

## Σύντομη εισαγωγή στις αρχές σχεδιασμού και βέλτιστες πρακτικές μεταλλικών κτιρίων τύπου Portal Frame

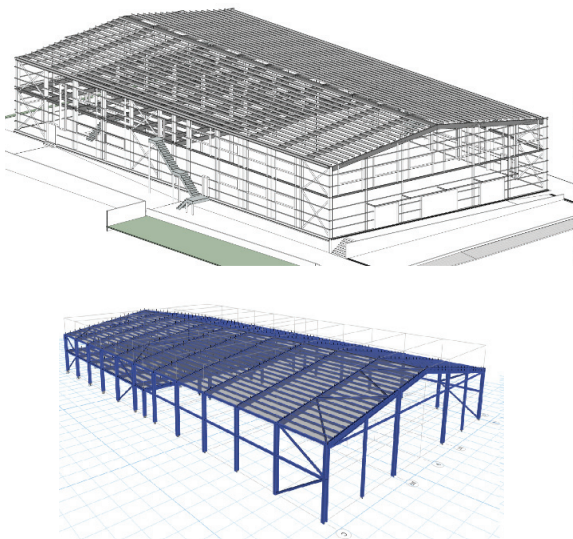


Eur. Ing. Πλάτωνας Στυλιανού B.Eng. (Hons), MSc, MCS, CEng, FICE, FCI Arb, FCA  
- Chartered Civil / Structural Engineer, A' Αντιπρόεδρος ΕΤΕΚ,  
Πρόεδρος του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Πολιτικών Μηχανικών (ECCE)

### 1. Εισαγωγή

Τα μεταλλικά κτίρια τύπου portal frame, αποτελούν μία από τις πλέον διαδεδομένες μορφές μεταλλικών φορέων για κτίρια με απαιτήσεις μεγάλων ανοιγμάτων. Πρόκειται για μεταλλικά πλαίσια παραλαβής ροπής, με άκαμπτες συνδέσεις υποστυλώματος-δοκού, καθώς και στην κορυφή (ridge) του πλαισίου. Η μορφή αυτή επιτρέπει την κατασκευή μεγάλων ανοιγμάτων της τάξης των 20-40m χωρίς ενδιάμεσες κολώνες, ενώ με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να επιτευχθούν και ακόμη μεγαλύτερα ανοίγματα.

Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους, τα portal frames εφαρμόζονται ευρέως σε βιομηχανικά κτίρια, βιοτεχνικά, αποθήκες και κέντρα logistics, συνεργεία, εργαστήρια και παραγωγικές μονάδες, καθώς και σε κτίρια με γερανογέφυρες. Η απλότητα του σχεδιασμού, της μορφολογίας, η δυνατότητα προκατασκευής των μελών, η οικονομία κατασκευής και η ευελιξία στη μελλοντική επέκταση, καθιστούν τα portal frames ιδιαίτερα αποδοτική και ευέλικτη λύση για σύγχρονες κατασκευές.



Εικόνα 1: Portal frame model design (Πάνω-Revit model, Κάτω-ETABS model)

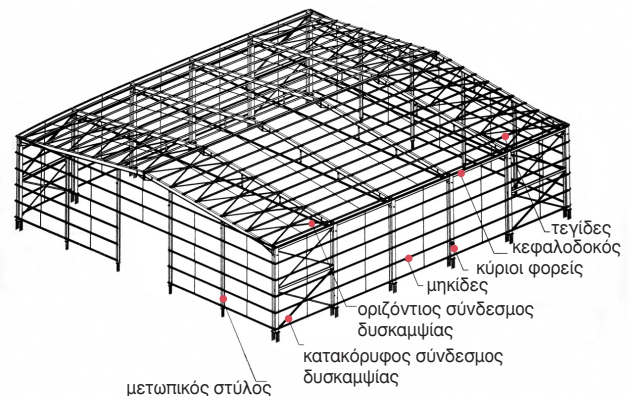
### 2. Βασικές αρχές σχεδιασμού portal frame

#### 2.1 Τυπική γεωμετρία και μορφολογία

Η τυπική γεωμετρία ενός portal frame περιλαμβάνει συνήθως επαναλαμβανόμενα επίπεδα πλαίσια ανά 5-8m κατά μήκος

του κτιρίου. Η στέγη μπορεί να είναι μονόριχτη ή δίριχτη, με συνήθη κλίση της τάξης του 5-10°, η οποία εξασφαλίζει επαρκή απορροή όμβριων υδάτων και οικονομία υλικού.

Η μορφολογία του φορέα επηρεάζει άμεσα την οριζόντια δυσκαμψία και τις πλευρικές μετακινήσεις του κτιρίου. Οι άκαμπτοι κόμβοι οδηγούν στην ανάπτυξη σημαντικών καμπτικών ροπών, ιδίως στη βάση των υποστυλωμάτων και στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος, γεγονός που καθιστά συχνά απαραίτητη τη χρήση ενισχύσεων τύπου haunches στους κόμβους.



Εικόνα 2: Δομικά στοιχεία τυπικού μονώροφου μεταλλικού κτιρίου Portal Frame

#### 2.2 Οριζόντια δυσκαμψία και στατική λειτουργία

Ο φέρων οργανισμός των μεταλλικών κτιρίων τύπου portal frame, λειτουργεί ως καμπτικό πλαίσιο παραλαβής ροπής, στο οποίο οι καμπτικές ροπές και οι τέμνουσες δυνάμεις αναπτύσσονται κυρίως στα υποστυλώματα και στις δοκούς οροφής, ενώ οι αξονικές δυνάμεις είναι κατά κανόνα δευτερεύουσες. Η στατική λειτουργία του φορέα και η πλευρική του δυσκαμψία, προκύπτουν από τη γεωμετρική διαμόρφωση των πλαισίων, τη δυσκαμψία των κύριων φερόντων στοιχείων και τη συμμετοχή των δευτερευόντων στοιχείων στη συνολική συμπεριφορά.

