



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :**  
**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΑΚΡΑΙΕΣ**  
**ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :** ΚΥΡΙΑΖΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
ΜΠΕΚΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :**  
Dr. ΠΟΠΗ ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΥ ΒΑΡΕΛΙΔΟΥ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :**  
Γ. ΒΑΡΕΛΙΔΗΣ



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |         |
|---|---------|
| Εισαγωγή.....   | σελ.3   |
| 1. Η μεταβολή των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....                        | σελ.4   |
| 2. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα πυροδιαμερίσματος με το χρόνο. Πρότυπη και παραμετρικές εξισώσεις φωτιάς..... | σελ. 4  |
| 3. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα.....  | σελ. 6  |
| 4. Η διαδικασία υπολογισμού.....  | σελ. 6  |
| 5. Χρησιμοποιούμενα υλικά .....   | σελ. 8  |
| 6. Χρονικό μελετών και πειραμάτων.....  | σελ. 9  |
| 7. Συμπεριφορά κατασκευής στο συνολό της σε φωτιά.....  | σελ. 11 |
| 8. Πείραμα σε πραγματικές συνθήκες φωτιάς σε 8-όροφο κτίριο.....  | σελ. 13 |
| 9. Τεστ – Μετρήσεις – Αποτελέσματα.....   | σελ. 15 |
| 10. Συμπεράσματα.....   | σελ. 21 |
| 11. Παράρτημα.....  | σελ. 23 |
| 12. Συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών σε ανέμους μεγάλης έντασης.....   | σελ. 44 |
| 13. Τρόποι αστοχίας.....  | σελ. 45 |
| 14. Γενικοί τρόποι αστοχίας σε μεταλλικές κατασκευές.....   | σελ. 53 |
| 15. Συμπεράσματα.....   | σελ. 56 |
| 16. Πόρισμα κατάρρευσης των Δίδυμων Πύργων.....   | σελ.57  |

## Εισαγωγή

Η αύξηση του αριθμού των δομικών έργων με φέροντα οργανισμό από χάλυβα τα οποία κατασκευάστηκαν κατά τα τελευταία χρόνια στην πατρίδα μας ή βρίσκονται σήμερα υπό εκτέλεση έχει αυξήσει και το ενδιαφέρον του τεχνικού κόσμου για θέματα και προβλήματα που συνδέονται με τη συγκεκριμένη κατηγορία έργων. Στα προβλήματα αυτά περιλαμβάνεται η συμπεριφορά των δομικών χαλύβδινων στοιχείων σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η αντοχή του χάλυβα απομειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, της οποίας η διάρκεια ξεπερνάει κάποια όρια, η θερμοκρασία του χώρου μέσα στον οποίο η πυρκαγιά εκδηλώνεται αυξάνεται ενώ η θερμοκρασία των δομικών στοιχείων από χάλυβα παρακολουθεί με κάποια χρονική υστέρηση (μεγαλύτερη ή μικρότερη ανάλογα με το βαθμό μόνωσης των στοιχείων αυτών) την αύξηση αυτή. Εάν, επομένως, κάποιος παράγοντας δεν αναστείλει την αύξηση της θερμοκρασίας του χάλυβα και δεδομένης της βαθμιαίας μείωσης της αντοχής του, μετά τη πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος από την έναρξη της πυρκαγιάς τα φορτία που υπάρχουν επί της κατασκευής θα καταστούν οριακά και θα προκαλέσουν αστοχία.

Το χρονικό διάστημα από την έναρξη της πυρκαγιάς μέχρι την αστοχία της κατασκευής δίνει το μέτρο της αντοχής της σε συνθήκες πυρκαγιάς και ονομάζεται δείκτης πυραντίστασης. Στα έργα ο δείκτης αυτός αξιολογείται, τα δε στοιχεία μόνωσης των δομικών στοιχείων προσδιορίζονται ώστε ο δείκτης αυτός να βρίσκεται μέσα σε όρια καθοριζόμενα από τους κανονισμούς.

Οι απαιτούμενοι δείκτες πυραντίστασης κατά κατηγορία έργου καθορίζονται στην πατρίδα μας από το Π.Δ. 71/88. Δύο Μέρη

Ευρωκωδίκων: το μέρος 1.2 του Ευρωκώδικα 1 που αντιμετωπίζει την πυρκαγιά ως φόρτιση και το μέρος 1.2 του Ευρωκώδικα 3 που προσδιορίζει διαδικασίες για τον έλεγχο των αντοχών σε περίπτωση πυρκαγιάς βρίσκονται από χρόνια υπό δοκιμαστική εφαρμογή (ENV κείμενα) και ήδη επιτροπές εργάζονται για τη μετατροπή τους σε τελικά EN κείμενα (Euro norms). Το μέρος 1.2 τέλος του Ευρωκώδικα 4 δίνει αντίστοιχα στοιχεία αντοχών για τις σύμμικτες κατασκευές.

## **1. Η μεταβολή των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας**

Η μεταβολή των κύριων μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα: τάση διαρροής, τάση αναλογίας και μέτρο ελαστικότητας κατά τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 3 (Μέρος 1.2). φαίνεται εποπτικά και αριθμητικά στις σελίδες 1 και 2 του Παραρτήματος. Η μεταβολή των θερμικών ιδιοτήτων: ειδική θερμότητα, θερμική αγωγιμότητα, συντελεστής θερμικής διαστολής φαίνεται στις σελίδες 3,4,5.

## **2. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα πυροδιαμερίσματος με το χρόνο.**

### **Πρότυπη και παραμετρικές εξισώσεις φωτιάς**

Ο Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης (ISO) έχει καθορίσει τη μεταβολή της θερμοκρασίας συν τω χρόνω με την οποία γίνεται η προσομοίωση των συνθηκών πυρκαγιάς (βλέπε σελίδα 6 Παραρτήματος). Η μεταβολή αυτή υιοθετείται και από τον Ευρωκώδικα 1. Ειδικά για περίπτωση καύσης υδρογονανθράκων ο Ευρωκώδικας 1 (EC1) υποδεικνύει δυσμενέστερη ειδική καμπύλη.

Είναι ωστόσο φανερό ότι όλες οι περιπτώσεις πυρκαγιών δεν μπορούν να προσομοιωθούν με μία μόνο καμπύλη, δεδομένου ότι υπάρχουν παράγοντες που διαφοροποιούν την εξέλιξη της θερμοκρασίας. Τέτοιοι

παράγοντες είναι η πυκνότητα του πυροθερμικού φορτίου, οι συνθήκες αερισμού του πυροδιαμερίσματος και η μονωτική ικανότητα του περιβλήματος του. Καμπύλες θερμοκρασίας χρόνου που λαμβάνουν υπ' όψη τις ειδικές συνθήκες κάθε πυροδιαμερίσματος ονομάζονται συνήθως παραμετρικές καμπύλες και οι πυρκαγιές που τους αντιστοιχούν φυσικές

Στη σελίδα 7 του Παραρτήματος φαίνονται παραμετρικές καμπύλες θερμοκρασίας-Χρόνου για δεδομένες συνθήκες αερισμού και μονωτικής ικανότητας του περιβλήματος και διάφορες τιμές της πυκνότητας του πυροθερμικού φορτίου

εκφρασμένου σε χιλιόγραμμα ισοδύναμης, από πλευράς εκλυόμενης ποσότητας θερμότητας, ποσότητας ξύλου. Στη σελίδα 8 παρουσιάζονται ο ορισμός του συντελεστή αερισμού και παραμετρικές καμπύλες για διάφορες τιμές του συντελεστή αυτού με σταθερές τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων. Ο ορισμός του συντελεστή περιβλήματος μέσω του οποίου παρακολουθείται η μονωτική του ικανότητα παρουσιάζεται στη σελίδα 9 του Παραρτήματος.

Οι παραμετρικές καμπύλες παρουσιάζουν, σε σύγκριση προς την πρότυπη, μια μέγιστη τιμή και φθίνοντα εν συνεχεία κλάδο. Στην αρχική φάση της πυρκαγιάς οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν, σε πολλές περιπτώσεις, τις αντίστοιχες της πρότυπης καμπύλης.

Ο Ευρωκώδικας 1 /Μέρος 1.2, στο παράρτημα του Β παρέχει δεδομένα για τη χάραξη της ειδικής κατά περίπτωση καμπύλης θερμοκρασίας χρόνου (σελίδα 10 Παραρτήματος). Στις σελίδες 11 έως 13 παρουσιάζονται συγκριτικά τέτοιες καμπύλες διάφορες τιμές των υπεισερχομένων παραμέτρων. Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του πυροθερμικού φορτίου ο EC1/Μέρος 1.2 δίνει, στο παράρτημα του D, πληροφορίες για τις εκλυόμενες ποσότητες θερμότητας κατά την καύση

της μονάδας μάζας πολλών υλικών (σελίδα 14).

### **3. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα**

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα παρακολουθεί από απόσταση (μικρότερη για μη μονωμένο και μεγαλύτερη για μονωμένο μέλος) τη θερμοκρασία του αέρα με βάση τους νόμους της Φυσικής (θερμότητα). Οι σχετικές σχέσεις δίδονται στη σελίδα 18 του Παραρτήματος. Βάσει αυτών μπορεί να υπολογιστεί κατά τη διάρκεια ενός επαρκώς μικρού χρονικού διαστήματος  $\Delta t$  (ώστε να μπορεί να θεωρηθεί μέσα στο διάστημα αυτό σταθερή η θερμοκρασία του αέρα) η μεταβολή της θερμοκρασίας του χάλυβα. Στις σχέσεις αυτές ο συντελεστής μεταβίβασης της θερμότητας δια συναγωγής  $\alpha_c$  λαμβάνεται ίσος προς  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  ο δε συντελεστής ακτινοβολίας  $\epsilon_r$  ίσος προσεγγιστικά προς 0.50. Θεωρώντας διαδοχικά χρονικά διαστήματα  $\Delta t_i$  μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία του χάλυβα κάθε χρονική στιγμή. Τέτοια αποτελέσματα φαίνονται, ως παραδείγματα, στους πίνακες των σελίδων 16 (μη μονωμένα μέλη) και 17 (μονωμένα μέλη) του Παραρτήματος. Οι θερμοκρασίες αέρα που εισάγονται για τα διαδοχικά διαστήματα  $\Delta t_i$  μπορεί να αντιστοιχούν σε οποιαδήποτε καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου.

### **4. Η διαδικασία υπολογισμού**

(α) φορτία συνυπάρχοντα με την πυρκαγιά

Η πυρκαγιά είναι τυχηματική φόρτιση και ως τέτοια συνδυάζεται με τα λοιπά φορτία κατά τις προβλέψεις του Κανονισμού. Τα μόνιμα φορτία στο συνδυασμό πυρκαγιάς εισάγονται με επί μέρους συντελεστή ασφαλείας  $\gamma=1$ , η κύρια μεταβλητή δράση με συντελεστή  $\psi_1$  και οι λοιπές μεταβλητές δράσεις με συντελεστή  $\psi_2$ . Η πυρκαγιά δεν συνδυάζεται με

άλλες τυχηματικές δράσεις ούτε με το σεισμό. Σχετική είναι η σελίδα 16 του Παραρτήματος. Είναι φανερό ότι κάθε διατομή ή μέλος διαθέτει, υπό συνθήκες πυρκαγιάς, απόθεμα αντοχής το οποίο υποβοηθεί τη συμπεριφορά της. Ο λόγος του φορτίου που δέχεται ένα μέλος κατασκευής υπό συνθήκες πυρκαγιάς προς την αντοχή του σε 20°C μπορεί να ονομάζεται βαθμός αξιοποίησης της διατομής.

#### (β) τρόπος ανάλυσης

Για τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών υπό το συνδυασμό πυρκαγιάς επιτρέπεται να θεωρείται: η συνολική κατασκευή, υποσύστημα της κατασκευής ή απλά μεμονωμένα μέλη της (δοκοί, υποστυλώματα). Η τελευταία θεώρηση είναι η χρησιμοποιούμενη στους συνήθεις υπολογισμούς (απλά υπολογιστικά μοντέλα).

#### (γ) απαιτούμενοι δείκτες πυραντίστασης

Οι απαιτούμενοι δείκτες πυραντίστασης καθορίζονται από τους Εθνικούς κανονισμούς κατά είδος, χρήση και μέγεθος κτιρίου. Στην πατρίδα μας εφαρμόζεται το Π.Δ. 71/88. Από το Διάταγμα αυτό έχει ληφθεί ο Πίνακας της σελίδας 19 του Παραρτήματος.

#### (δ) πορεία υπολογισμού

Τα διαδοχικά βήματα σε ένα τυπικό υπολογισμό είναι τα εξής:

- καθορισμός φορτίων που συνυπάρχουν με τη φωτιά
- προσδιορισμός των αντίστοιχων εντατικών μεγεθών
- προσδιορισμός της τιμής της τάσεως διαρροής για την οποία τα φορτία αυτά  
γίνονται κρίσιμα

- προσδιορισμός της θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην παραπάνω μειωμένη τάση διαρροής (κρίσιμη θερμοκρασία) π. χ. μέσω του πίνακα της σελίδας 2
- προσδιορισμός του χρόνου που απαιτείται ώστε ο χάλυβας (μονωμένος ή μη) να αποκτήσει τη θερμοκρασία αυτή (π.χ. μέσω πινάκων όπως στις σελίδες 16.17 ή άλλης μεθόδου)
- αξιολόγηση του χρόνου αυτού και προσαρμογές εάν απαιτείται

(ε) διατάξεις Ευρωκώδικα 3

Ο EC3 /Μέρος 1.2 δίνει λεπτομερείς οδηγίες για τον έλεγχο επάρκειας, υπό τη φόρτιση πυρκαγιάς, δομικών στοιχείων από χάλυβα ανάλογα με το είδος της κατασκευής (εφελκυσμός, θλίψη, κάμψη, θλίψη και κάμψη). Στους υπολογισμούς ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας του υλικού  $\gamma_M$  λαμβάνεται ίσος προς 1.0. Στον Ευρωκώδικα προτείνεται επίσης προσεγγιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας ανάλογα με τον βαθμό αξιοποίησης της διατομής (σελίδα 20 Παραρτήματος).

## 5. Χρησιμοποιούμενα υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την προστασία των μεταλλικών στοιχείων, δηλαδή για την επιβράδυνση στην αύξηση της θερμοκρασίας τους πρέπει να έχουν ιδιότητες που να διατηρούνται σε ψηλές θερμοκρασίες και να μην εκλύουν καπνό ή τοξικά αέρια κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες υλικών: επίπεδες πλάκες επένδυσης, διατιθέμενες στο εμπόριο σε διάφορα πάχη, εκτοξευόμενα επιχρίσματα και χρώματα συνήθως διογκούμενα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα εκτοξευόμενα επιχρίσματα, λόγω μορφολογικών ατελειών, εφαρμόζονται συνήθως σε δοκούς από ψευδοροφές.



Οι προμηθευτές των υλικών διαθέτουν συνήθως πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν το απαιτούμενο πάχος ανάλογα με το συντελεστή διατομής και τον απαιτούμενο δείκτη πυραντίστασης.

### Χρονικό μελετών και πειραμάτων

Η πυραντίσταση ενός μεταλλικού πλαισίου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε ένα πείραμα που έγινε από τους Cooke και Latham το 1987 σε ένα δισδιάστατο μεταλλικό πλαίσιο. Το πείραμα το οποίο ήταν το πρώτο στο είδος του στην Ευρώπη έδειξε ότι η αντοχή ενός πλαισίου είναι καλύτερη από αυτή ενός μεμονωμένου στοιχείου. Το μεταλλικό πλαίσιο άντεξε για 30 λεπτά χωρίς τη χρήση μέσων πυροπροστασίας. Οι μέγιστες θερμοκρασίες για δοκούς και υποστρώματα ήταν 775°C και 600 °C αντίστοιχα.

Το 1990 ο Lawson παρουσίασε τα αποτελέσματα για 8 τύπους συνδέσεων δοκού-υποστρώματος σε συνθήκες φωτιάς.

Λόγω του μεγάλου κόστους παροχής εγκαταστάσεων για πειράματα με φωτιά σε συνδυασμό με τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την περάτωση αλλά και την προετοιμασία πειραμάτων που ερευνούν την απόκριση κτιριών σε συνθήκες φωτιάς πολύ λίγες πειραματικές μελέτες έχουν γίνει σε κτίρια. Η πιο σημαντική από αυτές τις μελέτες έγινε σε ένα 8-όροφο κτίριο με μεταλλικό σκελετο πραγματικών διαστάσεων από το Βρετανικό ερευνητικό ίδρυμα (B.R.E) στο Cardington.

Τα αποτελέσματα για τα 4 από τα 6 πειράματα που έγιναν παρουσιάστηκαν από τον Kirby το 1997. Αυτό αποτελεί και το πείραμα στο οποίο θα εστιάσουμε αργότερα αφού είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για φωτιά σε κτίριο.

Επιπλέον έχουν γίνει πολλά πειράματα με χρήση φούρνου σε μεμονωμένα στοιχεία τα οποία δεν θα μας απασχολήσουν αφού δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική συμπεριφορά σε συνθήκες φωτιάς.

Σύμφωνα με την μελέτη των D.I. Nwosu και V.K.R. Kodur η υπάρχουσα διαδικασία αξιολόγησης της πυραντίστασης είναι βασισμένη στο standard test (ASTM 1990, ULC 1989) το οποίο έχει τα εξής μειονεκτήματα :

- Τα συμβατικά test με χρήση φούρνου δεν εξομοιώνουν το εύρος των τυπικών συνθηκών και φορτίων τα οποία απαντούνται στην πράξη.
- Δεδομένα από τέτοια test εμφανίζουν μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων λόγω μικροδιαφορών στην διαδικασία αλλά και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των φούρνων.
- Ο τρόπος έκθεσης των στοιχείων στη φωτιά δεν αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά μιας αληθινής φωτιάς.
- Η πυρανθεκτική συμπεριφορά ενός μεμονομένου στοιχείου διαφέρει από αυτή μιας ολόκληρης κατασκευής λόγω παραγόντων συνεχισιμότητας και διαδραστικότητας μεταξύ στοιχείων αλλά και ανακατανομών υπάρχοντων ροπών σε αυτή.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η πραγματική πυρανθεκτικότητα μιας κατασκευής πρέπει να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε φωτιά στο σύνολό της. Περιορισμένα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την συνολική συμπεριφορά μιας κατασκευής σε πραγματικές συνθήκες φωτιάς υπάρχουν προς το παρόν λόγω της περιπλοκότητας και του κόστους διεξαγωγής τέτοιου μεγέθους πειραμάτων. Αυτό το γεγονός έχει δημιουργήσει το ενδιαφέρον για την κατασκευή αριθμητικών μοντέλων.

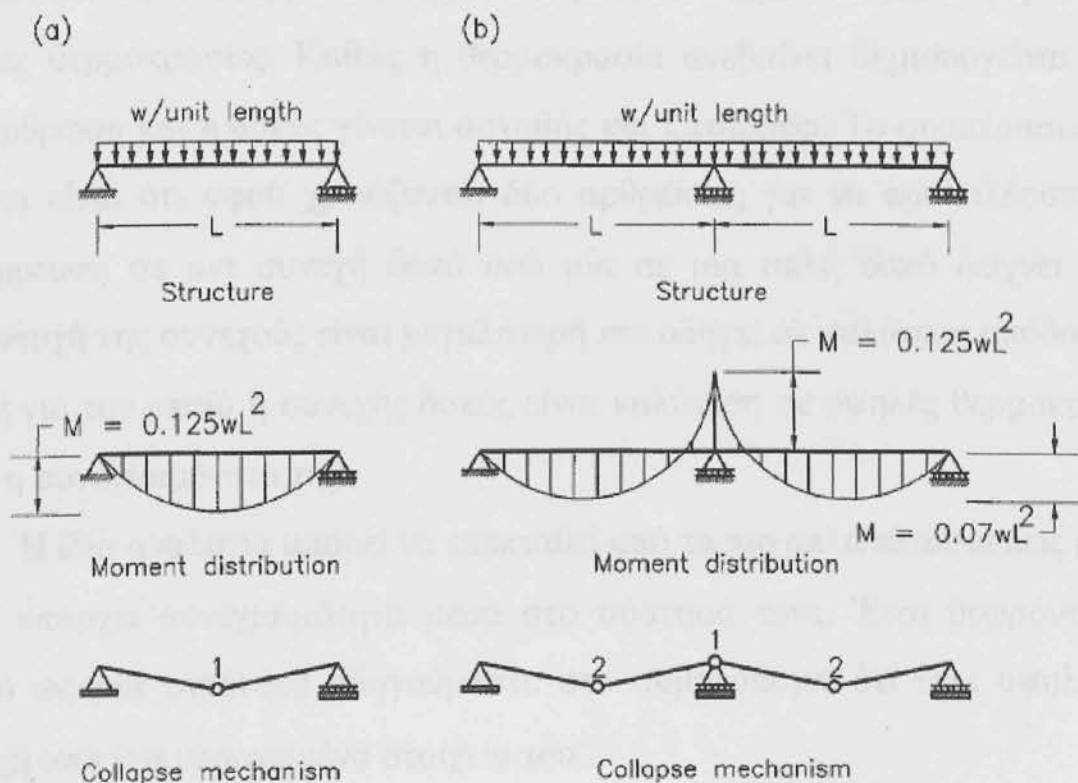
Απ'την άλλη τα αριθμητικά μοντέλα δώσαν το έναυσμα για να διεξαχθούν πειράματα πραγματικού μεγέθους.

Κατά τις προηγούμενες δύο δεκαετίες έχει δοθεί αξιοσημείωτη προσοχή στη εξομοίωση της συμπεριφοράς μιας ολόκληρης κατασκευής σε φωτιά μέσω αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων.

## Συμπεριφορά κατασκευής στο σύνολό της σε φωτιά.

Στην πραγματικότητα αστοχία κατά την διάρκεια φωτιάς δεν αποτελεί συνηθισμένο φαινόμενο, παρόλο που η αστοχία ενός μεμονομένου στοιχείου της κατασκευής υποδεικνύει ότι δεν είναι πλέον ασφαλές να φέρει το εφαρμοζόμενο φορτίο. Η αστοχία μερικών στοιχείων σε μια κατασκευή δεν είναι ικανή να επηρεάσει την ασφάλεια της κατασκευής στο σύνολό της. Λόγω της συνεχισημότητας και της διαδραστικότητας των στοιχείων σε μια κατασκευή αναπτύσσεται μια εναλλακτική κατανομή ροπών απ την υπόλοιπη κατασκευή για να “γεφυρώσει” τα στοιχεία που έχουν αστοχήσει με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση της κατασκευής.

Οι παραπάνω διαφορές μεταξύ μεμονομένων στοιχείων και μιας ολόκληρης κατασκευής σε φωτιά αποτυπώνονται με ένα ισοστατικό και ένα υπερστατικό σύστημα.



Σχήμα 1 : Συμπεριφορά ισοστατικών και υπερστατικών δοκών σε φωτιά.

Και στα δύο είδη δοκαριών εφαρμόζεται κατανεμημένο φορτίο  $W$ . Για μια μονοέριστη δοκό η μέγιστη ροπή  $0,125WL^2$  (όπου  $L$  το μήκος της δοκού) θα εμφανιστεί στο μέσο του ανοίγματος. Αυτό δείχνει ότι η μέγιστη καταπόνηση υπάρχει στο μέσο της δοκού και υποδεικνύει ότι το τμήμα αυτό θα είναι το πρώτο που θα υποχωρήσει αν εκτεθεί σε φωτιά το σύνολο της δοκού. Σε αυτό το σημείο του πειράματος δημιουργείται μια άρθρωση στο μέσο της δοκού οπότε χάνεται η ύπαρξη αντίστασης σε περιστροφή έτσι η δοκός γίνεται ασταθής και καταρρέει. Εκ τούτου μια άρθρωση είναι ικανή για την κατάρρευση μιας ισοστατικής δοκού.

Για μια συνεχή δοκό με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $W$  και άνοιγμα  $L$ , οι ροπές ελαστικής κατανομής είναι  $0,125WL^2$  στην κεντρική στήριξη και περίπου  $0,07WL^2$  στα ανοίγματα. Κατά την έκθεση σε φωτιά εμφανίζεται πρώτα μια άρθρωση στην κεντρική στήριξη αφήνοντας το τμήμα να περιστρέφεται ελεύθερα. Παρ όλα αυτά ο σχηματισμός της άρθρωσης σε αυτό το σημείο δεν είναι ικανός να δημιουργήσει αστάθεια στην δοκό και να προκαλέσει την κατάρρευση της αλλά μπορεί ακόμα να φέρει φορτίο υπό υψηλές θερμοκρασίες. Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει δημιουργείται άλλη μια άρθρωση και η δοκός γίνεται ασταθής και καταρρέει. Το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι αφού χρειάζονται δύο αρθρώσεις για να προκαλέσουν την κατάρρευση σε μια συνεχή δοκό ενώ μία σε μια απλή δοκό δείχνει ότι η πυραντοχή της συνεχούς είναι μεγαλύτερη και οδηγεί σε καλύτερη απόδοση. Ο λόγος για τον οποίο η συνεχής δοκός είναι καλύτερη σε υψηλές θερμοκρασίες είναι η συνεχισιμότητά της.

Η ίδια αναλογία μπορεί να επεκταθεί από τα πιο απλά πλαίσια έως κτίρια όπου υπάρχει συνεχισιμότητα μέσα στο σύστημά τους. Έτσι θεωρώντας το κτίριο ως μία οντότητα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι έχει υψηλότερη αντοχή από ένα μεμονωμένο στοιχείο του.

## **ΠΕΙΡΑΜΑ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ 8-ΟΡΟΦΟ ΚΤΙΡΙΟ**

Το 1997 ολοκληρώθηκε μια σειρά πειραμάτων τα οποία διεξήχθησαν σε ένα μοντέρνου σχεδιασμού μεταλλικό σύνθετο δόροφο κτίριο που χτίστηκε μέσα στις εγκαταστάσεις διεξαγωγής πειραμάτων με χρήση φωτιάς στο Cardington.

### **Σκοπός**

Ο σκοπός της έρευνας ήταν να κατανοηθεί το μέγεθος της επιφόρτισης και της αντοχής στα καινούρια μεταλλικά κτίρια όταν εκτίθενται σε φωτιά. Το τελικό προϊόν της έρευνας ήταν να βρεθούν τα κρίσιμα στοιχεία μιας κατασκευής που εκτίθεται σε φωτιά και να δημιουργηθεί ένας οδηγός σχεδίασης για τους μηχανικούς ώστε να υπολογίσει επαρκώς την πυραντίσταση του κτιρίου.

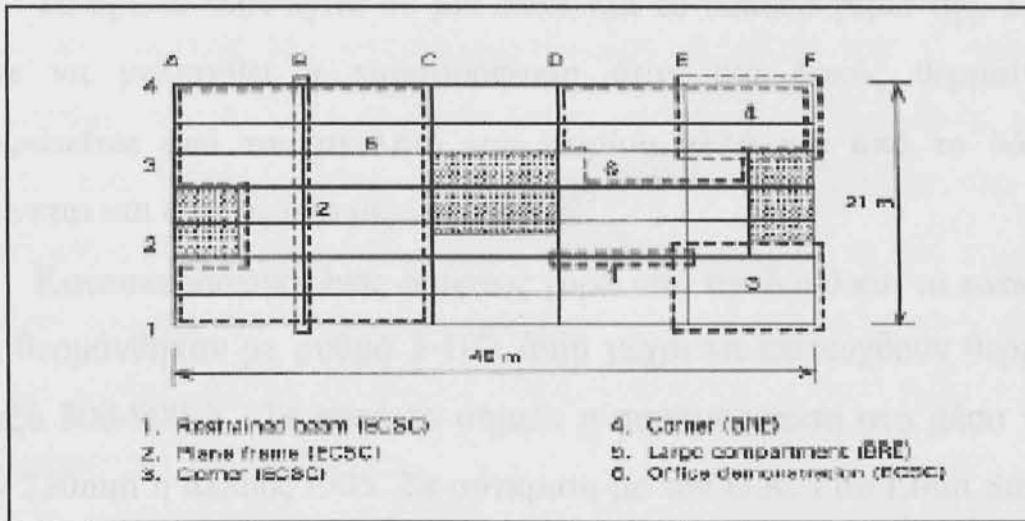
Το κτίριο κατασκευάστηκε ώστε να συναντά τις απαιτήσεις του Βρετανικού κατασκευαστικού κώδικα ενσωματώνοντας δύο κλιμακοστάσια ένα σε κάθε άκρη του κτιρίου και ένα φρεάτιο για ασανσέρ.

Η σύνθετη δράση επιτεύχθηκε με διατμητικές δοκίδες συγκολλημένες με τραπεζοειδή βάση πάνω στα κύρια αλλά και τα δευτερεύοντα δοκάρια. Το δάπεδο φτιάχτηκε από ελαφρομπετό πυκνότητας  $1900\text{kg}/\text{m}^3$  παρέχοντας μέγιστο πάχος δαπέδου 130mm.

### **Πειραματικό Πρόγραμμα**

Συνολικά έγιναν 6 πειράματα σε αυτό τον μεταλλικό σκελετό εκ των οποίων δύο από αυτά έγιναν από το B.R.E. και χρηματοδοτήθηκαν από το Βρετανικό κράτος, 4 από την πυρομηχανική ερευνητική ομάδα Corus και χρηματοδοτήθηκαν από τον όμιλο Corus και από την Ευρωπαϊκή κοινότητα άνθρακα και μετάλλου (E.C.S.C.).

Μια κάτοψη με τις τοποθεσίες που έγιναν τα πειράματα φαίνεται στο σχήμα 1



Σχήμα 1

Τα πειράματα είχαν ως σκοπό να ερυνήσουν διαφορετικές πλευρές συμπεριφοράς ενός κτιρίου και η πολυπλοκότητά τους αυξήθηκε όσο προχωρούσαν οι εργασίες. Τα πειράματα τα οποία έγιναν από την Corus έχουν τις εξής ονομασίες :

- 1) Αμφιέριστη δοκός
- 2) Απλός σκελετός
- 3) Γωνία
- 4) Πυρκαγιά σε γραφείο

Κατά την διάρκεια του προγράμματος οι περιοχές πού γίνονταν τα πειράματα ήταν εξαιρετικά εξοπλισμένες ώστε να μετρούν φυσικές αλλά και κατασκευαστικές παραμέτρους. Πάνω από 600 μηχανήματα μετρήσεων εγκαταστάθηκαν σε κάθε τεστ.

## Τεστ-Μετρήσεις-Αποτελέσματα

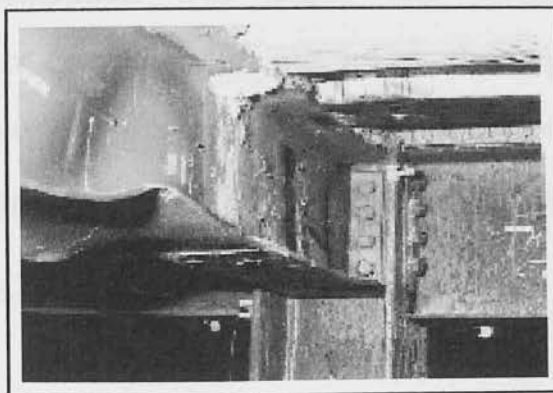
### Τεστ 1 : Αμφιέριστη δοκός

Το πρώτο τεστ έγινε σε μια δοκό και το δάπεδο γύρω της. Στόχος του ήταν να μελετηθεί η παραμόρφωση όταν μια δοκός θερμαίνεται και συγκρατείται από τον σκελετό του κτιρίου αλλά και από το δάπεδο που εκτείνεται και από τις δυο μεριές της.

Κατασκευάστηκε ένας φούρνος γύρω από την δοκό και το πάτωμα.

Όλα θερμάνθηκαν με ρυθμό  $3-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  μέχρι να επιτευχθούν θερμοκρασίες μεταξύ  $800-900^{\circ}\text{C}$ . Σε αυτό το σημείο η παραμόρφωση στο μέσο της δοκού ήταν 230mm ή αλλιώς L/35. Σε σύγκριση με τον U.K. Fire Limit State Design Code BS5950 Part 8 (1990) ένα μεμονωμένο στοιχείο δεχόμενο το ίδιο ποσοστό φορτίου θα έχει αποκτήσει το οριακό κριτήριο παραμόρφωσης του L/30 στο στάνταρντ τεστ πυραντοχής BS476 Part 20 (1987) και BS476 Part 21 (1987) σε χαμηλότερη θερμοκρασία συγκεκριμένα κάτω από  $700^{\circ}\text{C}$ .

