόνα 81: Αστοχία της αψίδας μέσω ελαστικού λυγισμού των ράβδων της

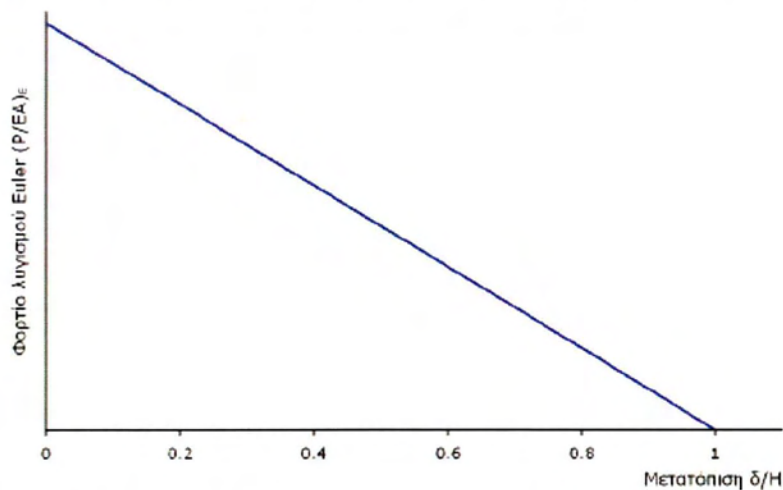
Σαν κριτήριο αυτής της μορφής αστοχίας χρησιμοποιείται η εξίσωση της αξονικής δύναμης κάθε ράβδου με το φορτίο λυγισμού Euler, όπου I είναι η μικρότερη κύρια ροπή αδράνειας της διατομής των ράβδων της αψίδας:

$$N = \frac{\pi^2 EI}{L^2 + H^2} \xrightarrow{(13) \wedge (14)} P = \frac{H - \delta}{\sqrt{L^2 + (H - \delta)^2}} \frac{\pi^2 EI}{L^2 + H^2} \quad (16)$$

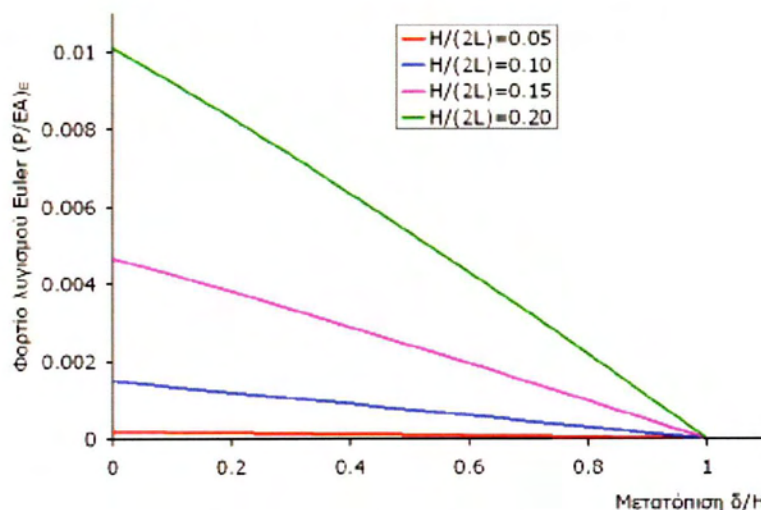
Χρησιμοποιώντας την έκφραση της ακτίνας αδράνειας $i = \sqrt{I/A}$ η (16) δίνει

$$\frac{P}{EA} = 2\pi^2 \left(\frac{i}{H} \right)^2 \frac{1 - \frac{\delta}{H}}{\left(1 + \frac{L^2}{H^2} \right) \sqrt{\frac{L^2}{H^2} + \left(1 - \frac{\delta}{H} \right)^2}} \quad (17)$$

Στην Εικόνα 82 έχει χαραχθεί η γραφική παράσταση της εξίσωσης (17) για μια συγκεκριμένη τιμή του λόγου i/H , από την οποία παρατηρείται πως επηρεάζεται το κρίσιμο φορτίο αστοχίας των ράβδων (από ελαστικό λυγισμό) από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα. Η τιμή του φορτίου λυγισμού Euler για $\delta=0$ είναι αυτή που προκύπτει αν αγνοήσουμε τις μετατοπίσεις, ενώ εάν αυτές ληφθούν υπόψη προκύπτει μία περίπου γραμμική μείωση. Επίσης, από το διάγραμμα της Εικόνας παρατηρούμε ότι ο λόγος ύψους προς άνοιγμα επηρεάζει το φορτίο ελαστικού λυγισμού των μελών, δηλαδή όσο πιο ρηχό είναι το μοντέλο τόσο μειώνεται η σχετική αντοχή του. Η επίδραση αυτή είναι ανάλογης σημασίας με την αντίστοιχη της περίπτωσης του ακαριαίου λυγισμού, όπως προκύπτει από την απόσταση μεταξύ των τεσσάρων καμπυλών της Εικόνας 83.

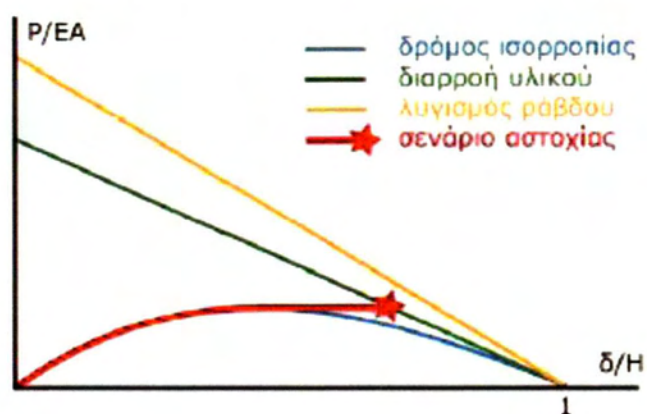


Εικόνα 82: Εξάρτηση του φορτίου ελαστικού λυγισμού μέλους από τη μετατόπιση

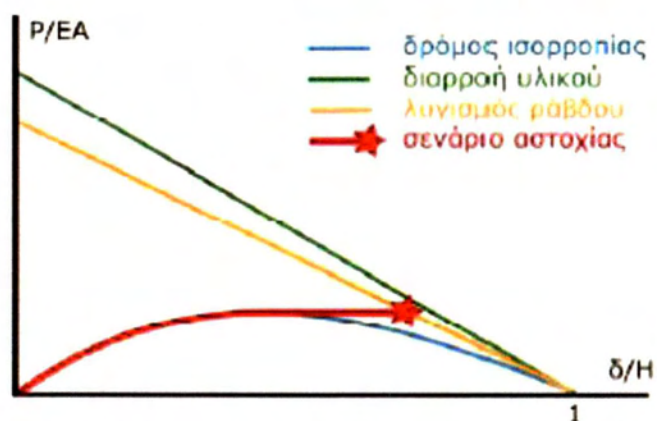


Εικόνα 83: Επίδραση του λόγου $H/2L$ στο φορτίο ελαστικού λυγισμού μέλους

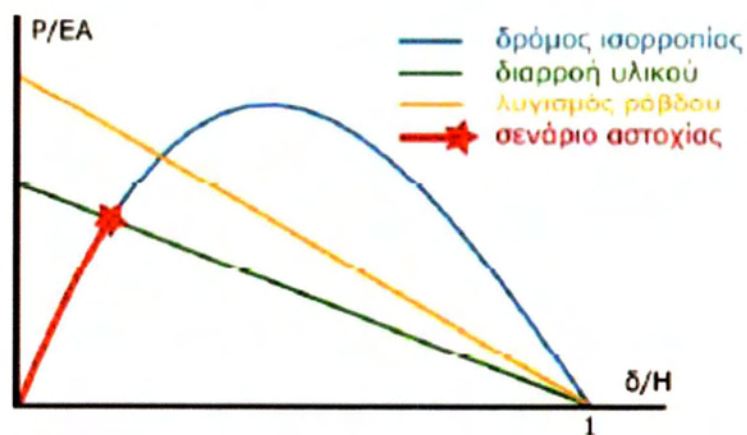
Σενάρια αστοχίας του μοντέλου : Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι υπάρχουν τρεις μηχανισμοί αστοχίας της αψίδας, ο καθολικός ακαριαίος λυγισμός, η διαρροή του υλικού των ράβδων, και ο τοπικός λυγισμός τύπου Euler των ράβδων, κάθε ένας από τους οποίους μπορεί να είναι ο κρίσιμος, ανάλογα με τη γεωμετρία και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά των μελών που την αποτελούν. Τέσσερα πιθανά σενάρια αστοχίας του συστήματος παρουσιάζονται στις Εικόνες 84 - 87, που ακολουθούν.



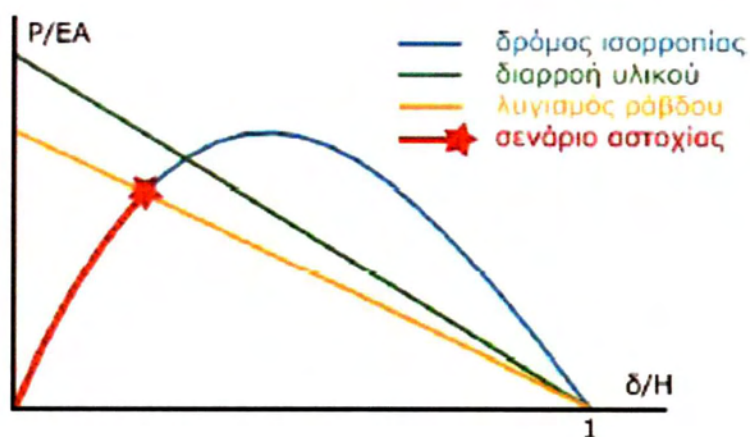
Εικόνα 84: Αστοχία λόγω ακαριαίου λυγισμού και κατόπιν διαρροής μέλους



Εικόνα 85: Αστοχία λόγω ακαριαίου λυγισμού και κατόπιν ελαστικού λυγισμού μέλους



Εικόνα 86: Αστοχία λόγω διαρροής μέλους



Εικόνα 87: Αστοχία λόγω ελαστικού λυγισμού μέλους

Στην Εικόνα 84 φαίνεται η περίπτωση όπου ο ελαστικός δρόμος ισορροπίας ακολουθείται μέχρι το οριακό σημείο χωρίς να συμβεί αστοχία υλικού ή λυγισμός Euler. Έτσι, εφόσον γίνεται έλεγχος φορτίου, συμβαίνει ακαριαίος λυγισμός. Η αστοχία του φορέα θα συμβεί όταν κατά τον ακαριαίο λυγισμό ο φορέας συναντήσει την καμπύλη διαρροής του υλικού, οπότε τα μέλη διαρρέουν. Παρόμοια είναι και η περίπτωση αστοχίας που περιγράφεται από την Εικόνα 85, όπου όμως μετά τον ακαριαίο λυγισμό η αστοχία λόγω λυγισμού Euler των ράβδων συμβαίνει πριν από την διαρροή.

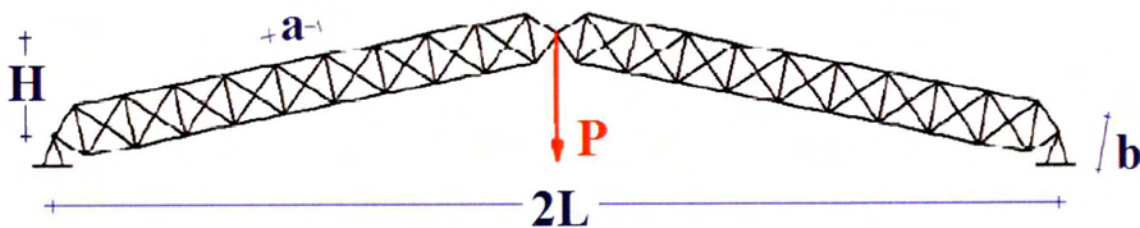
Η Εικόνα 86 παρουσιάζει την περίπτωση που η διαρροή ενός μέλους οδηγεί τον φορέα σε αστοχία για επιβαλλόμενο φορτίο μικρότερο από το οριακό. Τέλος, η Εικόνα 87 δείχνει την περίπτωση που ο λυγισμός Euler ενός μέλους, και συνεπώς η αστοχία του φορέα, προηγείται του ακαριαίου λυγισμού της αψίδας.

Σημειώνεται βεβαίως ότι η ανωτέρω ανάλυση της αψίδας είναι απλοποιητική, περιέχοντας πολλές προσεγγίσεις και παραδοχές, με στόχο πάντως την επισήμανση της ύπαρξης διαφόρων πιθανών μηχανισμών αστοχίας, της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους και της ανάγκης να λαμβάνεται υπόψη σε φορείς αυτής της μορφής η μη γραμμικότητα, τόσο η γεωμετρική όσο και του υλικού, για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας.

3.6. Δικτυωτή τριγωνική αψίδα

Σαν άμεση συνέχεια της ανάλυσης λυγισμού του απλού μοντέλου von Mises, θεωρείται εδώ η τριγωνική αψίδα της Εικόνας 88, τα σκέλη της οποίας μορφώνονται από επί μέρους δικτυώματα, αποτελούμενα από πέλματα με ράβδους μήκους a και διατομής με εμβαδόν A και ροπή αδράνειας I , τοποθετημένες σε απόσταση b μεταξύ τους, και συνδεόμενες με ορθοστάτες και διαγώνιες. Ο φορέας αυτός είναι ένα απλό αλλά αντιπροσωπευτικό παράδειγμα κατασκευών τύπου δικτυωτού θόλου που εφαρμόζονται συχνά για την στέγαση χώρων μεγάλου ανοίγματος. Η αψίδα φορτίζεται με κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο στον μεσαίο κόμβο της, οπότε παραμορφώνεται με κατακόρυφη μετατόπιση του μεσαίου κόμβου (Εικόνα 89α) και στα μέλη αναπτύσσεται κυρίαρχη

θλιπτική ένταση, ιδιαίτερα στα πέλματα των δικτυωμάτων των δύο σκελών, μέσω της οποίας το φορτίο μεταφέρεται στις ακραίες στηρίξεις.