Ο φέρων οργανισμός ενός τυπικού μεταλλικού κτιρίου αποτελείται από κύρια και δευτερεύοντα μέλη, τα οποία συνεργάζονται για την παραλαβή και τη μεταφορά των κατακόρυφων και οριζόντιων δράσεων προς τη θεμελίωση. Οι κύριοι φορείς είναι τα μεταλλικά πλαίσια τύπου portal frame, διατεταγμέ-

να συνήθως σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος του κτιρίου, τα οποία παραλαμβάνουν τα κατακόρυφα φορτία (ίδιο βάρος, χιόνι, κινητά φορτία χρήσης, φορτία εξοπλισμού), καθώς και τις οριζόντιες δράσεις από άνεμο ή σεισμό.

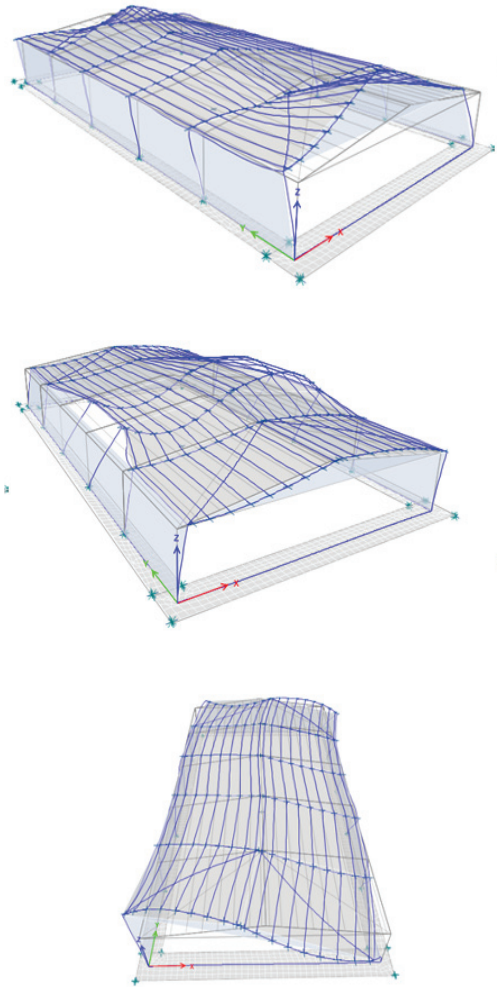
Η διαμόρφωση των κύριων μελών με μεταβλητή διατομή, επιτρέπει την ορθολογική αξιοποίηση του χάλυβα, χωρίς υποβάθμιση της φέρουσας ικανότητας, υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του EN 1993-1-1 ως προς την αντοχή, την κατηγορία διατομών και τους ελέγχους τοπικού και καθολικού λυγισμού. Τη συνολική δυσκαμψία του φορέα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό οι άκαμπτοι κόμβοι σύνδεσης υποστυλώματος με τη δοκό στέγης, μέσω των οποίων εξασφαλίζεται η μεταφορά καμπτικών ροπών και η καμπτική λειτουργία του πλαισίου. Οι κόμβοι αυτοί πρέπει να σχεδιάζονται με επαρκή αντοχή, δυσκαμψία και πλαστιμότητα, ώστε να αποφεύγονται ψαθυροί μηχανισμοί αστοχίας.

Τα φορτία της στέγης μεταφέρονται στους κύριους φορείς μέσω των τεγίδων, οι οποίες γεφυρώνουν τα ανοίγματα μεταξύ των πλαισίων και καταπονούνται κυρίως σε κάμψη. Οι τεγίδες μπορούν να διαμορφώνονται ως αμφίερειστα στοιχεία ή ως συνεχείς δοκοί. Αντίστοιχα, οι όψεις του κτιρίου διαμορφώνονται με μηκίδες, οι οποίες στηρίζουν τα στοιχεία πλευρικής επένδυσης και μεταφέρουν τις ανεμοπιέσεις και αναρροφήσεις στα κύρια φέροντα στοιχεία.

Οι οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας τοποθετούνται συνήθως στο επίπεδο της στέγης και μεταφέρουν τις οριζόντιες δράσεις προς τα κατακόρυφα συστήματα αντιστήριξης, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν τα φορτία στη θεμελίωση. Κατά μήκος του κτιρίου, οι κεφαλοδοκοί συνδέουν τα υποστυλώματα και συμβάλλουν στη συνεργασία τους υπό οριζόντια φόρτιση, βελτιώνοντας τη συνολική δυσκαμψία και κατανομή των εντάσεων. Στα μετωπικά φατνώματα τοποθετούνται μετωπικά υποστυλώματα, τα οποία παραλαμβάνουν κυρίως ανεμογενείς δράσεις.

Ο σχεδιασμός των κύριων μελών πραγματοποιείται με έλεγχο των οριακών καταστάσεων αστοχίας (ULS), που περιλαμβάνουν την αντοχή των διατομών, την αλληλεπίδραση ροπής - αξονικής δύναμης (M-N interaction), τον λυγισμό των υποστυλωμάτων και τον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό (LTB) των δοκών στέγης. Παράλληλα, ελέγχονται οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (SLS), με έμφαση στον περιορισμό των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (sway), σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών.