Μετά από το πείραμα η εξέταση των ζημιών αποκάλυψε ότι η δοκός είχε λυγίσει και στα δύο άκρα της δηλαδή ακριβώς στο σημείο που ξεκίναγε ο φούρνος. Υπήρχαν επίσης αποδείξεις λυγισμού στο κάτω μέρος στα άκρα της δοκού καθώς αυτή επιμηκυνόταν και περιστρεφόταν ως προς την κολώνα. Κατά την διάρκεια της ψύξης μεγάλες εφελκυστικές δυνάμεις δημιουργήθηκαν κατά μήκος της δοκού λόγω θερμικής συστολής του παραμορφωμένου μέλους η οποία εμποδιζόταν από τον γύρω πιο κρύο σκελετό αυτό οδήγησε σε διατμητικές αστοχίες στις συνδέσεις δοκού-υποστηλώματος και στα δύο άκρα.



Φωτο 1 Παραμόρφωση στο άκρο της δοκού

## Τεστ 2 : Δισδιάστατος σκελετός

Το δεύτερο τεστ σχεδιάστηκε για να εκτιμηθεί η συμπεριφορά μιας σειράς από δοκούς και υποστηλώματα που στήριζαν τον 4<sup>ο</sup> όροφο. Αυτό επιτεύχθηκε παίρνοντας μια δισδιάστατη φέτα του 4<sup>ου</sup> ορόφου σε όλο το πλάτος του κτίριου. Μια σημαντική άποψη του πειράματος ήταν να αποφασιστεί πόσο σημαντική είναι η πυροπροστασία γύρω από τις συνδέσεις. Για αυτό τον λόγο τα υποστηλώματα ήταν ελαφρά προστατευμένα σε ένα ύψος 200mm κάτω από τις συνδέσεις δοκών-υποστηλωμάτων ενώ οι συνδέσεις παρέμειναν εκτεθειμένες.

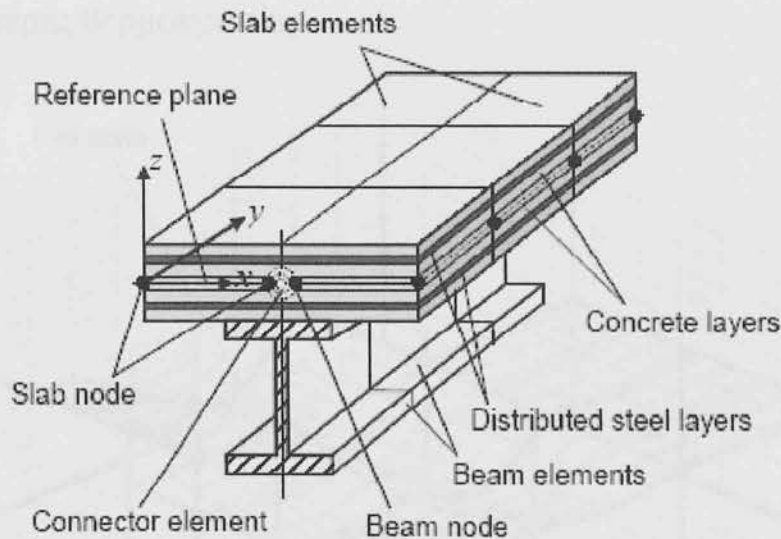
Κατασκευάστηκε ένας φούρνος 21m μήκος και 4m ύψος για να δημιουργηθεί ένας διάρομος κατά μήκος του κτιρίου. Η κατασκευή θερμάνθηκε για 2.5 ώρες κατά τις οποίες το κάτω μέρος των δοκών διατήρησε τη θερμοκρασία των 800 °C με μέγιστη καταγραφόμενη 850 °C. Η κεντρική δοκός των 610mm παραμορφώθηκε 293mm σε ένα άνοιγμα 9m (L/31) το οποίο επανήλθε στα 237mm παραμόρφωσης όταν η κατασκευή επανήλθε σε θερμοκρασία δωματίου.

Οι θερμοκρασίες στο εκτεθειμένο κομμάτι των υποστηλωμάτων ακριβώς κάτω από τις συνδέσεις διατήρησε θερμοκρασία 750 °C και ενώ εμφανίστηκαν να είναι ίσιες στην πλειοψηφία του μήκους τους οι κεφαλές τους είχαν παραμορφωθεί τρομερά με αποτέλεσμα να λιώσουν 180mm από τα 200mm κενού μεταξύ της αρχής της πυροπροστασίας και του κάτω μέρους της δοκού. Αντίθετα τα υποστηλώματα στα άκρα του σκελετού ήταν ελαφρώς παραμορφωμένο. Ήταν ξεκάθαρο με μια απλή παρατήρηση των συνδέσεων δοκών-υποστηλωμάτων ότι η επιμήκυνση και η παραμόρφωση της δοκού ειδικότερα στο κάτω μέρος της είχε γίνει με παρόμοιο τρόπο με το πείραμα 1 (Φωτο 1).



### Τεστ 3 : Γωνία

Ο σκοπός του πειράματος ήταν να εκτιμηθεί η συμπεριφορά ενός συνθετικού δαπέδου (σκυρόδεμα) και της σημασίας αυτού να λειτουργεί ως μεμβράνη.



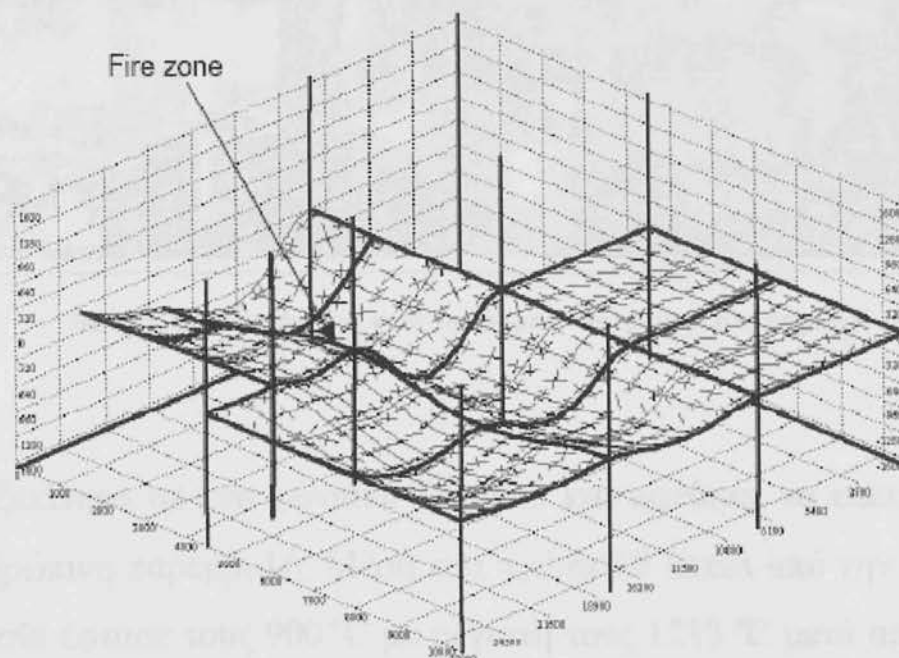
Σχήμα 2 3D Τομή δαπέδου από σκυρόδεμα

Ένα δωμάτιο με επιφάνεια  $80\text{m}^2$  χτίστηκε στο  $1^\circ$  επίπεδο.  $45\text{kg}/\text{m}^2$  ξύλου χρησιμοποιήθηκαν σαν καύσιμο σε συνδυασμό με ένα παράγοντα εξαερισμού  $0.34\text{m}^{1/2}$  σχεδιάστηκαν για να δώσουν θερμοκρασίες μετάλλου γύρω στους  $1000^\circ\text{C}$ . Η απόδοση της θερμότητας που μετρήθηκε ήταν  $19\text{MW}$ .

Βασισμένοι στα προηγούμενα αποτελέσματα τα υποστηλώματα ήταν πλήρως προστατευμένα συμπεριλαμβανομένων και των συνδέσεων. Παρ όλα αυτά όλες οι δοκοί του δαπέδου αλλά και οι συνδέσεις δοκών με δοκούς έμειναν εκτεθειμένες.

Κατά την διάρκεια της φωτιάς η κύρια δοκός των  $356\text{mm}$  έφτασε τους  $864^\circ\text{C}$  και τα δευτερεύοντα δοκάρια έφτασαν το μέγιστο την θερμοκρασία των  $1021^\circ\text{C}$ . Οι παραμορφώσεις στο μέσο του ανοίγματος σε κυρία και δευτερεύοντα δοκάρια ποίκιλαν από  $164\text{mm}$  σε άνοιγμα  $6\text{m}$  ( $L/37$ ) έως  $428\text{mm}$  σε  $9\text{m}$  άνοιγμα ( $L/21$ ). Σε αυτές τις θερμοκρασίες το μέταλλο έχει λιγότερο από το  $10\%$  της δύναμής του σε θερμοκρασία δωματίου.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα τεστ αστοχίες εμφανίστηκαν σε διάφορες συνδέσεις και πάλι όμως αυτές εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια της αποθέρμανσης. Ο αποχρωματισμός σε μια από τις βάσεις δείχνει ότι η αστοχία εμφανίστηκε στους 310 °C ενώ σε μια βίδα δεν υπήρχε αποχρωματισμός σε αυτή αλλά ούτε και γύρω της που σημαίνει ότι η αστοχία εμφανίστηκε σε ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 3 Προφίλ παραμορφώσεων στους 1000 °C στο B.R.E. Large Compartment Fire Test με τους τρόπους αστοχίας στο επάνω μέρος του δαπέδου χρήση του προγράμματος Vulcan το οποίο αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Sheffield.

#### **Τεστ 4 : Φωτιά σε γραφείο**

Ένα δωμάτιο 18m μήκος και 10m βάθος χτίστηκε στον 1<sup>ο</sup> όροφο το οποίο αναπαριστούσε ένα μοντέρνο γραφείο. Αυτό επιτεύχθηκε τοποθετώντας μια σειρά από θέσεις εργασίας με μοντέρνα έπιπλα και γεμάτα ράφια αρχείων. Έγινε μια λεπτομερής ανάλυση του αναφλέξιμου υλικού και αποδείχτηκε ίσο με 45.6kgr ξύλου/m<sup>2</sup>.

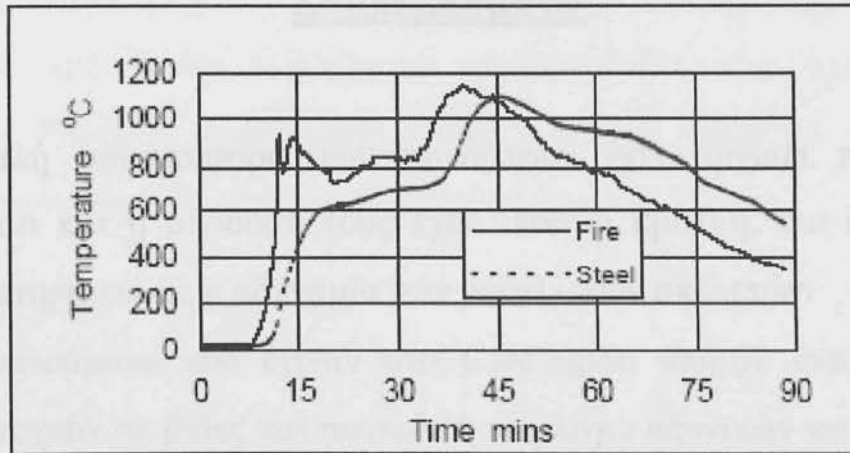
Όλα τα υποστηλώματα συμπεριλαμβανομένων και των συνδέσεων κυρίων δοκών υποστηλωμάτων ήταν προστατευμένα για τις ανάγκες του τεστ. Οι κύριες και δευτερεύουσες δοκοί του πατώματος παρέμειναν εκτεθειμένες συμπεριλαμβανομένων και των συνδέσεων δοκών-δοκών.



Φωτο 2 : Το γραφείο πριν, κατά την διάρκεια και μετά από το πείραμα

Η φωτιά ξεκίνησε σε ένα γωνιακό δωμάτιο και αφέθηκε να επεκταθεί χωρίς καμία ανθρώπινη παρεμβολή. Μέσα στα πρώτα 10 λεπτά από την ανάφλεξη η θερμοκρασία έφτασε τους 900 °C με μέγιστη τους 1213 °C μετά από 33 λεπτά. Σε αυτό το μέγιστο η θερμική απόδοση ήταν 58MW. Οι θερμοκρασίες στις εκτεθειμένες δοκούς ήταν από 1000 °C έως 1100 °C.

Στο διάγραμμα φαίνεται η σύγκριση μεταξύ θερμοκρασίας φωτιάς και θερμοκρασίας απροστάτευτων δοκών σε συνάρτηση με το χρόνο.



Όλα τα περιεχόμενα του γραφείου κάηκαν ολοσχερώς. Οι κύριες και δευτερεύουσες δοκοί παραμορφώθηκαν έως 642mm σε ένα άνοιγμα 9m (L/14) αλλά παρά όλες τις ακραίες παραμορφώσεις το συνθετικό σύστημα δαπέδου παρέμεινε στη θέση του. Πάνω από το δάπεδο υπήρχαν αστοχίες αλλά όπως φάνηκε μετά έγιναν κατά την διάρκεια της αποθέρμανσης. Το πείραμα αυτό δείχνει ότι η ανθεκτικότητα των συνθετικών πατωμάτων στην φωτιά ακόμα και όταν οι θερμοκρασίες που δέχονται από τα μεταλλικά μέρη είναι κατά πολύ μεγαλύτερες.

## Συμπεράσματα

Η καλή συμπεριφορά των συνδέσεων έχει αρχίσει πρόσφατα να αμφισβητείται και η απόδοσή τους έχει υποστεί κριτική, πιο συγκεκριμένα έχουν χαρακτηριστεί ως η αδυναμία των μεταλλικών σκελετών.

Στα πειράματα που έγιναν στο Cardington υπήρχε ένας σημαντικός αριθμός αστοχιών σε βίδες και συγκολλήσεις λόγω αξονικών και διατμητικών δυνάμεων σε συνδέσεις δοκού με δοκό και δοκού με υποστύλωμα. Όμως όταν εξετάστηκαν αυτές οι αστοχίες ήταν σαφές ότι εμφανίστηκαν χωρίς καμία εξαίρεση κατά την διάρκεια της αποθέρμανσης. Οπτικός έλεγχος των αστοχιών των συγκολλήσεων παρουσίασε χαρακτηριστικά αποχρωματισμού σε κομμάτια και αυτό μπορεί να συσχετιστεί με διάφορα στάδια της οξειδωτικής διαδικασίας. Βασισμένοι στην έκταση του αποχρωματισμού οι θερμοκρασίες στις οποίες εμφανίστηκαν οι αστοχίες φτάνουν μέχρι και τους 20 °C. Αφού αυτός ο τύπος αποχρωματισμού μπορεί να προέλθει μόνο από ένα κατεστραμένο και εκτεθειμένο στη φωτιά κομμάτι, δείχνει την υψηλότερη θερμοκρασία στη οποία αστόχησε το κομμάτι αυτό. Πέρα από την οπτική παρατήρηση η αστοχία συνήθως φαινόταν μέσα από απότομες αλλαγές των ηλεκτρικών σημάτων των strain gauges τα οποία είχαν τοποθετηθεί γύρω από το συγκεκριμένο κομμάτι του σκελετού.

Απο την θερμομηχανική ανάλυση που έγινε είναι εμφανές ότι κατά την διάρκεια της αποθέρμανσης πολύ μεγάλες διατμητικές δυνάμεις δημιουργήθηκαν στις συνδέσεις λόγω της θερμικής συστολής παραμορφωμένου μέλους. Σε όλες τις περιπτώσεις όμως λόγω της συνεχισιμότητας του δαπέδου σε κανένα στάδιο του πειράματος δεν τέθηκε υπό αμφισβήτηση η στατικότητα του κτιρίου.

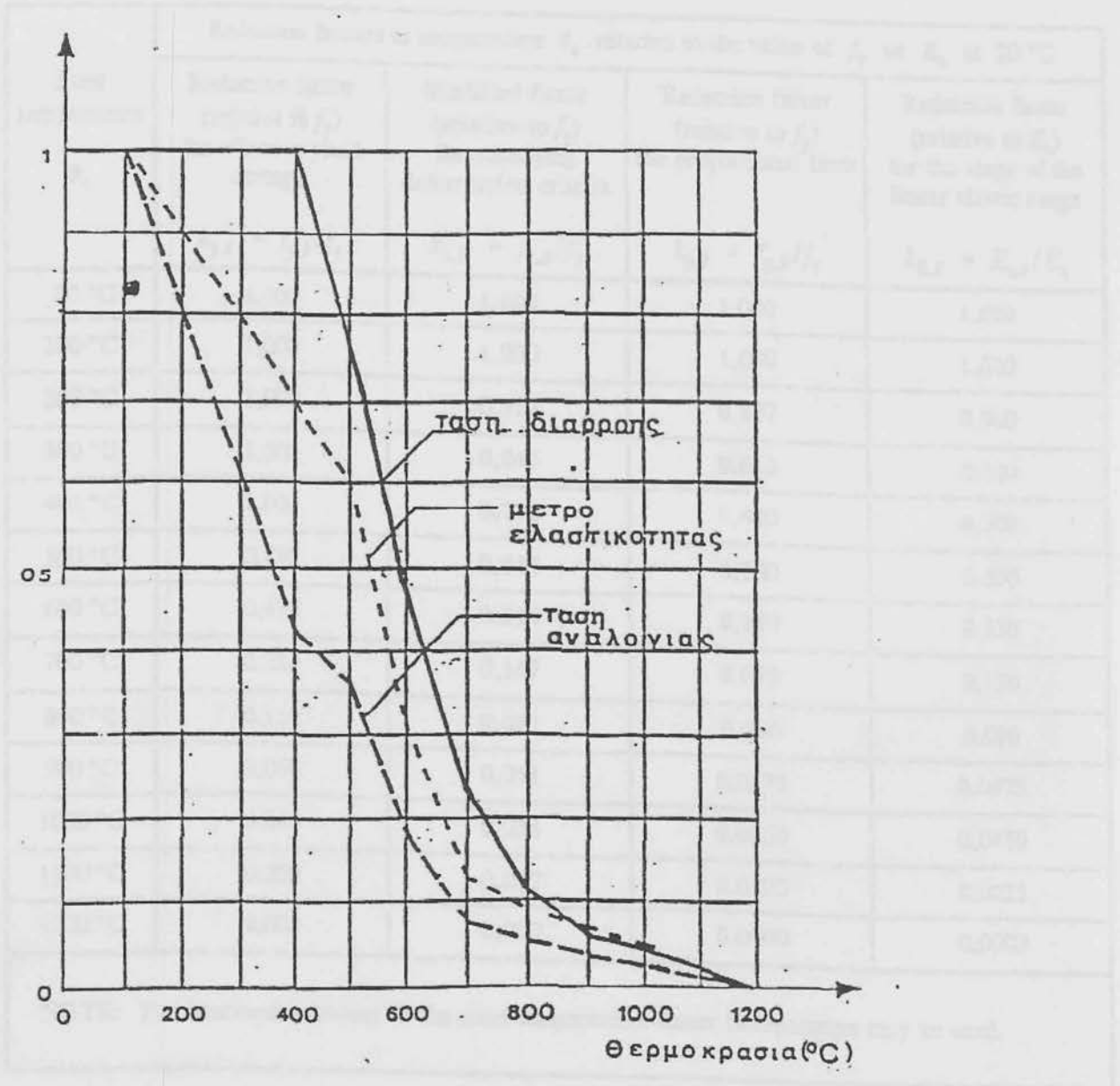
Μέχρι πρόσφατα ο σχεδιασμός των συνδέσεων σε ακραίες συνθήκες φωτιάς ήταν περιορισμένος λόγω έλλειψης πληροφοριών γύρω από τις ιδιότητες των στοιχείων αυτών σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η έλλειψη

γνώσης διορθώθηκε μέχρι κάποιο σημείο από την δουλειά των Kirby (1995) και Latham και Kirby (1998) και εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό των Ευρωπαϊκών Κανόνων Σχεδιασμού (prEN 1993-1-2,2002) για συγκολλήσεις και υψηλής αντοχής βίδες για θερμοκρασίες μέχρι και 1000 °C.



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

Table 1.1. Reduction factors for stress-strain relationships of steel at elevated temperatures.



ΣΧΗΜΑ 1

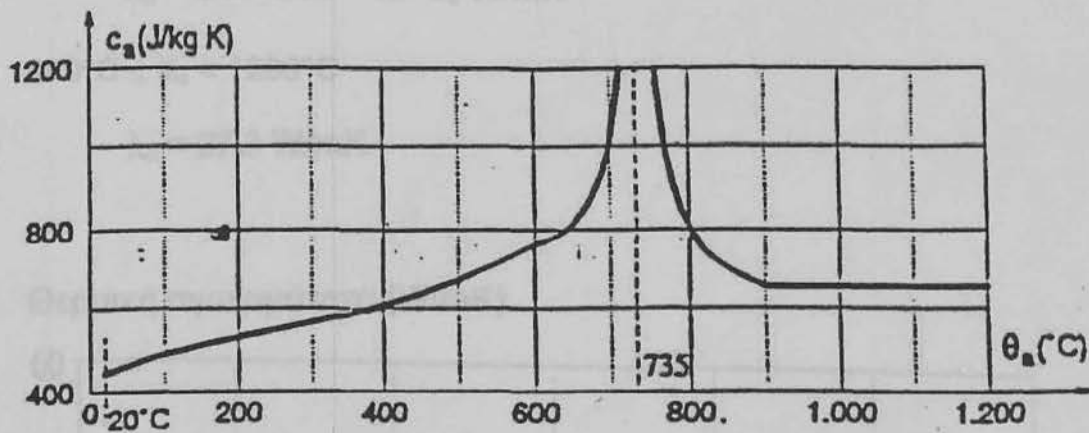


Table 3.1: Reduction factors for stress-strain relationship of steel at elevated temperatures.

| Steel temperature<br>$\theta_2$ | Reduction factors at temperature $\theta_2$ relative to the value of $f_y$ or $E_2$ at 20 °C            |   |   |  |
|---------------------------------|---|---|---|--|
|                                 | Reduction factor (relative to $f_y$ ) for effective yield strength<br>$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$ | Modified factor (relative to $f_y$ ) for satisfying deformation criteria<br>$k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$ | Reduction factor (relative to $f_y$ ) for proportional limit<br>$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$ | Reduction factor (relative to $E_2$ ) for the slope of the linear elastic range<br>$k_{E,\theta} = E_{2,\theta}/E_2$ |
| 20 °C                           | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000  |
| 100 °C                          | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000  |
| 200 °C                          | 1,000   | 0,922   | 0,807   | 0,900  |
| 300 °C                          | 1,000   | 0,845   | 0,613   | 0,800  |
| 400 °C                          | 1,000   | 0,770   | 0,420   | 0,700  |
| 500 °C                          | 0,780   | 0,615   | 0,360   | 0,600  |
| 600 °C                          | 0,470   | 0,354   | 0,180   | 0,310  |
| 700 °C                          | 0,230   | 0,167   | 0,075   | 0,130  |
| 800 °C                          | 0,110   | 0,087   | 0,050   | 0,090  |
| 900 °C                          | 0,060   | 0,051   | 0,0375  | 0,0675   |
| 1000 °C                         | 0,040   | 0,034   | 0,0250  | 0,0450   |
| 1100 °C                         | 0,020   | 0,017   | 0,0125  | 0,0225   |
| 1200 °C                         | 0,000   | 0,000   | 0,0000  | 0,0000   |

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

## Ειδική θερμότητα



$$20^\circ\text{C} \leq \theta_\alpha \leq 600^\circ\text{C}$$

$$C_\alpha = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \theta_\alpha - 1.69 \cdot 10^{-3} \theta_\alpha^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \theta_\alpha^3$$

$$600^\circ\text{C} < \theta_\alpha \leq 735^\circ\text{C}$$

$$C_\alpha = 666 - 13002/(\theta_\alpha - 738)$$

$$735^\circ\text{C} < \theta_\alpha \leq 900^\circ\text{C}$$

$$C_\alpha = 545 + 17820/(\theta_\alpha - 731)$$

$$900^\circ\text{C} < \theta_\alpha \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$C_\alpha = 650 \text{ J/kg K}$$

## Θερμική αγωγιμότητα

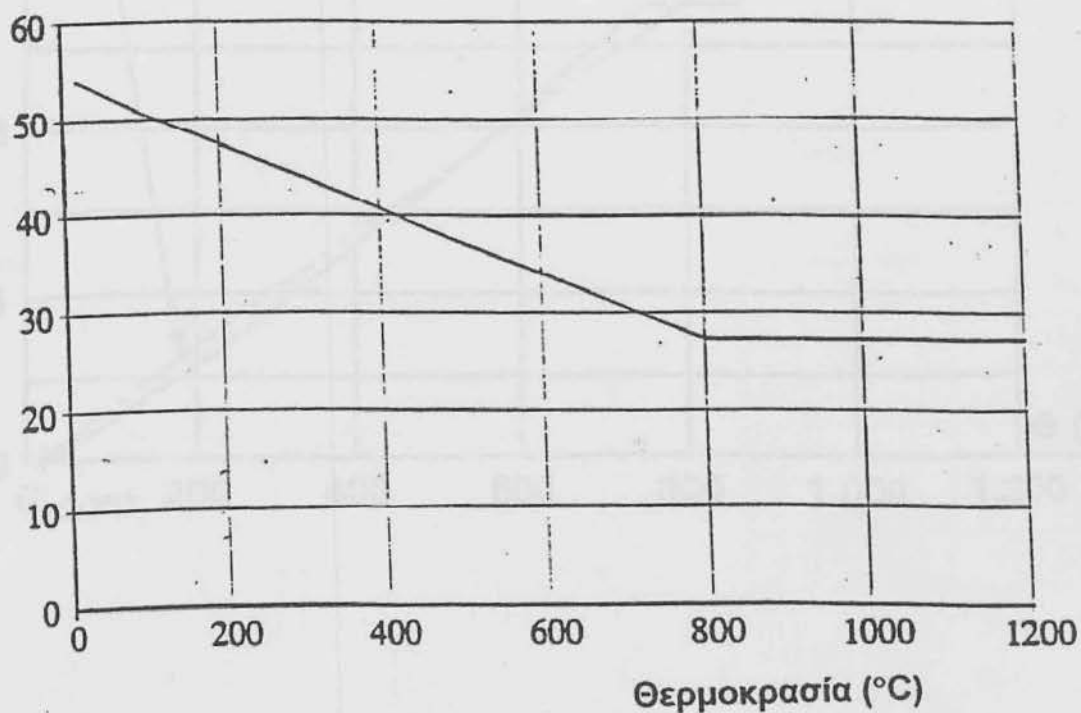
$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 800^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{\alpha} = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} \theta_{\alpha} \text{ W/mK}$$

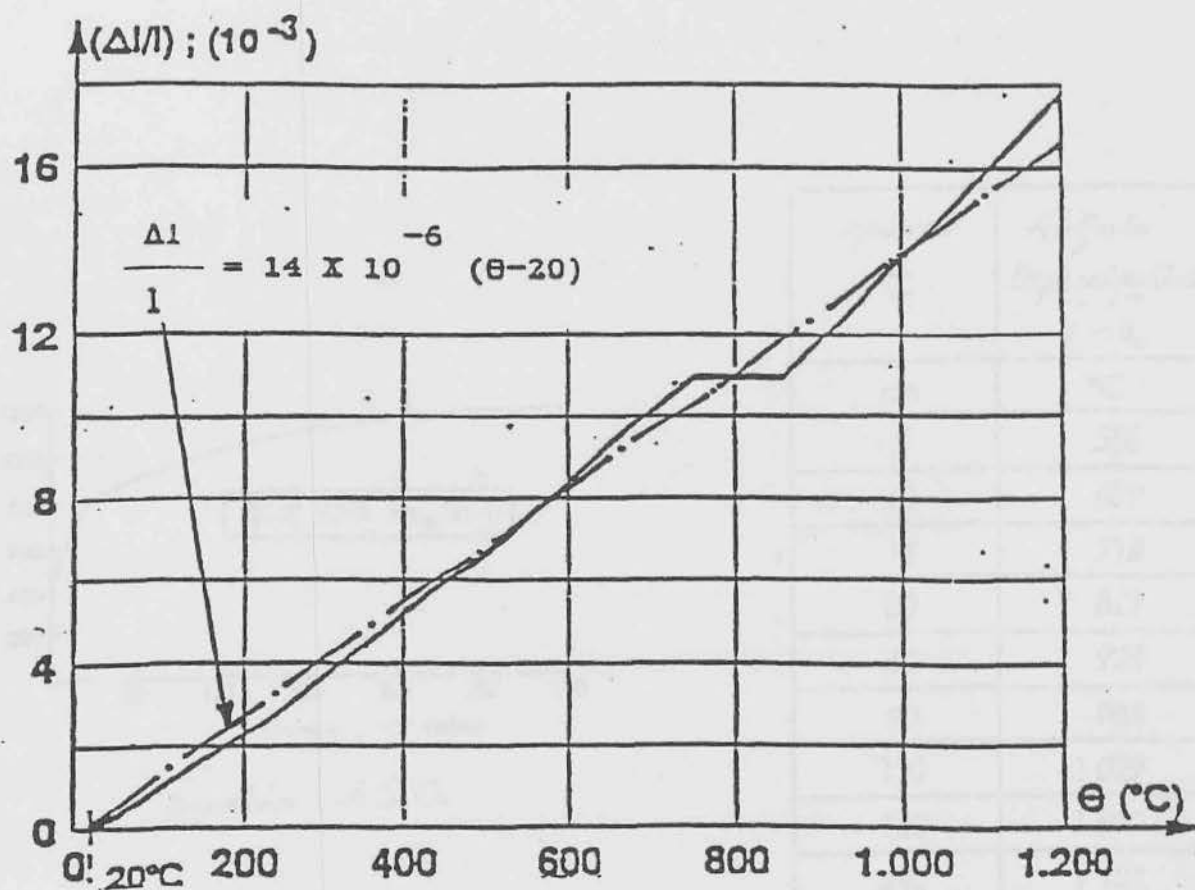
$$800^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 1200^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{\alpha} = 27.3 \text{ W/mK}$$

Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)



## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ



$$20^{\circ}C \leq \Theta_a \leq 750^{\circ}C$$

$$\Delta l/l = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \Theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \Theta_a^2$$

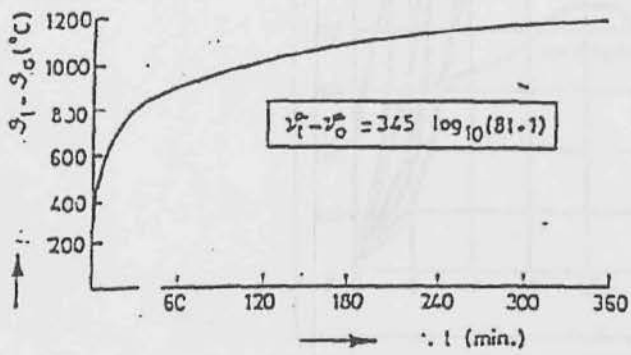
$$750^{\circ}C \leq \Theta_a \leq 860^{\circ}C$$

$$\Delta l/l = 11 \cdot 10^{-3}$$

$$860^{\circ}C \leq \Theta_a \leq 1200^{\circ}C$$

$$\Delta l/l = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \Theta_a$$

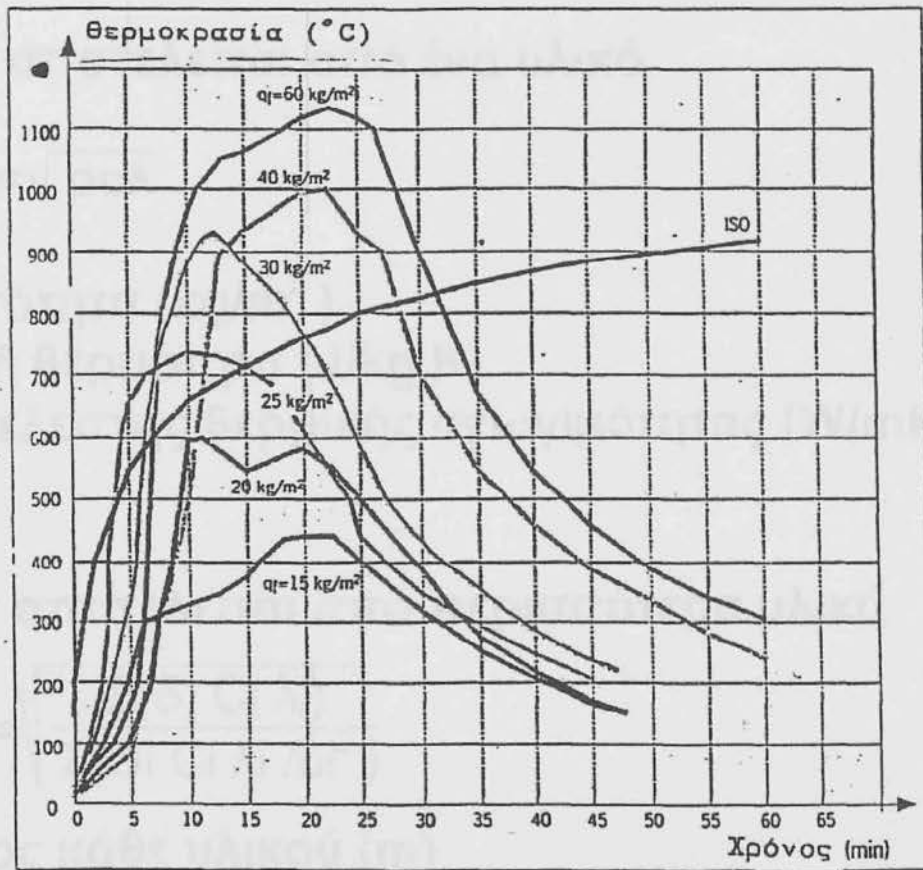
ΠΡΟΤΥΠΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ – ΧΡΟΝΟΥ (I.S.O.)