Εικόνα 88: Τριγωνική δικτυωτή αψίδα

Η ένταση αυτή είναι σχεδόν σταθερή κατά μήκος των πελμάτων των δικτυωτών σκελών (Εικόνα 89β) και η τιμή της μπορεί να προκύψει κατά προσέγγιση από ισορροπία του μεσαίου κόμβου στην απαραμόρφωτη κατάσταση, ως:

$$N = \frac{P \sqrt{L^2 + H^2}}{4H} \quad (18)$$



(α) Παραμόρφωση



(β) Θλιπτική αξονική ένταση πελμάτων δικτυωτών σκελών

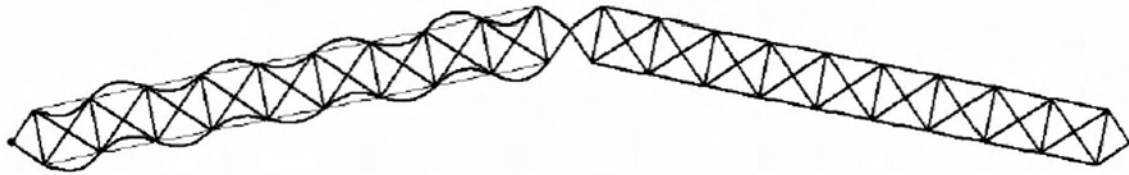
Εικόνα 89: Απόκριση δικτυωτής αψίδας υπό κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο

Ένας πιθανός μηχανισμός αστοχίας είναι η αστοχία υλικού μίας ή περισσότερων ράβδων λόγω της αναπτυσσόμενης θλιπτικής έντασης, που θα συμβεί όταν η θλιπτική τάση που αναπτύσσεται στις περισσότερο καταπονούμενες ράβδους υπερβεί το όριο διαρροής f_y του υλικού. Συνεπώς μία εκτίμηση της τιμής του φορτίου που θα προκαλέσει αστοχία αυτού του τύπου είναι:

$$P = 4Af_y \frac{H}{\sqrt{L^2 + H^2}} \quad (19)$$

Η προσέγγιση αυτή θα είναι καλή για δύσκαμπτες αψίδες, οι οποίες θα αστοχήσουν σε διαρροή πριν αναπτύξουν έντονες παραμορφώσεις, επομένως η σημασία της γεωμετρικής μη γραμμικότητας είναι μικρή και το σφάλμα που εισάγεται διατυπώνοντας τις εξισώσεις ισορροπίας στην απαραμόρφωτη γεωμετρία είναι μικρό.

Λόγω της αναπτυσσόμενης θλίψης, άλλη δυνατή μορφή αστοχίας είναι να συμβεί ελαστικός λυγισμός μεμονωμένων ράβδων της αψίδας (Εικόνα 90). Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι κρίσιμος, αν οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται για τα πέλματα των δικτυωτών σκελών έχουν σχετικά μικρή ροπή αδράνειας και επομένως μεγάλη λυγηρότητα.



Εικόνα 90: Αστοχία δικτυωτής αψίδας λόγω ελαστικού λυγισμού μεμονωμένων μελών

Μία εκτίμηση της τιμής του φορτίου που θα προκαλέσει αστοχία αυτού του τύπου μπορεί να γίνει εξισώνοντας το φορτίο Euler μίας μεμονωμένης ράβδου πέλματος, με μήκος a και ασθενή ροπή αδράνειας I , με την αξονική ένταση που έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά από τη σχέση (18):

$$P = 4\pi^2 \frac{EI}{a^2} \frac{H}{\sqrt{L^2 + H^2}} \quad (20)$$

Μία τρίτη δυνατή περίπτωση είναι να συμβεί ελαστικός λυγισμός του ενός ή και των δύο σκελών της αψίδας (Εικόνα 91). Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας ενδέχεται να επικρατήσει αν για τα πέλματα των δικτυωτών σκελών χρησιμοποιούνται ισχυρές διατομές σε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους, οπότε η συνολική λυγηρότητα του δικτυωτού σκέλους είναι μεγάλη. Το φορτίο που θα προκαλέσει αστοχία αυτού του τύπου μπορεί να εκτιμηθεί εξισώνοντας το φορτίο Euler ολόκληρου του δικτυωτού σκέλους, με μήκος ίσο με $L_2 + H_2$ και ροπή αδράνειας προσεγγιστικά υπολογιζόμενη μόνον από τους όρους Steiner, επομένως ίση με Ab^2 , με την αξονική ένταση που υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση (18):

$$P = 4\pi^2 EA \frac{b^2 H}{(L^2 + H^2)^{3/2}} \quad (21)$$

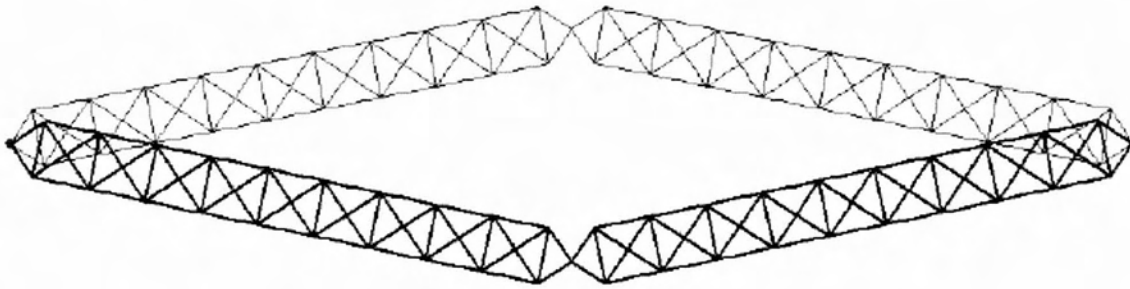


Εικόνα 91: Αστοχία δικτυωτής αψίδας λόγω ελαστικού λυγισμού ενός σκέλους

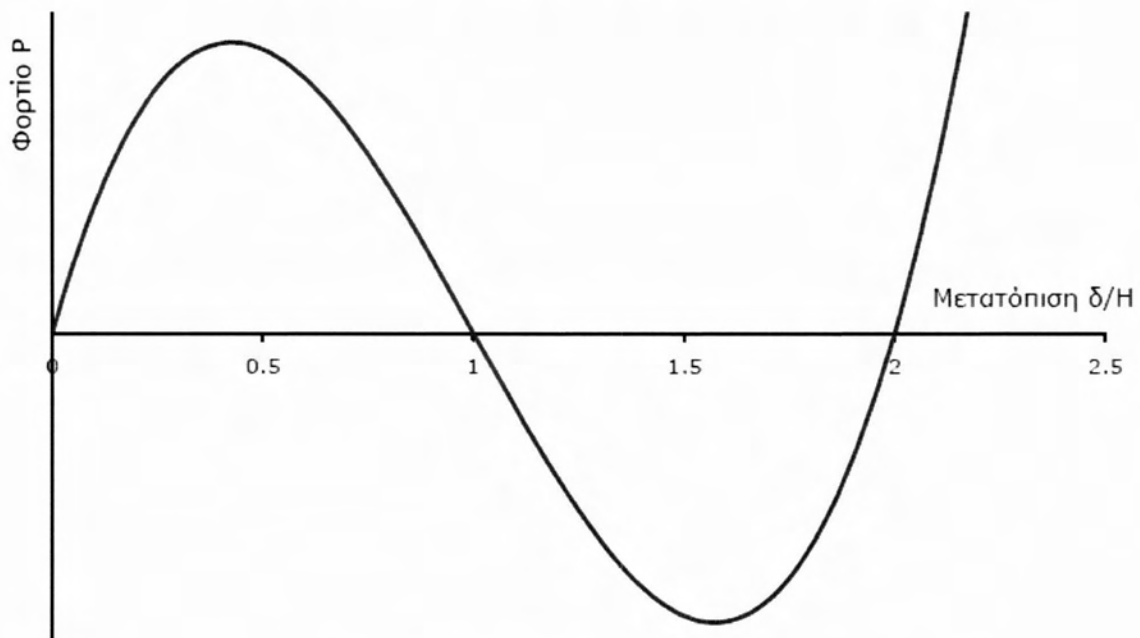
Τέλος, σε αψίδες με μικρό λόγο ύψους H προς άνοιγμα $2L$ μπορεί να συμβεί ακαριαίος λυγισμός ολόκληρης της αψίδας (Εικόνα 92), ανάλογος με αυτόν που εμφανίζεται στην απλή τριγωνική αψίδα της προηγούμενης περίπτωσης. Ο δρόμος ισορροπίας που περιγράφει αυτή τη συμπεριφορά και συσχετίζει το φορτίο P με την κατακόρυφη μετατόπιση δ του μεσαίου κόμβου, μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση (12), χρησιμοποιώντας ως ισοδύναμο εμβαδόν διατομής για το δικτυωτό σκέλος το άθροισμα των εμβαδών διατομής των δύο πελμάτων:

$$\frac{P}{2EA} = 2 \left(1 - \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)^2 + \left(1 - \frac{\delta}{H}\right)^2}}{\left(\frac{L}{H}\right)^2 + 1} \right) \frac{1 - \frac{\delta}{H}}{\sqrt{\left(\frac{L}{H}\right)^2 - \left(1 - \frac{\delta}{H}\right)^2}} \quad (22)$$

Η γραφική παράσταση του εν λόγω δρόμου φαίνεται στην Εικόνα 93.



Εικόνα 92: Αστοχία δικτυωτής αψίδας λόγω ακαριαίου λυγισμού



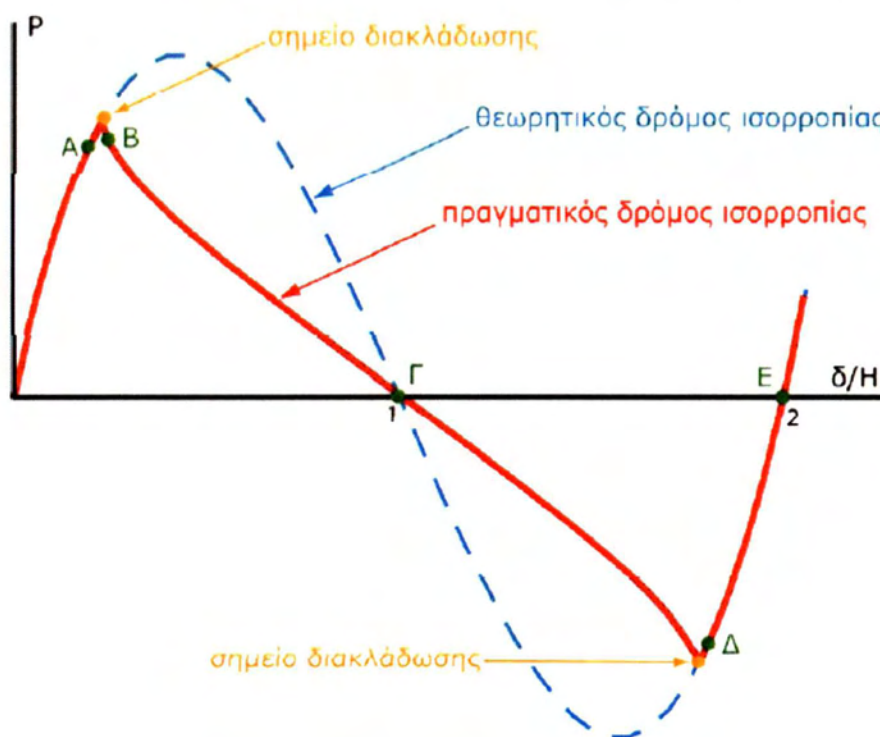
Εικόνα 93: Δρόμος ισορροπίας δικτυωτής αψίδας

Υφίστανται συνεπώς τέσσερις επί μέρους διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας του φορέα, που συνοψίζονται παρακάτω:

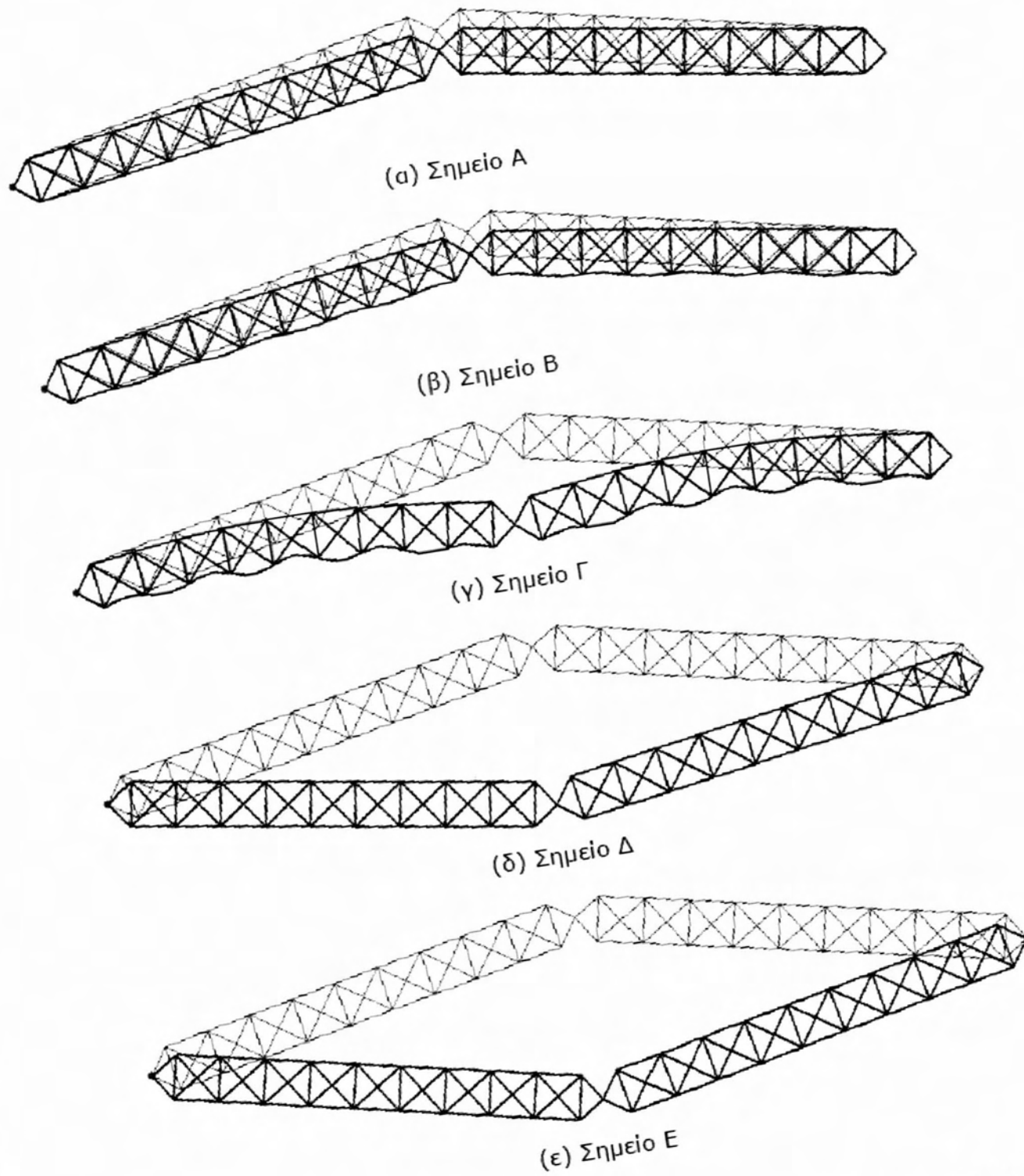
- (α) Καθολικός ακαριαίος λυγισμός ολόκληρης της αψίδας
- (β) Ελαστικός λυγισμός ενός σκέλους της αψίδας
- (γ) Ελαστικός λυγισμός μεμονωμένων ράβδων ενός σκέλους της αψίδας και
- (δ) Αστοχία υλικού.

Στην πραγματικότητα όμως, είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει αλληλεπίδραση δύο ή περισσότερων από αυτούς τους μηχανισμούς αστοχίας. Καθώς το εξωτερικό φορτίο αυξάνεται σταδιακά, η αψίδα ακολουθεί τον δρόμο ισορροπίας της Εικόνας 93. Παράλληλα, αυξάνονται οι θλιπτικές εντάσεις των μελών. Αυτό ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα, κάπου κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας η θλιπτική ένταση ενός ή περισσότερων ράβδων να αποκτήσει τέτοια τιμή, που να ενεργοποιηθεί κάποιος από τους άλλους μηχανισμούς αστοχίας, οπότε ο φορέας θα εγκαταλείψει τον δρόμο ισορροπίας της Εικόνας 93, και θα ισορροπήσει σε άλλες καταστάσεις παραμόρφωσης και έντασης.

Αυτό απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 94, όπου καταγράφεται ένας πραγματικός δρόμος ισορροπίας μίας τέτοιας αψίδας με αλληλεπίδραση μηχανισμών αστοχίας (με συνεχή κόκκινη γραμμή) και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο θεωρητικό δρόμο ισορροπίας χωρίς αλληλεπίδραση μηχανισμών αστοχίας (με διακεκομμένη μπλε γραμμή). Είναι ευκολότερο να κατανοήσει κάποιος αυτόν τον δρόμο ισορροπίας, συσχετίζοντάς τον με την παραμόρφωση σε χαρακτηριστικά σημεία του, που δίνεται στην Εικόνα 95.



Εικόνα 94: Δρόμος ισορροπίας δικτυωτής αψίδας με αλληλεπίδραση μηχανισμών αστοχίας



Εικόνα 95: Απαραμόρφωτη (μπλε χρώμα) και παραμορφωμένη (μαύρο χρώμα) γεωμετρία δικτυωτής αψίδας σε χαρακτηριστικές θέσεις

Ο δρόμος ισορροπίας της Εικόνας 94 αντιστοιχεί σε επιβολή κατακόρυφης μετατόπισης του μεσαίου κόμβου, με παραδοχή γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Αρχικά λοιπόν ο φορέας ακολουθεί τον δρόμο ισορροπίας της Εικόνας 93, και μάλιστα πιστά, κάτι που επιβεβαιώνει την ακρίβεια που επιτυγχάνεται με χρήση της προσεγγιστικής σχέσης (22). Η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται από απλή βράχυνση των μελών (Εικόνα 95α), ενώ παράλληλα τα πέλματα των δικτυωτών σκελών αναπτύσσουν συνεχώς αυξανόμενη θλιπτική ένταση. Για κάποια όμως τιμή της επιβαλλόμενης μετατόπισης η παραμόρφωση αλλάζει και παρατηρείται λυγισμός τύπου Euler των ράβδων στα κάτω πέλματα των δικτυωτών σκελών (Εικόνα 95β). Παράλληλα ο φορέας εγκαταλείπει τον θεωρητικό δρόμο ισορροπίας και αρχίζει να ακολουθεί έναν δευτερεύοντα, καθοδικό δρόμο ισορροπίας. Το σημείο τομής των δύο δρόμων ισορροπίας λέγεται σημείο διακλάδωσης. Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης βράχυνσης η θλιπτική ένταση γίνεται εντονότερη, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί και καθολική καμπύλωση των σκελών, δηλαδή λυγισμός τους τύπου Euler (Εικόνα 95γ) που εκδηλώνεται περισσότερο καθώς ο φορέας περνά από το οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από τις στηρίξεις. Για περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης η βράχυνση μειώνεται, με αποτέλεσμα να εξαφανιστούν αρχικά ο καθολικός λυγισμός των σκελών και στη συνέχεια και ο τοπικός λυγισμός των ράβδων (Εικόνα 95δ), που άλλωστε ήταν ελαστικοί, επομένως δεν συνδέονταν με παραμένουσες παραμορφώσεις. Τότε ο φορέας, μέσω ενός νέου σημείου διακλάδωσης, επιστρέφει στον αρχικό, θεωρητικό δρόμο ισορροπίας, τον οποίο και ακολουθεί μέχρις ότου φθάσει στην κατοπτρική θέση από την αρχική απαραμόρφωτη κατάστασή του (Εικόνα 95ε).

Παρατηρείται δηλαδή αλληλεπίδραση των τριών πιθανών μορφών λυγισμού της αψίδας, του καθολικού ακαριαίου λυγισμού ολόκληρης της αψίδας, του λυγισμού τύπου Euler ενός σκέλους της, και του λυγισμού τύπου Euler μεμονωμένων ράβδων. Στη γενικότερη περίπτωση θα εκδηλωθεί και μη γραμμικότητα υλικού, δηλαδή θα υπάρχει συνδυασμένη αστοχία από όλους τους δυνατούς μηχανισμούς. Το παράδειγμα αυτό είναι χαρακτηριστικό του προβλήματος της αλληλεπίδρασης των μηχανισμών αστοχίας, που εκδηλώνεται εντονότερα με την παρουσία αρχικών ατελειών και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον ασφαλή σχεδιασμό κατασκευών που είναι επιρρεπείς σε τέτοια φαινόμενα.

3.7. Βασικές μορφές αστοχίας χαλύβδινων κατασκευών

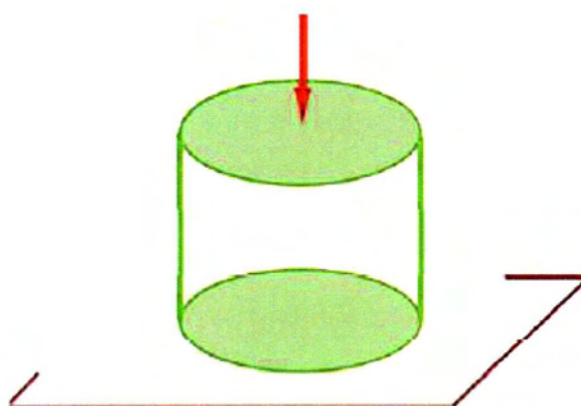
Σύμφωνα με τα περιεχόμενα των ανωτέρω παραγράφων, μπορούμε να εντοπίσουμε τις ακόλουθες βασικές μορφές αστοχίας χαλύβδινων κατασκευών:

(α) Αστοχία με κυρίαρχη μη γραμμικότητα υλικού: Σε αυτή την περίπτωση ο δρόμος ισορροπίας έχει παρόμοιο σχήμα με αυτό του καταστατικού νόμου του υλικού (Εικόνα 96). Αυτή η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζει δομικά μέλη με σημαντική δυσκαμψία και

μικρή λυγηρότητα, όπως φαίνεται ποιοτικά στην Εικόνα 97. Είναι συνήθως η κυρίαρχη μορφή αστοχίας σε κατασκευές από δομικά υλικά σχετικά μικρής αντοχής, δεδομένου ότι τότε απαιτούνται μεγάλες διατομές που οδηγούν σε μικρή λυγηρότητα. Επιθυμητό είναι τότε να έχει το υλικό όλκιμη συμπεριφορά, δηλαδή δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων μετά την διαρροή, ώστε να υπάρχει σημαντική απορρόφηση ενέργειας στην πλαστική περιοχή.



Εικόνα 96: Τυπικός δρόμος ισορροπίας φορέα που αστοχεί από μη γραμμικότητα υλικού



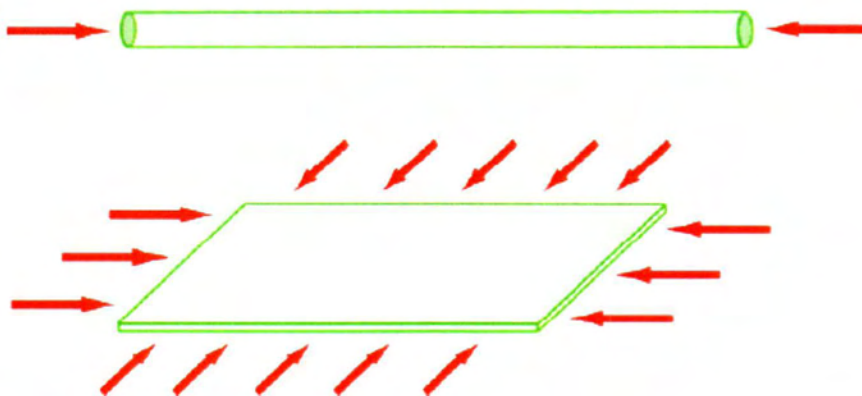
Εικόνα 97: Τυπικός δύσκαμπτος φορέας μικρής λυγηρότητας που αστοχεί από μη γραμμικότητα υλικού

(B) Αστοχία μέσω ευσταθούς σημείου διακλάδωσης: Εδώ ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά ευθύγραμμος και, πριν εκδηλωθεί μη γραμμικότητα υλικού ο φορέας λυγίζει, δηλαδή αλλάζει τον τρόπο παραμόρφωσής του, και ο κύριος δρόμος ισορροπίας διακλαδίζεται, στο λεγόμενο σημείο διακλάδωσης, με άλλον, δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας που είναι ανοδικός, επομένως ο φορέας διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή (Εικόνα 98). Η δυσκαμψία όμως μετά τον λυγισμό είναι σημαντικά μειωμένη, με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις να αυξάνονται πολύ και τελικά να εκδηλώνεται και μη γραμμικότητα υλικού που οδηγεί σε κατάρρευση. Αυτή η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζει δομικά μέλη και φορείς με σημαντική δυσκαμψία και με μεγάλη λυγηρότητα, με χαρακτηριστικά παραδείγματα

πλάκες που φορτίζονται εντός του επιπέδου τους καθώς και θλιβόμενα υποστυλώματα (Εικόνα 99), αν και στα δεύτερα η ταχεία εκδήλωση μη γραμμικότητας υλικού δεν επιτρέπει την αξιοποίηση της μεταλυγισμικής αντοχής.



Εικόνα 98: Τυπικός δρόμος ισορροπίας φορέα που αστοχεί μέσω ευσταθούς σημείου διακλάδωσης



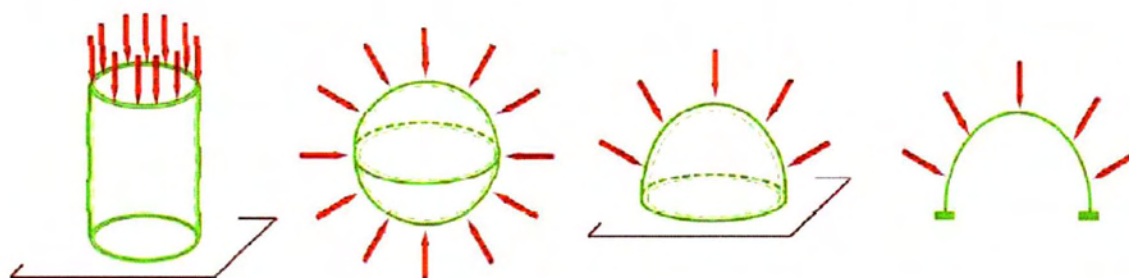
Εικόνα 99: Τυπικοί δύσκαμπτοι φορείς μεγάλης λυγηρότητας που αστοχούν μέσω ευσταθούς σημείου διακλάδωσης

(γ) Αστοχία μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης: Και εδώ ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά ευθύγραμμος και, πριν εκδηλωθεί μη γραμμικότητα υλικού ο φορέας λυγίζει, δηλαδή αλλάζει τον τρόπο παραμόρφωσής του, και ο κύριος δρόμος ισορροπίας διακλαδίζεται, στο λεγόμενο σημείο διακλάδωσης, με άλλον, δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας που όμως τώρα είναι καθοδικός, επομένως ο φορέας δεν διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή (Εικόνα 100). Και πάλι μετά τον λυγισμό οι παραμορφώσεις αυξάνονται πολύ, και μάλιστα, εφόσον επιβάλλουμε φορτία οι παραμορφώσεις αυξάνονται πολύ πιο απότομα, με δυναμικό χαρακτήρα, και τελικά εκδηλώνεται και μη γραμμικότητα υλικού που οδηγεί σε κατάρρευση. Αυτή η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζει επίσης δομικά

μέλη και φορείς με σημαντική δυσκαμψία και με μεγάλη λυγηρότητα, με χαρακτηριστικά παραδείγματα λεπτότοιχα κελύφη καθώς θόλους και τόξα με σχετικά μεγάλο λόγο ύψους προς άνοιγμα (Εικόνα 101), ώστε η αρχική δυσκαμψία να είναι σημαντική.