Τέλος, η πλευρική δυσκαμψία του συστήματος δεν προκύπτει αποκλειστικά από τα κύρια πλαίσια, αλλά ενισχύεται από τα δευτερεύοντα στοιχεία και την επένδυση. Η συνεργασία των τεγίδων, των μηκίδων και των στοιχείων επικάλυψης με τον φέροντα οργανισμό, μέσω της δράσης του stressed skin, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στον περιορισμό των οριζόντιων μετακινήσεων, υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνεται ρητά υπόψη στον σχεδιασμό και στη λεπτομέρεια των συνδέσεων.



**Εικόνα 3:** Ενδεικτικές μεταφορικές και στρεπτικές ιδιομορφές portal frame

### 2.3 Τυπικές συνδέσεις σε μεταλλικά κτήρια portal frame

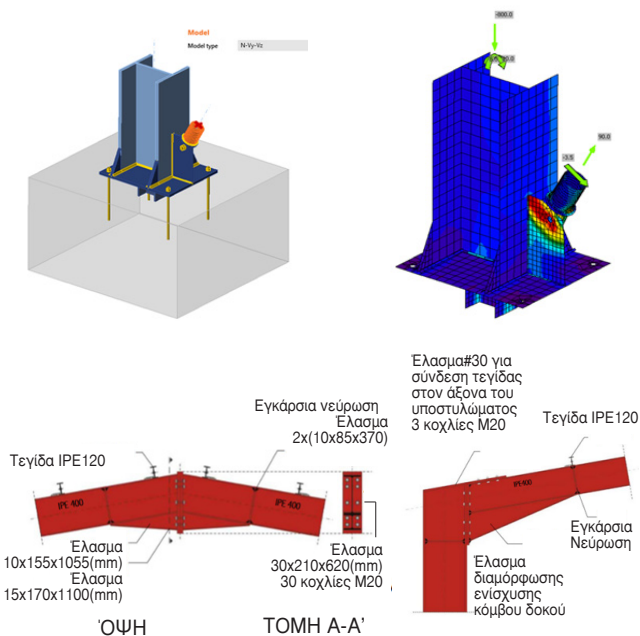
Οι συνδέσεις αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της στατικής λειτουργίας των φορέων τύπου portal frame, καθώς καθορίζουν τον τρόπο μεταφοράς των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ των μελών.

Οι αρθρωτές συνδέσεις (pin connections) χρησιμοποιούνται κυρίως σε δευτερεύοντα στοιχεία, αλλά και σε βάσεις υποστυλωμάτων σαν μελετηθούν έτσι. Μεταφέρουν κυρίως τέμνουσες δυνάμεις, επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφή και συμβάλλουν στη μείωση των καμπτικών ροπών στα συνδεδεμένα μέλη.

Οι συνδέσεις ροπής (moment connections) αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των portal frames και χρησιμοποιούνται κυρίως στους κόμβους δοκού-υποστυλώματος και στην κορυφή του πλαισίου. Οι συνδέσεις αυτές μεταφέρουν σημαντικές καμπτικές ροπές και απαιτούν τη χρήση end plates και ισχυρών συγκολλήσεων και κοχλιωτών συνδέσεων, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία της σύνδεσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδίως σε κτίρια με μικρότερα ανοίγματα ή όπου η πλευρική δυσκαμψία εξασφαλίζεται από ανεξάρτητα συστήματα, εφαρμόζονται συστήματα σύνδεσης ημιάκαμπτης συμπεριφοράς (semi-rigid connections). Οι συνδέσεις αυτές διαθέτουν πεπερασμένη δυσκαμψία και αντοχή σε ροπή, η οποία λαμβάνεται ρητά υπόψη στη στατική ανάλυση, επηρεάζοντας, τόσο την κατανομή των ροπών, όσο και τις οριζόντιες μετακινήσεις του φορέα.

Σε συστήματα πλευρικής δυσκαμψίας με διαγώνιους συνδέσμους (bracings), χρησιμοποιούνται συνδέσεις με πλάκες σύνδεσης (gusset plates), οι οποίες επιτρέπουν την αξιόπιστη ένωση των διαγωνίων με τα κύρια μέλη. Οι συνδέσεις αυτές πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να παραλαμβάνουν αξονικές δυνάμεις εφελκυσμού και θλίψης και, σε σεισμικές περιοχές, να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις υπεραντοχής και πλαστιμότητας των κανονισμών.



Εικόνα 4: Λεπτομέρειες σύνδεσης μεταλλικών μελών

### 3. Συμπεριφορά μεταλλικών portal frames έναντι δράσεων ανέμου

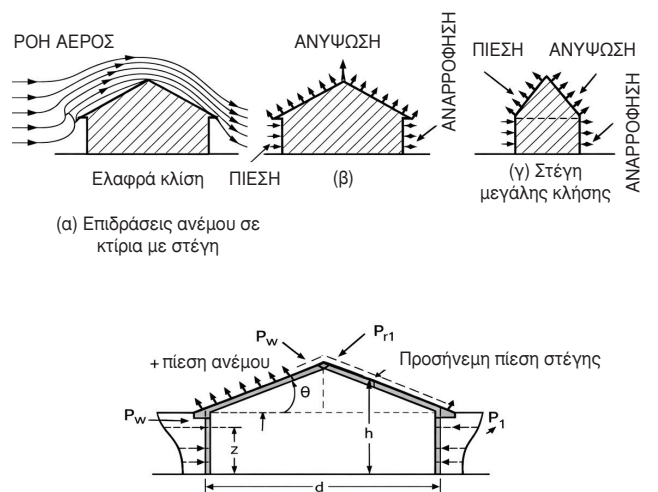
Ο άνεμος αποτελεί συχνά τη δυσμενέστερη δράση για τα μεταλλικά κτίρια τύπου portal frame και σε πολλές περιπτώσεις, κυριαρχεί στη διαστασιολόγηση των μελών. Λόγω του μικρού ίδιου βάρους των μεταλλικών κατασκευών, οι ανεμογενείς δράσεις συχνά οδηγούν σε αυξημένες οριζόντιες μετακινήσεις, γεγονός που επηρεάζει, τόσο τη συνολική ευστάθεια, όσο και τη λειτουργικότητα του κτιρίου.