καμπύλη I.S.O.

| χρόνος<br>$t$ | Αύξηση<br>θερμοκρασίας<br>$\theta - \theta_0$ |
|---------------|---|
| min           | °C  |
| 5             | 556   |
| 10            | 659   |
| 15            | 718   |
| 30            | 821   |
| 60            | 925   |
| 90            | 986   |
| 120           | 1 029   |
| 180           | 1 090   |
| 240           | 1 133   |
| 360           | 1 193   |

Παραμετρικές  
καμπύλες  
φωτιάς για  
διάφορες  
πυκνότητες  
πυροθερμικού  
φορτίου



## Συντελεστής περιβλήματος

(α) όταν αποτελείται από ένα υλικό

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}$$

$\rho$  πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  ειδική θερμότητα ( $\text{J/kg K}$ )

$\lambda$  συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\text{W/mk}$ )

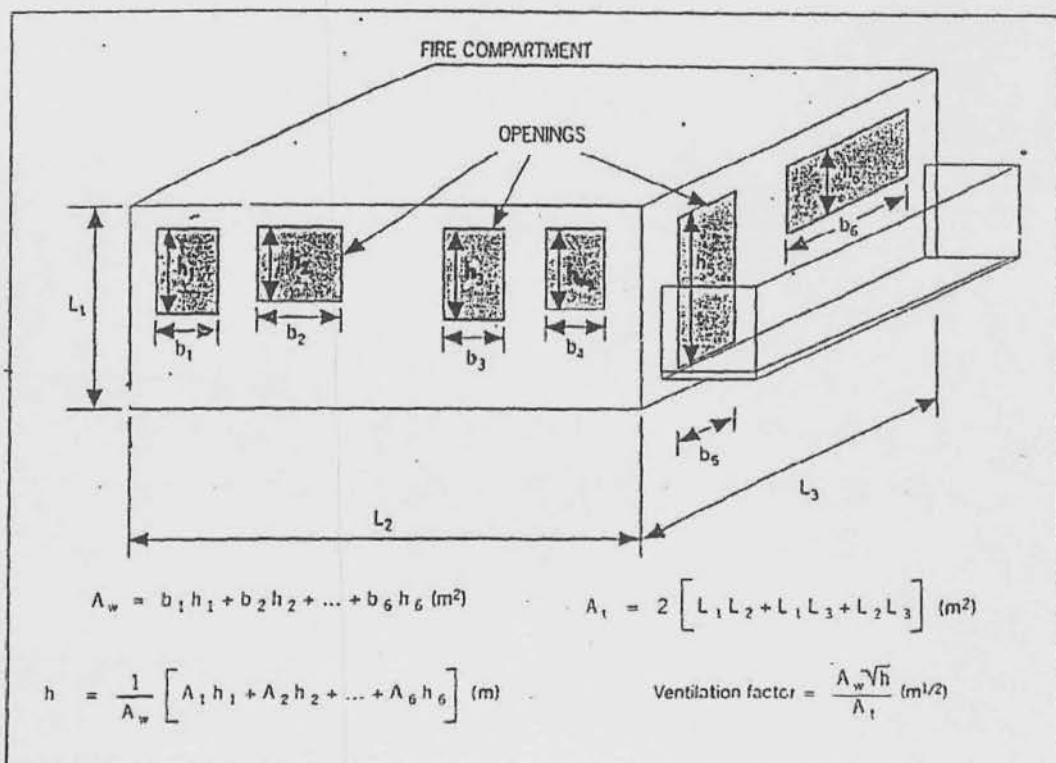
(β) όταν αποτελείται από περισσότερα υλικά

$$b = \sqrt{\frac{\sum (S_i C_i \lambda_i)}{\sum (S_i C_i \lambda_i / b_i^2)}}$$

$S_i$  πάχος κάθε υλικού (m)

$b_i$  ο συντελεστής  $b$  που του αντιστοιχεί

... επιφάνεια περιβλήματος (m<sup>2</sup>)



Παραμετρικές καμπύλες φωτιάς  
για διάφορες συνθήκες αερισμού

## Συντελεστής περιβλήματος

(α) όταν αποτελείται από ένα υλικό

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}$$

$\rho$  πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  ειδική θερμότητα ( $\text{J/kg K}$ )

$\lambda$  συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\text{W/mk}$ )

(β) όταν αποτελείται από περισσότερα υλικά

$$b = \sqrt{\frac{\sum (S_i C_i \lambda_i)}{\sum (S_i C_i \lambda_i / b_i^2)}}$$

$S_i$  πάχος κάθε υλικού (m)

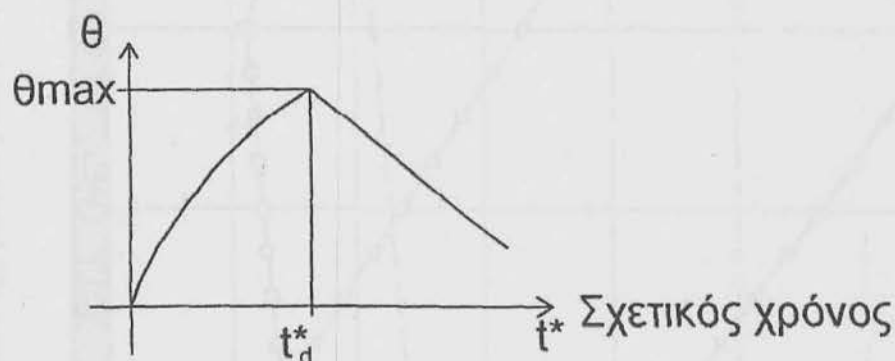
$b_i$  ο συντελεστής  $b$  που του αντιστοιχεί



## Παραμετρικές καμπύλες Θερμοκρασίας - Χρόνου (EC1 - Μέρος 1.2 - Παράρτημα Β)

Ανιών κλάδος

$$\theta_g = 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*})$$



όπου

$\theta_g$  Θερμοκρασία πυροδιαμερίσματος

$O$  Συντελεστής αερισμού

$\Gamma = (O/b)^2 / (0.04/1160)^2$ , Αδιάστατος συντελεστής

$b$  Συντελεστής περιβλήματος ( $J/m^2 s^{1/2} K$ )

$t^* = t * \Gamma$  (Ωρες)

$$t_d^* = (0.13 * 10^{-3} q_{td} \Gamma) / O$$

$q_{td}$  πυκνότητα πυροθερμικού φορτίου

Κατιών κλάδος

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_d^*) \quad t_d^* < 0.5$$

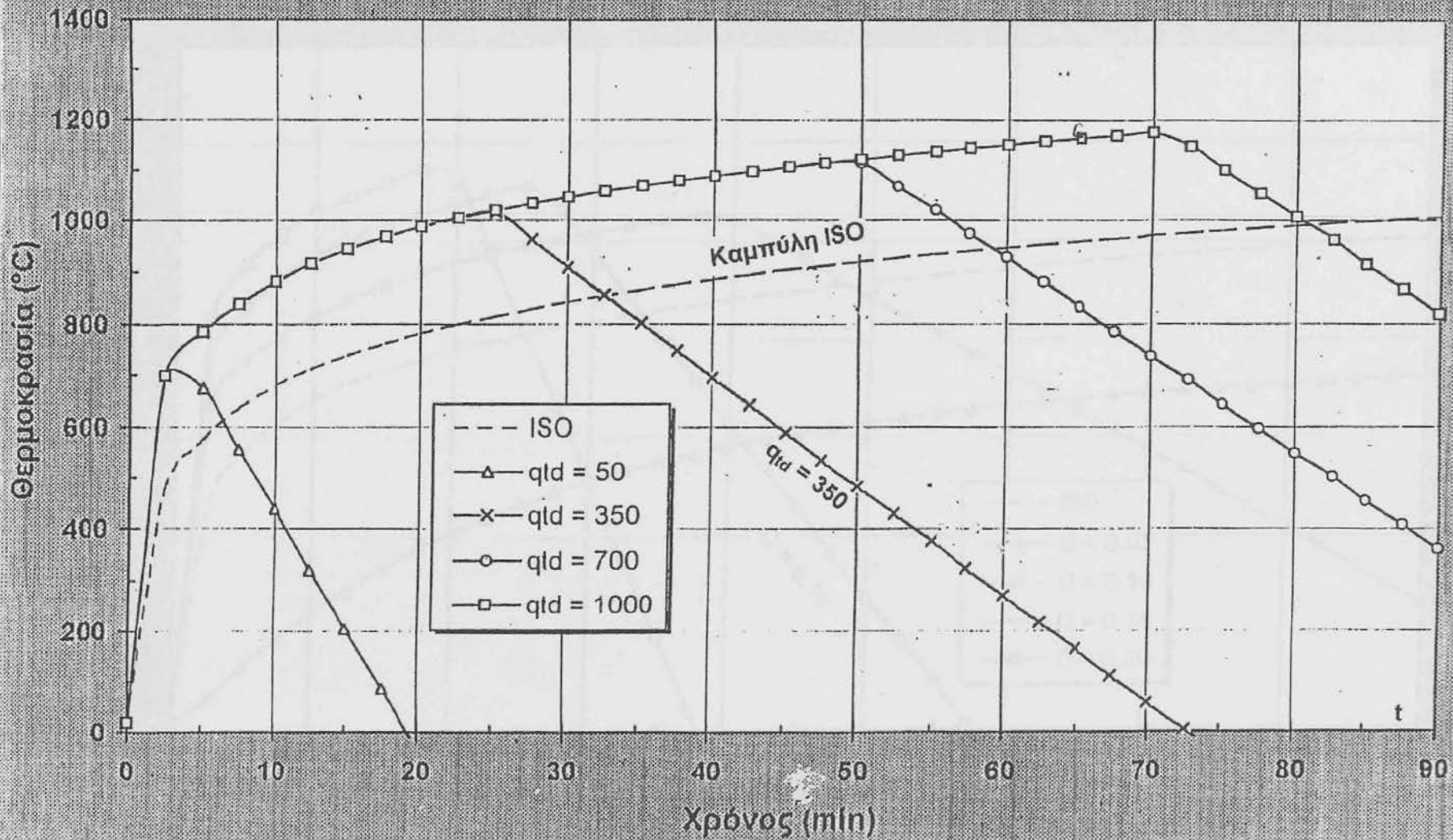
$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_d^*)(t - t_d^*) \quad 0.5 < t_d^* < 2$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_d^*) \quad t_d^* > 2$$

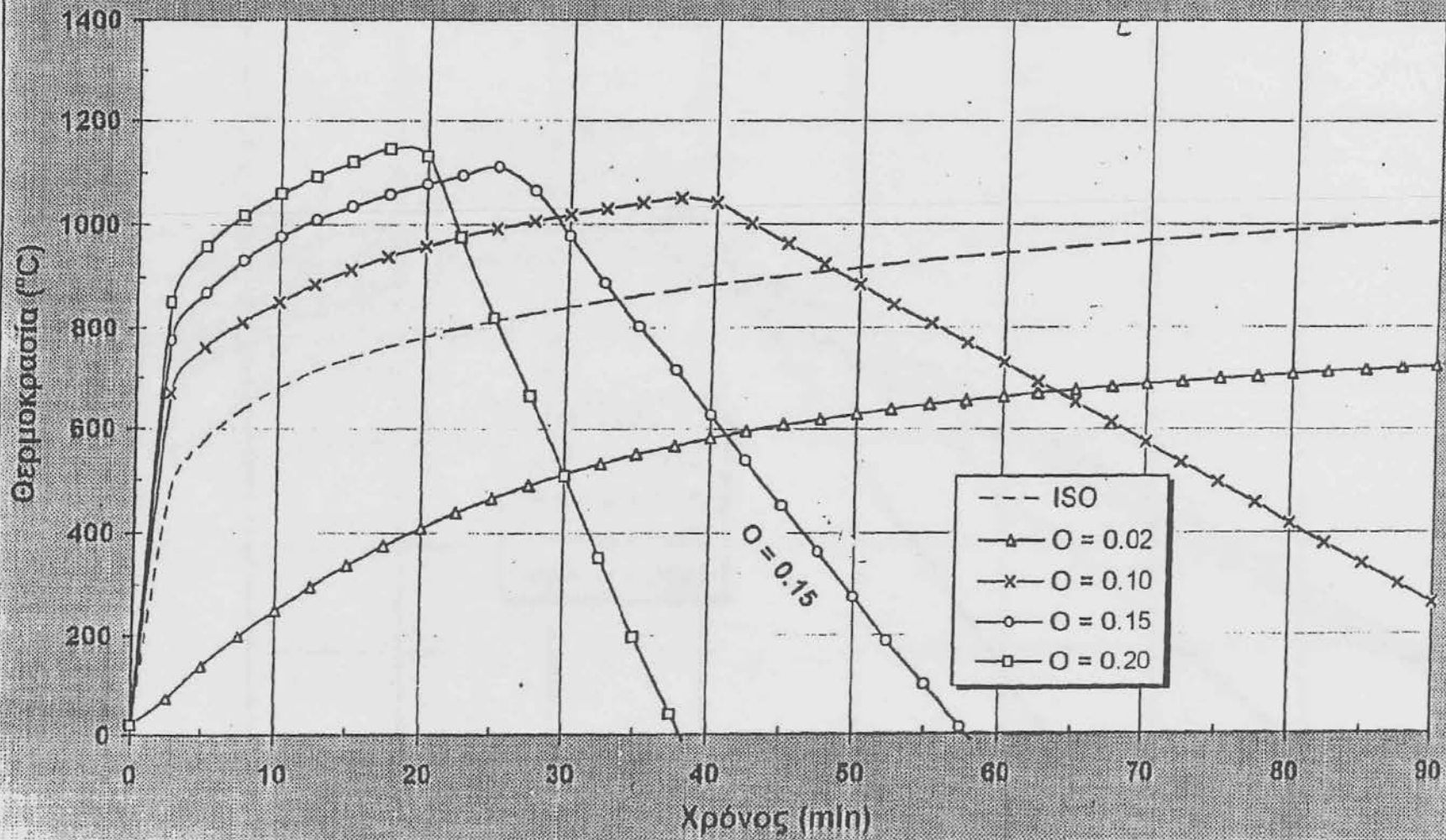
Περιοχή ισχύος

$$1000 \leq b \leq 2000, \quad 0.02 \leq O \leq 0.20, \quad 50 \leq q_{td} \leq 1000$$

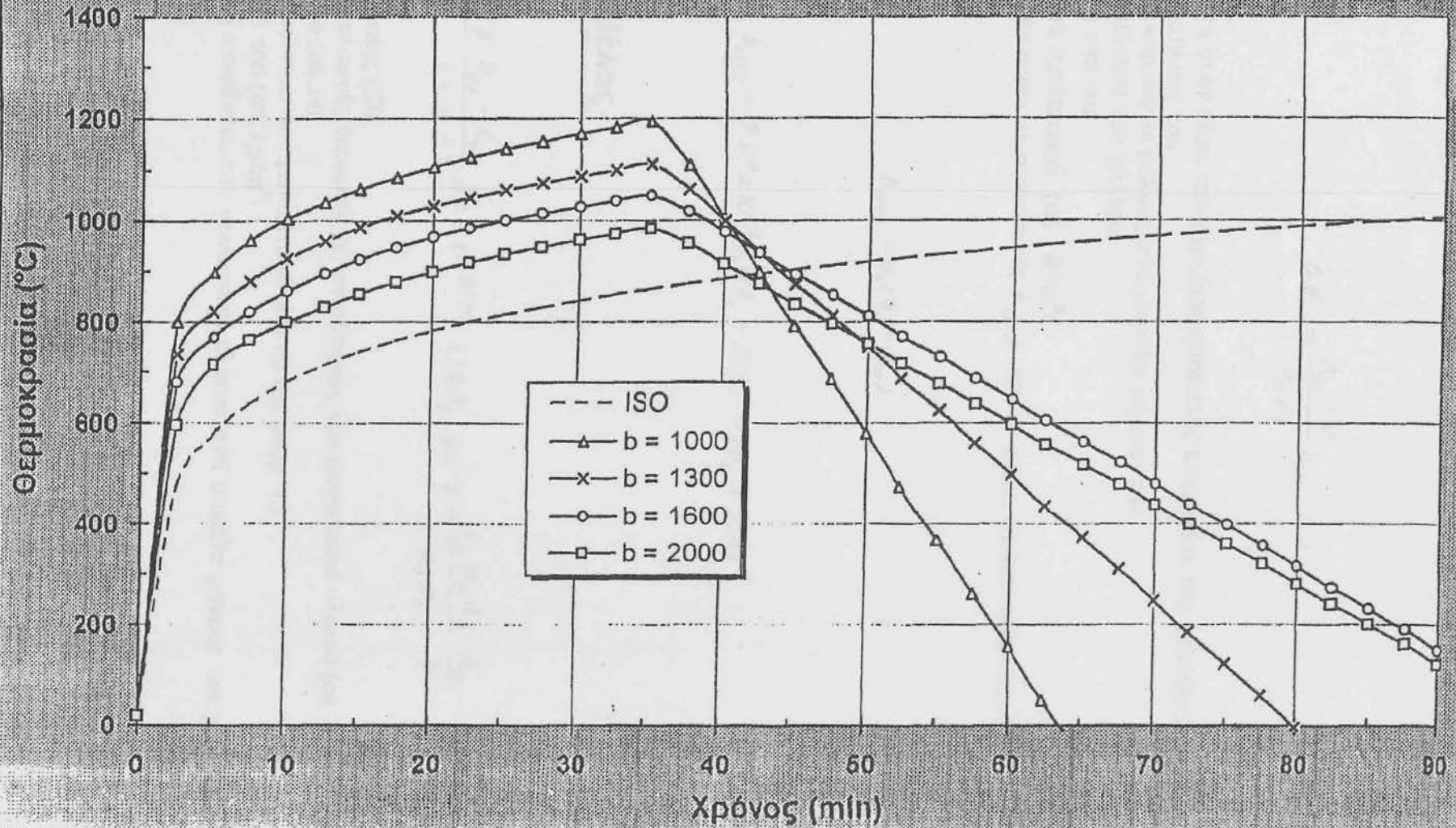
Παραμετρικές καμπύλες της θερμοκρασίας του αέρα σε συνάρτηση με το χρόνο για χαρακτηριστικές τιμές του ανηγμένου πυροθερμικού φορτίου  $q_{ld}$  ( $MJ/m^2$ ) και για σταθερές τιμές των συντελεστών  $b = 1500$  ( $J/m^2 s^{0,5}K$ ) και  $O = 0,11(m^{0,5})$ .



Παραμετρικές καμπύλες της θερμοκρασίας του αέρα σε συνάρτηση με το χρόνο για χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή αερισμού  $O$  ( $m^{0.5}$ ) και για σταθερές τιμές των συντελεστών  $b = 1500$  ( $J/m^2 s^{0.5} K$ ) και  $q_{id} = 500$  ( $MJ / m^2$ ).



Παραμετρικές καμπύλες της θερμοκρασίας του αέρα σε συνάρτηση με το χρόνο για χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή  $b$  ( $J/m^2 s^{0,6} K$ ) και για σταθερές τιμές των συντελεστών  $\alpha_{td} = 500$  ( $MJ/m^2$ ) και  $O = 0,11$  ( $m^{0,5}$ ).



## Μη Μονωμένο Μέλος

$$\Delta \theta_{\alpha,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t$$

του  
η εκτεθειμένη στον αέρα του πυροδιαμερίσματος επιφάνεια του χαλύβδινου μέλους ανά μονάδα μήκους του  
ο όγκος του παραπάνω μέλους ανά μονάδα μήκους του  
η ειδική θερμότητα του χάλυβα  
η πυκνότητά του και  
η θερμική ροή σχεδιασμού (σε  $W/m^2$ )  
οφειλόμενη εν μέρει σε συναγωγή ( $h_{net,c}$ ) και εν μέρει σε ακτινοβολία ( $h_{net,r}$ )

$$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

$$h_{net,r} = 5.67 \times 10^{-8} e_r [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

## Μονωμένο Μέλος

$$\theta_{\alpha,t} = \frac{\lambda_p (A_p / V)}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{\alpha,t}}{1 + \varphi / 3} \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t} \text{ με } \varphi = \frac{c_p \rho_p d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V}$$

Οι παραπάνω σχέσεις (10)  
είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού υλικού (σε  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )  
το πάχος του (σε  $m$ )  
η ειδική θερμότητα του μονωτικού υλικού (σε  $J/kg \cdot ^\circ C$ )  
η πυκνότητά του (σε  $kg/m^3$ )  
η εσωτερική επιφάνεια του μονωτικού υλικού ανά μονάδα μήκους του χαλύβδινου μέλους ( $m^2$ )

| <b>solids</b>               | <b>(MJ/kg)</b> | <b>liquids</b>    | <b>(MJ/kg)</b> |
|-----------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| anthracite                  | 34             | gasoline          | 44             |
| asphalt                     | 41             | diesel oil        | 41             |
| bitumen                     | 42             | linseed oil       | 39             |
| cellulose                   | 17             | methanol          | 20             |
| charcoal                    | 35             | paraffin oil      | 41             |
| clothes                     | 19             | spirits           | 29             |
| coal, coke                  | 31             | tar               | 38             |
| cork                        | 29             | benzene           | 40             |
| cotton                      | 18             | benzyl alcohol    | 33             |
| grain                       | 17             | ethyl alcohol     | 27             |
| grease                      | 41             | isopropyl alcohol | 31             |
| kitchen refuse              | 18             |                   |                |
| leather                     | 19             |                   |                |
| linoleum                    | 20             |                   |                |
| paper, cardboard            | 17             |                   |                |
| paraffin wax                | 47             |                   |                |
| foam rubber                 | 37             |                   |                |
| rubber isoprene             | 45             |                   |                |
| rubber tire                 | 32             |                   |                |
| silk                        | 19             |                   |                |
| straw                       | 16             |                   |                |
| wood                        | 19             |                   |                |
| wool                        | 23             |                   |                |
| particle board              | 18             |                   |                |
| <b>plastics</b>             | <b>(MJ/kg)</b> | <b>gases</b>      | <b>(MJ/kg)</b> |
| ABS                         | 36             | acetylen          | 48             |
| acrylic                     | 28             | butane            | 46             |
| celluloid                   | 19             | carbon monoxide   | 10             |
| epoxy                       | 34             | hydrogen          | 120            |
| melamin resin               | 18             | propane           | 46             |
| phenolformaldehyde          | 29             | methane           | 50             |
| polyester                   | 31             | ethanol           | 27             |
| polyester, fibre reinforced | 21             |                   |                |
| polyethylene                | 44             |                   |                |
| polystyrene                 | 40             |                   |                |
| petroleum                   | 41             |                   |                |
| polyisocyanurate foam       | 24             |                   |                |
| polycarbonate               | 29             |                   |                |
| polypropylene               | 43             |                   |                |
| polyurethane                | 23             |                   |                |
| polyurethane foam           | 26             |                   |                |
| polyvenylchloride           | 17             |                   |                |
| ureaformaldehyde            | 15             |                   |                |
| ureaformaldehyde foam       | 14             |                   |                |

Table D.1: Net calorific value  $H_u$  of combustible materials

EUROPEAN CONVENTION OF CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS)

ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΦΩΤΙΑΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μεταβολή της θερμοκρασίας μη μονωμένου μέλους για διάφορες τιμές του συντελεστή διατομής

| $\epsilon_r = 0.5$ |                            | section factor $F/V$ [ $m^{-1}$ ] |     |     |     |     |      |      |      |      |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| time $t$<br>[min]  | gas temp.<br>$T_i$<br>[°C] | 10                                | 20  | 30  | 50  | 100 | 150  | 200  | 250  | 300  |
| 0                  | 20                         | 20                                | 20  | 20  | 20  | 20  | 20   | 20   | 20   | 20   |
| 15                 | 739                        | 95                                | 164 | 226 | 333 | 514 | 612  | 664  | 691  | 705  |
| 30                 | 842                        | 215                               | 367 | 484 | 637 | 781 | 814  | 824  | 829  | 831  |
| 45                 | 902                        | 343                               | 552 | 682 | 808 | 877 | 888  | 893  | 895  | 896  |
| 60                 | 945                        | 467                               | 700 | 814 | 897 | 930 | 936  | 939  | 940  | 941  |
| 75                 | 979                        | 580                               | 809 | 898 | 949 | 967 | 972  | 974  | 975  | 976  |
| 90                 | 1006                       | 678                               | 859 | 954 | 985 | 997 | 1000 | 1002 | 1003 | 1003 |

$$\epsilon_{res}=0,5, \quad \Delta t=30 \text{ sec}, \quad c_a=520 \text{ J/kg K}, \quad \alpha_c=25\text{W/m}^2\text{K}$$

EUROPEAN CONVENTION OF CONSTRUCTIONAL STEELWORK (ECCS)

ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΕΝΑΝΤΙ ΦΩΤΙΑΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μεταβολή της θερμοκρασίας μονωμένου μέλους για διάφορες τιμές του συντελεστή διατομής και των στοιχείων του μονωτικού υλικού

| $dI/\lambda_1 = 0,05$<br>$\left  \frac{20}{w} \frac{^\circ C}{m} \right $ |   | section factor $F_d/v$ [ $m^{-1}$ ] |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|---|---|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| time $t$<br>[min]   | qantemp.<br>$\frac{v}{t}$<br>[ $^\circ C$ ] | 10                                  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300  | 350  | 400  |
| 0   | 20  | 20                                  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20   | 20   | 20   |
| 15  | 739   | 40                                  | 60  | 78  | 114 | 193 | 259 | 315 | 363 | 403  | 439  | 469  |
| 30  | 842   | 68                                  | 112 | 153 | 226 | 368 | 467 | 540 | 595 | 636  | 669  | 695  |
| 45  | 902   | 98                                  | 167 | 220 | 330 | 505 | 612 | 683 | 732 | 767  | 792  | 811  |
| 60  | 945   | 129                                 | 221 | 298 | 421 | 611 | 716 | 780 | 821 | 849  | 868  | 882  |
| 75  | 979   | 160                                 | 273 | 363 | 499 | 694 | 793 | 850 | 884 | 906  | 921  | 931  |
| 90  | 1006  | 191                                 | 322 | 423 | 568 | 762 | 853 | 902 | 931 | 948  | 960  | 968  |
| 105   | 1029  | 222                                 | 368 | 477 | 628 | 817 | 901 | 943 | 967 | 981  | 991  | 997  |
| 120   | 1049  | 251                                 | 411 | 527 | 688 | 864 | 940 | 977 | 997 | 1009 | 1016 | 1021 |

(b)

| $dI/\lambda_1 = 0,10$<br>$\left  \frac{20}{w} \frac{^\circ C}{m} \right $ |   | section factor $F_d/v$ [ $m^{-1}$ ] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|---|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| time $t$<br>[min]   | qantemp.<br>$\frac{v}{t}$<br>[ $^\circ C$ ] | 10                                  | 20  | 30  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| 0   | 20  | 20                                  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  |
| 15  | 739   | 32                                  | 43  | 54  | 76  | 126 | 172 | 212 | 249 | 283 | 313 | 341 |
| 30  | 842   | 48                                  | 74  | 99  | 146 | 247 | 327 | 393 | 447 | 493 | 531 | 564 |
| 45  | 902   | 65                                  | 107 | 146 | 216 | 353 | 454 | 529 | 588 | 634 | 671 | 701 |
| 60  | 945   | 83                                  | 140 | 192 | 281 | 445 | 555 | 633 | 690 | 733 | 767 | 793 |
| 75  | 979   | 102                                 | 173 | 237 | 342 | 523 | 637 | 714 | 768 | 807 | 837 | 860 |
| 90  | 1006  | 120                                 | 206 | 279 | 398 | 591 | 705 | 779 | 829 | 865 | 891 | 910 |
| 105   | 1029  | 139                                 | 238 | 320 | 449 | 649 | 762 | 832 | 878 | 910 | 933 | 949 |
| 120   | 1049  | 158                                 | 268 | 359 | 496 | 700 | 810 | 876 | 919 | 947 | 967 | 981 |

Table c-6: continued.