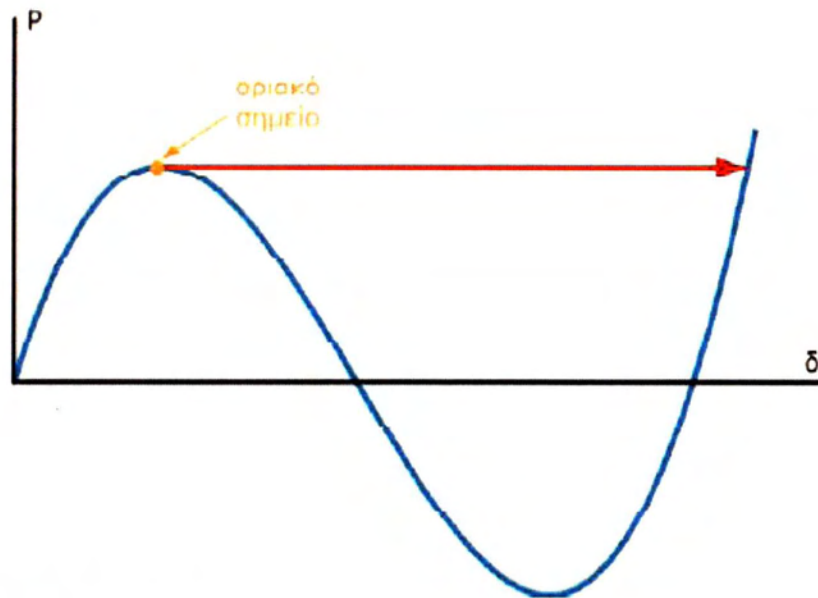


Εικόνα 100: Τυπικός δρόμος ισορροπίας φορέα που αστοχεί μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης

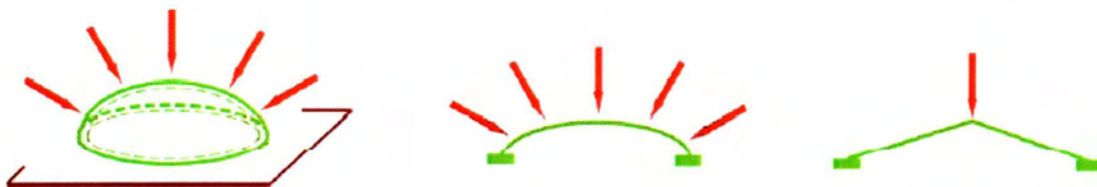


Εικόνα 101: Τυπικοί δύσκαμπτοι φορείς μεγάλης λυγηρότητας που αστοχούν μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης

(δ) Αστοχία μέσω οριακού σημείου: Στην περίπτωση αυτή ο δρόμος ισορροπίας είναι από την αρχή καμπύλος, με συνεχώς μειούμενη δυσκαμψία που τελικά μηδενίζεται, στο λεγόμενο οριακό σημείο, πριν εκδηλωθεί μη γραμμικότητα υλικού (Εικόνα 102). Μετά το λυγισμό οι παραμορφώσεις αυξάνονται πολύ, και μάλιστα, εφόσον επιβάλλουμε φορτία, οι παραμορφώσεις αυξάνονται πολύ απότομα, με δυναμικό χαρακτήρα, και τελικά εκδηλώνεται και μη γραμμικότητα υλικού που οδηγεί σε κατάρρευση. Αυτή η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζει φορείς με μικρή δυσκαμψία, με χαρακτηριστικά παραδείγματα θόλους και τόξα με σχετικά μικρό λόγο ύψους προς άνοιγμα (Εικόνα 103), ώστε η αρχική δυσκαμψία να είναι μικρή. Η σημαντική ποιοτική διαφορά αυτής της μορφής αστοχίας από τις προηγούμενες είναι ότι η συμπεριφορά είναι γεωμετρικά μη γραμμική και για φορτία μικρότερα του φορτίου λυγισμού, επομένως για την ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης είναι απαραίτητο, ακόμη και για μικρά φορτία, να ληφθεί υπόψη η επιρροή αυτής της μη γραμμικότητας.



Εικόνα 102: Τυπικός δρόμος ισορροπίας φορέα που αστοχεί μέσω οριακού σημείου

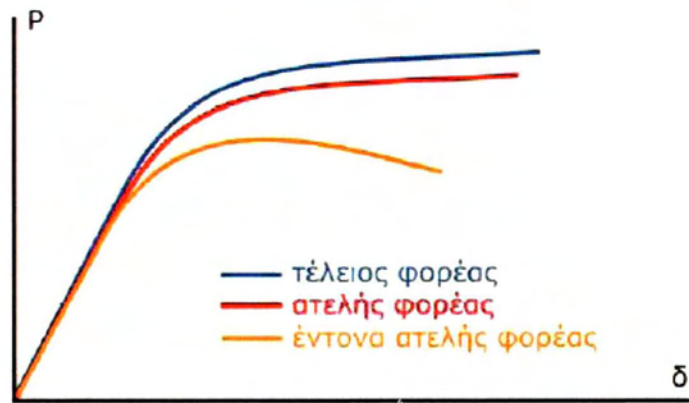


Εικόνα 103: Τυπικοί εύκαμπτοι φορείς που αστοχούν μέσω οριακού σημείου

3.8. Η επιρροή των αρχικών ατελειών

Όλοι οι πραγματικοί φορείς χαρακτηρίζονται από ατέλειες που μπορεί να οφείλονται είτε σε ανομοιογένεια του υλικού, είτε σε αποκλίσεις από την ιδεατή γεωμετρία λόγω κατασκευαστικής ανακρίβειας (π.χ. απόκλιση μελών από την ευθυγραμμία ή από την κατακορυφότητα), είτε να είναι ατέλειες ως προς την εφαρμογή του φορτίου (π.χ. έκκεντρη φόρτιση). Η επίδραση των ατελειών στη μη γραμμική συμπεριφορά των κατασκευών εξαρτάται από το είδος του φορέα και τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας του. Στις επόμενες Εικόνες 104 ως 107 παρουσιάζεται ποιοτικά η επιρροή των ατελειών για τις τέσσερις βασικές μορφές αστοχίας που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Σε φορείς που αστοχούν λόγω μη γραμμικότητας υλικού, η παρουσία αρχικών ατελειών έχει ως αποτέλεσμα την ελαφρά μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω ταχύτερης τοπικής πλαστικοποίησης τμημάτων των κρίσιμων διατομών από την εισαγωγή δευτερευουσών τάσεων (Εικόνα 104). Δεν παρουσιάζεται πάντως ποιοτική μεταβολή της συμπεριφοράς, του τρόπου αστοχίας και της μορφής του δρόμου ισορροπίας, που εξακολουθεί να είναι παρόμοιος με τον καταστατικό νόμο του υλικού.



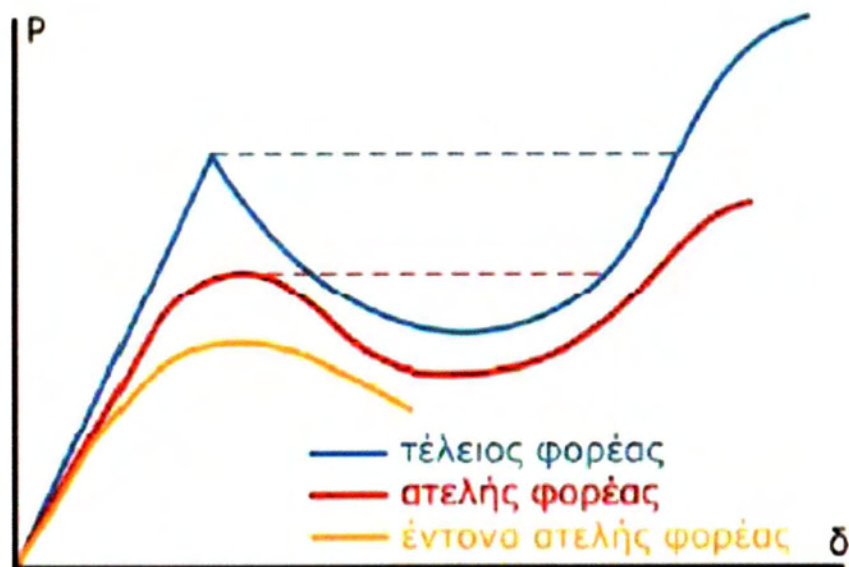
Εικόνα 104: Επιρροή αρχικών ατελειών σε φορέα που αστοχεί λόγω μη γραμμικότητας υλικού

Σε φορείς που αστοχούν μέσω ευσταθούς σημείου διακλάδωσης οι αρχικές ατέλειες έχουν ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και την ενοποίηση του κύριου και του δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας σε έναν, ενιαίο, καμπύλο δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα δρόμου του αντίστοιχου τέλειου συστήματος και αποκλίνει από αυτούς τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η ατέλεια. Ο λυγισμός δεν εμφανίζεται πλέον απότομα, για μία συγκεκριμένη τιμή του φορτίου, αλλά παίρνει την μορφή σταδιακής, πάντως ταχείας, μείωσης της δυσκαμψίας του φορέα όταν το φορτίο πάρει τιμές ίσες ή και λίγο μικρότερες από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του αντίστοιχου τέλειου συστήματος (Εικόνα 105). Για μικρές ατέλειες υπάρχει και πάλι μεταλυγισμική αντοχή, όμως λόγω ατελειών επέρχεται ταχύτερη τοπική πλαστικοποίηση τμημάτων των κρίσιμων διατομών από την εισαγωγή δευτερευουσών τάσεων και η τελική θραύση εμφανίζεται για μειωμένο φορτίο. Αυτό είναι εντονότερο για μεγάλες αρχικές ατέλειες, οπότε ενδέχεται και να μην υπάρξει μεταλυγισμική αντοχή.



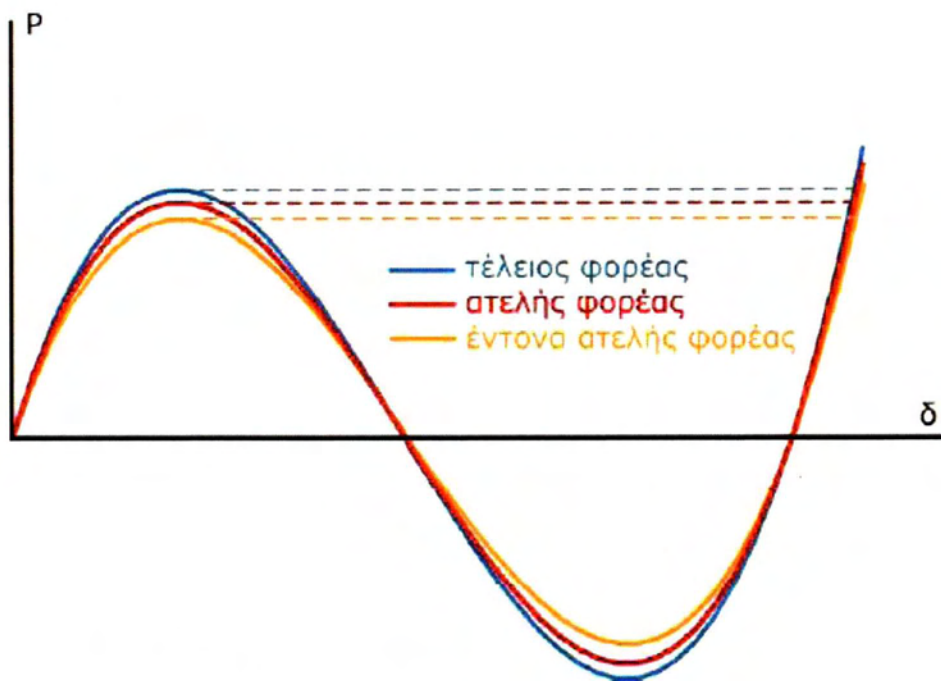
Εικόνα 105: Επιρροή αρχικών ατελειών σε φορέα που αστοχεί μέσω ευσταθούς σημείου διακλάδωσης

Σε φορείς που αστοχούν μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης οι αρχικές ατέλειες έχουν και πάλι ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και την ενοποίηση του κύριου και του δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας σε έναν, ενιαίο, καμπύλο δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα δρόμου του αντίστοιχου τέλειου συστήματος και αποκλίνει από αυτούς τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η ατέλεια (Εικόνα 106). Λόγω όμως τώρα της καθοδικής μορφής του δευτερεύοντος δρόμου του τέλειου συστήματος, ο ενιαίος δρόμος ισορροπίας του ατελούς συστήματος αποκτά και αυτός καθοδική τροχιά, αφού περάσει από ένα ανώτατο σημείο. Δηλαδή, λόγω των ατελειών, το σημείο διακλάδωσης εκφυλίζεται σε οριακό σημείο, το οποίο μάλιστα εμφανίζεται για αρκετά μικρότερη τιμή φορτίου από εκείνη που αντιστοιχεί στο σημείο διακλάδωσης του τέλειου συστήματος, τόσο μικρότερη όσο μεγαλύτερες είναι οι ατέλειες. Για την τιμή αυτή του φορτίου παρατηρείται και πάλι ακαριαίος λυγισμός, εφόσον η καταπόνηση γίνεται μέσω άσκησης φορτίου. Λόγω ατελειών επέρχεται και πάλι ταχύτερη τοπική πλαστικοποίηση τμημάτων των κρίσιμων διατομών από την εισαγωγή δευτερευουσών τάσεων και η τελική θραύση εμφανίζεται για μειωμένο φορτίο.