Οι αυξημένες πλευρικές μετατοπίσεις υπό ανεμοφόρτιση συνεπάγονται την ανάπτυξη σημαντικών ροπών ανατροπής στη βάση των υποστυλωμάτων, αυξημένες απαιτήσεις σε συστήματα αντιστήριξης και αυξημένες απαιτήσεις στις αγκυρώσεις της θεμελίωσης. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος των οριζόντιων μετακινήσεων (sway ή lateral drift) αποτελεί βα-

σικό κριτήριο σχεδιασμού, όχι μόνο για λόγους αντοχής και ευστάθειας, αλλά και για την προστασία των μη φερόντων στοιχείων και των επενδύσεων.

Πέραν των θετικών πιέσεων, ο άνεμος προκαλεί και αρνητικές πιέσεις (φαινόμενα αναρρόφησης), κυρίως στη στέγη και στα κατακόρυφα τοιχεία. Τα φαινόμενα αναρρόφησης μπορεί να οδηγήσουν σε ανύψωση της στέγης, αποκόλληση στοιχείων επένδυσης (cladding system) και αυξημένες καμπτικές καταπονήσεις στα δευτερεύοντα στοιχεία, όπως οι τεγίδες και οι μηκίδες. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε ελαφριές στέγες με μεταλλικά πάνελ ή λαμαρίνες, όπου ο σχεδιασμός των συνδέσεων και των αγκυρώσεων καθίσταται καθοριστικός για την ασφάλεια του συστήματος.

Οι μεταβαλλόμενες ανεμοπιέσεις μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε τοπικό λυγισμό λεπτότοιχων στοιχείων, όπως τεγίδες, μηκίδες και στοιχεία επικάλυψης, ιδιαίτερα όταν δεν εξασφαλίζεται επαρκής πλευρική στήριξη των στοιχείων. Η σωστή διάταξη και στήριξη των δευτερευόντων στοιχείων είναι επομένως κρίσιμη για τη διατήρηση της ευστάθειάς τους υπό ανεμοφόρτιση.



Εικόνα 5: Ενδεικτική κατανομή πιέσεων / Επίδραση ανέμου σε κτίρια τύπου portal frame

Οι μεταλλικές κατασκευές χαρακτηρίζονται επίσης από σχετικά χαμηλή δομική απόσβεση, γεγονός που τις καθιστά πιο ευαίσθητες σε δυναμικές επιδράσεις ανέμου. Υπό ορισμένες συνθήκες, ιδιαίτερα σε κατασκευές μεγάλων ανοιγμάτων, με λεπτά φέροντα στοιχεία ή εκτεταμένες στέγες, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν φαινόμενα δυναμικής ταλάντωσης. Οι επιδράσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα κόπωσης, δυσλειτουργίας ή ενόχλησης των χρηστών.

Οι πλευρικές μετακινήσεις του φορέα λόγω ανεμοφόρτισης οδηγούν σε αυξημένες εντατικές καταστάσεις στις συνδέσεις, οι οποίες συχνά καθορίζουν τη διαστασιολόγηση και τη λεπτομέρειά τους, ιδίως στους κόμβους της στέγης και στις βάσεις των υποστυλωμάτων.



**Εικόνα 6:** Τοπικός λυγισμός μεταλλικών στοιχείων λόγω ανεμοπίεσης

#### 4. Συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών portal frame έναντι σεισμού

Οι μεταλλικές κατασκευές παρουσιάζουν γενικά ευνοϊκή συμπεριφορά έναντι σεισμικών δράσεων, κυρίως λόγω της υψηλής πλαστιμότητας του χάλυβα και του μικρού ίδιου βάρους των μεταλλικών κατασκευών. Η δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων πριν την τελική αστοχία, επιτρέπει την απορρόφηση και διάχυση της σεισμικής ενέργειας μέσω ελεγχόμενων μηχανισμών, περιορίζοντας τον κίνδυνο ψαθυρών καταρρεύσεων. Παράλληλα, το μικρό ίδιο βάρος συνεπάγεται μειωμένες αδρανειακές δυνάμεις κατά τη σεισμική διέγερση και, κατ' επέκταση, χαμηλότερες σεισμικές απαιτήσεις σε σύγκριση με βαρύτερα δομικά συστήματα.

Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στον Ευρωκώδικα 8 μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  (behaviour factor), ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του φορέα να απορροφά και να διαχέει σεισμική ενέργεια μέσω ανελαστικών παραμορφώσεων του φορέα. Η τιμή του εξαρτάται από τον τύπο του στατικού συστήματος και την κατηγορία πλαστιμότητας του φορέα. Για μεταλλικά συστήματα κανονικά σε όψη, οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του  $q$  καθορίζονται στον Πίνακα 6.2 του EN 1998-1, ενώ ο λόγος  $a_u/a_1$ , ο οποίος επηρεάζει τις τιμές αυτές, ορίζεται στην §6.3.2 του ίδιου κανονισμού. Ειδικότερα, για πλαίσια ροπής, λαμβάνεται  $q = 4$  για κατηγορία πλαστιμότητας **KPM** και  $q = 5 \cdot (a_u/a_1)$  για κατηγορία **KPY**. Για συστήματα με κεντρικούς συνδέσμους τύπου **X** λαμβάνεται  $q = 4$  και για τις δύο κατηγορίες πλαστιμότητας, ενώ για διατάξεις τύπου **V** ή **A** οι αντίστοιχες τιμές είναι  $q = 2$  για **KPM** και  $q = 2,5$  για **KPY**. Αντίστοιχα, για συστήματα με έκκεντρους συνδέσμους ισχύει  $q = 4$  για **KPM** και  $q = 5 \cdot (a_u/a_1)$  για **KPY**, ενώ για το αντεστραμμένο εκκρεμές οι τιμές διαμορφώνονται σε  $q = 2$  για **KPM** και  $q = 2 \cdot (a_u/a_1)$  για **KPY**. (Οι βασικές τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, ενώ οι τύποι των δομικών συστημάτων και οι ενδεικτικές τιμές του λόγου  $a_u/a_1$  δίνονται στην Εικόνα 7.)

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η σεισμική απόκριση των μεταλλικών φορέων επηρεάζεται και από κρίσιμα φαινόμενα ευστάθειας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η συμπεριφορά λεπτότοιχων στοιχείων, στα οποία ενδέχεται να εκδηλωθεί τοπικός λυγισμός πέλματος ή κορμού. Επιπλέον, σε δοκούς με ανεπαρκή πλευρική στήριξη μπορεί να αναπτυχθεί στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ιδίως υπό συνθήκες αυξημένων οριζόντιων μετακινήσεων. Τα φαινόμενα αυτά είναι δυνατόν να περιορίσουν την διαθέσιμη πλαστιμότητα των μελών, εφό-

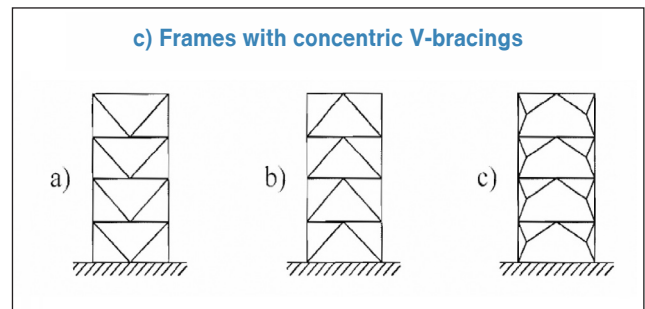
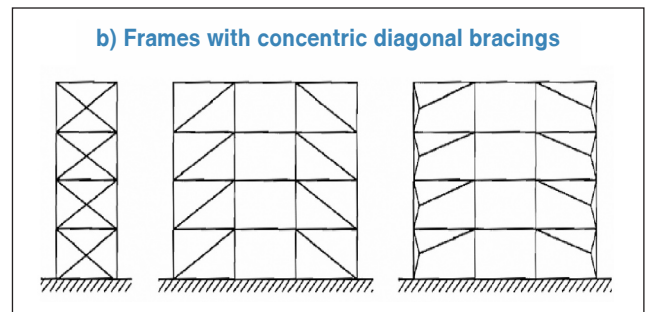
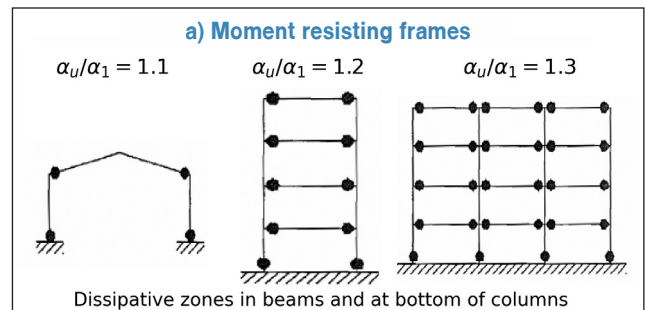
σον δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις πλευρικής στήριξης και κατάταξης των διατομών