(c)



## ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3

### ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΔΡΑΣΕΩΝ

| Δράση  | Ψ0  | Ψ1 | Ψ2  |
|--|-----|----|-----|
| 1 Φορτία Χρήσης  |     |    |     |
| 1.1. Κατοικίες, γραφεία, καταστήματα, ξενοδοχεία, νοσοκομεία   | 0,6 |    | 0,3 |
| 1.2. Χώροι συχνής συνάθροισης προσώπων (σχολεία, θέατρα, στάδια κλπ.)                                  | 0,8 |    | 0,5 |
| 1.3. Χώροι στάθμευσης  | 0,9 |    | 0,6 |
| 1.4. Χώροι μακροχρόνιας αποθήκευσης (βιβλιοθήκες, αρχεία, αποθήκες, δεξαμενές, σιλό, υδατόπυργοι κλπ.) | 1,0 |    | 0,8 |
| 2. Άνεμος  | 0,6 |    | 0   |
| 3. Χιόνι (μη βατές στέγες)   | 0,6 |    | 0,3 |
| Χιόνι (βατές στέγες)   | 0,6 |    | 0,0 |

### Συνθήκες φωτιάς (τυχηματικός συνδυασμός)

$$\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 1:ΕΛΑΧΙΣΤΟΙ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (Π.Δ.71/88)

| Κατηγορία κτιρίου  | Μονόροφα       | Πολυόροφα | Υπόγεια | Εγκατάσταση<br>καταιογιστήρων<br>μειωτικός<br>συντελεστής |
|--------------------|----------------|-----------|---------|---|
| <b>Βιομηχανίες</b> |                |           |         |   |
| Z1                 | χωρίς απαίτηση | 60 λ.     | 120 λ.  | 0,5   |
| Z2                 | 60 λεπτά       | 90 λ.     | 120 λ.  | 0,6   |
| Z3                 | 60 λεπτά       | 120 λ.    | 180 λ.  | 0,7   |
| <b>Αποθήκες</b>    |                |           |         |   |
| Z1                 | 60 λεπτά       | 90 λ.     | 120 λ.  | 0,5   |
| Z2                 | 120 λεπτά      | 80 λ.     | 180 λ.  | 0,5   |
| Z3                 | 180 λεπτά      | 140 λ.    | 240 λ.  | 0,5   |

για αποθήκες

|    |           |              |         |             |                     |
|----|-----------|--------------|---------|-------------|---------------------|
| Z1 | πυκνότητα | πυροθερμικού | φορτίου | $\leq 1000$ | MJ / m <sup>2</sup> |
| Z2 | "         | "            | "       | 1000-2000   | "                   |
| Z3 | "         | "            | "       | $\geq 2000$ | "                   |

για βιομηχανίες

καθορισμός κατηγοριών Z1,Z2,Z3 κατά την απόφαση 17483/78 το Υπουργείου Βιομηχανίας

Κρίσιμη θερμοκρασία χάλυβα για διάφορες τιμές του συντελεστή αξιοποίησης  $\mu_0$

| $\mu_0$ | $\theta_{a,cr}$ | $\mu_0$ | $\theta_{a,cr}$ | $\mu_0$ | $\theta_{a,cr}$ |
|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| 0,22    | 711             | 0,42    | 612             | 0,62    | 549             |
| 0,24    | 698             | 0,44    | 605             | 0,64    | 543             |
| 0,26    | 685             | 0,46    | 598             | 0,66    | 537             |
| 0,28    | 674             | 0,48    | 591             | 0,68    | 531             |
| 0,30    | 664             | 0,50    | 585             | 0,70    | 526             |
| 0,32    | 654             | 0,52    | 578             | 0,72    | 520             |
| 0,34    | 645             | 0,54    | 572             | 0,74    | 514             |
| 0,36    | 636             | 0,56    | 566             | 0,76    | 508             |
| 0,38    | 628             | 0,58    | 560             | 0,78    | 502             |
| 0,40    | 620             | 0,60    | 554             | 0,80    | 496             |

$$\theta_{a,w} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

$\mu_0 = \frac{\text{ένταση από το συνδυασμό πυρκαγιάς}}{\text{αντοχή σχεδιασμού στους } 0 \text{ } ^\circ\text{C}}$

## ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΥΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ



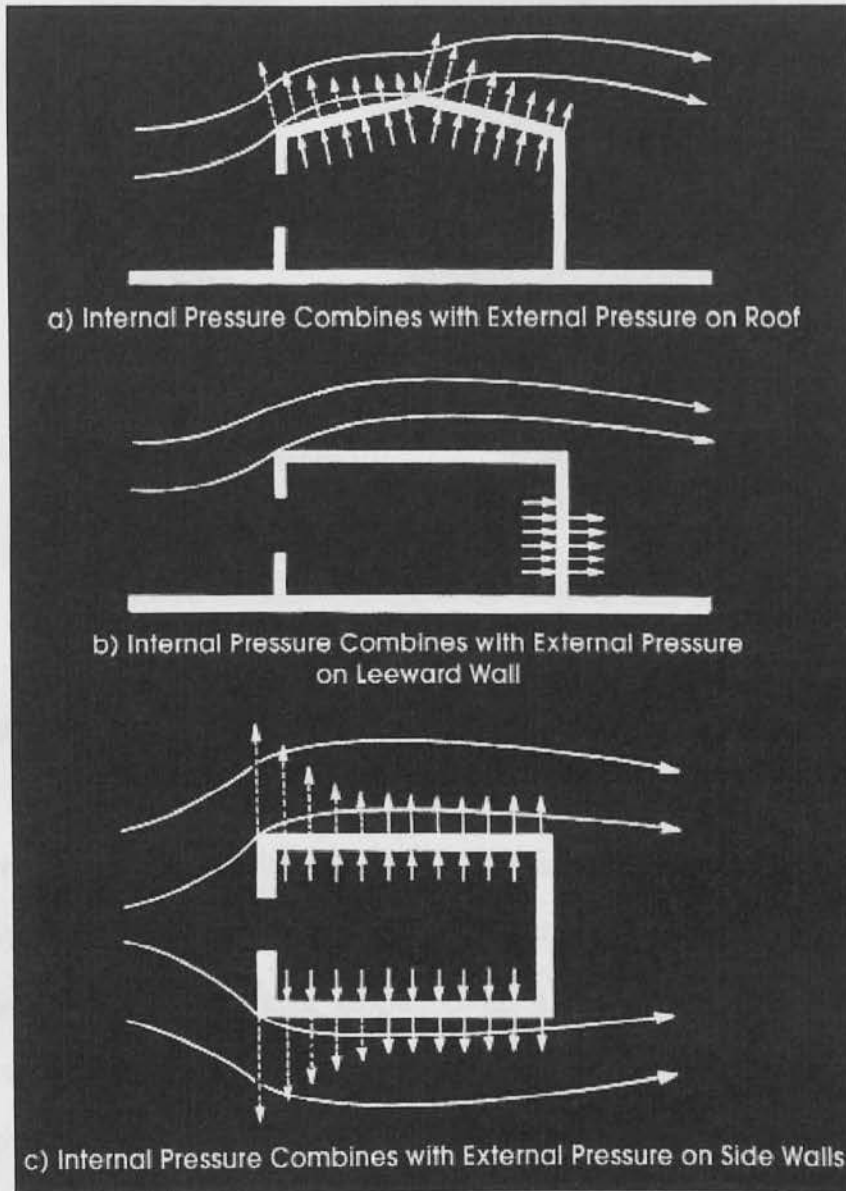
Εμπορικά κέντρα, αποθήκες, σχολεία, συγκροτήματα αιθουσών προβολής ταινιών είναι κατασκευές που απαντούνται σε κάθε πόλη. Ένας αριθμός από αυτές τις κατασκευές είναι μεταλλικές και συνήθως είναι από έναν έως τρεις ορόφους με εξωτερικούς τοίχους από μεταλλική επένδυση ή οπτοπλιθοδομή. Όλες αυτές οι κατασκευές είναι ευπαθείς σε ανέμους μεγάλης εντάσεως.



Τρόποι αστοχίας :

- **Πόρτες, παράθυρα, φεγγίτες**

Ο πιο κοινός τρόπος αστοχίας στις μεταλλικές κατασκευές σε ανέμους μεγάλης έντασης είναι μεγάλα ανεπαρκώς καλυμμένα ανοίγματα όπως παράθυρα και φεγγίτες. Όταν φυσάει αέρας και βρεί δίοδο στο εσωτερικό της κατασκευής η πίεση ανεβαίνει δραματικά εσωτερικά και ξεπερνάει την ικανότητα των στοιχείων της να φέρουν τα φορτία που δημιουργούνται. Η πίεση μη έχοντας πως να εξουδετερωθεί μπορεί να εκτοπίσει προς τα έξω τους τοίχους ή την οροφή σε συνδυασμό με τον εξωτερικό αέρα που προσπαθεί να αφαιρέσει τους τοίχους και την οροφή οδηγεί στην καταστροφή της κατασκευής και του περιεχομένου της.



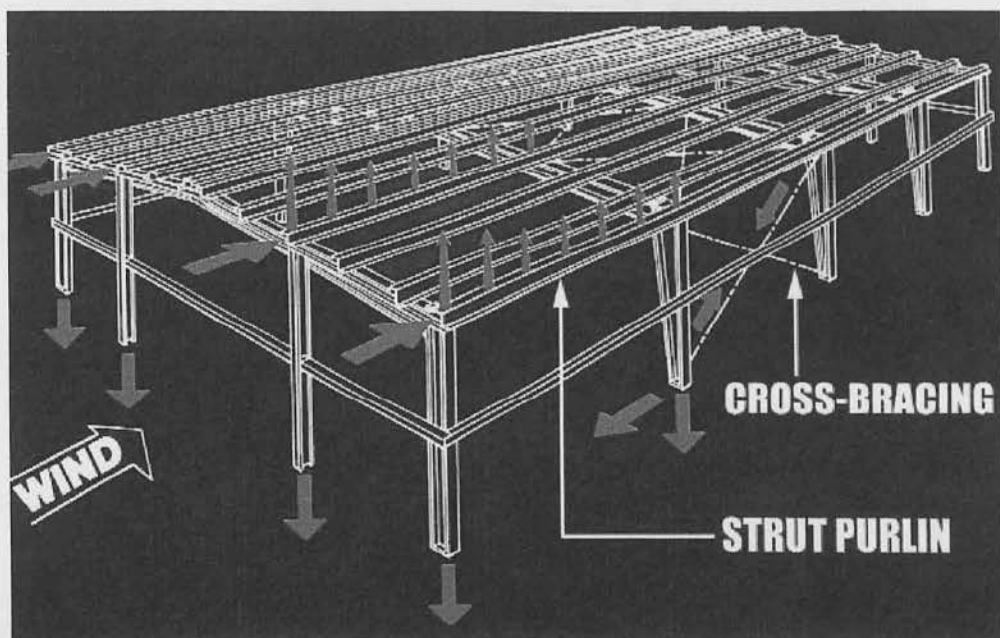
Μηχανισμός αστοχίας λόγω δημιουργίας υποπίεσης στο εσωτερικό της κατασκευής



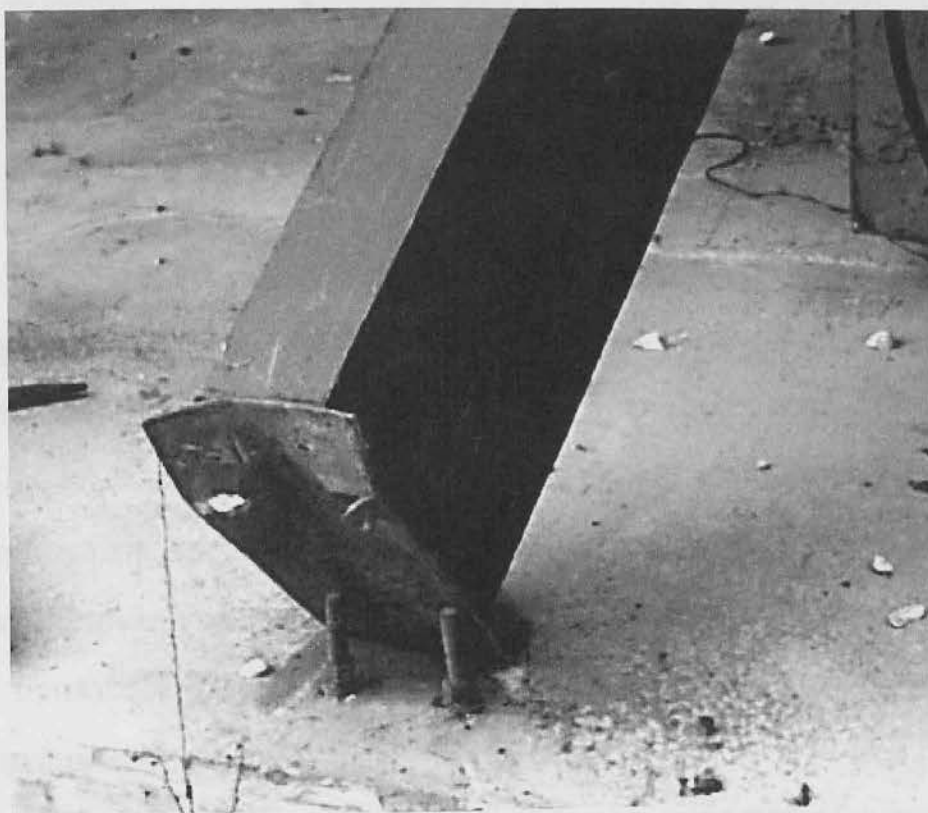
- **Περιμετρικοί τοίχοι**

Άλλος ένας τρόπος αστοχίας είναι η καταστροφή των εξωτερικών τοίχων ή η αστοχία των περιμετρικών πλαισίων τα οποία μπορούν να παρασύρουν και άλλα τμήματα του σκελετού λόγω της αλληλεπίδρασής τους. Αυτό ονομάζεται το φαινόμενο ντόμινο. Μερικές φορές άνεμοι μεγάλης εντάσεως μπορούν να «ξεριζώσουν» ένα περιμετρικό πλαίσιο από τα θεμέλια του κόβοντας τα αγκύρια που το κρατάνε πακτωμένο στη θεμελίωσή ενώ άλλες φορές στραβώνουν και ξεριζώνουν τα αγκύρια. Οι περισσότερες όμως αστοχίες περιμετρικών τοίχων οφείλονται σε λυγισμό τεγίδων αντιστήριξης. Σύμφωνα με τον (MBMA) σύλλογο κατασκευαστών μεταλλικών κτιρίων, αυτός ο τύπος αστοχίας εμφανίζεται σε κατασκευές που χρονολογούνται πριν το 1980 που οι πιέσεις του αέρα στις άκρες μιας κατασκευής δεν είχαν κατανοηθεί πλήρως. Οι πιο καινούριες κατασκευές δεν είναι απρόσβλητες από τέτοιου είδους αστοχίες λόγω του ότι κατασκευάζονται σύμφωνα με τις κατά τόπους κατασκευαστικές

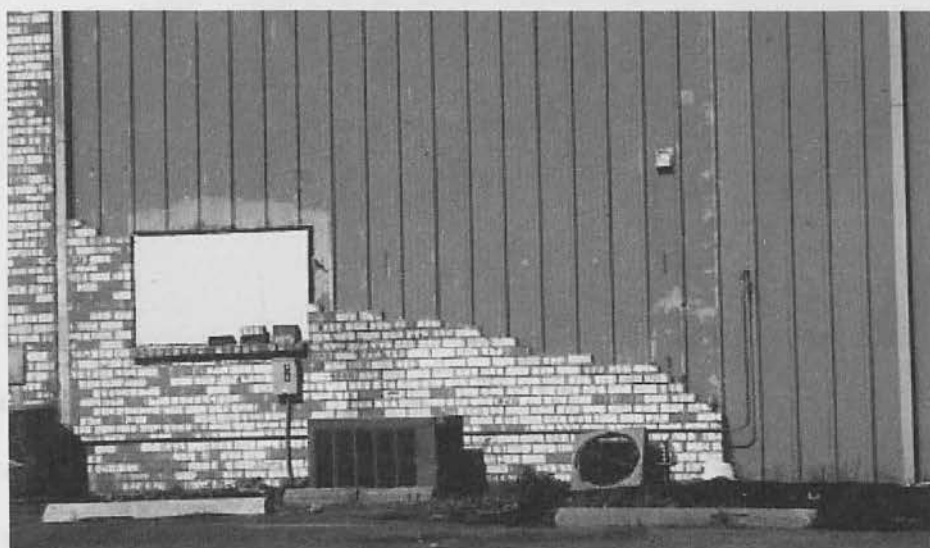
απαιτήσεις και κανονισμούς που μπορεί να μην ενσωματώνουν σχεδιαστικά στάνταρτς για μεγάλης έντασης ανέμους.(φωτ.1)



Μηχανισμός λυγισμού τεγίδων λόγω ανυψωτικών πιέσεων που εφαρμόζονται στην επιφάνεια της σκεπής και αξονικό φορτίο λόγω πίεσης ανέμου στην προσπίπτουσα επιφάνεια







- **Μη φέρουσες τοιχοποιίες-επικαλύψεις**

Οι αρχιτέκτονες για να πετύχουν τα αισθητικά αποτελέσματα χρησιμοποιούν γυαλί, ξύλο, αλουμίνιο ή και οπτοπλινθοδομές ως επικάλυψη. Δυστυχώς η σωστή σύνδεση της τοιχοποιίας με τον μεταλλικό σκελετό είναι συχνά ελάχιστη ή μηδαμινή. Έτσι συχνά τέτοιες επικαλύψεις αποκολλούνται λόγω δημιουργίας μεγάλων υποπίεσεων στο εξωτερικό της κατασκευής κατά την διάρκεια μεγάλων ανέμων.

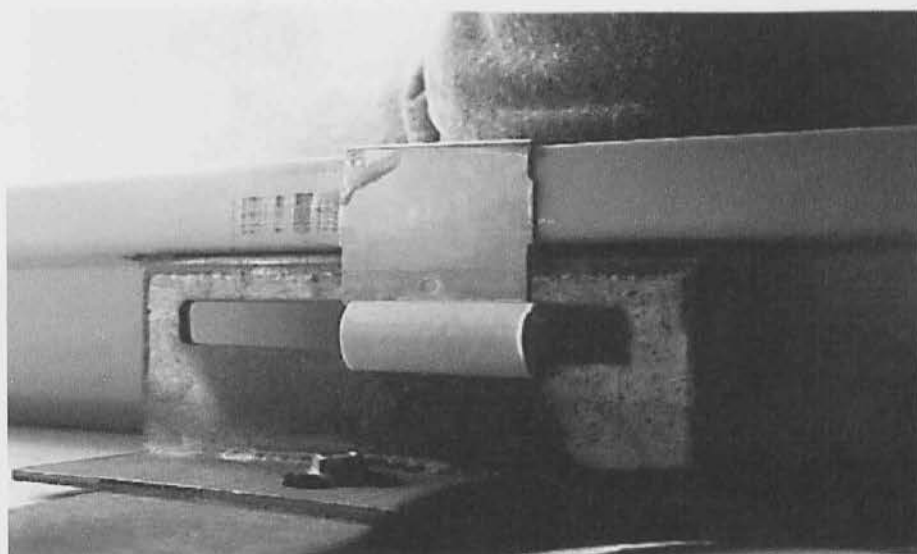
Κατασκευές με τέτοιες επικαλύψεις πρέπει να κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν μια σχετική κίνηση μεταξύ επικάλυψης και σκελετού. Έχουν παρουσιαστεί αστοχίες όπου ο μεταλλικός σκελετός ήταν ανέπαφος αλλά οι

τοιχοποιίες βρέθηκαν γκρεμισμένες. Οι τοίχοι φαίνεται ότι ήταν τελείως αστήριχτοι χωρίς κάποια σύνδεση με τον μεταλλικό σκελετό. Σε τέτοιες περιπτώσεις δεν μπορεί να προσδιοριστεί αν ο άνεμος δημιούργησε τέτοια υποπίεση που γκρέμισε τους τοίχους ή αν η μετατοπίσεις του σκελετού ήταν αρκετές για να προκαλέσουν κάτι τέτοιο. Όποιος και αν είναι ο τρόπος αστοχίας είναι εμφανές ότι οι συνδέσεις μεταξύ ενός εύκαμπτου μεταλλικού σκελετού και μιας άκαμπτης επικάλυψης χρειάζεται προσοχή.

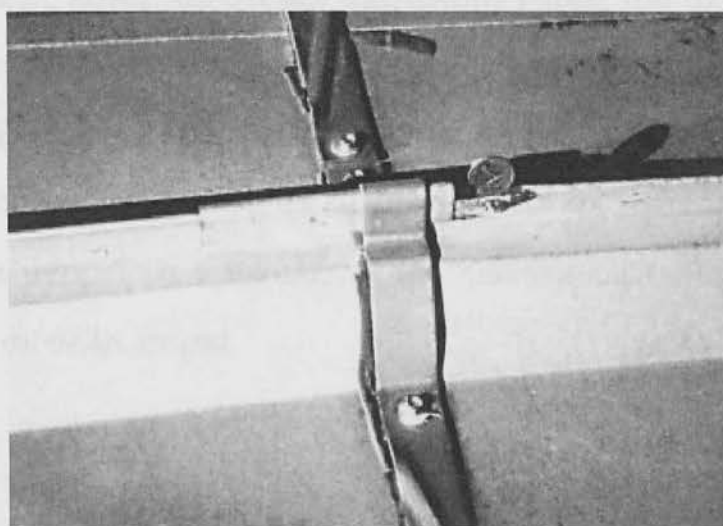


- **Σκεπές**

Οι σκεπές είναι άλλο ένα ευάλωτο σημείο. Οι υψηλης εντάσεως άνεμοι μπορούν να ανοίξουν σκεπές όπως ένα ανοιχτήρι μια κονσέρβα (τουλάχιστον σε κατασκευές πρι το 1980). Τη σήμερα ημέρα το σκέπασμα των σκεπών μεταλλικών και άλλων κατασκευών γίνεται με ένα σύστημα που ονομάζεται SSMRS (Standing Seam Metal Roof System). Σε αυτό το σύστημα οι επιφάνειες που αποτελούν τη σκεπή είναι προσαρτημένες σε συρόμενα clip τα οποία τοποθετούνται στον κατα μήκη άξονα των τεγίδων και κολλούνται σε αυτές αφήνοντας τη σκεπή να «επιπλέει» ελεύθερα ή ακόμα να διαστέλλεται ή να συστέλλεται λόγω της ηλιακής θερμότητας.



Παρόλο που το σύστημα SSMRS έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε ανέμους υψηλών εντάσεων η αστοχία τέτοιων συστημάτων έχει γίνει κοινό φαινόμενο ειδικότερα σε κατασκευές τεσσάρων-πέντε χρόνων. Αυτό γίνεται λόγω της υποβάθμισης της κατασκευής με το χρόνο. Ποιο συγκεκριμένα τα clip σκουριάζουν οι φθείρονται οπότε η λειτουργία τους κρίνεται αναποτελεσματική.

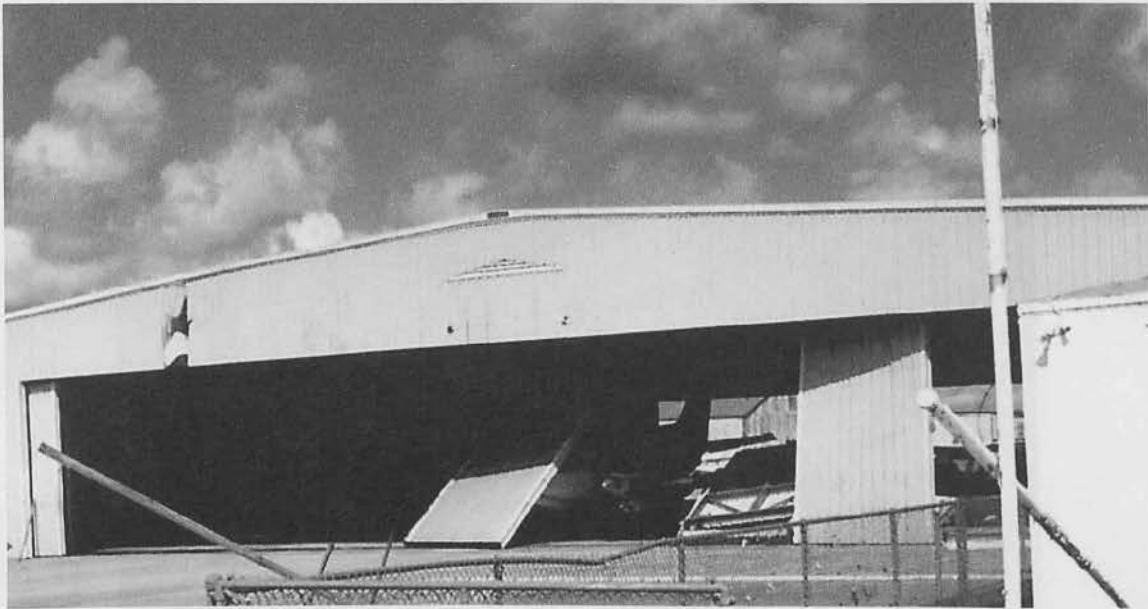


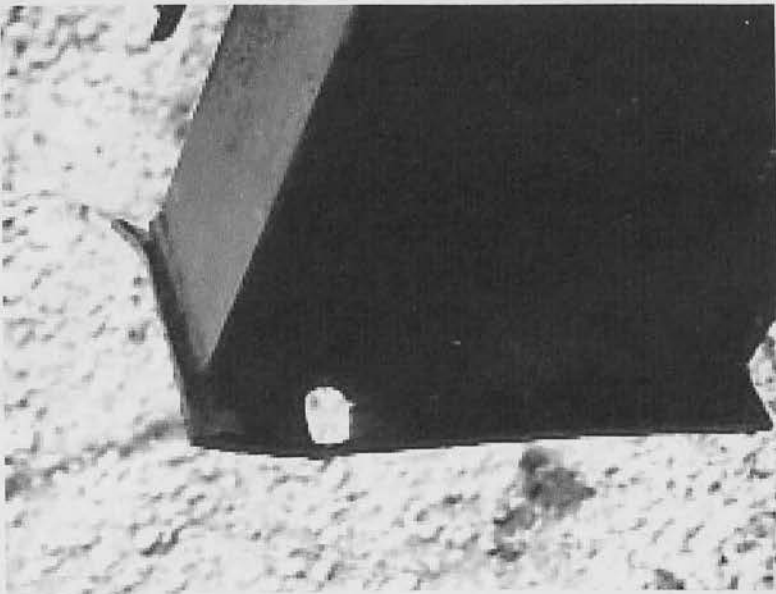
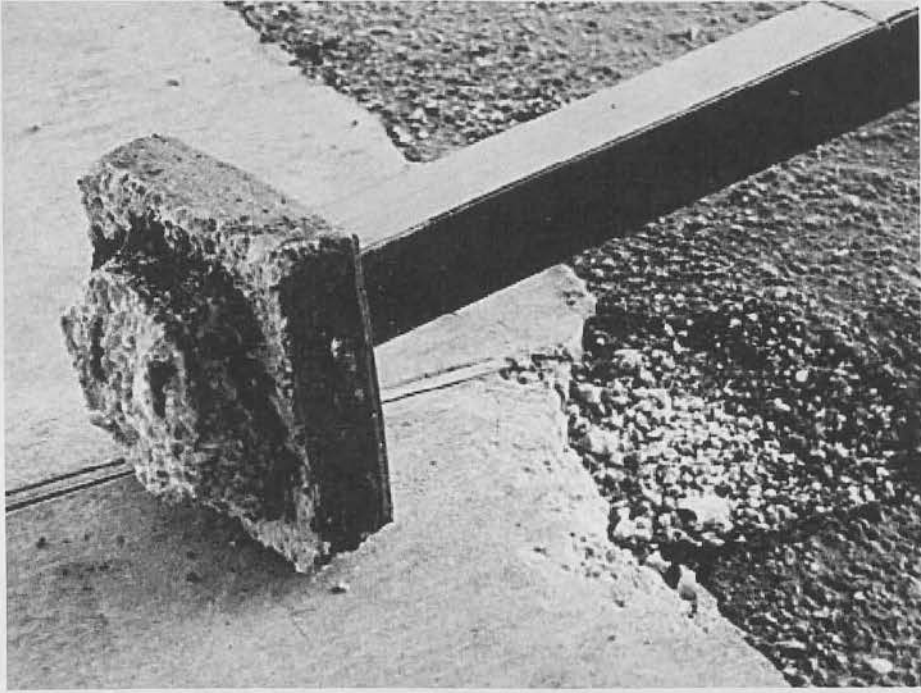


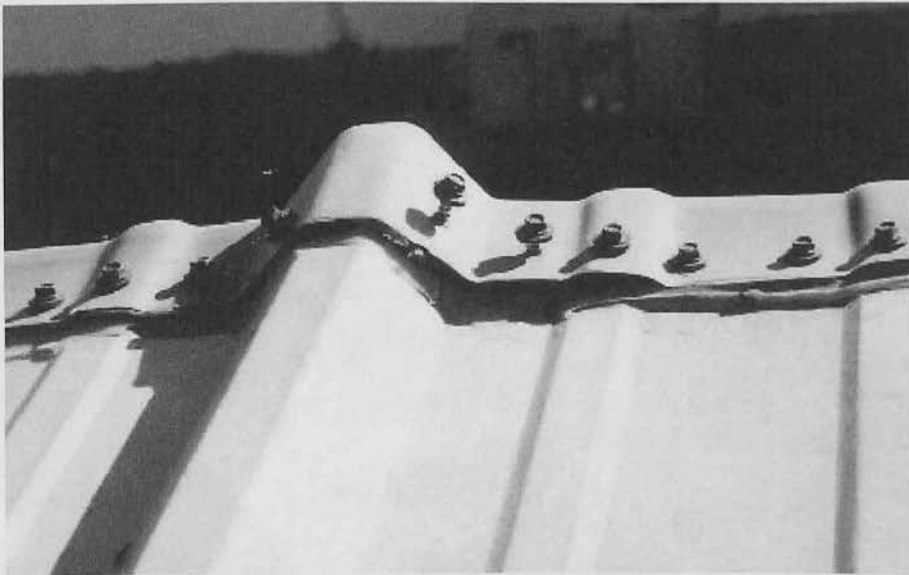
- **Μαρκίζες σκίαστρα**

Οι μαρκίζες και τα σκίαστρα είναι άλλο ένα σημείο ανησυχίας επειδή δεν μελετούνται επαρκώς λόγω του ότι δεν αποτελούν μέρος του σκελετού. Όταν ο άνεμος φυσάει απευθείας ένα στέγαστρο οι πιέσεις μπορεί να είναι τέτοιες που να το βγάλουν από τη θέση του. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα θα επηρεαστεί η στατικότητα του κτιρίου (εκτός αν αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία της σκεπής) αλλά μπορεί να προκαλέσει τραυματισμούς σε ανθρώπους αλλά και υλικές ζημιές σε άλλα κτίρια.

**ΓΕΝΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**







### Συμπεράσματα

Σε γενικά πλαίσια οι μεταλλικές κατασκευές είναι αρκετά ανθεκτικές σε υψηλής εντάσεως ανέμους με βασική προϋπόθεση την συντήρησή τους και την αποφυγή κατασκευαστικών λαθών. Η Ελλάδα όντας μια χώρα που δεν έχει τυφώνες και τρομακτικές καταιγίδες οι υψηλής εντάσεως άνεμοι θεωρούνται μικρή πιθανότητα κινδύνου. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι καποιες προφυλάξεις δεν πρέπει να παίρνονται ώστε να αποφευχθούν υλικές ζημιές και ανθρώπινες απώλειες.







Η κατάρρευση των Δίδυμων  
Πύργων στη Ν. Υόρκη  
9-11-2001

Ι. Βάγιας  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
ΕΜΠ

**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ**  
Γραφείο Επιστημονικού Έργου

(5)

**ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ**  
**ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**

**2η ΔΙΑΛΕΞΗ**

**18 ΜΑΡΤΙΟΥ 2003**

**ΘΕΜΑ:** « Η κατάρρευση των Δίδυμων Πύργων στη Ν. Υόρκη »

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:** **Ι. ΒΑΓΙΑΣ**, Καθηγητής ΕΜΠ, Μέλος της ΕΕΕ Π.Μ.