Εικόνα 106: Επιρροή αρχικών ατελειών σε φορέα που αστοχεί μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης

Τέλος σε φορείς που αστοχούν μέσω οριακού σημείου η παρουσία αρχικών ατελειών έχει ως αποτέλεσμα την ελαφρά τροποποίηση του δρόμου ισορροπίας, χωρίς πάντως ποιοτική μεταβολή της μορφής του, ούτε της συμπεριφοράς και του τρόπου αστοχίας του φορέα (Εικόνα 107).



Εικόνα 107: Επιρροή αρχικών ατελειών σε φορέα που αστοχεί μέσω οριακού σημείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Λεπτότοιχα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης

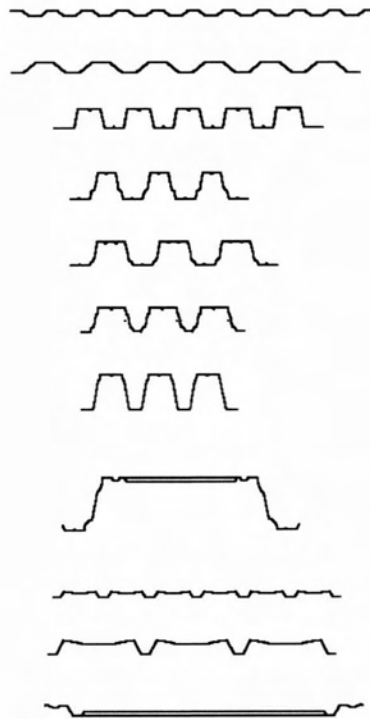
4.1. Εισαγωγή, τυπικά προϊόντα και χρήση αυτών

Παλιότερα, η χρήση λεπτότοιχων διατομών ψυχρής διαμόρφωσης περιοριζόταν κυρίως σε προϊόντα όπου το ελάχιστο βάρος ήταν η βασική επιδίωξη, όπως στην αεροναυπηγική, τη βιομηχανία σιδηροδρόμων και τη βιομηχανία αυτοκινήτων. Επίσης, είχαν χρησιμοποιηθεί απλοί τύποι τέτοιων διατομών αλλά και διαμορφωμένα επιφανειακά στοιχεία (φύλλα) για μη δομικές εφαρμογές ακόμα και πριν 100 χρόνια περίπου. Όμως, μετά από συστηματική έρευνα των τελευταίων δεκαετιών καθώς και η βελτίωση στην τεχνολογία βιομηχανικής παραγωγής - κατεργασίας και την αντιδιαβρωτική προστασία, η αυξημένη αντοχή των υλικών και η διάθεση Κωδίκων για το σχεδιασμό, οδήγησαν στην ευρύτερη χρήση διατομών ψυχρής διαμόρφωσης στις δομοστατικές κατασκευές.

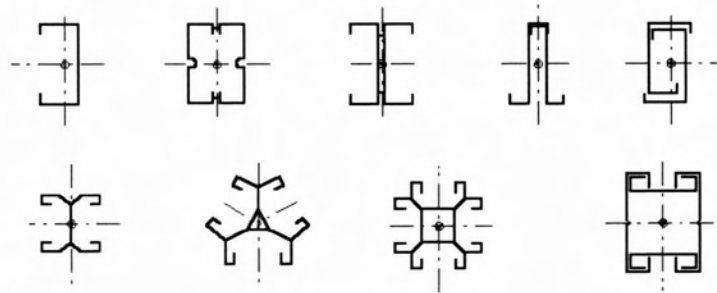
Οι διατομές αυτές είναι πρισματικά στοιχεία, σταθερού πάχους φύλλων, τα οποία διαμορφώνονται μέσω μιας αλληλουχίας επίπεδων υποστοιχείων και πτυχώσεων, με σκοπό να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις αντοχής και μερικές φορές για την κάλυψη επιφανειών, σύμφωνα με τα περιεχόμενα των Εικόνων 108 - 110.



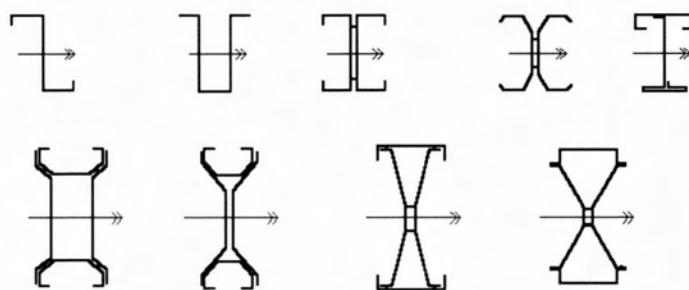
Εικόνα 108: Μέλη ψυχρής διαμόρφωσης



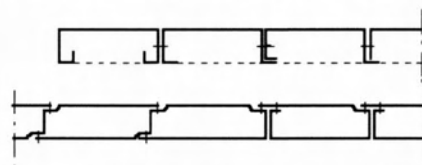
Εικόνα 109: Εν ψυχρώ διαμορφωμένα επιφανειακά στοιχεία (φύλλα)



Δομικά στοιχεία κατάλληλα για ανάληψη εφελκυσμού και θλίψης



Δομικά στοιχεία κατάλληλα για την ανάληψη κάμψης



Επιφανειακά στοιχεία κατάλληλα για ανάληψη συνδυασμένων δράσεων

Εικόνα 110: Μέλη κατασκευών από διατομές ψυχρής διαμόρφωσης

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα των διατομών ψυχρής διαμόρφωσης είναι ότι λυγηρά μέρη ενισχύονται μέσω πτύκωσης (διπλώματος) είτε ενδιάμεσα είτε στα άκρα, γεγονός που καθυστερεί ή αποτρέπει τον πρόωρο λυγισμό των θλιβόμενων ζωνών. Το φαινόμενο αυτό θα συζητηθεί στη συνέχεια.

4.2. Εφαρμογές, πλεονεκτήματα και τρόπος βιομηχανικής παραγωγής - κατεργασίας

Οι τύποι των ανωτέρω μελών, που διατίθενται για δομοστατικές εφαρμογές είναι:

(α) Ευθύγραμμα μέλη, εκ των οποίων συνήθως χρησιμοποιούνται αυτά με μεγαλύτερο πάχος, ως δοκοί με σχετικά μικρά φορτία και για μικρά ανοίγματα (τεγίδες και άνω - κάτω οδηγί ανηρημένων κατακόρυφων επιφανειακών κατασκευών), όπως π.χ. στύλοι και κατακόρυφες στηρίξεις, ως επίσης και σε δικτυώματα.

(β) Επίπεδα φέροντα μέλη μικρής σχετικά φέρουσας ικανότητας και μικρού πάχους, όπου απαιτείται μια λειτουργία κάλυψης χώρου υπό μέτριο κατανεμημένο φορτίο, όπως πατώματα, τοίχοι και στέγες.

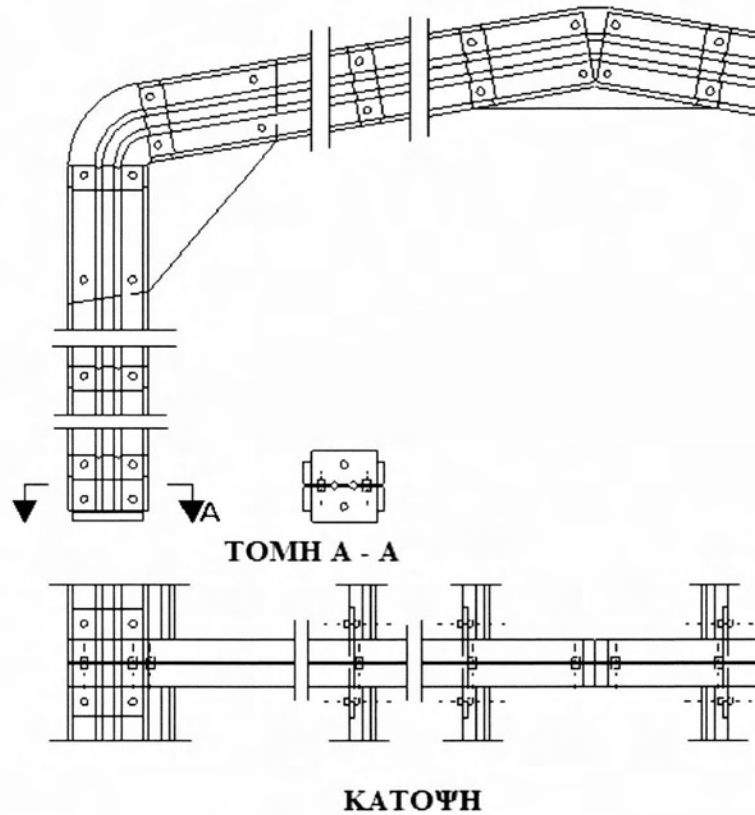
Κατά συνέπεια, μέλη διατομών ψυχρής διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε χαμηλά κτίρια και σε ελαφριάς μορφής βιομηχανικά κτίρια με μικρά ανοίγματα, περιπτώσεις στις οποίες η χρήση τους είναι βέλτιστη.

Σε ότι αφορά τα πλεονεκτήματά τους, τα μέλη διατομής ψυχρής διαμόρφωσης διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κλασσικά μέλη θερμής εξέλασης, όπως:

- Το σχήμα της διατομής μπορεί να βελτιστοποιηθεί για να επιτευχθεί η άριστη χρήση υλικού
- Υπάρχει μεγάλο περιθώριο νεοτερισμού
- Σε συνδυασμό με τα διαμορφωμένα φύλλα οι διατομές αυτές προσφέρουν οικονομικές και αξιόπιστες λύσεις, που οδηγούν σε κάλυψη χώρου και πλευρικές δεσμεύσεις έναντι λυγισμού. Παράδειγμα κατασκευής που εκμεταλλεύονται το τελευταίο αυτό πλεονέκτημα είναι τα ελαφρού βάρους βιομηχανικά κτίρια, όπως αυτό της Εικόνας 111.

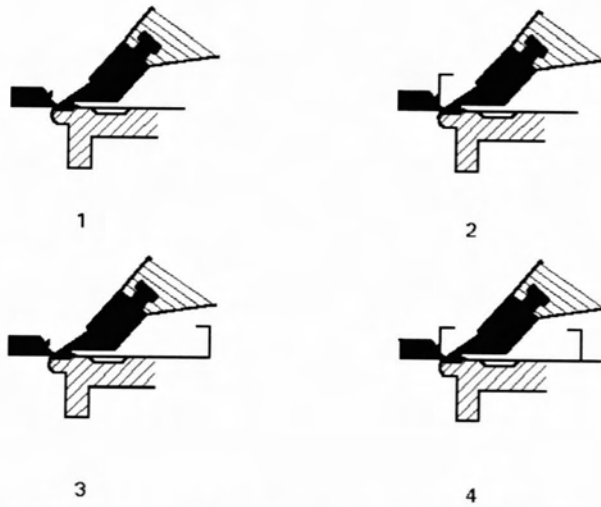
Τα πλεονεκτήματα συνεπώς μπορεί γενικά να ταξινομηθούν μέσω των παρακάτω:

- Μείωση βάρους
- Βελτιστοποίηση του προϊόντος σε σχέση με τη φέρουσα ικανότητα ανάλογα με την εκάστοτε χρήση και τις σχετικές κατασκευαστικές απαιτήσεις και
- Λειτουργικότητα στην κάλυψη επιφανειών.