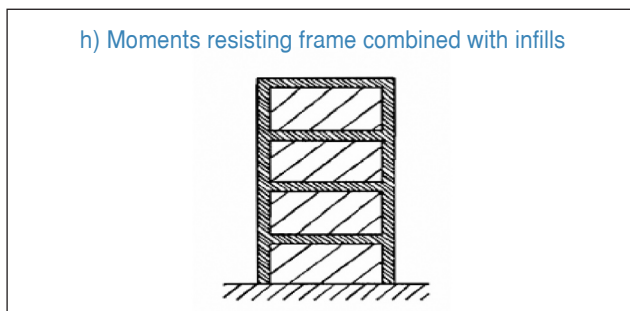
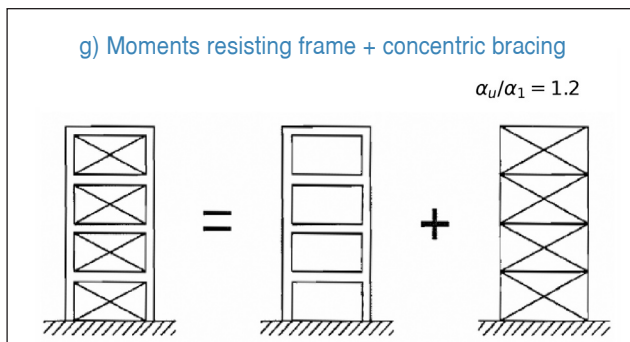
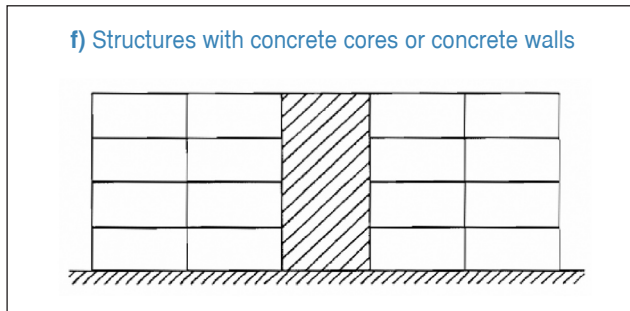
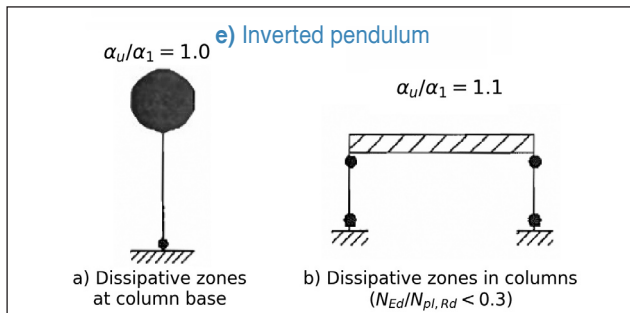
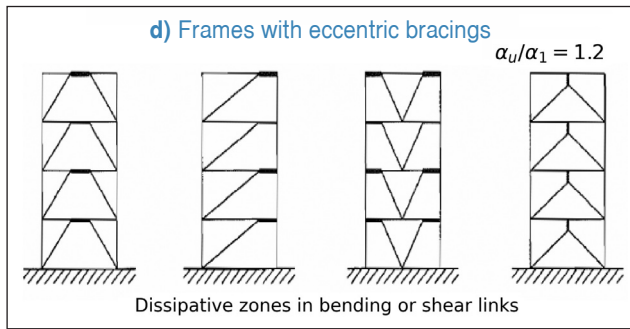
Κατά συνέπεια, ο αντισεισμικός σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών βασίζεται στις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού, σύμφωνα με τις οποίες οι ανελαστικές παραμορφώσεις πρέπει να συγκεντρώνονται σε προκαθορισμένες πλαστιμες ζώνες, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία του φορέα οφείλουν να διατηρούνται ουσιαστικά ελαστικά. Παράλληλα, απαιτείται ο έλεγχος των οριζόντιων μετακινήσεων, των φαινομένων δεύτερης τάξης (**P-A**), καθώς και η σαφής διαμόρφωση του συστήματος παραλαβής πλευρικών φορτίων.

Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές $q$		
Στατικό σύστημα	Κατηγορία Πλαστιμότητας	
	KPM	KPY
Πλάισια ροπής	4	$5 \cdot (a_u/a_1)$
Κεντρικοί σύνδεσμοι <b>X</b>	4	4
Κεντρικοί σύνδεσμοι <b>V</b> ή <b>A</b>	2	2,5
Έκκεντροι σύνδεσμοι	4	$5 \cdot (a_u/a_1)$
Αντεστραμμένο εκκρεμές	2	$2 \cdot (a_u/a_1)$

**Πίνακας 1:** Τιμές αναφοράς του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  για συστήματα κανονικά σε όψη (EN 1998-1, Πίνακας 6.2)

#### EC Part 1, 6.3.1 Structural Types and Default $a_u/a_1$ Values





Εικόνα 7: Τύποι δομικών συστημάτων και αντίστοιχες τιμές του λόγου  $\alpha_u/\alpha_1$  σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (EN 1998-1, §6.3.1)

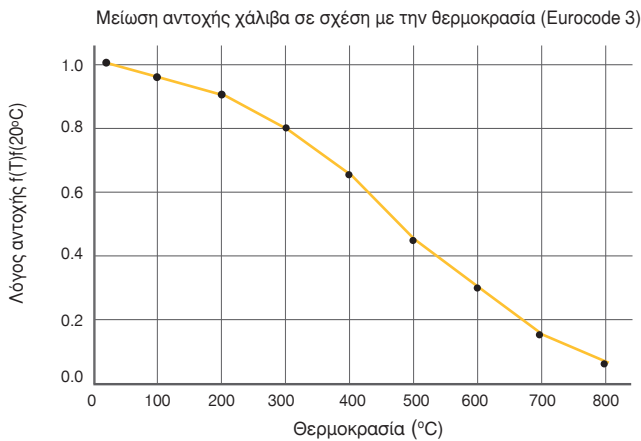
## 5. Συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών υπό δράση πυρκαγιάς

Η αύξηση της θερμοκρασίας των μεταλλικών στοιχείων κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς προκαλεί ταχεία και έντονα μη γραμμική υποβάθμιση της συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού. Η θερμική δράση επηρεάζει αρνητικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα, οδηγώντας σε σημαντική απομείωση της αντοχής, της δυσκαμψίας και του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και στην ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων και σταδιακή απώλεια φέρουσας ικανότητας. Σε προχωρημένα στάδια, τα φαινόμενα αυτά μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση λυγισμού, στη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων και τοπικών αστοχιών, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατή η μερική ή και ολική κατάρρευση του φορέα, ιδίως σε λεπτότοιχα ή μη προστατευμένα μεταλλικά στοιχεία.