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2003**

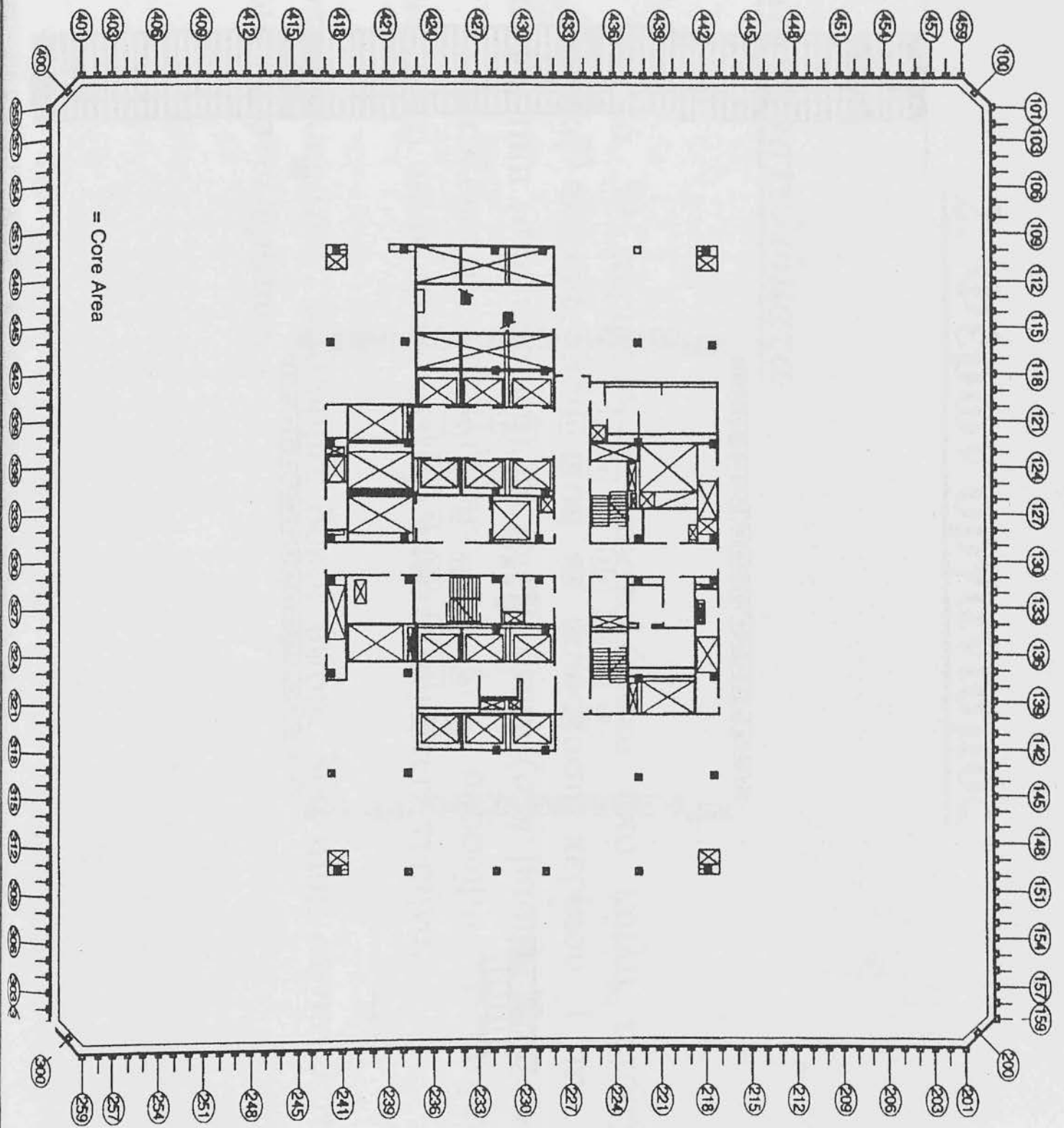
# 1. Περιγραφή κτιρίων

Το όλο συγκρότημα του World Trade Center αποτελείται από 7 κτίρια, τα ονομαζόμενα WTC 1 έως 7. Τα κύρια κτίρια είναι οι «δίδυμοι» πύργοι, WTC 1 (βόρειος πύργος) και WTC 2 (νότιος πύργος), αποτελούμενοι από 110 ορόφους και 7 στάθμες υπογείων.

|       | Διαστάσεις κάτοψης | Ύψος κτιρίου | Ύψος κεραίας | Επιφάνεια πυρήνα υπηρεσιών (σκάλες, ασανσέρ) |
|-------|--------------------|--------------|--------------|--|
| WTC 1 | 62,8 x 62,8 m      | 415 m        | 109 m        | 42 x 26 m                                    |
| WTC 2 | 62,8 x 62,8 m      | 413 m        | -            | 42 x 26 m                                    |

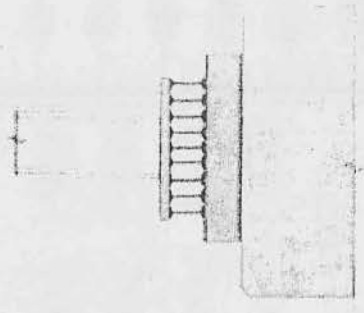
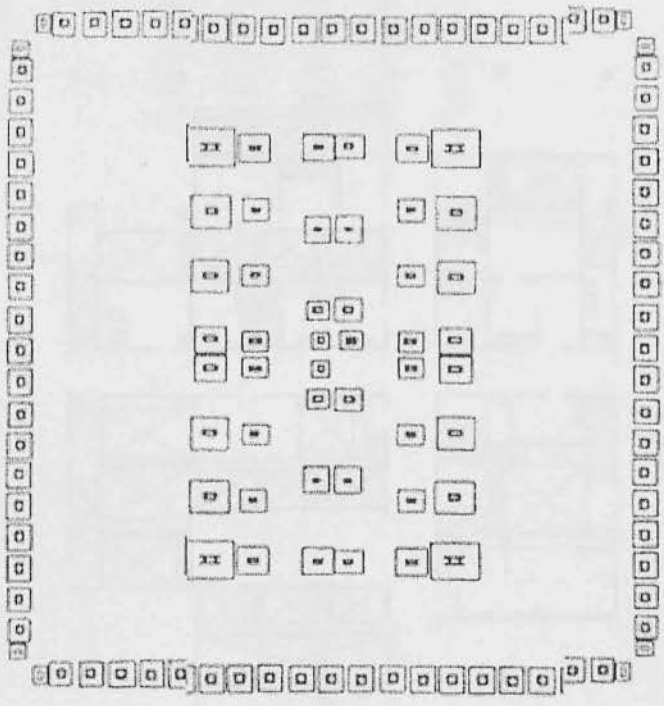
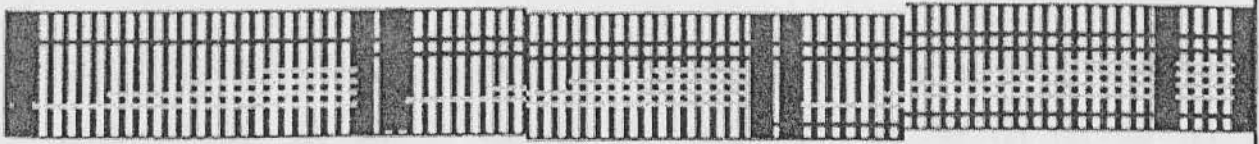
3 κλιμακοστάσια, 99 ασανσέρ (ασανσέρ εξπρές για 44<sup>ο</sup> και 78<sup>ο</sup> όροφο)

Οι δύο πύργοι ήταν πραγματικοί «δίδυμοι», με διαφορές σε φέροντα στοιχεία λόγω διαφορετικών ανεμοπιέσεων και διαφορών στα διαχωριστικά στοιχεία.



|                       |  |
|-----------------------|--|
| Ιδιοκτήτης:           | Port Authority New York και New Jersey   |
| Αρχιτεκτονική μελέτη: | Minoru Yamasaki (1912 – 1985)            |
| Στατική μελέτη:       | Skilling, Helle, Christiansen, Robertson |

|                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Αρχή εκσκαφών:               | Αύγουστος 1966  |
| Αρχή μεταλλικής κατασκευής:  | Αύγουστος 1968  |
| Πρώτη εγκατάσταση στο WTC 1: | Δεκέμβριος 1970 |
| Πρώτη εγκατάσταση στο WTC 2: | Ιανουάριος 1972 |
| Κόψιμο κορδέλλας:            | Απρίλιος 1973   |



## 2. Φέρων οργανισμός

### Περιμετρικά υποστυλώματα

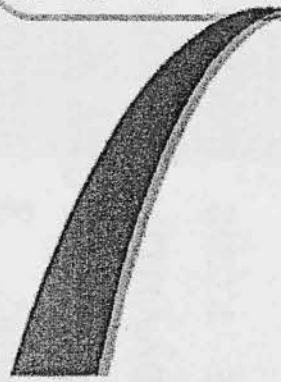
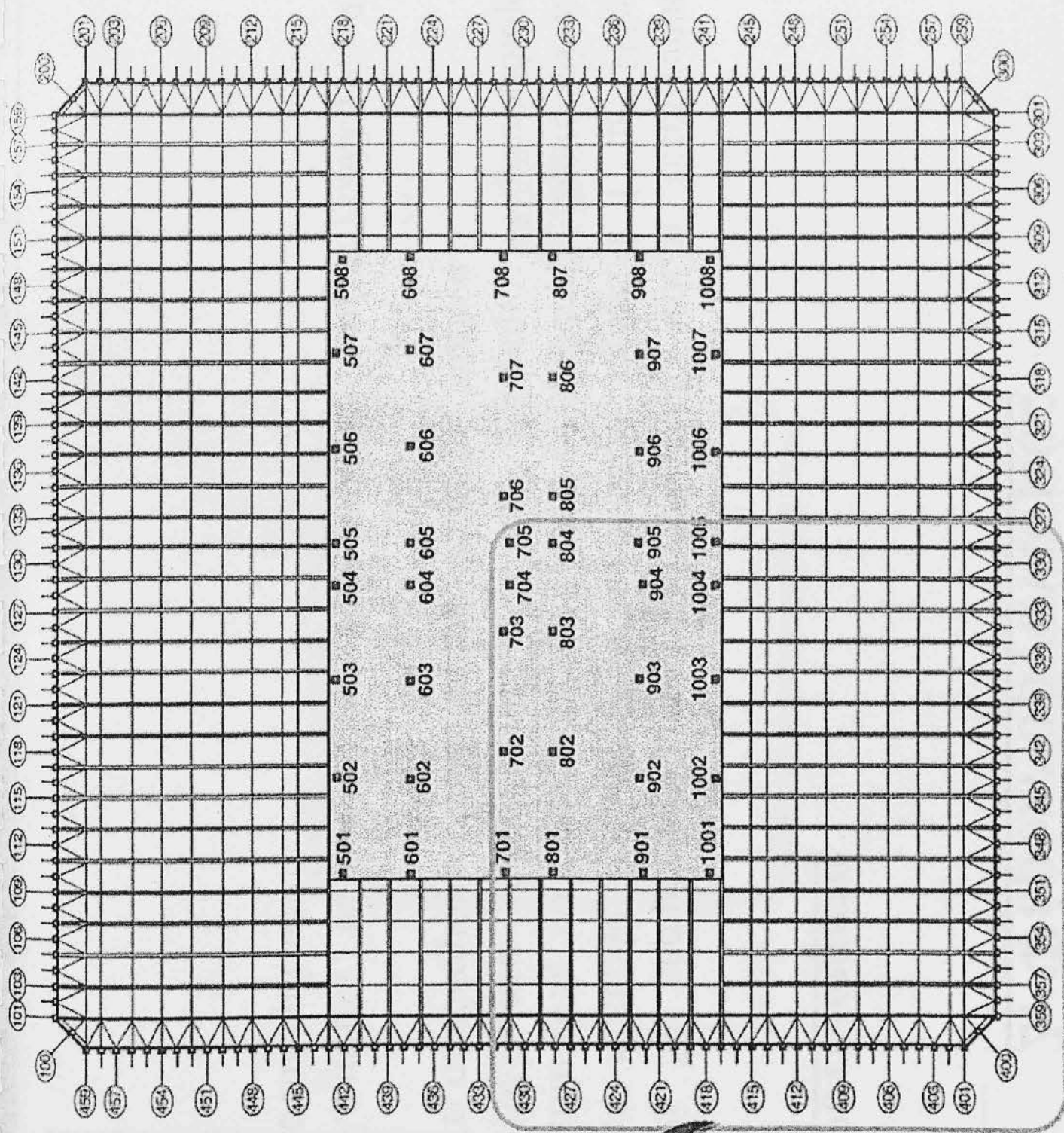
□ Σε κάθε πλευρά 59 περιμετρικά υποστυλώματα από κοίλη τετραγωνικά συγκολλητή διατομή πλευράς 356 mm, σε απόσταση περίπου 1 m. Πάχος τοιχωμάτων από 6 mm (στη κορυφή), μέχρι 100 mm (στη βάση). Στους κάτω 7 ορόφους, 3 υποστυλώματα καταλήγουν σε ένα ολόσωμο. Εξισορρόπηση δυσκαμψίας με χιαστί συνδέσμους μεταξύ υποστυλωμάτων πυρήνα.

□ Μεταξύ υποστυλωμάτων, υψίκορμες δοκοί ύψους 800 mm, συγκολλητές στη μια πλευρά των υποστυλωμάτων.

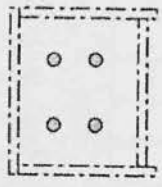
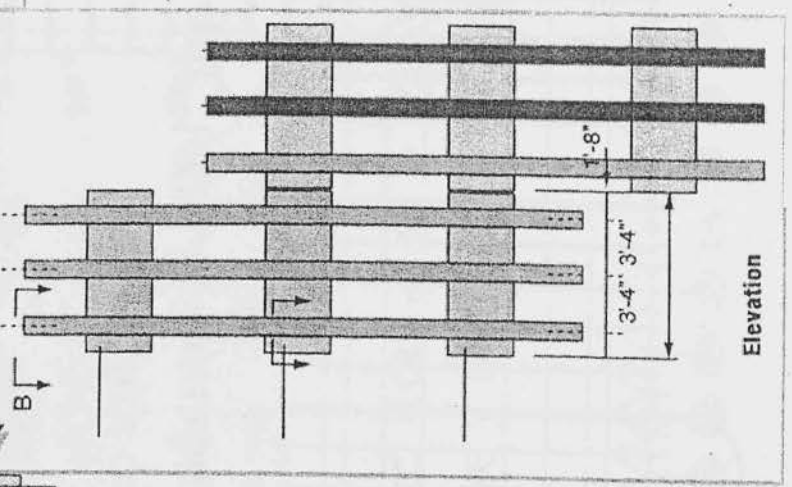
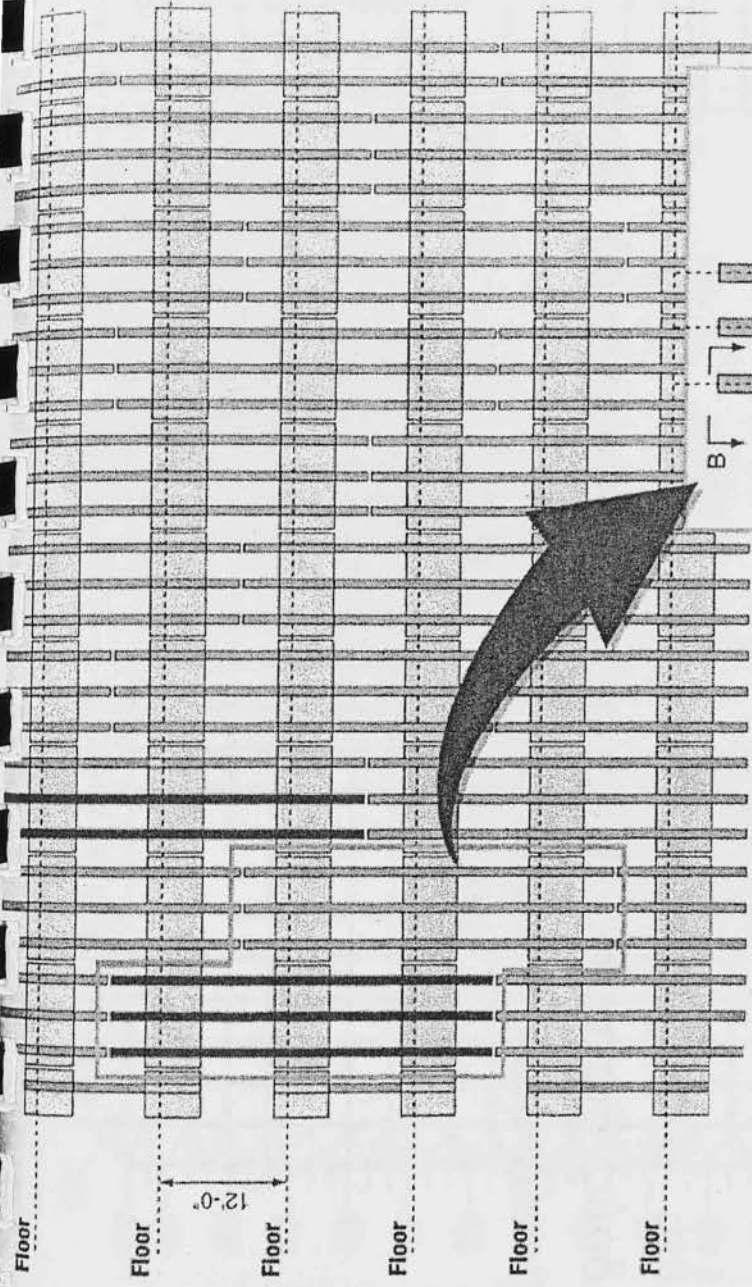
## Περιμετρικά υποστυλώματα

- Συναρμολόγηση σε ομάδα 3 υποστυλωμάτων σε 3 ορόφους. Καθ' ύψος σύνδεση υποστυλωμάτων κοχλιωτή, με μετωπικές πλάκες και 4 ή 6 κοχλίες. Σύνδεση υψίκορμων δοκών επίσης κοχλιωτή.
- 12 διαφορετικές ποιότητες χάλυβα με εφελκυστική αντοχή 300 – 690 MPa. Ποιότητες και πάχη πλακών διαφορετικά στους δύο πύργους.
- Παραλαβή ανέμου μόνο από περιμετρικά υποστυλώματα. Λειτουργία ως προβόλου κιβωτοειδούς διατομής. Κορμοί με συμπεριφορά δοκών Vierendeel. Σχεδιασμός περιμετρικών υποστυλωμάτων για G + W.

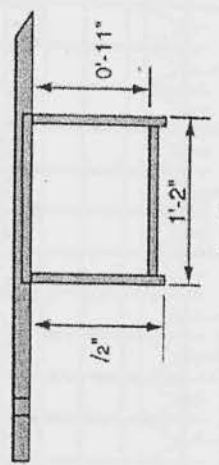




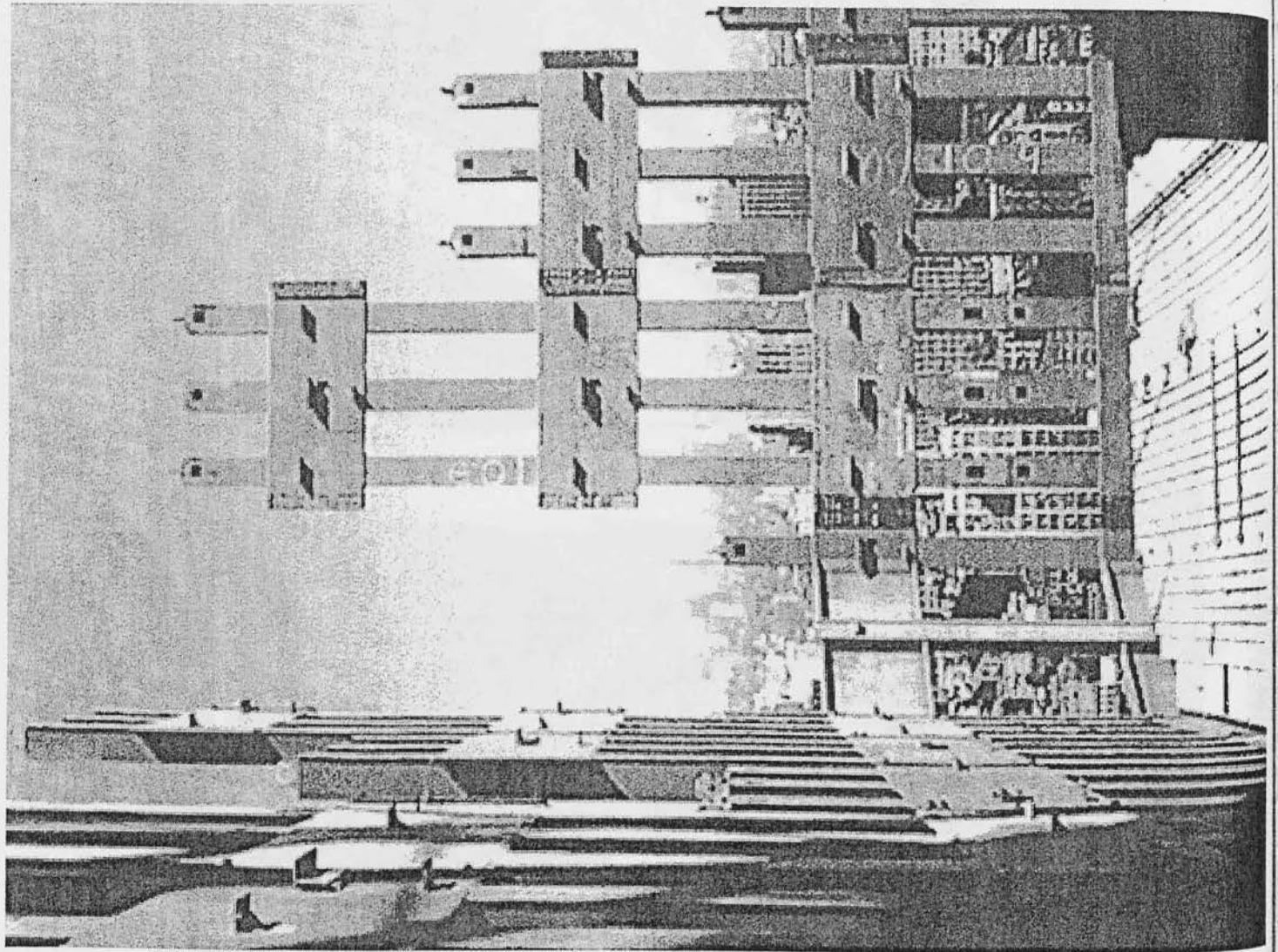
UNIVERSITY

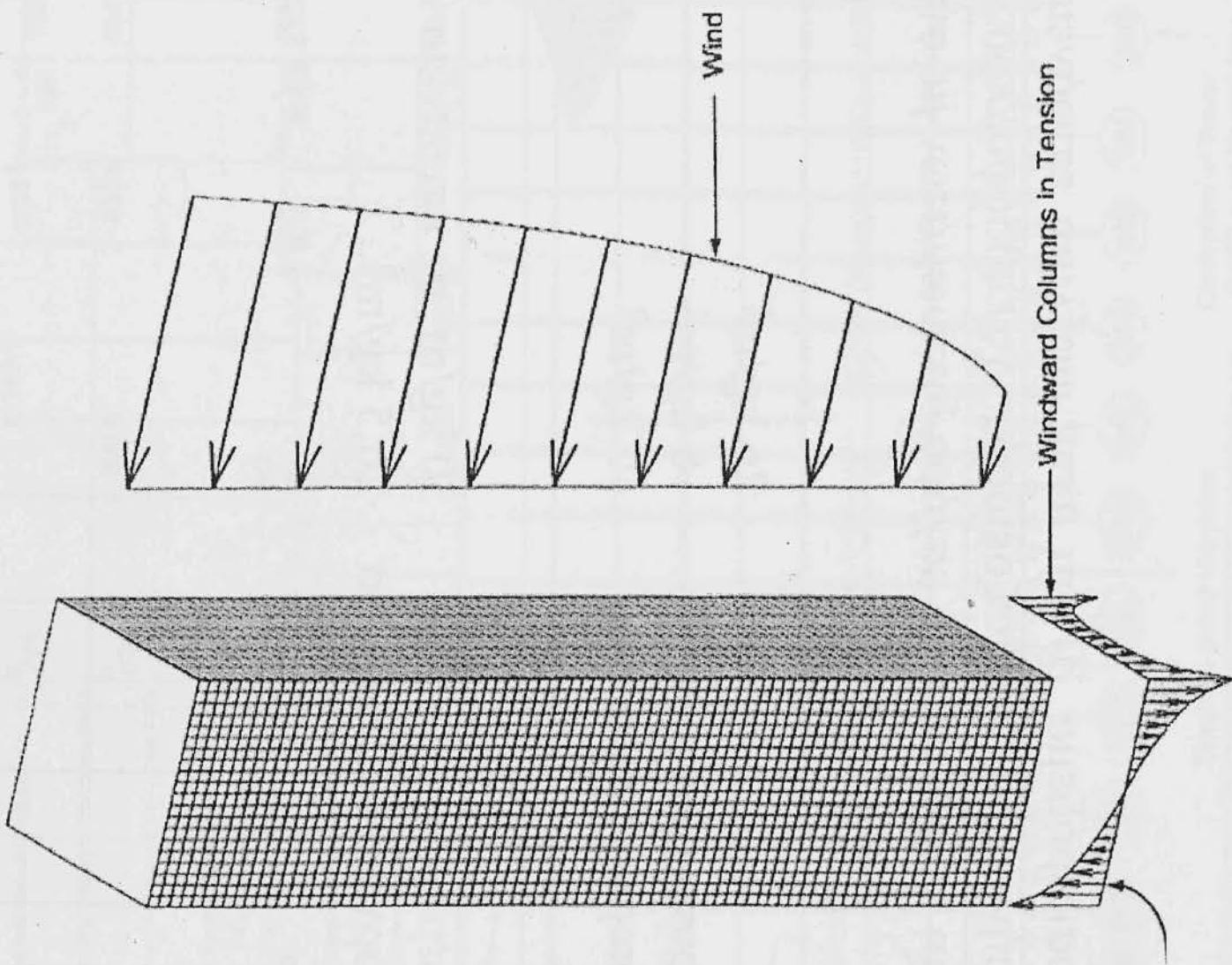


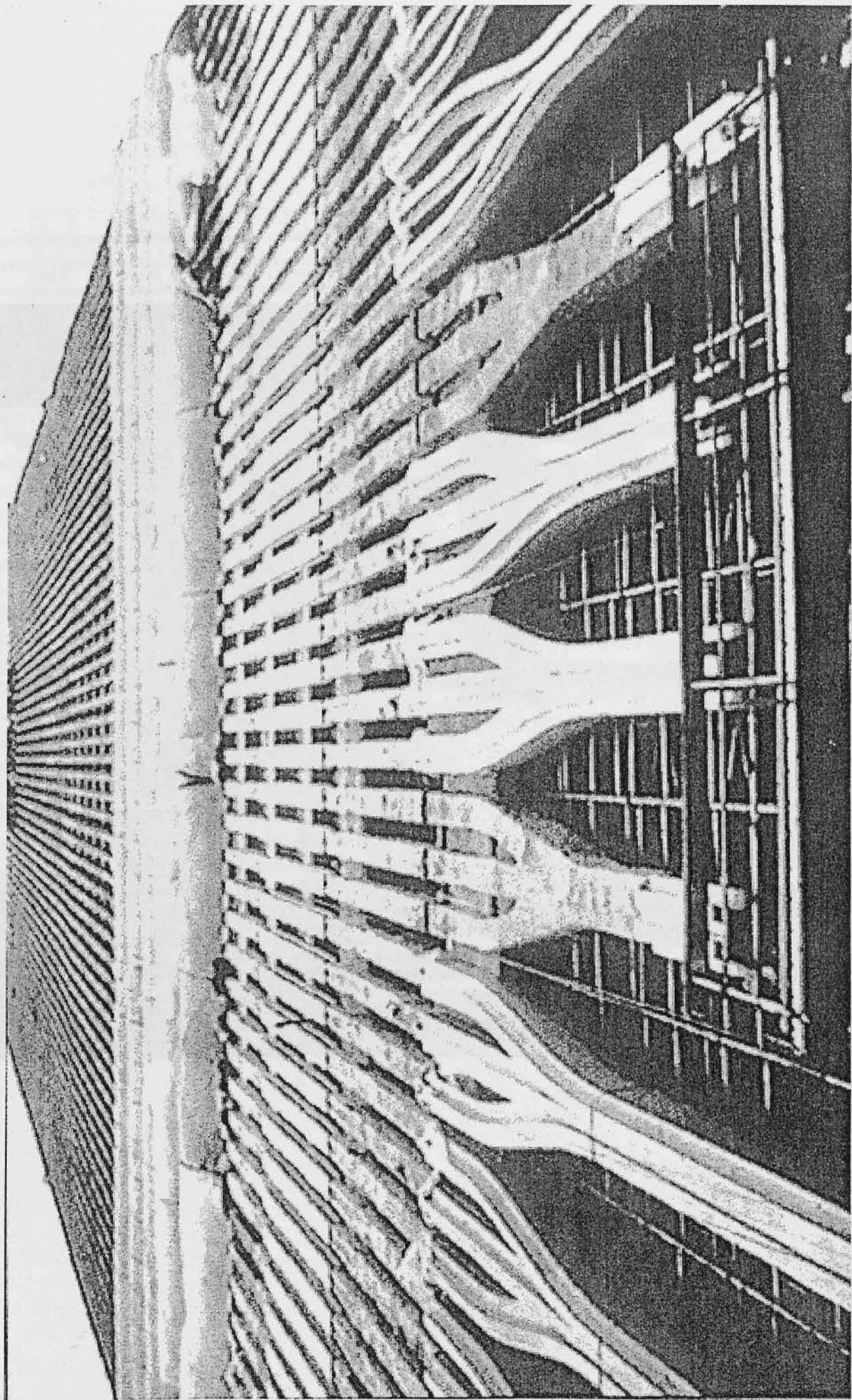
Section B



Section A





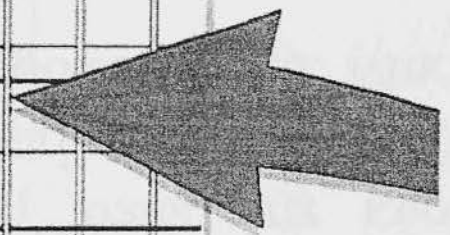
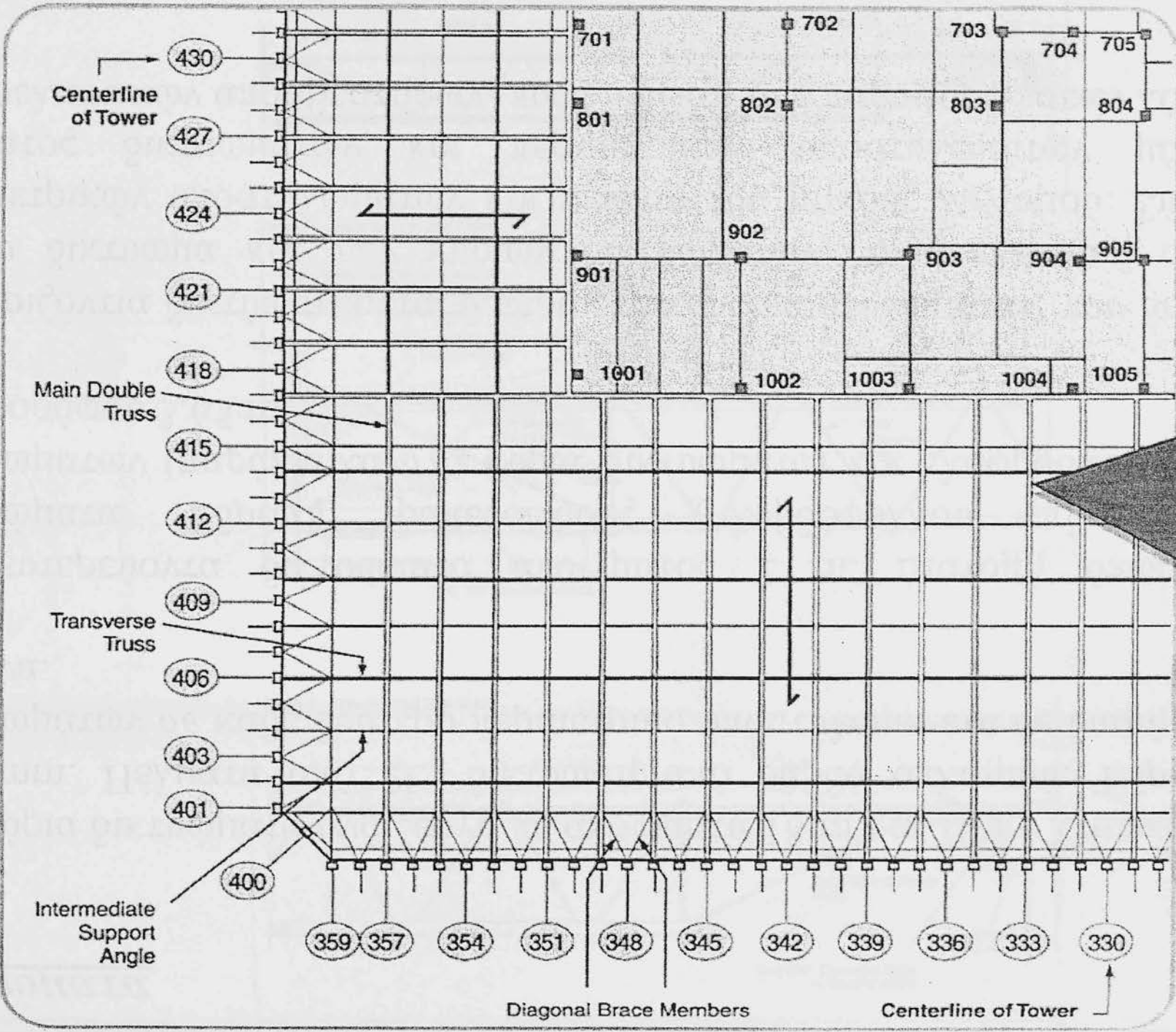


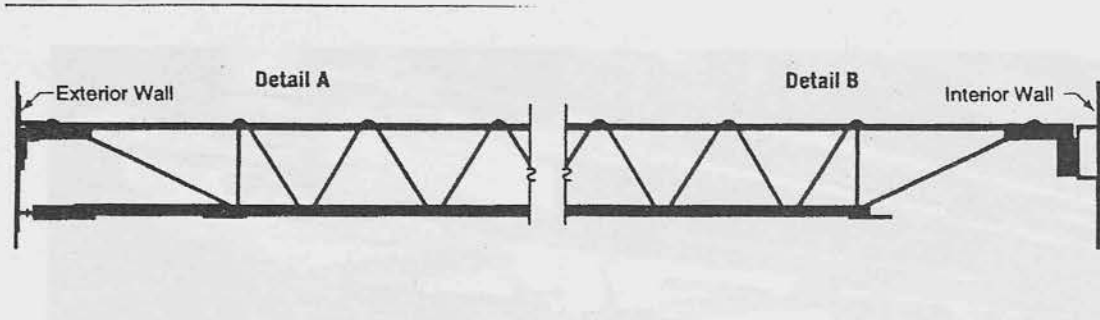
## Πατώματα

□ Πλάκες από ελαφροσκυρόδεμα 10 cm στην ωφέλιμη επιφάνεια και 12,5 cm στη περιοχή του πυρήνα επί τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου. Στήριξη του πατώματος στην ωφέλιμη επιφάνεια από εσχάρα δικτυωμάτων με σύμμικτη δράση.