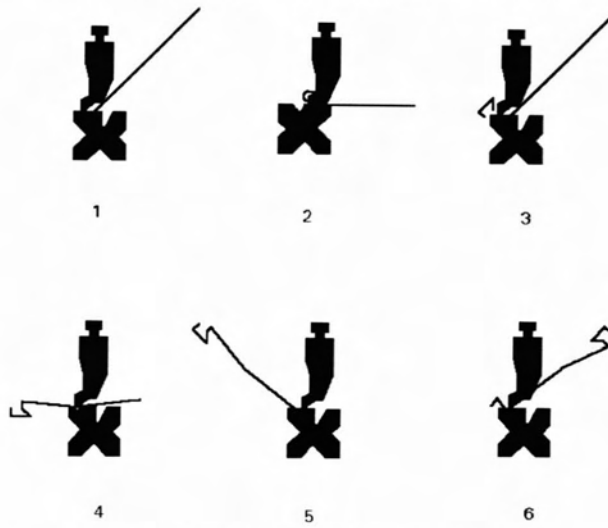


Εικόνα 111: Ελαφρύ Βιομηχανικό κτίριο με μέλη και καλύψεις ψυχρής διαμόρφωσης

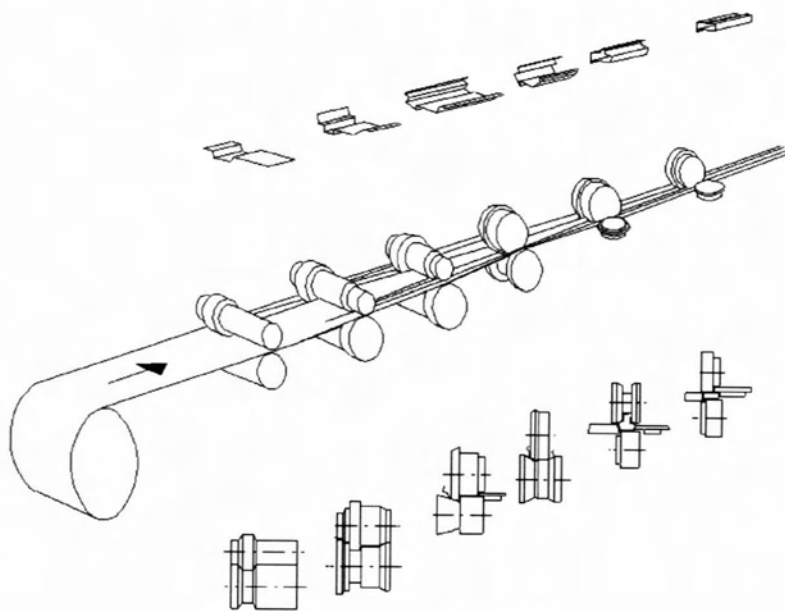
Στην σχετική βιομηχανία, υπάρχουν γενικά τρεις μέθοδοι ψυχρής διαμόρφωσης, που είναι το δίπλωμα (πτύκωση - folding), το τσάκισμα μέσω πίεσης (press braking) και η ψυχρή εξέλαση (cold rolling), κάθε μια εκ των οποίων να φαίνεται σχηματικά στις Εικόνες 112, 113 και 114 αντίστοιχα. Για δομικά μέλη σχετικά μικρού μήκους, συνήθως μέχρι 6m και σπανιότερα μέχρι 12m, είναι πιο φυσιολογική η χρήση των δύο πρώτων μεθόδων. Η προσπάθεια που απαιτείται για τη διαμόρφωση ενός τύπου διατομής εξαρτάται από το πάχος του φύλλου, την ολκιμότητα του υλικού και το σχήμα της διατομής, που περιορίζεται από το πλάτος της διαθέσιμης ταινίας. Και οι τρεις αυτές μέθοδοι πάντως μπορούν να οδηγήσουν κατά περίπτωση σε μέλη που να διαθέτουν τα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 112: Ψυχρή διαμόρφωση μέσω πτύκωσης



Εικόνα 113: Ψυχρή διαμόρφωση με τσάκισμα



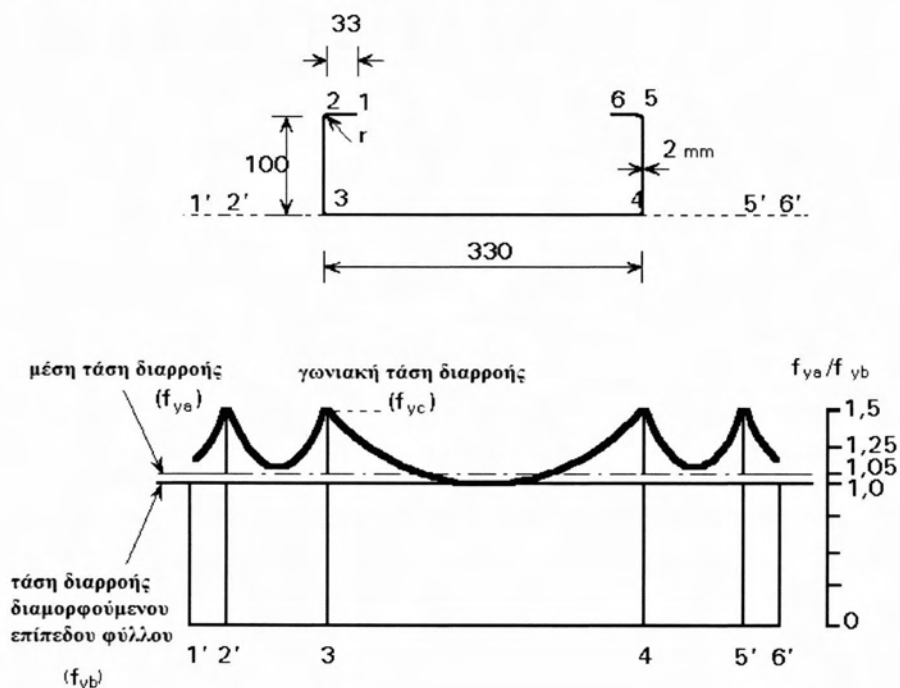
Εικόνα 114: Ψυχρή εξέλαση

4.3. Υλικά, επίδραση της ψυχρής διαμόρφωσης και συνδέσεις

Ο τύπος του χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι κατάλληλος τόσο για ψυχρή διαμόρφωση όσο και για γαλβανισμό. Για τη ψυχρή διαμόρφωση είναι προτιμητέα η χρήση χάλυβα ψυχρής έλασης συνεχούς γαλβανισμού με τάση διαρροής που να κυμαίνεται σε 280 - 320 - 350 N/mm² και συνολική επιμήκυνση τουλάχιστον 10% για λωρίδα πλάτους 12.5 mm, που συχνά αναφέρεται ως μετρικό μήκος $\ell_0 = 80mm$, καθώς και λόγο μεταξύ οριακής αντοχής σε εφελκυσμό προς τάση διαρροής τουλάχιστο 1.1.

Υπό κανονικές συνθήκες, ανοδική προστασία Z257 (275 gr/m²) είναι επαρκής. Σε πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα μπορεί πάντως να χρειαστούν βελτιωμένες μέθοδοι τέτοιας προστασίας, ενώ για μεγάλα πάχη διατομών μερικές φορές εφαρμόζεται είτε επί τόπου εξωτερική προστατευτική βαφή είτε γαλβάνισμα εν θερμώ μέσω εμβύθισης.

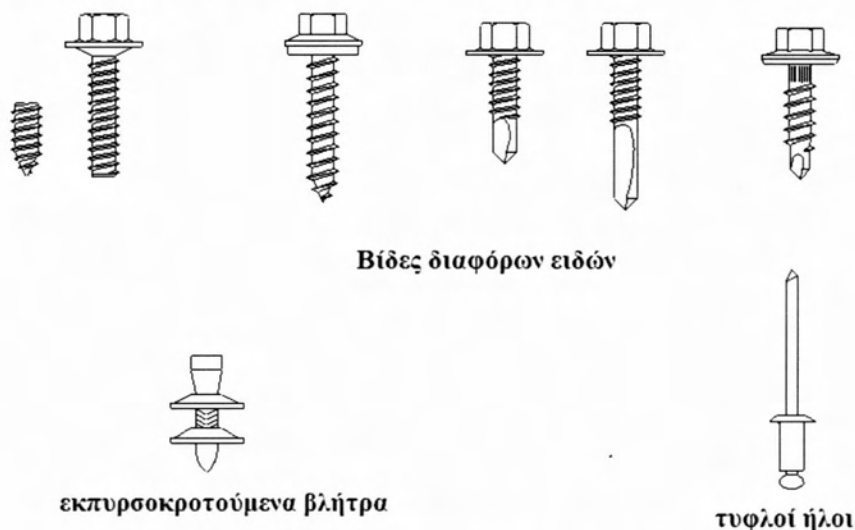
Η ψυχρή διαμόρφωση επιτρέπει την άμεση διαφοροποίηση των γεωμετρικών ιδιοτήτων μιας διατομής, οπότε είναι εφικτή η επιρροή στην φέρουσα ικανότητα ενός μέρους σε ότι αφορά αντοχή, δυσκαμψία και μορφές αστοχίας (μέσω εισαγωγής π.χ. ενδιάμεσων ενισχύσεων ή εξασφάλισης κατάλληλου λόγου πλάτους προς πάχος σε γειτονικά επίπεδα μέρη της διατομής). Καθόσον η όλη διαδικασία διαμόρφωσης περιλαμβάνει σκλήρυνση, η τάση διαρροής, η οριακή αντοχή και η ολκιμότητα επηρεάζονται τοπικά σε κάποιο βαθμό, που εξαρτάται από την ακτίνα πτύχωσης, το πάχος του φύλλο, την ποιότητα του χάλυβα και τη μέθοδο διαμόρφωσης. Η μέση τάση διαρροής της διατομής εξαρτάται συνεπώς από τον αριθμό των γωνιών και το πάχος των επιπέδων μερών. Η επιρροή αυτή καταδεικνύεται στην Εικόνα 115.



Εικόνα 115: Παράδειγμα επίδρασης της ψυχρής κατεργασίας στην τάση διαρροής

Η μέση τάση διαρροής μπορεί να εκτιμηθεί μέσω προσεγγιστικών εκφράσεων στους κατάλληλους Κώδικες. Στο ανωτέρω παράδειγμα, οι σχετικοί λόγοι τάσεων διαρροής ισούνται με $f_{ya}/f_{yb} \approx 1.05$, $f_{yc}/f_{yb} \approx 1.4$. Κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, διάφορες εκτατικές δυνάμεις μπορεί επίσης να δημιουργήσουν παραμένουσες τάσεις, που αλλάζουν σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα. Η παρουσία τους πάντως δρα ευεργετικά αν εμφανίζονται σε θλιβόμενα μέρη της διατομής, τα οποία τότε όμως είναι επιδεκτικά τοπικού λυγισμού.

Αναφορικά με τις τεχνικές σύνδεσης μελών ψυχρής διαμόρφωσης, υπάρχουν συμβατικοί και μη συμβατικοί συνδετήρες (μηχανικά μέσα σύνδεσης). Συμβατικοί θεωρούνται οι κοχλίες (με δακτύλιο και περικόχλιο) ενώ μη συμβατικοί οι τυφλοί ήλοι (πριτσίνια), διαφόρων ειδών σφραγιστικές βίδες (αυτοχαρακτικές ή αυτοκοπτικές ή τρυπανόβιδες) καθώς εκπυρσοκροτούμενα βλήτρα, σύμφωνα με τα περιεχόμενα της Εικόνας 116. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικές σημειακές συγκολλήσεις, εξωραφές, ή συγκολλητικές ουσίες.



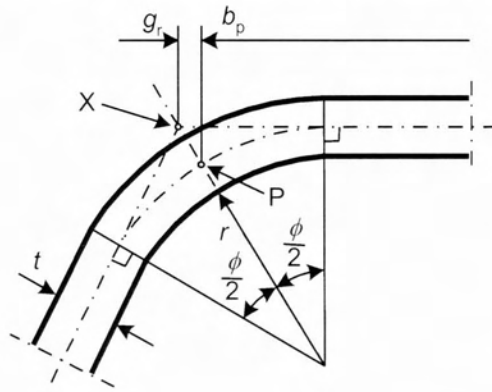
Εικόνα 116: Μη συμβατικά μέσα σύνδεσης

4.4. Στοιχεία στατικής ανάλυσης

4.4.1 Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης διαθέτουν εν γένει στρογγυλεμένες γωνίες, γεγονός που επηρεάζει τις ιδιότητες τους. Κατά συνέπεια αυτές θα πρέπει να υπολογίζονται με βάση την πραγματική γεωμετρία, το δε ονομαστικό πλάτος b_p των τοιχωμάτων δέον όπως μετράται από το μέσο σημείο των γειτονικών τοιχωμάτων, σύμφωνα με την Εικόνα 117. Πλην περιπτώσεων χρήσης ακριβέστερων μεθόδων, ο υπολογισμός των ιδιοτήτων θα πρέπει να ακολουθεί την ακόλουθη μεθοδολογία. Η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών στην αντοχή της διατομής μπορεί να αγνοηθεί αν για εσωτερικές ακτίνες r ισχύουν οι σχέσεις $r < 5t$ και $r < 0.10b_p$. Η διατομή

μπορεί τότε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα τοιχώματα με αιχμηρές γωνίες (σύμφωνα με την Εικόνα 118 Σημειώνεται ότι υπολογίζεται το πλάτος b_p για όλα τα επίπεδα τοιχώματα, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων τοιχωμάτων σε εφελκυσμό). Στις αδρανειακές ιδιότητες της διατομής για τον υπολογισμό δυσκαμψίας η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη.