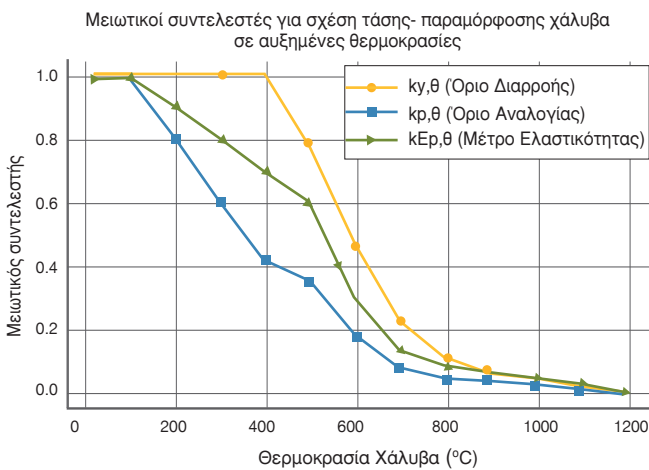
Η θερμική διαστολή των δομικών μελών, σε συνδυασμό με την απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα, οδηγεί στην ανάπτυξη σημαντικών εσωτερικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Οι δοκοί, οι τεγίδες και τα υποστυλώματα τείνουν να διαστέλλονται, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θλιπτικών εντάσεων και μετακινήσεων, ενώ η ταυτόχρονη μείωση της δυσκαμψίας καθιστά τα μέλη ιδιαίτερα ευάλωτα σε λυγισμό, ακόμη και υπό σχετικά μικρές θερμικές παραμορφώσεις.

Οι συνδέσεις αποτελούν ένα από τα πιο ευάλωτα σημεία των μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς. Η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει χαλάρωση των κοχλιών ή παραμόρφωση των end plates των συνδέσεων. Ως αποτέλεσμα, ο φορέας χάνει σταδιακά τη δυσκαμψία του και ενεργοποιούνται ανεπιθύμητοι μηχανισμοί αστοχίας. Εάν η άνοδος της θερμοκρασίας συνεχιστεί χωρίς περιορισμό, οι βλάβες στις συνδέσεις μπορεί να καταστούν μη αναστρέψιμες και να οδηγήσουν σε προοδευτική κατάρρευση. Καθώς ορισμένα μέλη αποδυναμώνονται λόγω της πυρκαγιάς, τα φορτία ανακατανέμονται σε γειτονικά στοιχεία, τα οποία ενδέχεται να μην έχουν σχεδιαστεί για τις αυξημένες αυτές εντάσεις. Η ανακατανομή αυτή μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλων ανελαστικών παραμορφώσεων και, τελικά, σε μερική ή ολική κατάρρευση του φορέα. Στις μεταλλικές κατασκευές, η κατάρρευση συχνά έχει προοδευτικό χαρακτήρα, ξεκινώντας τοπικά, για παράδειγμα από αστοχία δοκού, τεγίδας ή κεφαλής υποστυλώματος και εξελισσόμενη σε καθολική απώλεια ευστάθειας.

Η έκθεση του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες συνοδεύεται από χαρακτηριστική μείωση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Έως περίπου τους 200°C οι μεταβολές είναι περιορισμένες, ενώ στους 300-400°C η αντοχή αρχίζει να μειώνεται αισθητά. Σε θερμοκρασίες της τάξης των 500-600°C η φέρουσα ικανότητα μπορεί να περιοριστεί περίπου στο 50% της αρχικής, ενώ σε επίπεδα άνω των 700-800°C ο χάλυβας έχει χάσει το μεγαλύτερο μέρος της φέρουσας ικανότητάς του και σε θερμοκρασίες άνω των 900 °C θεωρείται πρακτικά μη φέρον υλικό. Τα θερμοκρασιακά αυτά επίπεδα εξηγούν τις έντονες παραμορφώσεις και τις εκτεταμένες αστοχίες που παρατηρούνται σε πυρκαγιές χωρίς επαρκή πυροπροστασία.



**Εικόνα 8:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής του χάλυβα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (EN 1993)



**Εικόνα 9:** Διάγραμμα μειωτικών συντελεστών των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (EN 1993-1-2 - Πίνακας 3.2)

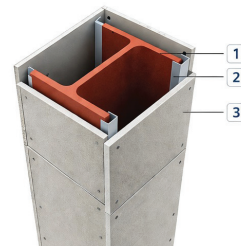
Για τους λόγους αυτούς, η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων πυροπροστασίας είναι κρίσιμη τόσο για την ασφάλεια των χρηστών όσο και για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας των μεταλλικών κατασκευών. Ο σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς περιλαμβάνει τον καθορισμό της απαιτούμενης χρονικής διάρκειας πυραντίστασης, ανάλογα με τη χρήση και τη σπουδαιότητα του κτηρίου και πραγματοποιείται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-2 (EN 1993-1-2), όπου καθορίζονται οι μειωτικοί συντελεστές των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η παθητική πυροπροστασία, η οποία εφαρμόζεται πριν την εκδήλωση πυρκαγιάς, στοχεύει στην καθυστέρηση της ανόδου της θερμοκρασίας των δομικών μελών και περιλαμβάνει μέτρα όπως πυροπροστατευτικές επενδύσεις δοκών και υποστυλωμάτων, βαφές, θερμομονωτικά υλικά πυροπροστασίας και τη διαμόρφωση πυροδιαμερισμάτων. Παράλληλα, τα ενεργητικά μέτρα πυροπροστασίας ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς και περιλαμβάνουν συστήματα ανίχνευσης και ειδοποίησης, καταιονητήρες, πυροσβεστήρες, πυροσβεστικά δίκτυα και οργανωμένα σχέδια διαφυγής και εκκένωσης του κτηρίου. Ο συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών μέτρων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή και ελεγχόμενη συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες πυρκαγιάς.