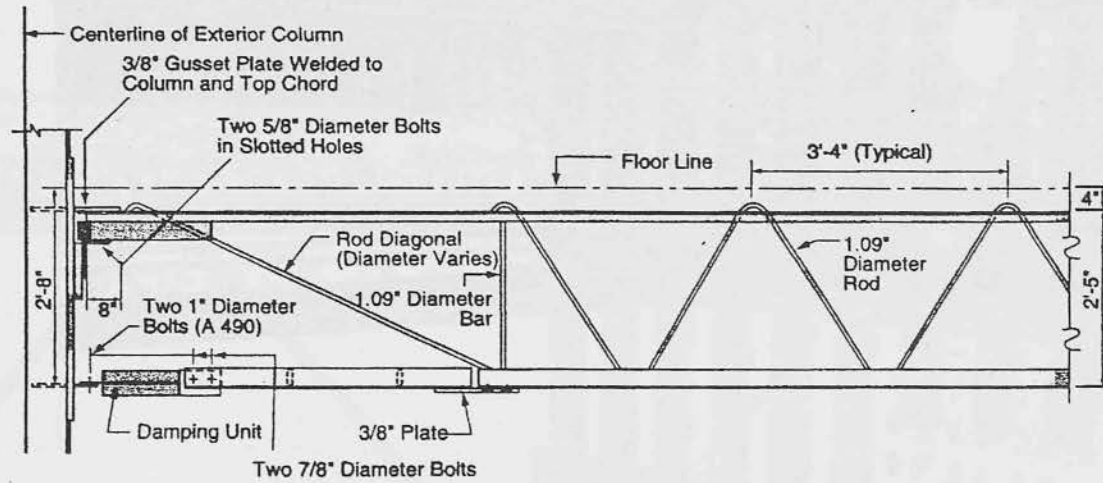
|  |                      |
|--|----------------------|
| Ίδιο βάρος πατωμάτων                   | 26 kg/m <sup>2</sup> |
| Φορτίο ελαφρών διαχωριστικών           | 6 kg/m <sup>2</sup>  |
| Λοιπά μόνιμα (έπιπλα, περιεχόμενο κλπ) | 10 kg/m <sup>2</sup> |

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Ωφέλιμο φορτίο σχεδιασμού ≈           | 50 kg/m <sup>2</sup> σε επιφάνεια 20 m <sup>2</sup> . |
| Μέση τιμή ωφέλιμου φορτίου στον όροφο | 26,5 kg/m <sup>2</sup> .                              |
| Τοίχοι από γυψοσανίδες.               |   |

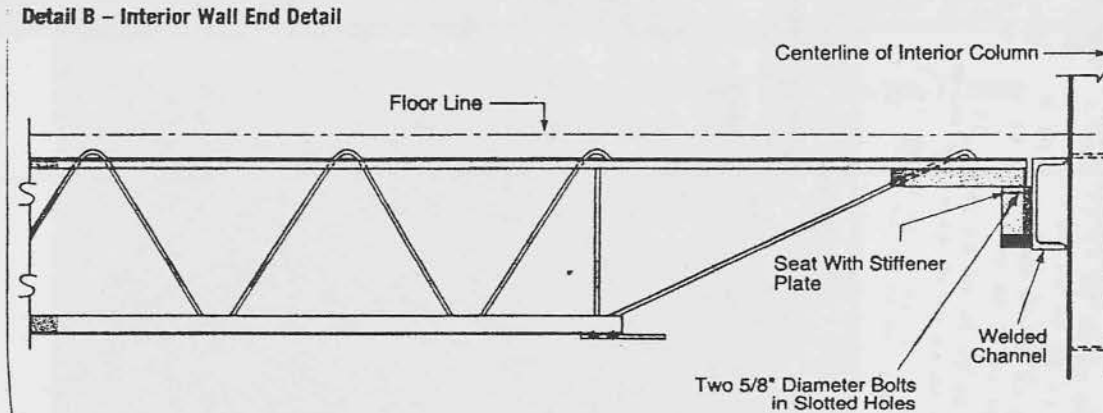




**Detail A - Exterior Wall End Detail**



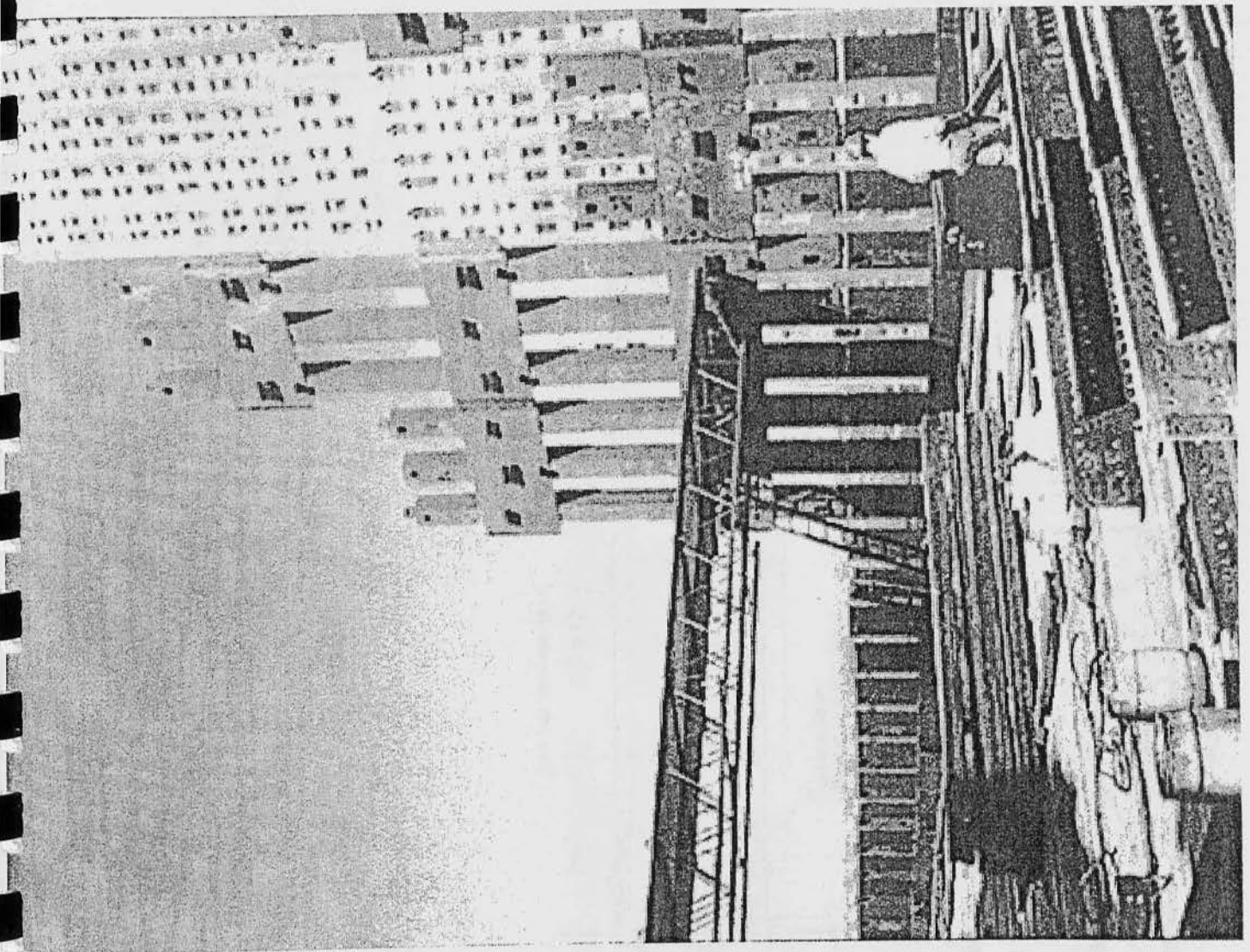
**Detail B - Interior Wall End Detail**

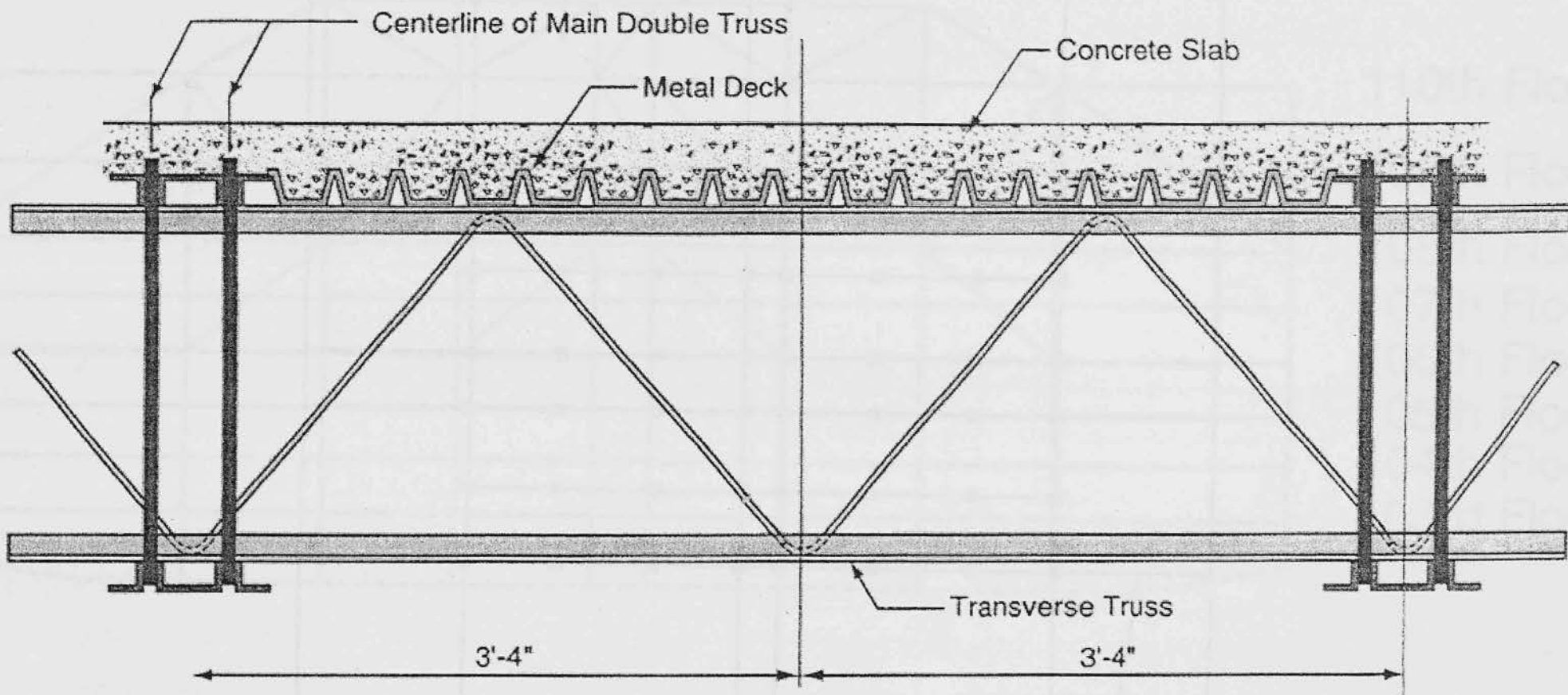


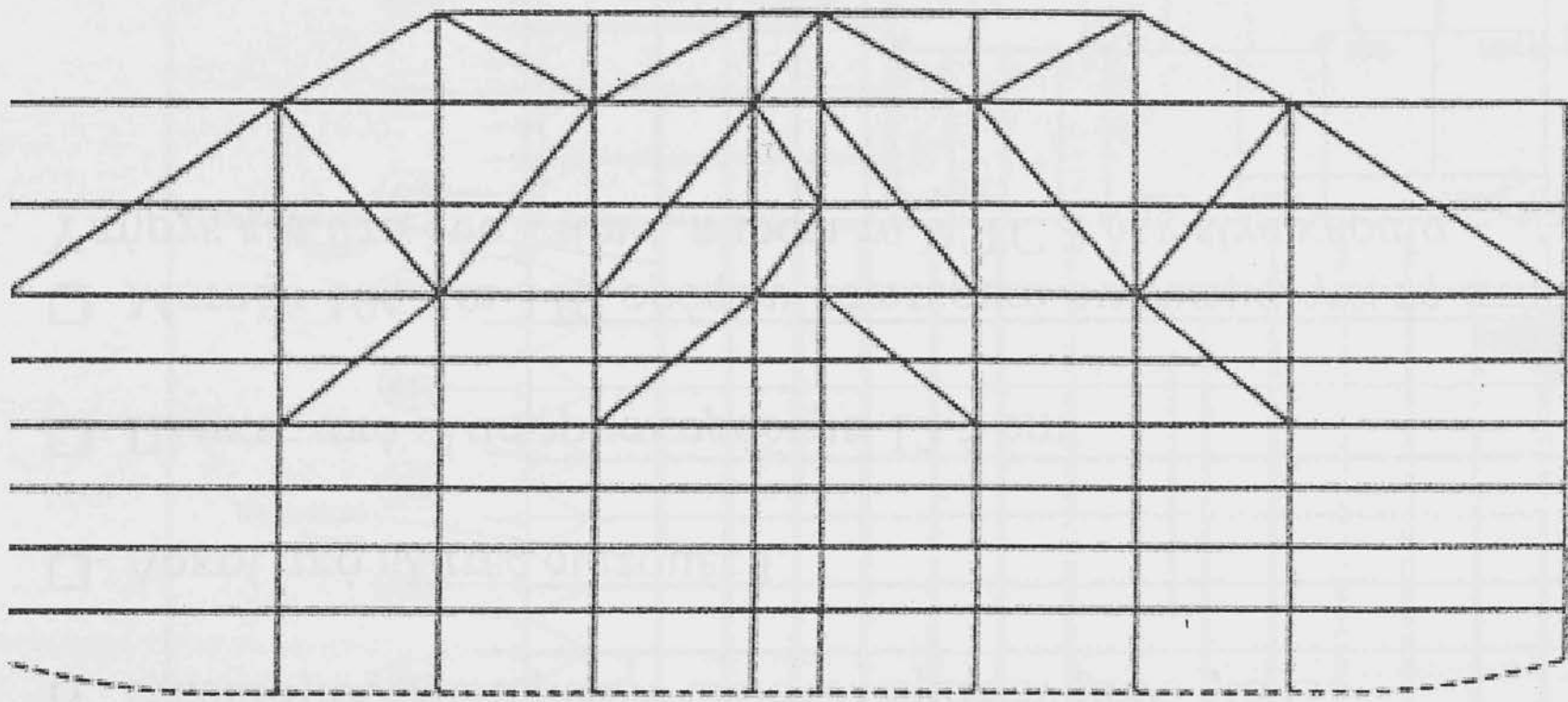


## Πατώματα

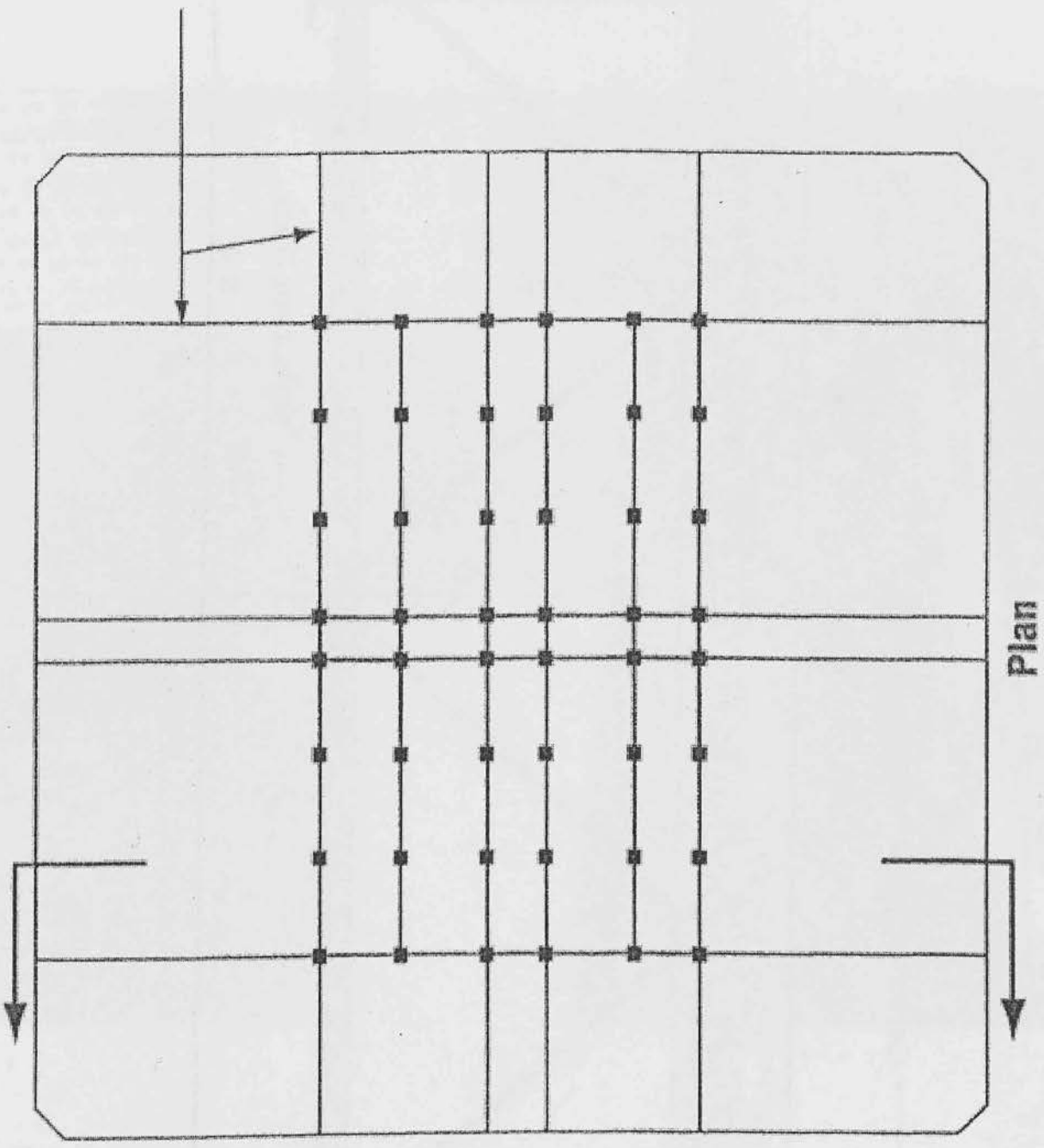
- Κύρια δικτυώματα ανά ζεύγη με ανοίγματα 18 m και 10 m. Στατικό ύψος ύψος 800 mm. Πέλματα από 2L, δικτύωση από ράβδο οπλισμού. Έδραση κυρίων δικτυωμάτων σε κάθε δεύτερο περιμετρικό υποστύλωμα και σε διαμήκη δοκό του πυρήνα.
- Δευτερεύοντα δικτυώματα ανοίγματος 2 m. Διατομή όπως τα κύρια δικτυώματα. Έδραση τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου επί δευτερευόντων δικτυωμάτων (παράλληλα στα κύρια δικτυώματα) και ελαφροσκυρόδεμα. Μικτό ύψος ορόφου 3,65 m.
- Οριζόντια δικτύωση μεταξύ περιμετρικών υποστυλωμάτων που δε συνδέονται με το δικτύωμα και των κυρίων δικτυωμάτων, προς πλευρική στήριξη των περιμετρικών υποστυλωμάτων και μείωση του μήκους λυγισμού. Σύνδεση κάτω πέλματος δικτυωμάτων και περιμετρικών υποστυλωμάτων μέσω 10.000 βισκοελαστικών αποσβεστήρων, προς μείωση των παραμορφώσεων λόγω ανέμου.







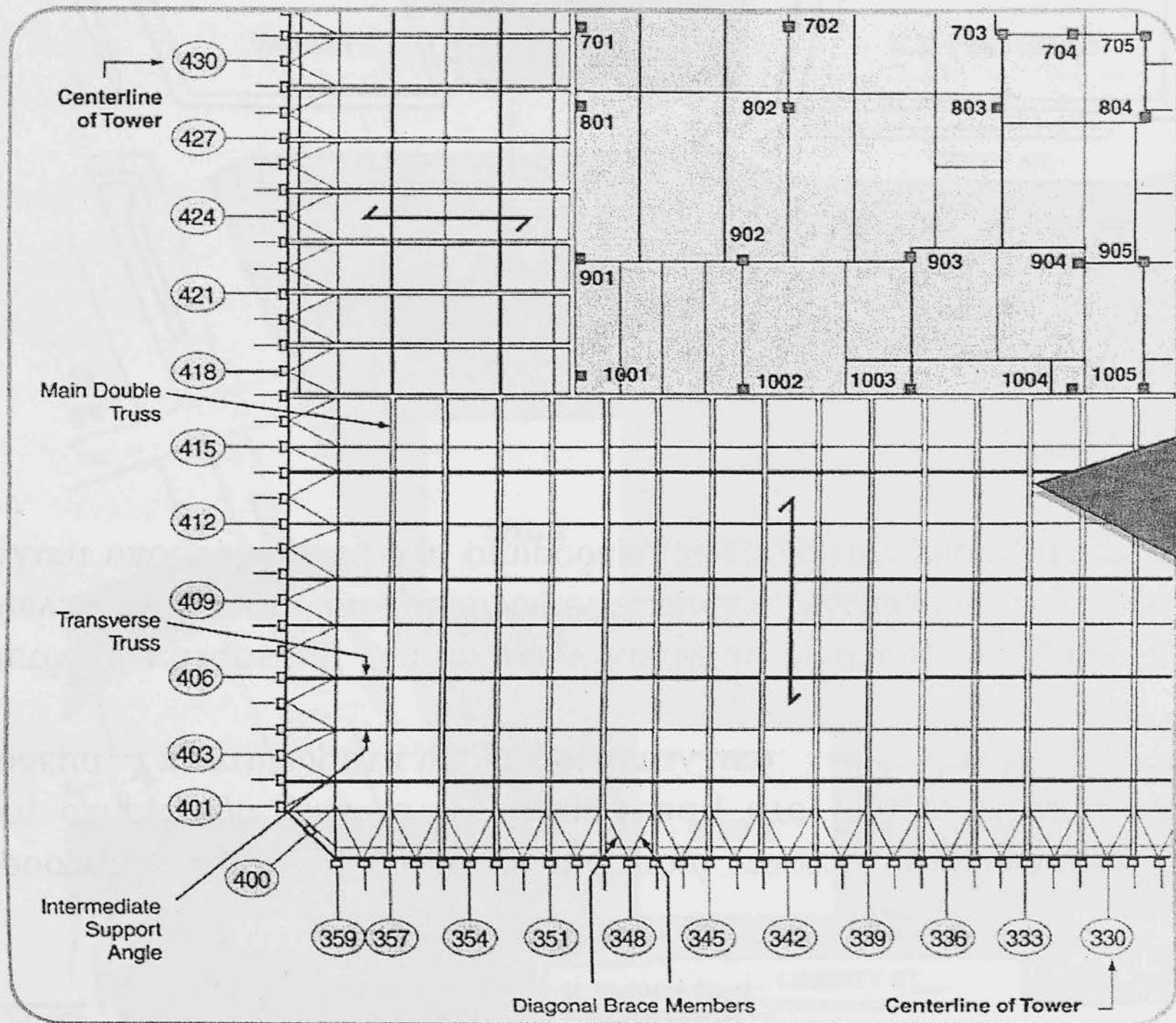
110th Floor  
109th Floor  
108th Floor  
107th Floor  
106th Floor  
105th Floor  
104th Floor  
103rd Floor

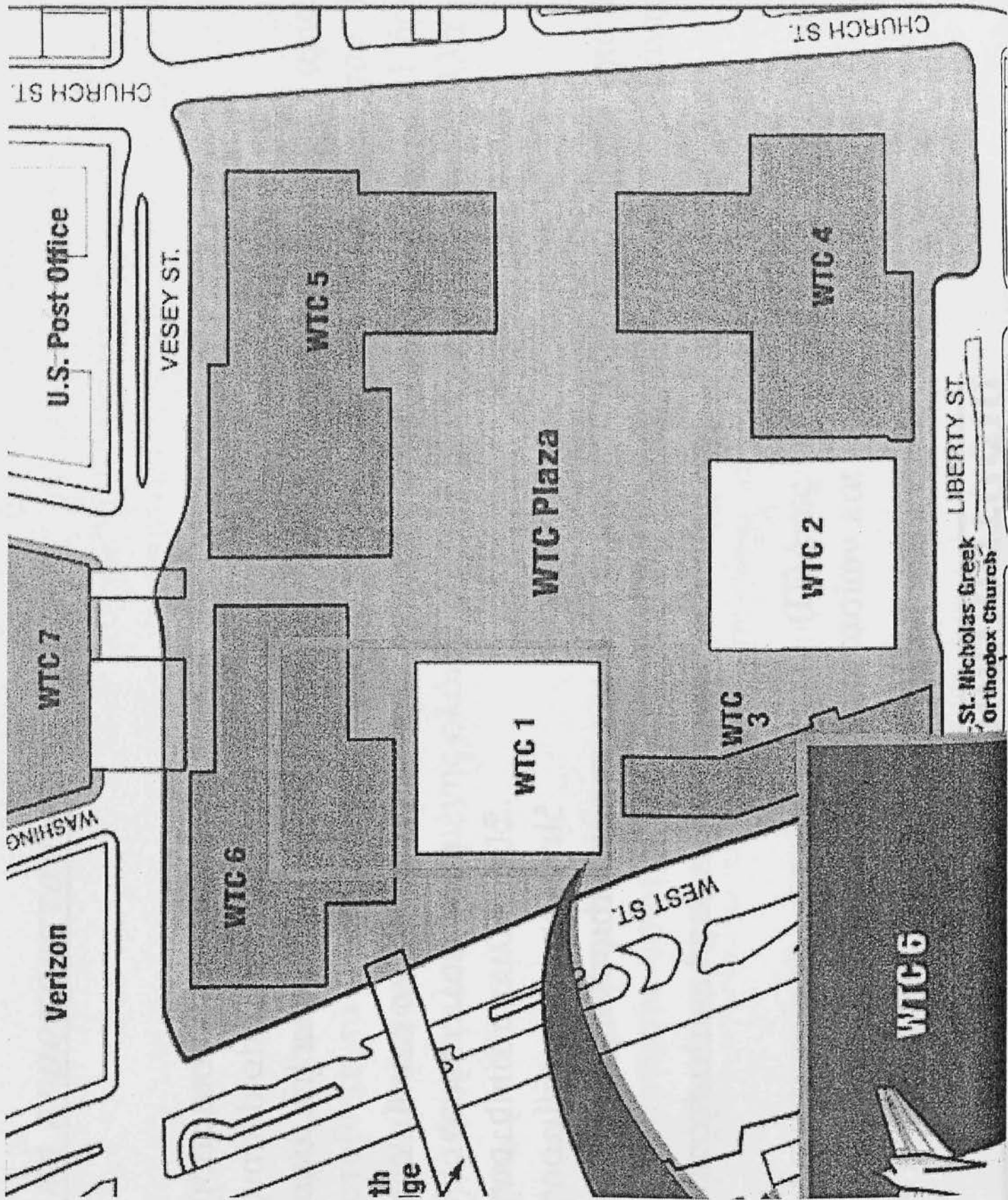


Plan

## Πυρήνας

- Υποστυλώματα από δοκούς H και ορθογωνικές κοιλοδοκούς. Διαστάσεις κοιλοδοκών 355 x 915 mm στη βάση. Στην κορυφή οι κοιλοδοκοί γινόταν δοκοί H. Σχεδιασμός εσωτερικών υποστυλωμάτων μόνο για G.
- Δοκοί από ελατές διατομές I.
- Πλάκες από ελασφροσκυρόδεμα 12,5 cm.
- Μεταξύ 106 και 110 ορόφου εσωτερικό δικτύωμα για τη στήριξη της κεραίας. Υπήρχε και στα δύο κτίρια, παρότι το WTC 2 δεν είχε κεραία.







## Υπόγεια

□ Προστασία εκσκαφής από περιμετρικά τοιχεία, αγκυρωμένα στο έδαφος. Αρχική στήριξη με μπεντονίτη. Θεμελίωση στο βράχο. Πλάκες υπογείων από σκυρόδεμα. Υποστυλώματα υπογείων μεταλλικά.

□ Μετά τη κατασκευή των πλακών κόπηκαν οι αγκυρώσεις των περιμετρικών τοιχείων. Θεμελίωση από μεμονωμένα πέδιλα. Μεταφορά της δύναμης από τα μεταλλικά υποστυλώματα στο σκυρόδεμα των πεδίων μέσω εσχάρας μεταλλικών δοκών.

# 3. Πυροπροστασία

## Γενικά

Σύστημα ανεξάρτητων μέσων, αποτελούμενων από:

- Ενεργητική πυροπροστασία
  - Συστήματα καταστολής
  - Συστήματα ανίχνευσης
  - Συσκευές εντοπισμού
  - Συστήματα απαγωγής καπνού
  
- Παθητική πυροπροστασία
  - Διαμερισματοποίηση
  - Προστασία δομικών στοιχείων

## Παθητική πυροπροστασία

- ❑ Χρόνος πυραντίστασης 3 ώρες.
- ❑ Ψεκασμός δικτυωμάτων με πυράντοχο υλικό από ανόργανες ίνες (ο αμίαντος αντικαταστάθηκε το 1980). Αρχικό πάχος 19 mm υλικού. Από μέσα του 1990 σταδιακός διπλασιασμός πάχους. Μέχρι την 9.11.2001 επιδιορθώθηκαν 31 όροφοι του WTC 1, συμπεριλαμβανομένης ολόκληρης της ζώνης πρόσκρουσης, αλλά μόνο ένας όροφος, ο 78<sup>ος</sup>, του WTC 2.
- ❑ Το ίδιο υλικό χρησιμοποιήθηκε και στα περιμετρικά υποστυλώματα (για τις 3 πλευρές). Προστασία εσωτερικής πλευράς με γυψοσανίδες. Πάχος πυράντοχου υλικού αυξανόμενο προς τα επάνω, λόγω μείωσης πάχους υποστυλωμάτων.
- ❑ Διαμερισματοποίηση μεταξύ ορόφων (Πλάκες σε αεροστεγή σύνδεση με τις υψίκορμες δοκούς). Χωρισμός κλιμακοστασίων και ασανσέρ με τοίχους από μονές και διπλές γυψοσανίδες πάχους 16 mm. Προστασία για 2 ώρες.

## Διαχείριση καπνού

- ❑ Σε κάθε σύστημα εξαερισμού υπήρχε ένα χωνοποιημένο σύστημα ελέγχου του καπνού, που κατευθυνόταν από το κέντρο ελέγχου του Πυροσβεστικού Σώματος της Ν. Υόρκης.
- ❑ Σκοπός του συστήματος ήταν η αποφυγή μεταφοράς καπνού από τη περίμετρο προς το πυρήνα, ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς να μπορεί να εκκενωθεί το κτίριο.