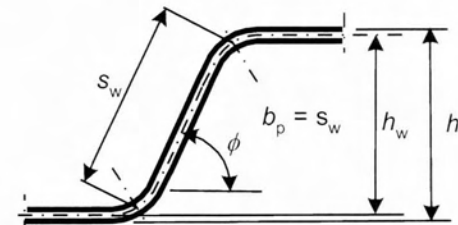
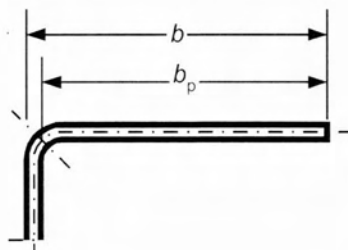


(α) Μέσο σημείο της γωνίας ή κάμψης

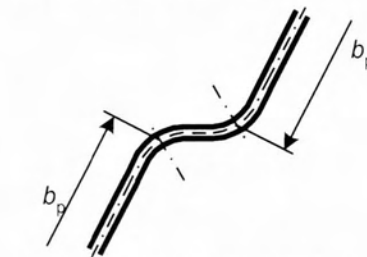
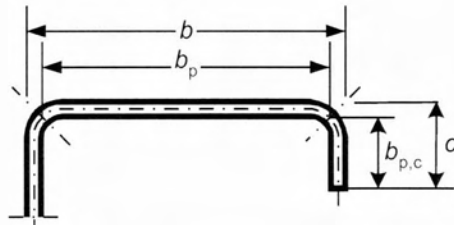
X το σημείο τομής των μέσων επιφανειών
P το μέσο σημείο της γωνίας

$$r_m = r + t / 2$$

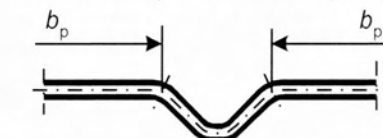
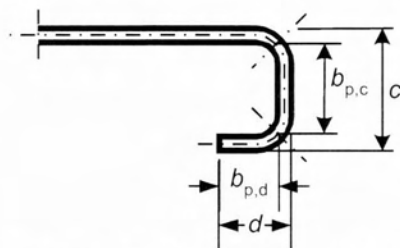
$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)$$



(γ) ονομαστικό πλάτος b_p κορμού ($b_p = \text{λοξό ύψος } s_w$)



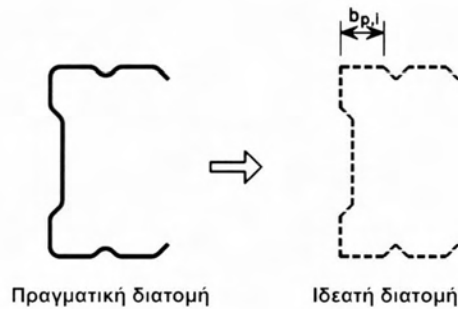
(δ) ονομαστικό πλάτος b_p επιπέδων στοιχείων με ενισχύσεις κορμού



(ε) ονομαστικό πλάτος b_p επιπέδων στοιχείων με ενισχύσεις πέλματος

(β) ονομαστικό πλάτος b_p επιπέδων στοιχείων πελμάτων

Εικόνα 117: Ονομαστικά πλάτη επίπεδων στοιχείων b_p



Εικόνα 118: Προσεγγιστικός τρόπος για να ληφθούν υπόψη στρογγυλεμένες γωνίες

Η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών στις ιδιότητες της διατομής μπορεί να ληφθεί υπόψη με απομείωση των ιδιοτήτων μιας παρόμοιας διατομής με αιχμηρές γωνίες με βάση προσεγγιστικές σχέσεις.

4.4.2 Προσομοίωση για στατική ανάλυση- καμπύλωση πέλματος

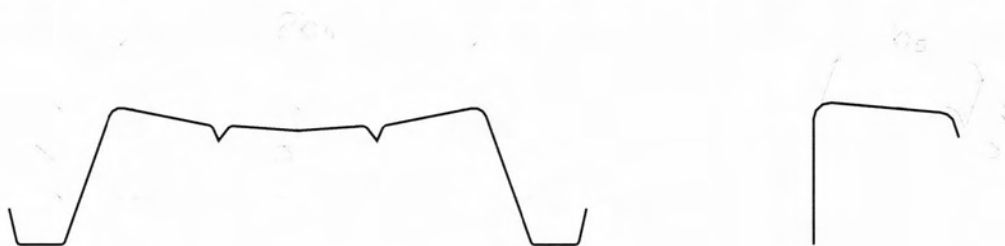
Τα στοιχεία μιας διατομής μπορούν να προσομοιωθούν σύμφωνα με τα περιεχόμενα της Εικόνας 119, αν δεν χρησιμοποιούνται αναλυτικά μοντέλα, ενώ είναι σαφές ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία και αλληλεπίδραση πολλαπλών ενισχύσεων καθώς και οι αρχικές ατέλειες που σχετίζονται με τον καμπτικό και τον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα	Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα

Εικόνα 119: Προσομοίωση των στοιχείων της διατομής

Επιπρόσθετα δε, η επίδραση στην αντοχή της καμπύλωσης (curling) (δηλαδή η εσωτερική καμπυλότητα προς το ουδέτερο επίπεδο) ενός πολύ πλατέος

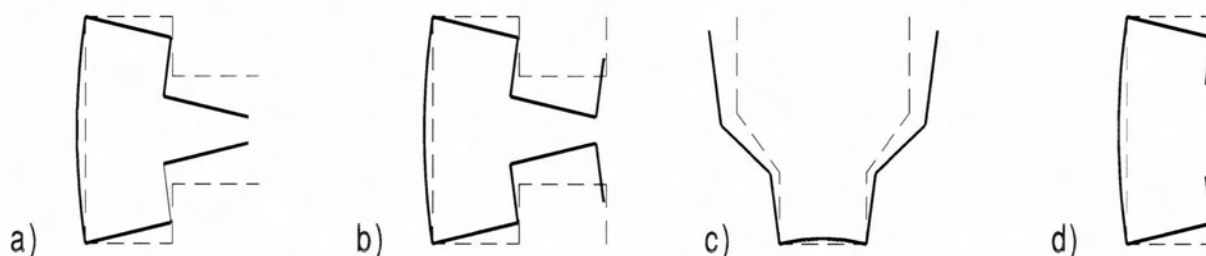
πέλματος μιας καμπτόμενης διατομής ή ενός καμπτόμενου πέλματος μιας τοξωτής διατομής στην οποία η κοίλη πλευρά είναι θλιβόμενη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, εκτός εάν αυτή η καμπύλωση είναι μικρότερη από το 5% του ύψους της διατομής. Εάν η καμπύλωση είναι μεγαλύτερη, τότε η μείωση στην αντοχή, π.χ. λόγω μείωσης του μοχλοβραχίονα σε τμήματα των πλατιών πελμάτων και της πιθανής επίδρασης της κάμψης των κορμών, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Το φαινόμενο της καμπύλωσης φαίνεται στην Εικόνα 120.



Εικόνα 120: Καμπύλωση πέλματος

4.4.3 Τοπικός και στρεβλωτικός λυγισμός

Η επίδραση του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με στρέβλωση της διατομής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως. Η επίδραση του τοπικού λυγισμού μπορεί να λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της ενεργού διατομής, οι οποίες στηρίζονται στα ενεργά πλάτη, ενώ Στον υπολογισμό της αντοχής έναντι τοπικού λυγισμού, το όριο διαρροής f_y πρέπει να λαμβάνεται ως f_{yb} όταν υπολογίζονται τα ενεργά πλάτη των θλιβόμενων στοιχείων. Παραδείγματα μορφών λυγισμού με στρέβλωση δίδονται στην Εικόνα 121, που ακολουθεί.



Εικόνα 121: Παραδείγματα στρεβλωτικού λυγισμού

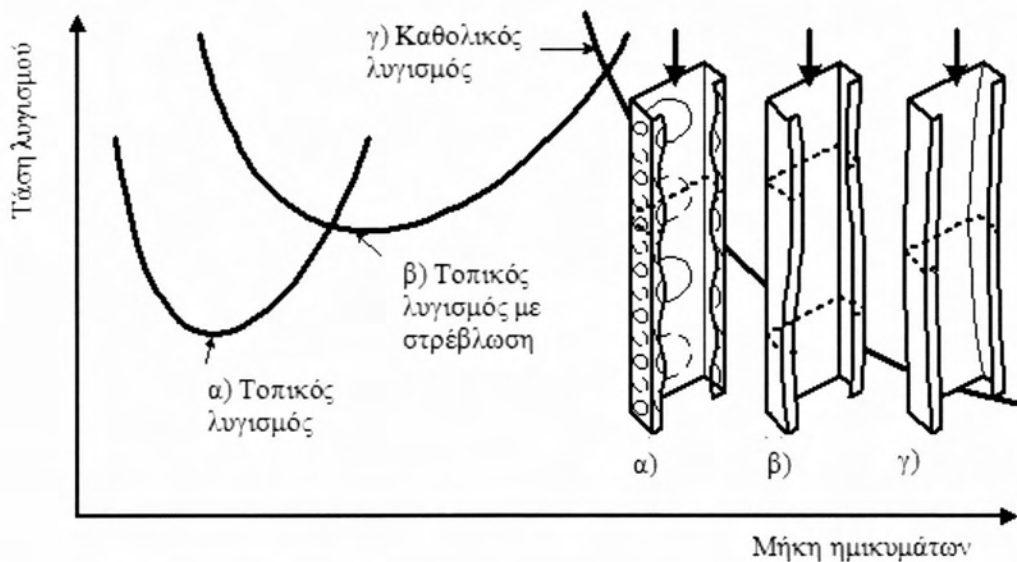
Για τον υπολογισμό μελών σε λυγισμό, συνιστάται η ακόλουθη απλουστευμένη αλλά και αρκούντως θεωρητικά τεκμηριωμένη διαδικασία:

1) Για μήκος κύματος μέχρι το πραγματικό μήκος του στοιχείου, υπολογίζεται η ελαστική τάση λυγισμού και οι αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού, βλέπε Εικόνα 122α.

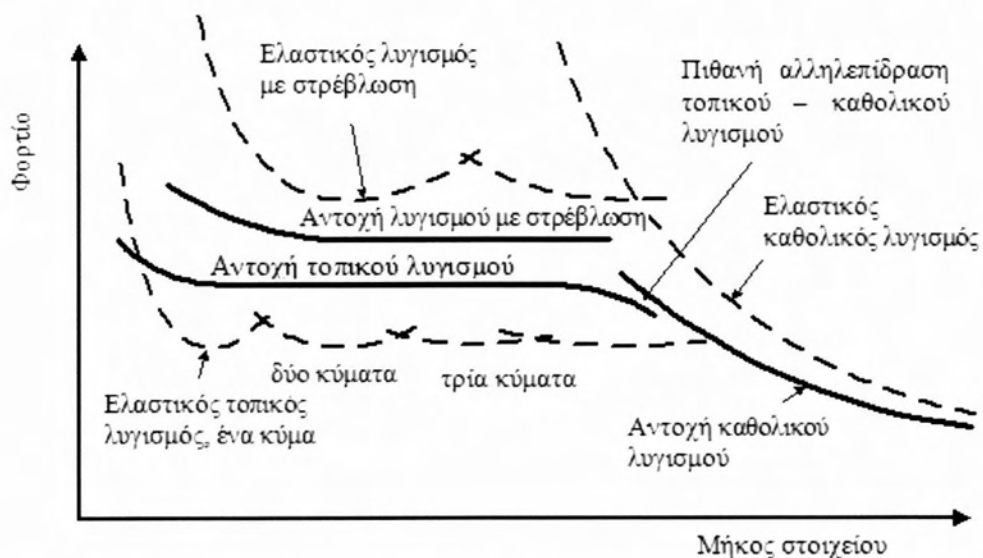
2) Υπολογίζεται το ενεργό πλάτος (ενεργά πλάτη) για τα στοιχεία της διατομής που έχουν λυγίσει τοπικά με βάση την ελάχιστη τάση λυγισμού, βλέπε Εικόνα 122B.

3) Υπολογίζεται το μειωμένο πάχος για ακραίες και ενδιάμεσες ενισχύσεις ή άλλα μέρη διατομών, οι οποίες υφίστανται λυγισμό με στρέβλωση με βάση την ελάχιστη τάση λυγισμού στρεβλώσεως βλέπε Εικόνα 122B.

4) Υπολογίζεται η αντοχή σε καθολικό λυγισμό (καμπτικός, στρεπτικός ή στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ανάλογα με τη μορφή λυγισμού) για το πραγματικό μήκος των στοιχείων με βάση την ενεργό διατομή όπως ορίζεται στα 2) και 3).



Εικόνα 122α: Παραδείγματα της ελαστικής κρίσιμης τάσης για διάφορες ιδιομορφές λυγισμού ως συνάρτηση του μήκους των ημικυμάτων και παραδείγματα μορφών λυγισμού



Εικόνα 122β: Παραδείγματα ελαστικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού και αντοχής λυγισμού ως συνάρτηση του μήκους του στοιχείου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Διαλέξεις του ESDEP και αναλυτικό περιεχόμενο αυτών
(στην αγγλική)

WG 1A	:	<u>STEEL CONSTRUCTION: ECONOMIC & COMMERCIAL FACTORS</u>
WG 1B	:	<u>STEEL CONSTRUCTION: INTRODUCTION TO DESIGN</u>
WG 2	:	<u>APPLIED METALLURGY</u>
WG 3	:	<u>FABRICATION AND ERECTION</u>
WG 4A	:	<u>PROTECTION: CORROSION</u>
WG 4B	:	<u>PROTECTION: FIRE</u>
WG 5	:	<u>COMPUTER AIDED DESIGN AND MANUFACTURE</u>
WG 6	:	<u>APPLIED STABILITY</u>
WG 7	:	<u>ELEMENTS</u>
WG 8	:	<u>PLATES AND SHELLS</u>
WG 9	:	<u>THIN-WALLED CONSTRUCTION</u>
WG 10	:	<u>COMPOSITE CONSTRUCTION</u>
WG 11	:	<u>CONNECTION DESIGN: STATIC LOADING</u>
WG 12	:	<u>FATIGUE</u>
WG 13	:	<u>TUBULAR STRUCTURES</u>
WG 14	:	<u>STRUCTURAL SYSTEMS: BUILDINGS</u>
WG 15A	:	<u>STRUCTURAL SYSTEMS: OFFSHORE</u>
WG 15B	:	<u>STRUCTURAL SYSTEMS: BRIDGES</u>
WG 15C	:	<u>STRUCTURAL SYSTEMS: MISCELLANEOUS</u>
WG 16	:	<u>STRUCTURAL SYSTEMS: REFURBISHMENT</u>
WG 17	:	<u>SEISMIC DESIGN</u>
WG 18	:	<u>STAINLESS STEEL</u>

WG1A : STEEL CONSTRUCTION: ECONOMIC & COMMERCIAL FACTORS

- Lecture 1A.1 : Introduction to Steel's Role in Construction in Europe
 - Lecture 1A.2 : Steelmaking and Steel Products
 - Lecture 1A.3 : Introduction to Structural Steel Costs
 - Lecture 1A.4 : The European Building Market
-