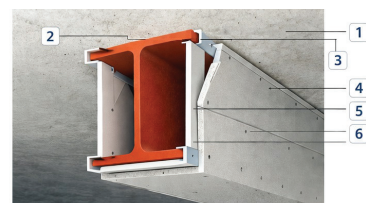
**Εικόνα 10:** Λυγισμός σε επίπεδο διατομής κύριας δοκού (αριστερά) και Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός τεγίδων (δεξιά)



**Εικόνα 11:** Πλήρης τήξη και καταστροφή δομικών μελών και μεταλλικών φύλλων επικάλυψης της οροφής



1. Υποστυλόμετρο τύπου HEA
2. Χαλύβδινος γαλβανιζέ οδηγός
3. Πυροπροστατευτική πλάκα



1. Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος,
2. Μεταλλική δοκός,
3. Γωνιακός χαλύβδινος γαλβανιζέ οδηγός,
4. Τεμάχιο στερέωσης πυροπροστατευτικής πλάκας,
5. Πυροπροστατευτική πλάκα,
6. Χαλύβδινος γαλβανιζέ οδηγός, μορφή Π

**Εικόνα 12:** Τρόποι πυροπροστασίας

## 6. Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των Portal Frames - Επίλογος

Η ευρεία εφαρμογή των μεταλλικών κτηρίων τύπου portal frame στη βιομηχανική δόμηση οφείλεται κυρίως στην ισορροπία που επιτυγχάνουν μεταξύ στατικής επάρκειας, κατασκευαστικής απλότητας και οικονομίας. Η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων ανοιγμάτων, χωρίς ενδιάμεσα υποστυλώματα, προσφέρει σημαντική λειτουργική ευελιξία. Η καμπτική λειτουργία των πλαισίων, σε συνδυασμό με τη χρήση μεταβλητών διατομών, επιτρέπει την αποδοτική κατανομή του υλικού και οδηγεί σε σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας χάλυβα σε σύγκριση με πιο συμβατικά δομικά συστήματα.

Η κατασκευαστική φιλοσοφία των portal frames, βασισμένη σε προκατασκευασμένα στοιχεία και κοχλιωτές συνδέσεις, ευνοεί τη γρήγορη ανέγερση, την τυποποίηση και τη μείωση του χρόνου κατασκευής, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη μελλοντική επέκταση του κτηρίου με την προσθήκη νέων φανωμάτων. Επιπλέον, οι μεταλλικές κατασκευές χαρακτηρίζονται από υψηλή ανθεκτικότητα στον χρόνο, καθώς η ελεγχόμενη ποιότητα κατασκευής, η δυνατότητα επιθεώρησης και συντήρησης και η προβλέψιμη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα συμβάλλουν στη μακροχρόνια αξιοπιστία του φορέα.

Παράλληλα, η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και η υψηλή ανακυκλωσιμότητα του χάλυβα ενισχύουν τη βιωσιμότητα της λύσης, ενώ η βιομηχανική παραγωγή των μεταλλικών στοιχείων συνδέεται με χαμηλότερους ρύπους και μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με άλλες κατασκευαστικές λύσεις, ιδιαίτερα όταν λαμβάνεται υπόψη ο κύκλος ζωής της κατασκευής.

Τα πλεονεκτήματα αυτά, είναι μεν σημαντικά, συνοδεύονται όμως από συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις και περιορισμούς, οι οποίοι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά και το κόστος. Η σχετικά περιορισμένη πλευρική δυσκαμψία των portal frames, ιδιαίτερα κατά τη διαμήκη διεύθυνση του κτηρίου, καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση συστημάτων οριζόντιας δυσκαμψίας τύπου bracings για την παραλαβή σεισμικών δράσεων, επηρεάζοντας τόσο τη στατική διάταξη όσο και την αρχιτεκτονική ευελιξία.

Η δράση ανέμου, και ιδιαίτερα τα φαινόμενα αναρρόφησης στη στέγη, μπορούν να καταστούν καθοριστικά για τη διαστασιολόγηση των συνδέσεων και των θεμελιώσεων, οδηγώντας σε αυξημένες απαιτήσεις αγκύρωσης στη βάση. Επιπλέον, η συμπεριφορά των portal frames σε συνθήκες πυρκαγιάς είναι δυσμενής όταν δεν λαμβάνονται επαρκή μέτρα πυροπροστασίας, καθώς η ταχεία απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια φέρουσας ικανότητας και προοδευτική κατάρρευση. Τέλος, τα ζυγώματα της στέγης παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, εάν δεν εξασφαλιστεί επαρκής πλευρική στήριξη μέσω τεγίδων και συνδέσεων.

Συνεπώς, τα μεταλλικά portal frames αποτελούν ένα εξαιρετικό σύστημα που αποδίδει βέλτιστα όταν ο σχεδιασμός του λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες της μορφολογίας, των δράσεων και των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Όταν οι περιορισμοί αυτοί αντιμετωπίζονται ορθά και λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό, τα πλεονεκτήματα του συστήματος υπερισχύουν, καθιστώντας τα portal frames μία ιδιαίτερα αποδοτική, οικονομική και αξιόπιστη επιλογή για σύγχρονες κατασκευές.