## Ενεργητική πυροπροστασία

- Τοποθέτηση sprinklers όχι στην αρχική φάση, αλλά από το 1990, κάλυψη 100% της επιφάνειας. Κατακόρυφοι σωλήνες πυρόσβεσης υπήρχαν στα 3 κλιμακοστάσια. Σε κάθε όροφο, σε κάθε κλιμακοστάσιο, υπήρχαν πρόσθετοι πυροσβεστήρες νερού υπό πίεση.
- Νερό από ειδική δεξαμενή που περιέβαλε όλα τα κτίρια του συγκροτήματος. Η δεξαμενή έπαιρνε νερό από το δίκτυο της Ν. Υόρκης. Η πίεση του δικτύου εξασφαλιζόταν από δύο αντλίες παροχής  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ .
- Κάθε πύργος είχε 3 ηλεκτρικές αντλίες που εξασφάλιζαν τη πίεση στους κατακόρυφους σωλήνες. Η πρώτη, στον 7<sup>ο</sup> όροφο έπαιρνε νερό από τη δεξαμενή και την έστελνε στο 41<sup>ο</sup> όροφο και από εκεί μια τρίτη στο 75<sup>ο</sup> όροφο. Η πίεση κάθε αντλίας ήταν επαρκής, για να καλύψει και την επόμενη της στη περίπτωση βλάβης.
- Δευτερογενές σύστημα πυρόσβεσης από σειρά δεξαμενών χωρητικότητας  $20 \text{ m}^3$ . Δεξαμενές τροφοδοσίας του κατακόρυφου συστήματος ήταν τοποθετημένες στο 41<sup>ο</sup>, 75<sup>ο</sup> και 110<sup>ο</sup> όροφο. Υπήρχαν πολλές περιμετρικές συνδέσεις, γύρω από όλο το συγκρότημα με το δίκτυο πυρόσβεσης της Ν. Υόρκης για χρήση από το Πυροσβεστικό Σώμα.

## Διαχείριση Πυροσβεστικής Υπηρεσίας

- ❑ Πριν τη τρομοκρατική ενέργεια του 1993, υπήρχε ένα Κέντρο Πυροσβεστικού Ελέγχου για τους δύο πύργους, τοποθετημένο στο Κέντρο Ελέγχου Λειτουργιών των πύργων στο Υπόγειο. Μετά το 1993, δημιουργήθηκαν πρόσθετα Κέντρα στα ισόγεια κάθε πύργου. Υπήρχαν καλώδια και κεραίες για το Πυροσβεστικό Σώμα και ειδικά τηλέφωνα σε κάθε δεύτερο όροφο σε ένα κλιμακοστάσιο κάθε πύργου.
- ❑ Το συγκρότημα του WTC είχε δικό του Πυροσβεστικό Σώμα, συνεργαζόμενο με το Πυροσβεστικό Σώμα της Ν. Υόρκης. Το εσωτερικό Πυροσβεστικό Σώμα είχε πρόσβαση σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους με εξοπλισμό πρώτης ανάγκης.

## Έξοδοι κινδύνου

□ Η έξοδος κινδύνου γινόταν από τα 3 κλιμακοστάσια. Αυτά δεν ήταν κατακόρυφα από τη βάση μέχρι τη κορυφή, αλλά τα κλιμακοστάσια 1 και 2 άλλαζαν θέση σε 4 ορόφους (42, 48, 76, 82), ενώ το κλιμακοστάσιο 3 στον 76<sup>ο</sup> όροφο. Μετά το 1993, τα κλιμακοστάσια εφοδιάστηκαν με φωτισμό από μπαταρίες και φωσφορίζον χρώμα.

□ Κάθε πύργος είχε 99 ασανσέρ, από τα οποία 23 εξπρές (χωρίς στάση στους ορόφους 44 και 78). Τα ασανσέρ δεν προβλέπονταν ως έξοδοι κινδύνου. Τα ασανσέρ κάθε ορόφου ήταν χωρισμένα σε 2 ομάδες με διαφορετικές ηλεκτρικές παροχές.

□ Σε ένα συναγερμό, όλα τα ασανσέρ κάθε ορόφου πήγαιναν αυτόματα είτε στη βάση, είτε στον ανώτερο όροφο της ομάδας (44<sup>ο</sup> ή 78<sup>ο</sup>). Από εκεί ενεργοποιούνταν με το χέρι από το Πυροσβεστικό Σώμα.

## 4. Απόκριση κτιρίων

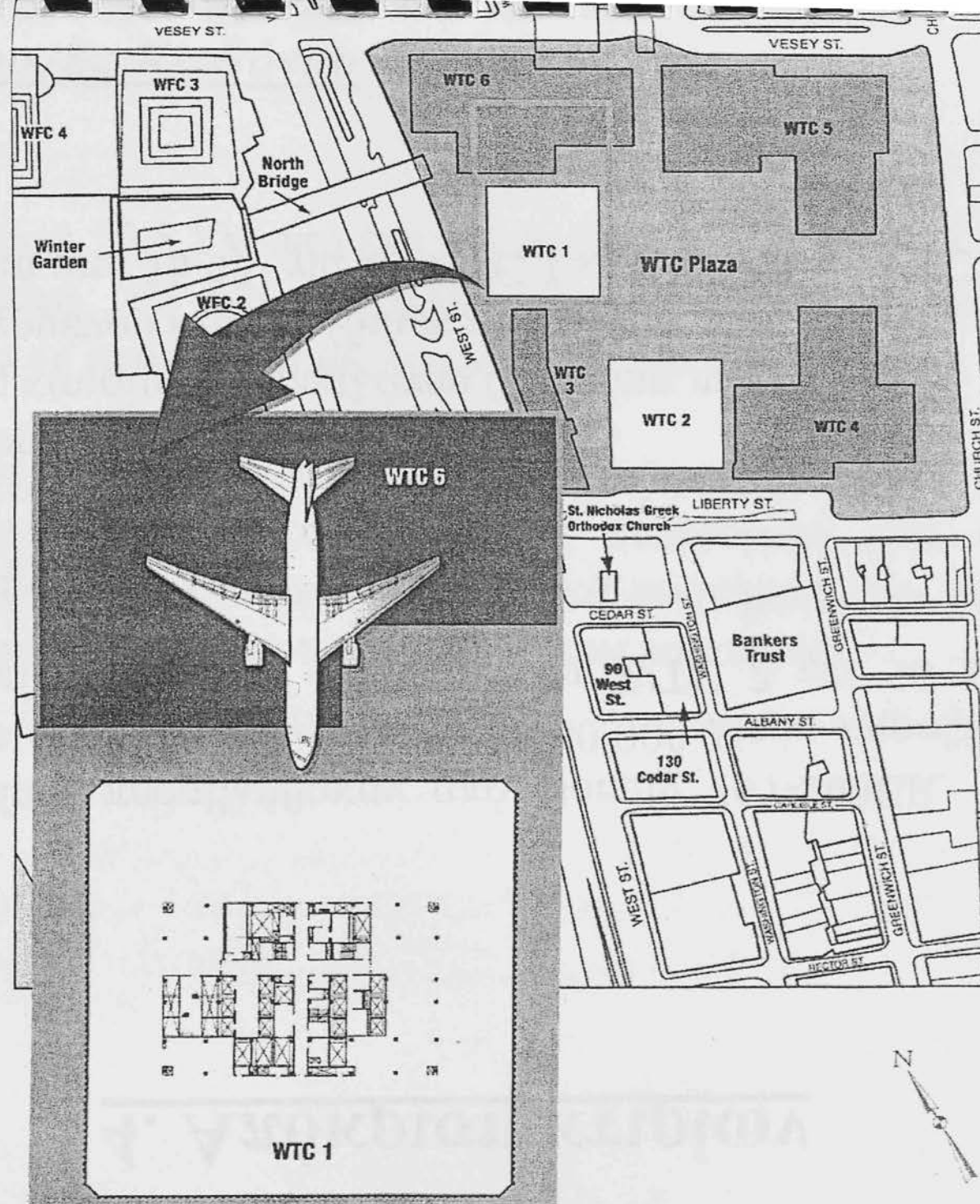
### Γενικά

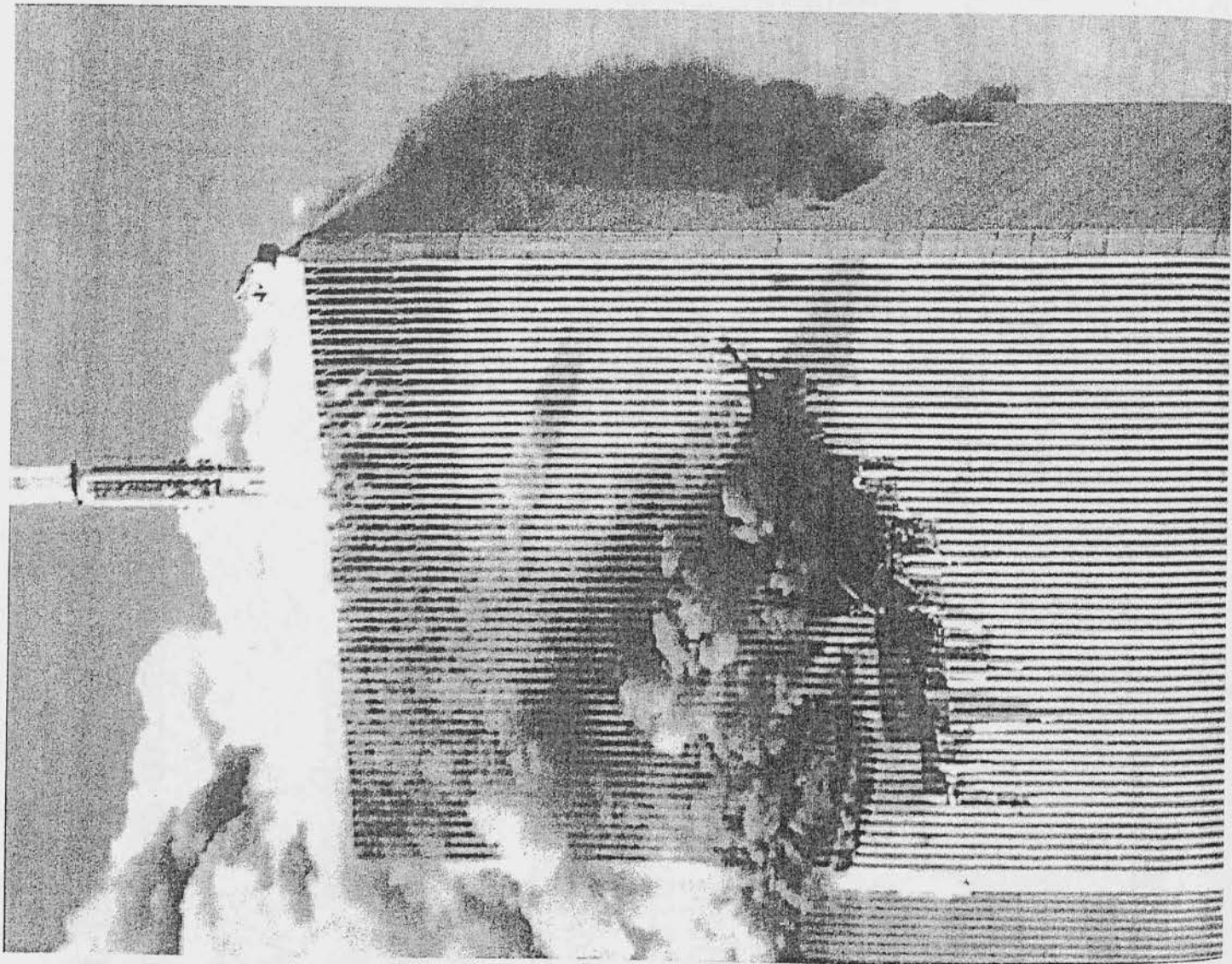
- Και τα δύο κτίρια προσβλήθηκαν από Boeing 767-200ER. Τη στιγμή της πρόσκρουσης, κάθε αεροπλάνο είχε περίπου 40.000 λίτρα κηροζίνη. Το WTC 1 παρέμεινε όρθιο επί 1 ώρα και 43 λεπτά, το WTC 2 επί 56 λεπτά μετά την πρόσκρουση.
  
- Οι φάσεις ήταν:
  - Άμεση πρόσκρουση (διάρκεια sec)
  - Άμεση ανάφλεξη καυσίμου αεροπλάνου (διάρκεια min)
  - Ανάφλεξη περιεχομένου κτιρίου (διάρκεια ώρα)
  - Κατάρρευση (μετά από 1h 43' για το WTC 1 και 56' για το WTC 2)



## Ηλεκτρικές Παροχές Κινδύνου

- ❑ Πρωτογενής παροχή 13,8 kV από ένα υποσταθμό στο WTC 7. Καλωδίωση με 2 ανεξάρτητα συστήματα. Το ένα αφορούσε όλο το κτίριο, το δεύτερο μόνο τα συστήματα κινδύνου σε περίπτωση μη λειτουργίας του πρώτου.
- ❑ Δευτερεύουσα παροχή από 6 γεννήτριες κινδύνου των 1,2 MW, για συσκευές επικοινωνίας, ασανσέρ, φώτα ασφαλείας σε διαδρόμους και κλιμακοστάσια κινδύνου και πυροσβεστικές αντλίες. Τηλεφωνικά συστήματα και φώτα ασφαλείας στα κλιμακοστάσια κινδύνου λειτουργούσαν και με μπαταρία.





## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

### Άμεση πρόσκρουση

□ Κύρια στοιχεία του φέροντα οργανισμού:

- Περιμετρικά πλαίσια (παραλαβή του 0,40 του βάρους του κτιρίου)
- Εσωτερικός πυρήνας (παραλαβή του 0,60 του βάρους του κτιρίου)
- Δικτύωμα κορυφής

□ Περιμετρικά υποστυλώματα: παραλαβή 0,40 του βάρους του κτιρίου. Για φόρτιση G, καταπόνηση στο 40% της αντοχής τους (υπόλοιπη αντοχή προς παραλαβή W). Τα περιμετρικά υποστυλώματα πάνω από την περιοχή πρόσκρουσης λειτούργησαν υπό εφελκυσμό, καθώς αναρτήθηκαν από το δικτύωμα της κορυφής.

□ Εσωτερικά υποστυλώματα: παραλαβή 0,60 του βάρους του κτιρίου. Για φόρτιση G, καταπόνηση στο 90% της αντοχής τους, διότι δεν συμμετείχαν στη παραλαβή ανέμου.

*Επομένως οι πύργοι δεν αστόχησαν από την πρόσκρουση αεροπλάνου.*

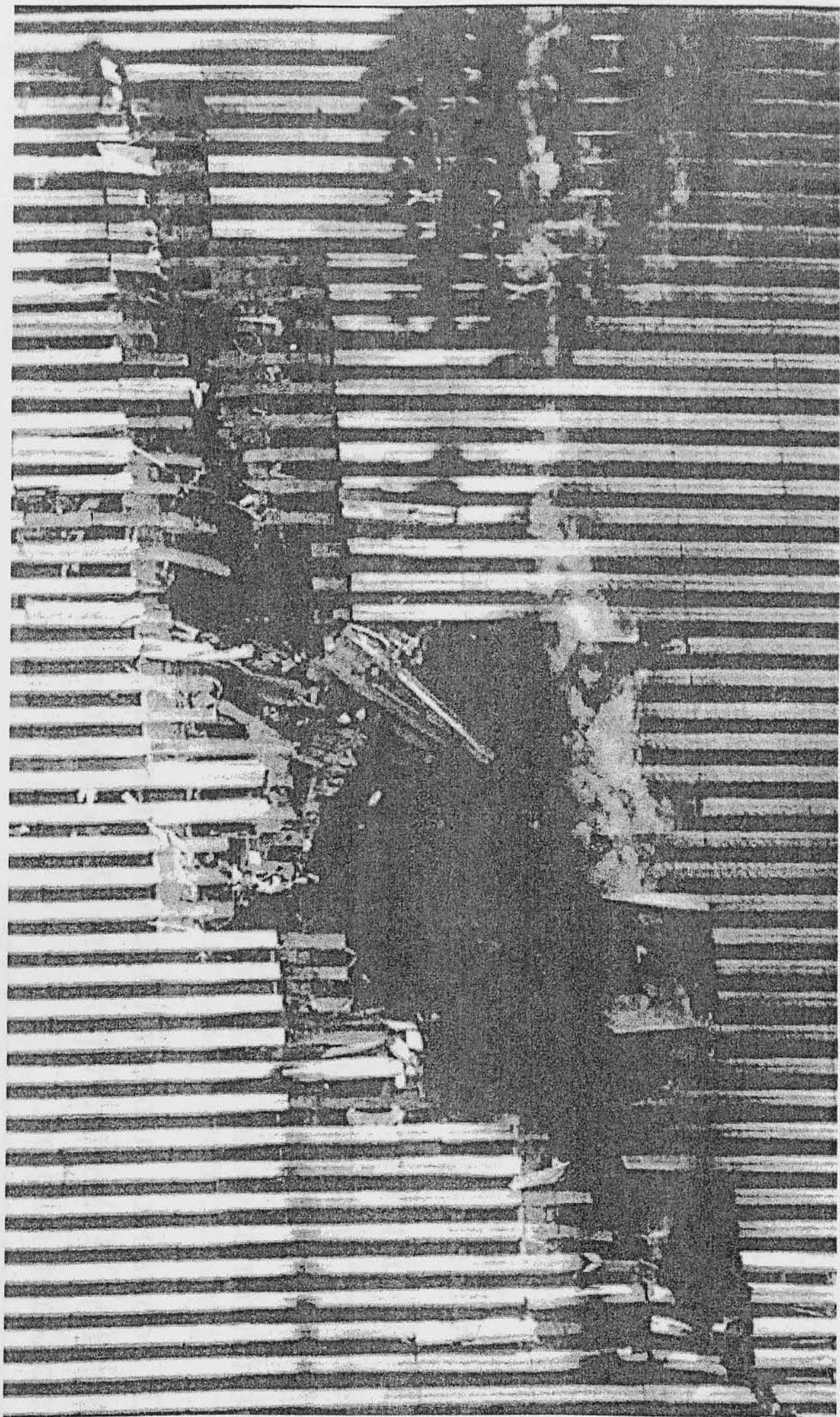
## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

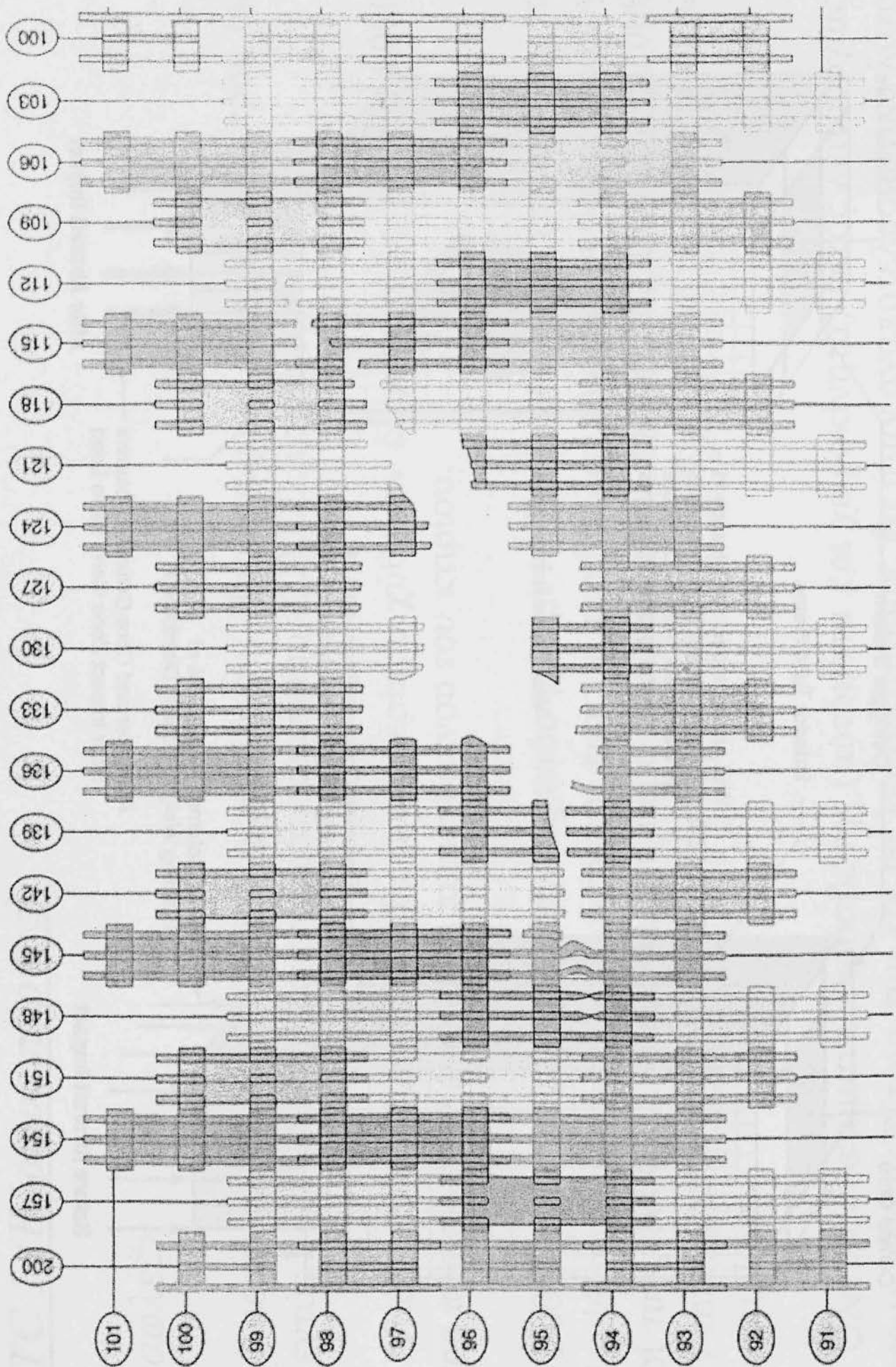
### Άμεση πρόσκρουση

□ Η πρόσκρουση έγινε στη βόρεια πλευρά, μεταξύ 94<sup>ου</sup> και 98<sup>ου</sup> ορόφου. Άμεση αστοχία 5 ομάδων τριπλών περιμετρικών υποστυλωμάτων, στη θέση πρόσκρουσης του κορμού του αεροπλάνου. Τα πατώματα που στηρίζονταν στα υποστυλώματα αυτά έχασαν τη στήριξή τους και έπεσαν. Αστοχίες περιμετρικών υποστυλωμάτων και στην πρόσκρουση με τα φτερά. Συνολικά αστόχησαν περί τα 31 – 36 περιμετρικά υποστυλώματα επί ύψους 4 ορόφων.

□ Συντρίμια του αεροπλάνου (σωσίβια, καθίσματα κλπ) βρέθηκαν στη νότια πλευρά του κτιρίου. Αυτό υποδηλώνει ότι υπήρξε διάτρηση του κτιρίου και επομένως αστοχία εσωτερικών υποστυλωμάτων, δοκών, μη φερόντων διαχωριστικών τοίχων κλπ.

□ Το γεγονός ότι το κτίριο άντεξε μέχρι της πλήρους κατάρρευσης επί 1 ώρα και 43 λεπτά, δείχνει την υπερστατικότητά του, τη δυνατότητα δηλ. ανακατανομής της έντασης.



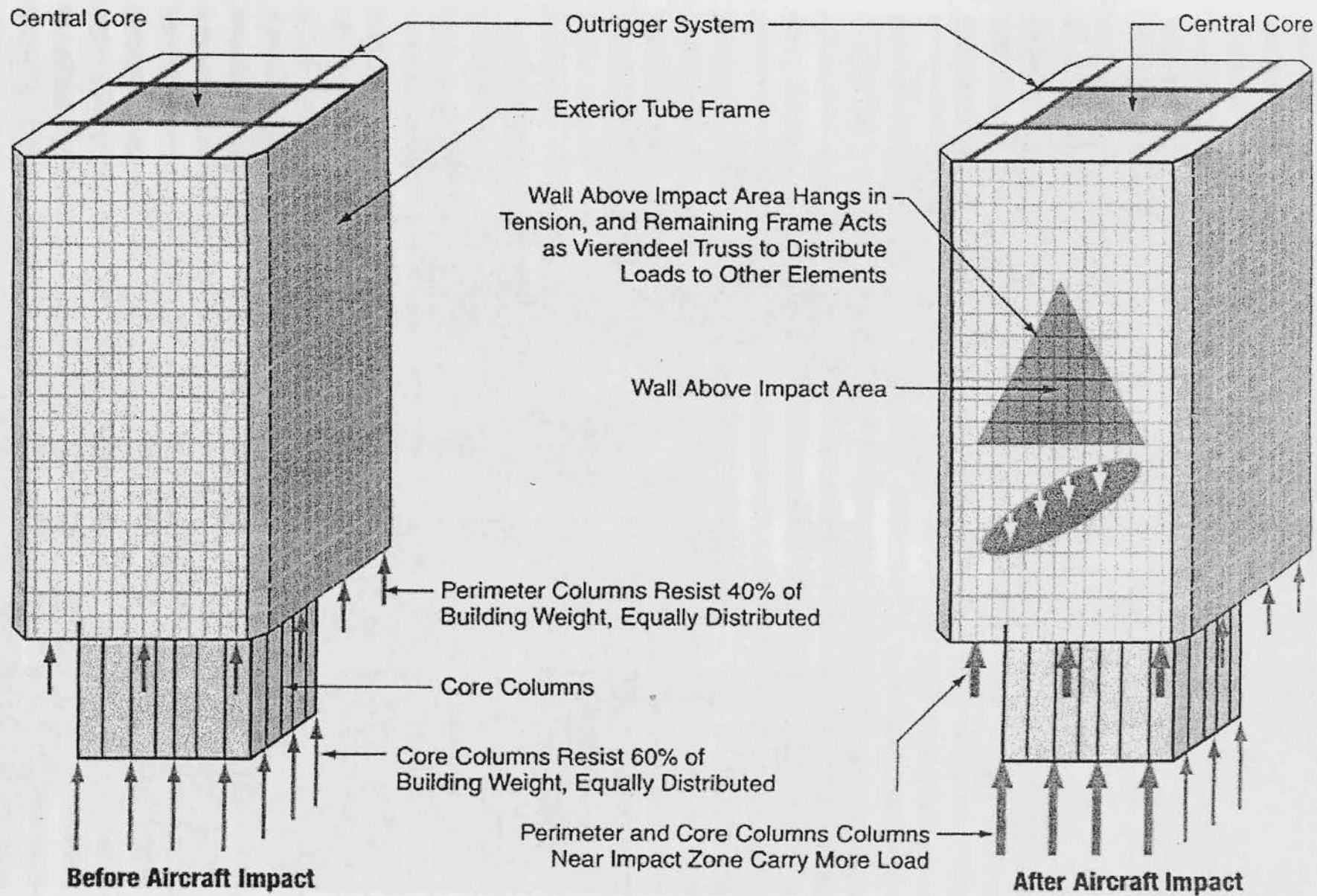


## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

### Ανάφλεξη

- Άμεση ανάφλεξη καυσίμου αεροπλάνου: Πυρακτωμένη σφαίρα διαμέτρου 60 m, εντός 2 sec. Άμεση κατανάλωση καυσίμου 12.000 λίτρα εντός 5 min.
- Υπόλοιπα 28.000 λίτρα. Τα μισά περίπου χύθηκαν έξω, τα άλλα μισά, 14.000 λίτρα προκάλεσαν ανάφλεξη περιεχομένου του κτιρίου.
- Ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας καύσης περί τα 1 – 1,6 GW ανά κτίριο. Περί το 1/3 – 1/2 της ενέργειας αυτής διάχυση προς το περιβάλλον. Ανάπτυξη θερμοκρασιών περί τους 1000<sup>0</sup> C. Κατανάλωση αέρα για διατήρηση της φωτιάς 15.000 – 30.000 m<sup>3</sup> / min. Έκταση της φωτιάς και θερμοκρασίες μεταβλητές κατά πλάτος και ύψος του κτιρίου.
- Όλα τα συστήματα πυρόσβεσης (αυτόματα και χειροκίνητα) εκτός λειτουργίας. Έκταση φωτιάς τέτοια που και να λειτουργούσαν, θα ήταν αναποτελεσματικά λόγω πτώσης της πίεσης, αφού θα άνοιγαν όλα μαζί ταυτόχρονα.





## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

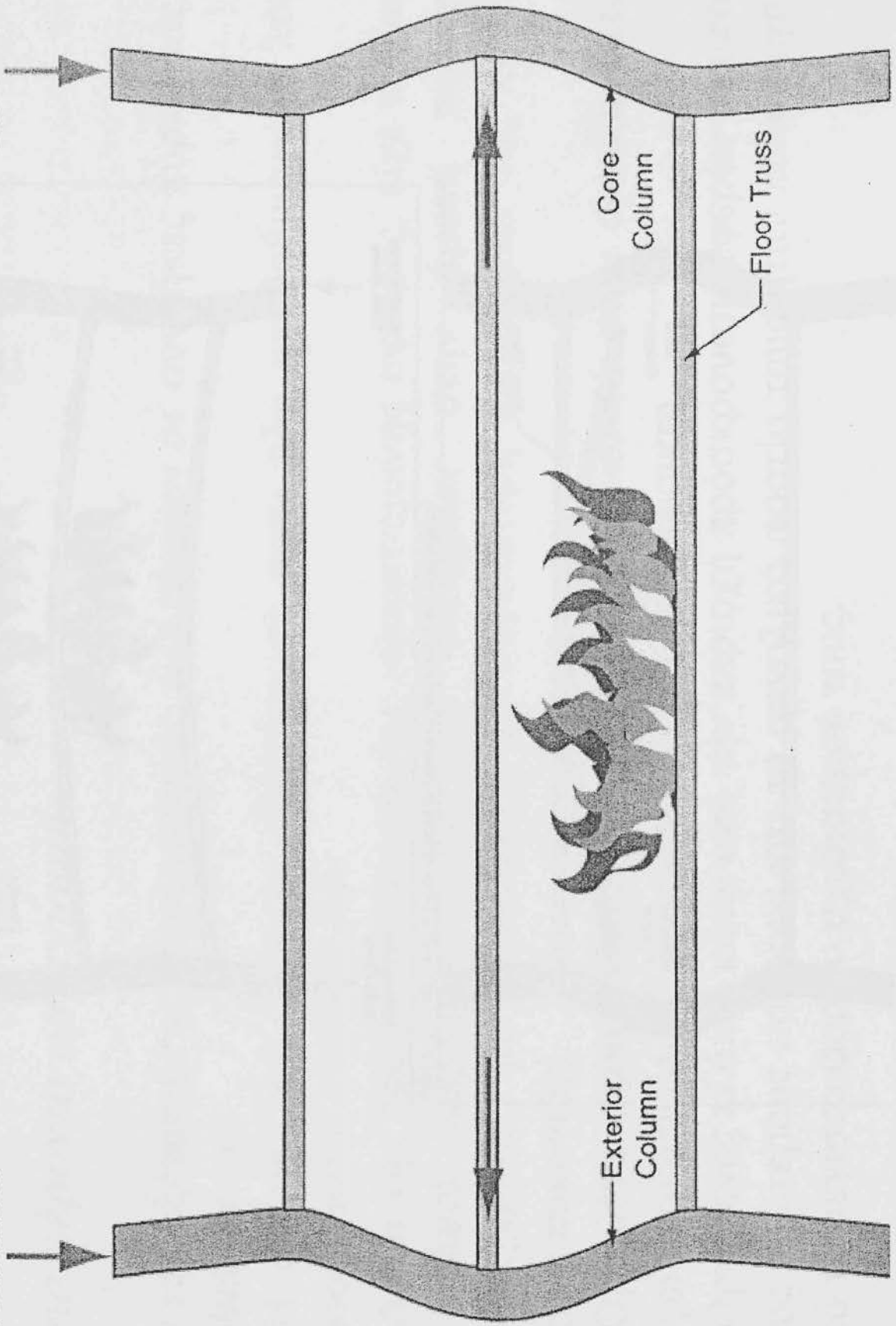
### Εκκένωση

□ Η διαταγή εκκένωσης δόθηκε μετά την πρόσκρουση στο δεύτερο πύργο. Εκκένωση κατά 99% κάτω των ορόφων πρόσκρουσης και στους δύο πύργους. Καλή εκπαίδευση προσωπικού των πύργων μετά την τρομοκρατική ενέργεια του 1983. Στους ορόφους πάνω από την πρόσκρουση δεν ήταν δυνατή η εκκένωση λόγω καταστροφής των κλιμακοστασίων.

□ Στους κατώτερους ορόφους συνωστισμός κατερχομένων προσώπων με πυροσβέστες που ανέβαιναν στο κτίριο. Επίσης, από το 10<sup>ο</sup> όροφο και κάτω τα κλιμακοστάσια γλιστρούσαν λόγω κατερχόμενου νερού πυρόσβεσης.