WG1B : STEEL CONSTRUCTION: INTRODUCTION TO DESIGN

- Lecture 1B.1 : Process of Design
 - Lecture 1B.2.1 : Design Philosophies
 - Lecture 1B.2.2 : Limit State Design Philosophy and Partial Safety Factors
 - Lecture 1B.3 : Background to Loadings
 - Lecture 1B.4.1 : Historical Development of Iron and Steel in Structures
 - Lecture 1B.4.2 : Historical Development of Steelwork Design
 - Lecture 1B.4.3 : Historical Development of Iron and Steel in Buildings
 - Lecture 1B.4.4 : Historical Development of Iron and Steel in Bridges
 - Lecture 1B.5.1 : Introduction to the Design of Simple Industrial Buildings
 - Lecture 1B.5.2 : Introduction to the Design of Special Industrial Buildings
 - Lecture 1B.6.1 : Introduction to the Design of Steel and Composite Bridges:
Part 1
 - Lecture 1B.6.2 : Introduction to the Design of Steel and Composite Bridges:
Part 2
 - Lecture 1B.7.1 : Introduction to the Design of Multi-Storey Buildings: Part 1
 - Lecture 1B.7.2 : Introduction to the Design of Multi-Storey Buildings: Part 2
 - Lecture 1B.8 : Learning from Failures
-

WG2 : APPLIED METALLURGY

- Lecture 2.1 : Characteristics of Iron-Carbon Alloys
- Lecture 2.2 : Manufacturing and Forming Processes
- Lecture 2.3.1 : Introduction to the Engineering Properties of Steels

- Lecture 2.3.2 : Advanced Engineering Properties of Steels
Lecture 2.4 : Steel Grades and Qualities
Lecture 2.5 : Selection of Steel Quality
Lecture 2.6 : Weldability of Structural Steels
-

WG3 : FABRICATION AND ERECTION

- Lecture 3.1.1 : General Fabrication of Steel Structures I
Lecture 3.1.2 : General Fabrication of Steel Structures II
Lecture 3.2.1 : Erection I
Lecture 3.2.2 : Erection II
Lecture 3.2.3 : Erection III
Lecture 3.3 : Principles of Welding
Lecture 3.4 : Welding Processes
Lecture 3.5 : Fabrication/Erection of Buildings
Lecture 3.6 : Inspection / Quality Assurance
-

WG4A : PROTECTION: CORROSION

- Lecture 4A.1 : General Corrosion
Lecture 4A.2 : Factors Governing Protection of Steelwork
Lecture 4A.3 : Practical Corrosion Protection for Buildings
Lecture 4A.4 : Corrosion Protection of Bridges
Lecture 4A.5 : Corrosion in Offshore and Sheet Piling
-

WG4B : PROTECTION: FIRE

- Lecture 4B.1 : Introduction to Fire Safety
Lecture 4B.2 : Background to Thermal Analysis
Lecture 4B.3 : Background to Structural (Mechanical Fire) Analysis
Lecture 4B.4 : Practical Ways of Achieving Fire Resistance of Steel Structures
Lecture 4B.5 : Calculation Examples
-

WG5 : COMPUTER AIDED DESIGN AND MANUFACTURE

- Lecture 5.1 : Introduction to Computer Aided Design & Manufacture
 - Lecture 5.2 : The Future Development of Information Systems for Steel Construction
-

WG6 : APPLIED STABILITY

- Lecture 6.1 : Concepts of Stable and Unstable Elastic Equilibrium
 - Lecture 6.2 : General Criteria for Elastic Stability
 - Lecture 6.3 : Elastic Instability Modes
 - Lecture 6.4 : General Methods for Assessing Critical Loads
 - Lecture 6.5 : Iterative Methods for Solving Stability Problems
 - Lecture 6.6.1 : Buckling of Real Structural Elements I
 - Lecture 6.6.2 : Buckling of Real Structural Elements II
-

WG7 : ELEMENTS

- Lecture 7.1 : Methods of Analysis of Steel Structures
- Lecture 7.2 : Cross-Section Classification
- Lecture 7.3 : Local Buckling
- Lecture 7.4.1 : Tension Members I
- Lecture 7.4.2 : Tension Members II
- Lecture 7.5.1 : Columns I
- Lecture 7.5.2 : Columns II
- Lecture 7.6 : Built-up Columns
- Lecture 7.7 : Buckling Lengths
- Lecture 7.8.1 : Restrained Beams I
- Lecture 7.8.2 : Restrained Beams II
- Lecture 7.9.1 : Unrestrained Beams I
- Lecture 7.9.2 : Unrestrained Beams II
- Lecture 7.10.1 : Beam Columns I

- Lecture 7.10.2 : Beam Columns II
Lecture 7.10.3 : Beam Columns III
Lecture 7.11 : Frames
Lecture 7.12 : Trusses and Lattice Girders
-

WG8 : PLATES AND SHELLS

- Lecture 8.1 : Introduction to Plate Behaviour and Design
Lecture 8.2 : Behaviour and Design of Unstiffened Plates
Lecture 8.3 : Behaviour and Design of Stiffened Plates
Lecture 8.4.1 : Plate Girder Behaviour and Design I
Lecture 8.4.2 : Plate Girder Behaviour and Design II
Lecture 8.4.3 : Plate Girder Design - Special Topics
Lecture 8.5.1 : Introduction to Design of Box Girders
Lecture 8.5.2 : Advanced Design of Box Girders
Lecture 8.6 : Introduction to Shell Structures
Lecture 8.7 : Basic Analysis of Shell Structures
Lecture 8.8 : Design of Unstiffened Cylinders
Lecture 8.9 : Design of Stringer-Stiffened Cylindrical Shells
-

WG9 : THIN-WALLED CONSTRUCTION

- Lecture 9.1 : Thin-Walled Members and Sheeting
Lecture 9.2 : Design Procedures for Columns
Lecture 9.3 : Design Procedures for Beams
Lecture 9.4 : Design Procedures for Sheeting
Lecture 9.5 : Stressed Skin Design
Lecture 9.6 : Connections in Thin-Walled Construction
Lecture 9.7 : Application of Thin-Walled Construction
-

WG10 : COMPOSITE CONSTRUCTION

- Lecture 10.1 : Composite Construction - General
 - Lecture 10.2 : The Behaviour of Beams
 - Lecture 10.3 : Single Span Beams
 - Lecture 10.4.1 : Continuous Beams I
 - Lecture 10.4.2 : Continuous Beams II
 - Lecture 10.5.1 : Design for Serviceability I
 - Lecture 10.5.2 : Design for Serviceability - II
 - Lecture 10.6.1 : Shear Connection 1
 - Lecture 10.6.2 : Shear Connection II
 - Lecture 10.6.3 : Shear Connection III
 - Lecture 10.7 : Composite Slabs
 - Lecture 10.8.1 : Composite Columns I
 - Lecture 10.8.2 : Composite Columns II
 - Lecture 10.9 : Composite Buildings
 - Lecture 10.10 : Composite Bridges
-

WG11 : CONNECTION DESIGN: STATIC LOADING

- Lecture 11.1.1 : Connections in Buildings
- Lecture 11.1.2 : Introduction to Connection Design
- Lecture 11.2.1 : Generalities on Welded Connections
- Lecture 11.2.2 : Welded Connections - Basis for Weld Calculation
- Lecture 11.2.3 : Welded Connections - Applications of Fillet Weld Calculation
- Lecture 11.3.1 : Connections with Non-Preloaded Bolts
- Lecture 11.3.2 : Connections with Preloaded Bolts
- Lecture 11.3.3 : Particular Aspects in Bolted Connections
- Lecture 11.4.1 : Analysis of Connections I: Basic Determination of Forces
- Lecture 11.4.2 : Analysis of Connections: Distribution of Forces in Groups of Bolts and Welds

- Lecture 11.4.3 : Analysis of Connections: Transfer of Direct Tension or Compression and Shear
- Lecture 11.4.4 : Analysis of Connections: Resistance to Moment by Combined Tension and Compression
- Lecture 11.5 : Simple Connections for Buildings
- Lecture 11.6 : Moment Connections for Continuous Framing
- Lecture 11.7 : Partial Strength Connections for Semi-Continuous Framing
- Lecture 11.8 : Splices in Buildings
-

WG 12 : FATIGUE

- Lecture 12.1 : Basic Introduction to Fatigue
- Lecture 12.2 : Advanced Introduction to Fatigue
- Lecture 12.3 : Effect of Workmanship on Fatigue Strength of Longitudinal and Transverse Welds
- Lecture 12.4.1 : Fatigue Behaviour of Hollow Section Joints (I)
- Lecture 12.4.2 : Fatigue Behaviour of Hollow Section Joints II
- Lecture 12.5 : Improvement Techniques in Welded Joints
- Lecture 12.6 : Fatigue Behaviour of Bolted Connections
- Lecture 12.7 : Reliability Analysis and Safety Factors Applied to Fatigue Design
- Lecture 12.8 : Basic Fatigue Design Concepts in Eurocode3
- Lecture 12.9 : Eurocode 3 Classification of Constructional Details
- Lecture 12.10 : Basics of Fracture Mechanics
- Lecture 12.11 : Stress Analysis of Cracked Bodies
- Lecture 12.12 : Determination of Stress Intensity Factors
- Lecture 12.13 : Fracture Mechanics Applied to Fatigue
- Lecture 12.14 : Fracture Mechanics: Structural Engineering Applications
- Lecture 12.15 : Fracture Mechanics Applied to Fitness for Purpose
-

WG 13 : TUBULAR STRUCTURES

- Lecture 13.1 : Application of Hollow Sections in Steel Structures
 - Lecture 13.2 : The Behaviour and Design of Welded Connections between Circular Hollow Sections under Predominantly Static Loading
 - Lecture 13.3 : The Behaviour and Design of Welded Connections between Rectangular Hollow Sections Under Predominantly Static Loading
-

WG 14 : STRUCTURAL SYSTEMS: BUILDINGS

- Lecture 14.1.1 : Single- Storey Buildings: Introduction and Primary Structure
 - Lecture 14.1.2 : Single Storey Buildings: Envelope and Secondary Structure
 - Lecture 14.2 : Analysis of Portal Frames: Introduction and Elastic Analysis
 - Lecture 14.3 : Analysis of Portal Frames: Plastic Analysis
 - Lecture 14.4 : Crane Runway Girders
 - Lecture 14.5 : Space Structure Systems
 - Lecture 14.6 : Special Single Storey Structures
 - Lecture 14.7 : Anatomy of Multi-Storey Buildings
 - Lecture 14.8 : Classification of Multi-Storey Frames
 - Lecture 14.9 : Methods of Analysis for Multi-Storey Frames
 - Lecture 14.10 : Simple Braced Non-Sway Multi-Storey Buildings
 - Lecture 14.11 : Influence of Connections on Behaviour of Frames
 - Lecture 14.12 : Simplified Method of Design for Low-Rise Frames
 - Lecture 14.13 : Design of Multi-Storey Frames with Partial Strength and Semi-Rigid Connections
 - Lecture 14.14 : Methods of Analysis of Rigid Jointed Frames
 - Lecture 14.15 : Tall Building Design
-

WG 15A : STRUCTURAL SYSTEMS: OFFSHORE

- Lecture 15A.1 : Offshore Structures: General Introduction
 - Lecture 15A.2 : Loads (I) : Introduction and Environmental Loads
 - Lecture 15A.3 : Loads (II) - Other Loads
 - Lecture 15A.4 : Analysis I
 - Lecture 15A.5 : Analysis II
 - Lecture 15A.6 : Foundations
 - Lecture 15A.7 : Tubular Joints in Offshore Structures
 - Lecture 15A.8 : Fabrication
 - Lecture 15A.9 : Installation
 - Lecture 15A.10 : Superstructures I
 - Lecture 15A.11 : Superstructures II
 - Lecture 15A.12 : Connections in Offshore Deck Structures
-

WG 15B : STRUCTURAL SYSTEMS: BRIDGES

- Lecture 15B.1 : Conceptual Choice
 - Lecture 15B.2 : Actions on Bridges
 - Lecture 15B.3 : Bridge Decks
 - Lecture 15B.4 : Plate Girder and Beam Bridges
 - Lecture 15B.5 : Truss Bridges
 - Lecture 15B.6 : Box Girder Bridges
 - Lecture 15B.7 : Arch Bridges
 - Lecture 15B.8 : Cable Stayed Bridges
 - Lecture 15B.9 : Suspension Bridges
 - Lecture 15B.10 : Bridge Equipment
 - Lecture 15B.11 : Splices and other Connections in Bridges
 - Lecture 15B.12 : Introduction to Bridge Construction
-

WG 15C : STRUCTURAL SYSTEMS: MISCELLANEOUS

- Lecture 15C.1 : Design of Tanks for the Storage of Oil and Water
 - Lecture 15C.2 : Structural Design of Bins
 - Lecture 15C.3 : Lattice Towers and Masts
 - Lecture 15C.4 : Guyed Masts
 - Lecture 15C.5 : Chimneys
-

WG 16 : STRUCTURAL SYSTEMS: REFURBISHMENT

- Lecture 16.1 : Strengthening of Structures
 - Lecture 16.2 : Transformation and Repair
 - Lecture 16.3 : Re-use of Buildings
 - Lecture 16.4 : Traditional Residual Life Assessment for Bridges
 - Lecture 16.5 : Refurbishment of Bridges: New Approaches
-

WG 17 : SEISMIC DESIGN

- Lecture 17.1 : An Overall View of the Seismic Behaviour of Structural Systems
 - Lecture 17.2 : Introduction to Seismic Design - Seismic Hazard and Seismic Risk
 - Lecture 17.3 : The Cyclic Behaviour of Steel Elements and Connections
 - Lecture 17.4 : Structural Analysis for Seismic Actions
 - Lecture 17.5 : Requirements and Verification of Seismic Resistant Structures
 - Lecture 17.6 : Special Topics
-

WG 18 : STAINLESS STEEL

- Lecture 18.1 : Introduction to Stainless Steel
 - Lecture 18.2 : Structural Behaviour and Design
 - Lecture 18.3 : Corrosion of Stainless Steel
 - Lecture 18.4 : Fabrication
-



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000108320