Building Load  
From Above

Building Load  
From Above



Core  
Column

Exterior  
Column

Floor Truss

## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

### *Αστοχία φέροντα οργανισμού*

- ❑ Για την εξέταση της συμπεριφοράς των πύργων σε συνθήκες πυρκαγιάς πρέπει να ληφθεί υπόψη:
  - Η αντοχή του φέροντα οργανισμού ήταν ήδη υποβαθμισμένη λόγω της πρόσκρουσης αεροπλάνου.
  - Λόγω της πρόσκρουσης και της πυρακτωμένης σφαίρας, είχε καταστραφεί το υλικό πυροπροστασίας των στοιχείων στην άμεση περιοχή της πρόσκρουσης, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ευαισθησία της κατασκευής έναντι πυρκαγιάς.
  - Ορισμένα υποστυλώματα βρίσκονταν ήδη κοντά στην οριακή κατάσταση λόγω ανακατανομής φορτίων από την πρόσκρουση.
  - Ορισμένες πλάκες κάτω από την περιοχή πρόσκρουσης έφεραν τα μπάζα από τους ανώτερους ορόφους και το συνολικό φορτίο τους ήταν πολύ μεγαλύτερο από το μέγιστο φορτίο σχεδιασμού τους.

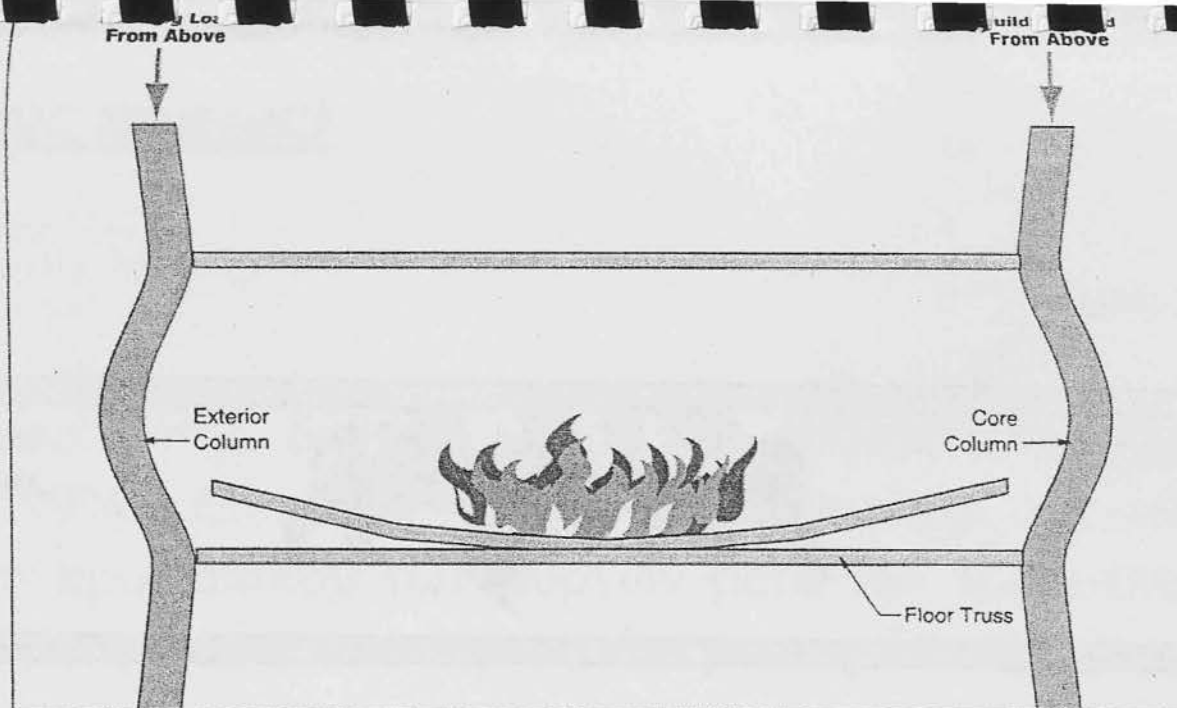
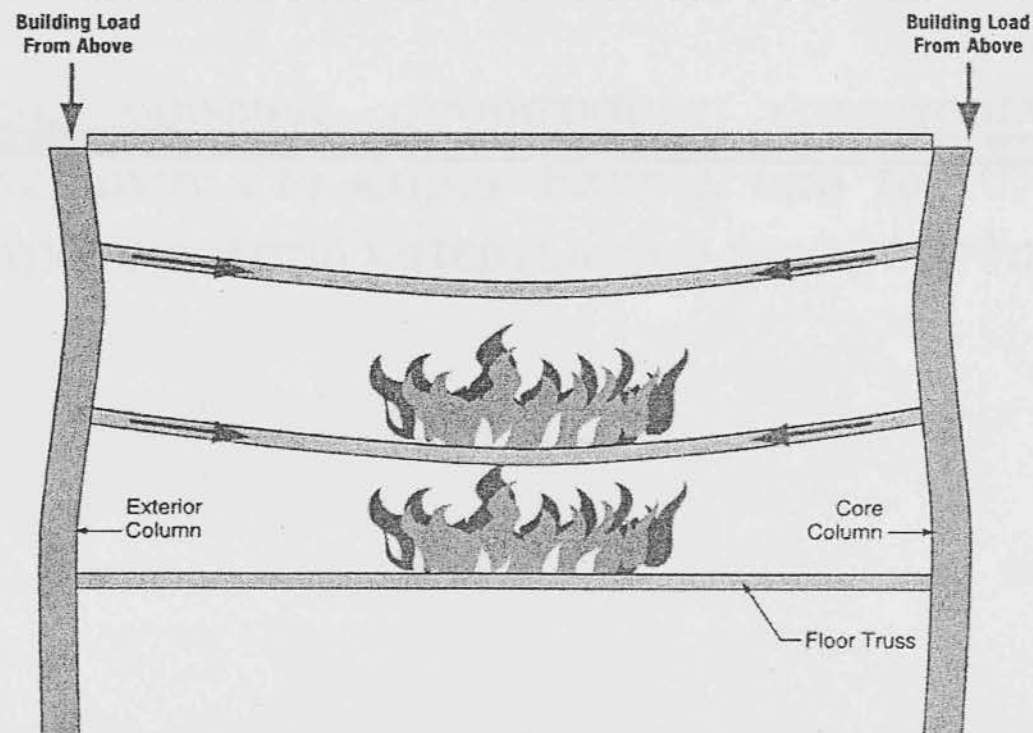


Figure 2-21 Buckling of columns initiated by failure of floor framing and connections.



## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

### Αστοχία φέροντα οργανισμού

- Οι επόμενοι παράγοντες έπαιξαν ρόλο στη σταδιακή αστοχία του κτιρίου:
  - Μείωση της αντοχής υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο παράγων αυτός έπαιξε κύριο ρόλο στα υποστυλώματα του πυρήνα.
  - Πρόσθετη ένταση σε δομικά στοιχεία και συνδέσεις λόγω επιμήκυνσης στις υψηλότερες θερμοκρασίες.
  - Η μείωση της αντοχής και δυσκαμψίας των πλακών και δικτυωμάτων, σε συνδυασμό με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου, προκάλεσαν υπερβολικά μεγάλα βέλη. Αυτό είχε ως συνέπεια την αλλαγή της συμπεριφοράς από στοιχείο δοκού σε στοιχείο καλωδίου και αύξηση των δυνάμεων στις ακραίες συνδέσεις.
  - Με την αστοχία των συνδέσεων πέφτει ένας όροφος, πράγμα που έχει ως συνέπεια όχι μόνο την αύξηση της φόρτισης στο κάτω πάτωμα, αλλά και αύξηση του μήκους λυγισμού των υποστυλωμάτων. Τελικώς τα περιμετρικά υποστυλώματα αστοχούν σε λυγισμό, στην ασθενέστερη θέση των ματισμάτων.

## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

### *Αστοχία φέροντα οργανισμού*

□ Η αστοχία άρχισε πιθανώς από τα υποστυλώματα του πυρήνα για τους εξής λόγους:

- Τα υποστυλώματα αυτά βρίσκονταν υπό G κοντά στο όριο της αντοχής τους διότι δεν παρελάμβαναν W.
- Με την ανακατανομή λόγω πρόσκρουσης, παρέλαβαν πρόσθετα φορτία από το δικτύωμα της κορυφής, καταναλώνοντας το συντελεστή ασφαλείας.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώθηκε και η αντοχή τους.

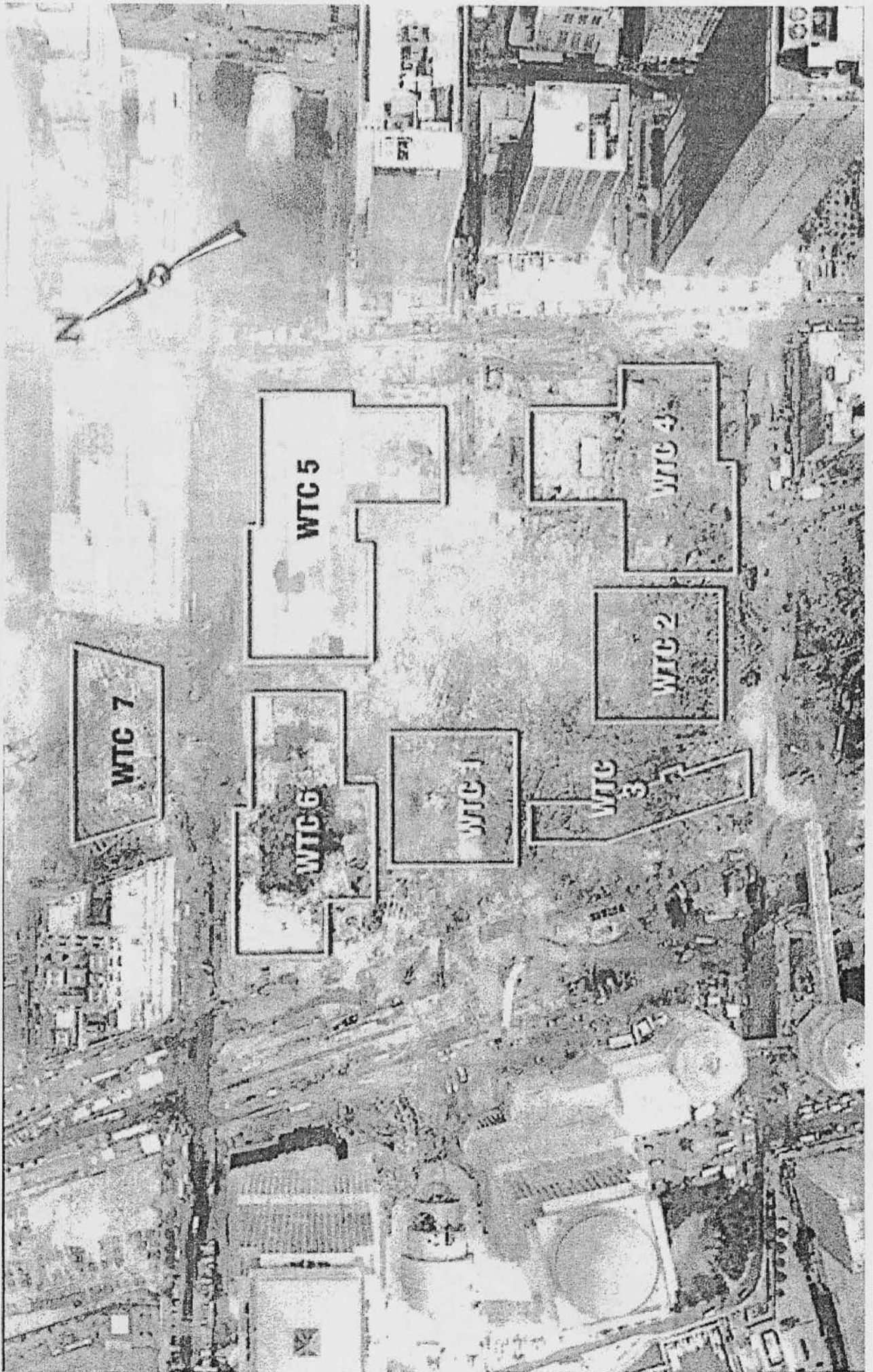
## WTC 1 (Βόρειος πύργος)

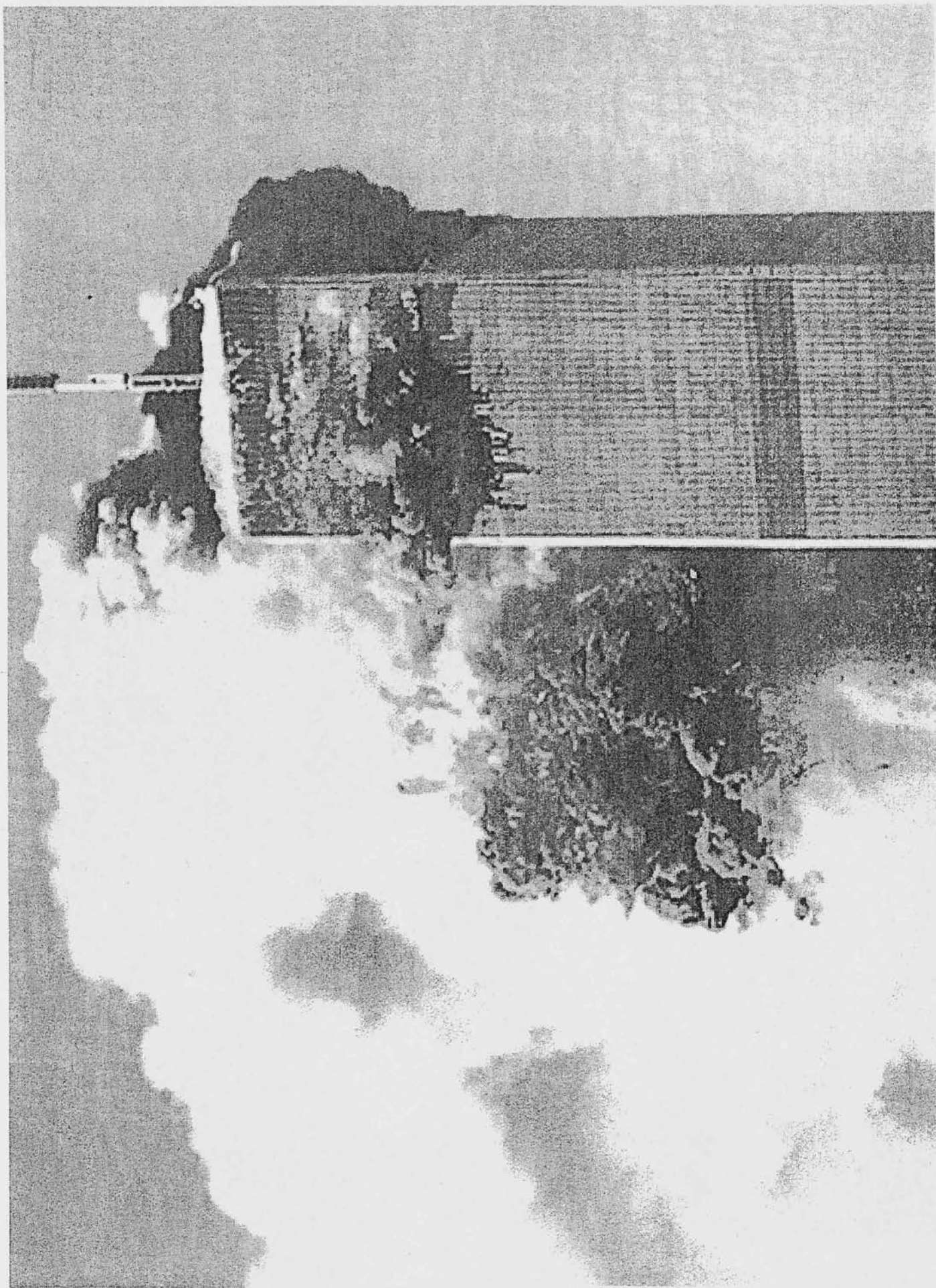
### Αστοχία φέροντα οργανισμού

□ Με την έναρξη της κίνησης, ολόκληρο το τμήμα του κτιρίου πάνω από τη θέση πρόσκρουσης έπεσε ως στερεό σώμα. Η δυναμική ενέργεια του τμήματος αυτού ήταν περίπου  $8 \times 10^9$  Joules, η οποία μετατράπηκε σε κινητική ενέργεια. Όσο επιταχυνόταν η μεγάλη αυτή μάζα και συγκρουόταν με τους κατώτερους ορόφους, προκαλούσε επιταχυνόμενη προοδευτική κατάρρευση των ορόφων.

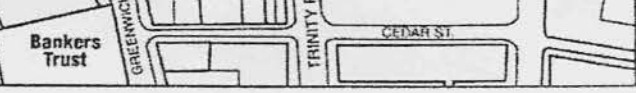
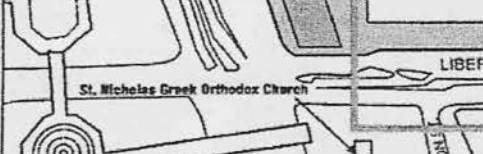
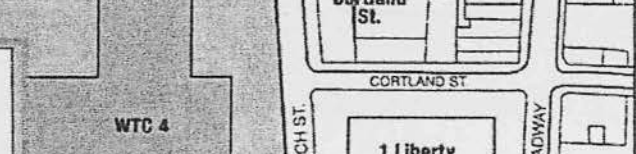
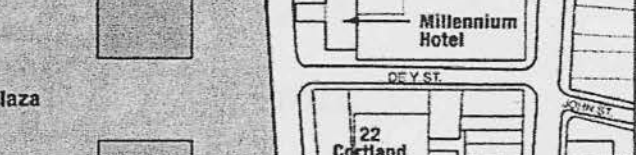
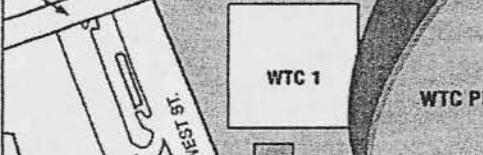
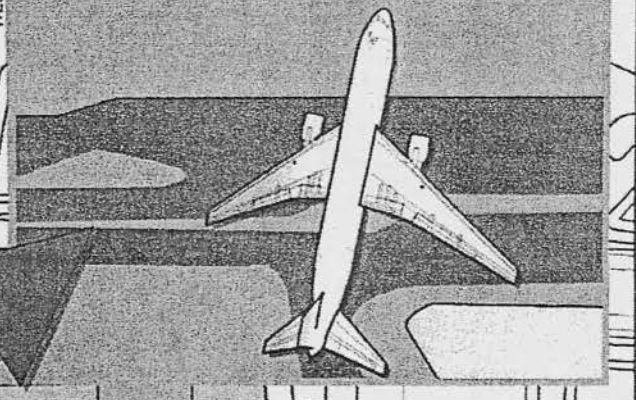
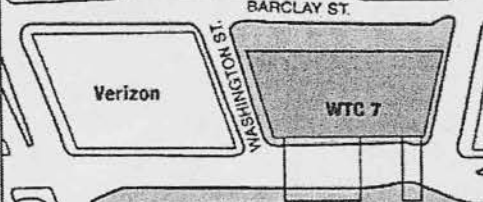
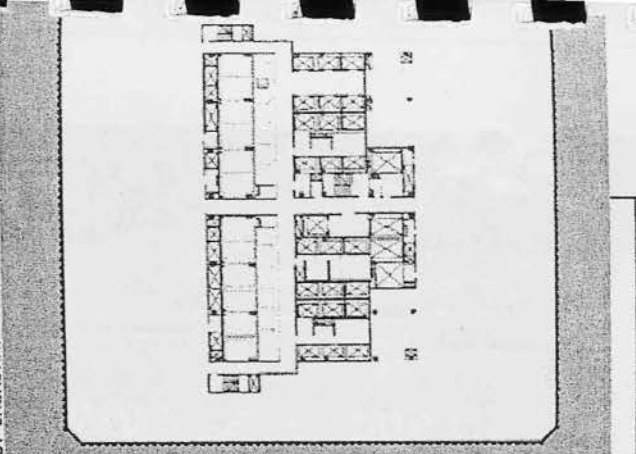
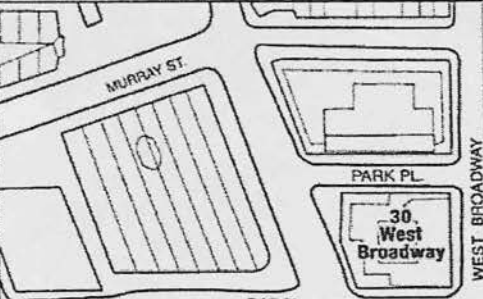
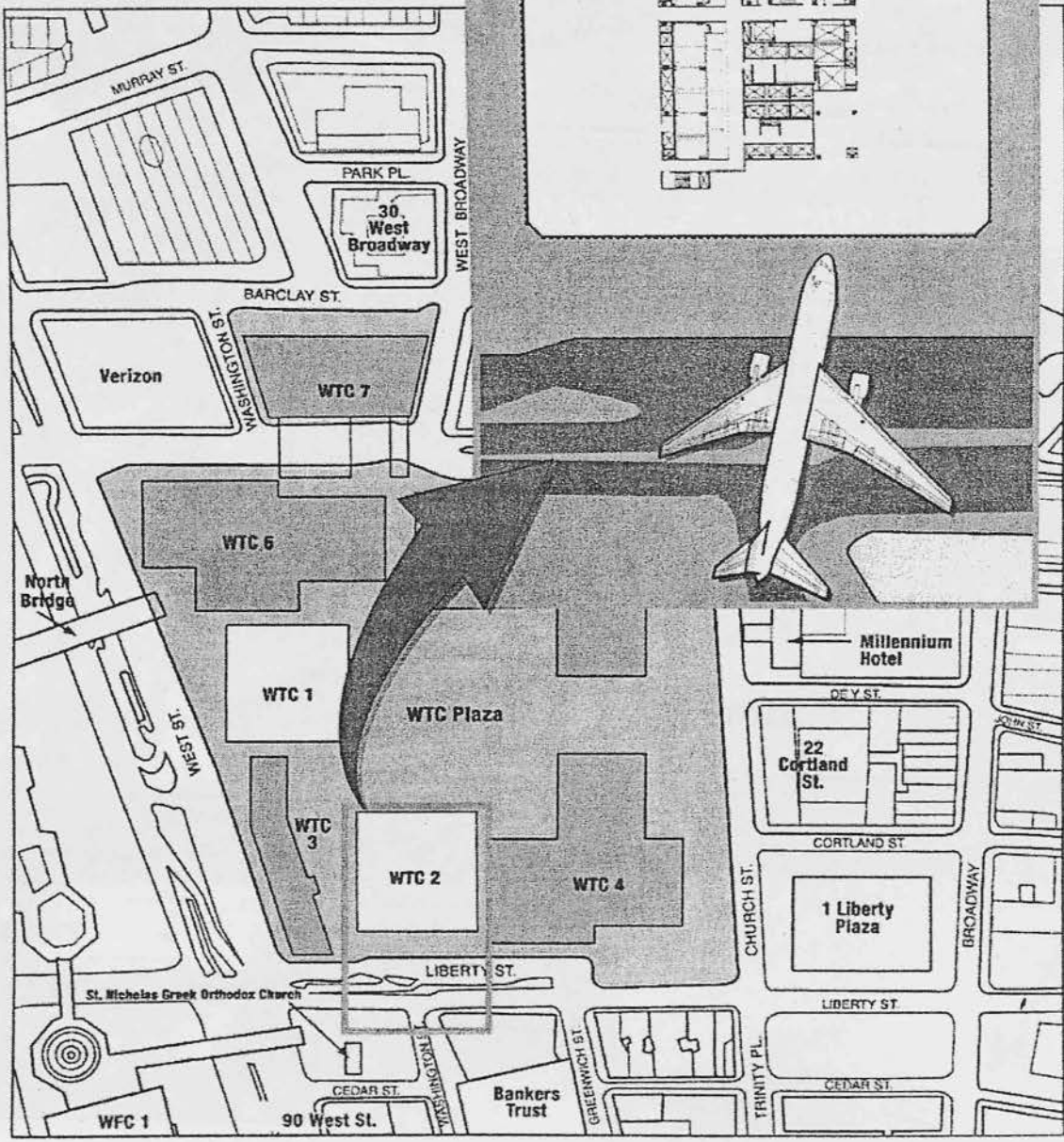
□ Η προς τα κάτω κίνηση του αρχικώς καταρρέοντος ανώτερου τμήματος του κτιρίου, προκάλεσε πίεση στον ενδιάμεσο αέρα, ο οποίος τροφοδότησε περαιτέρω τη φωτιά με νέο οξυγόνο και την έσπρωξε προς τα έξω, δίνοντας τη ψευδαίσθηση εκρήξεων. Τα συντρίμια εκτινάχθηκαν σε απόσταση 120-150 m μακριά από το κτίριο. Συνολικό βάρος μπάζων για τα 2 κτίρια μερί τους 600.000 τόνους.

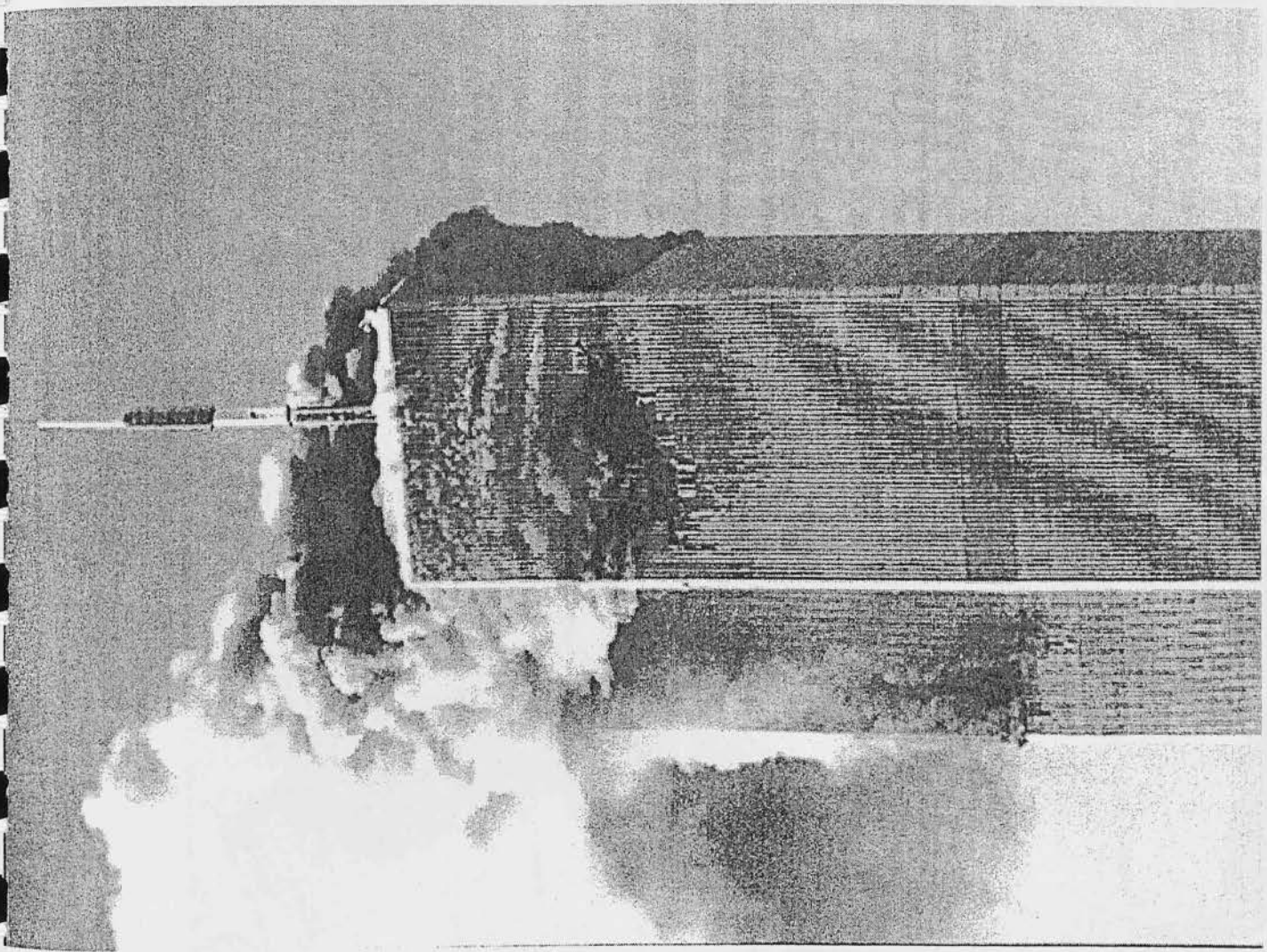


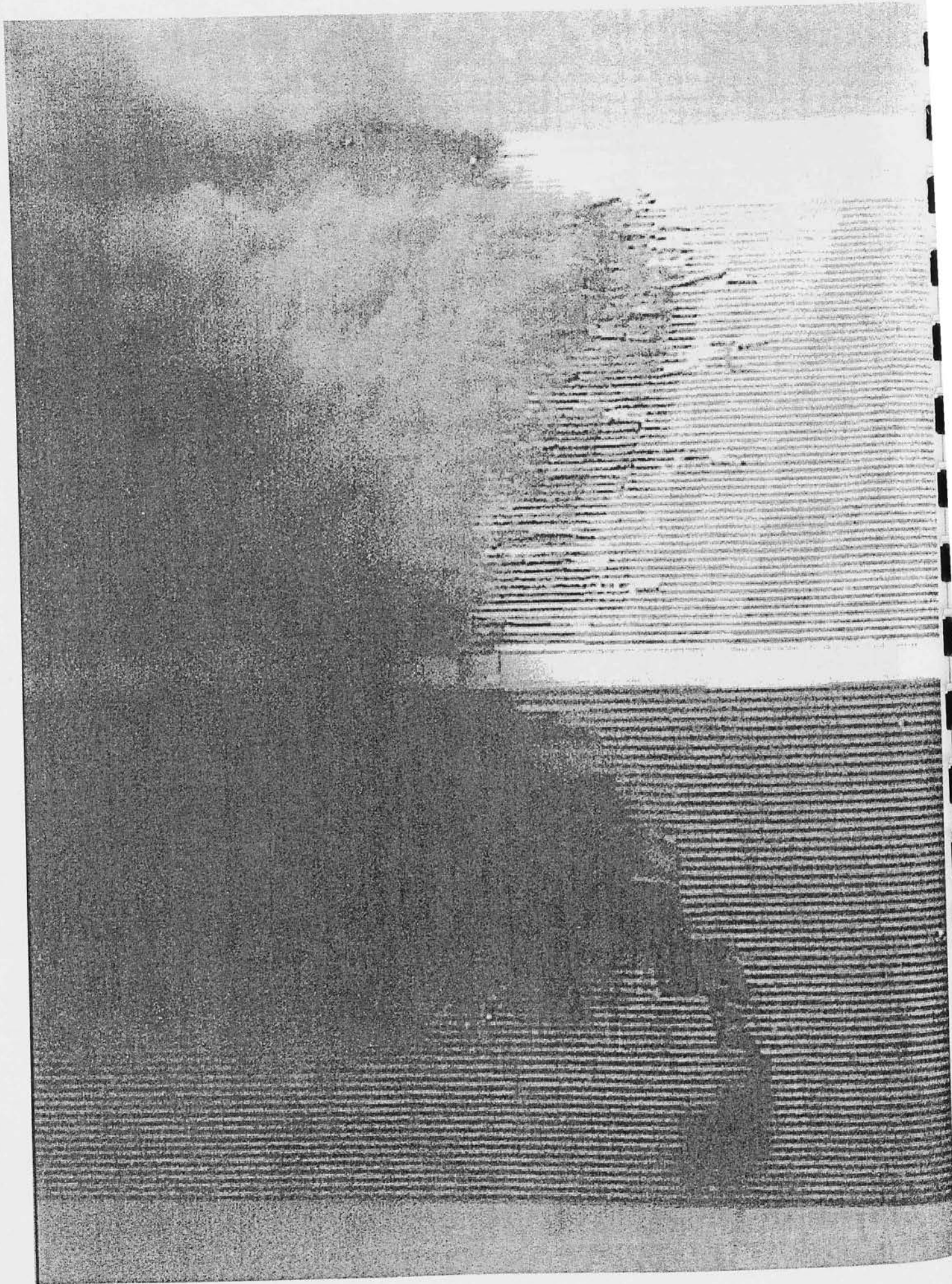


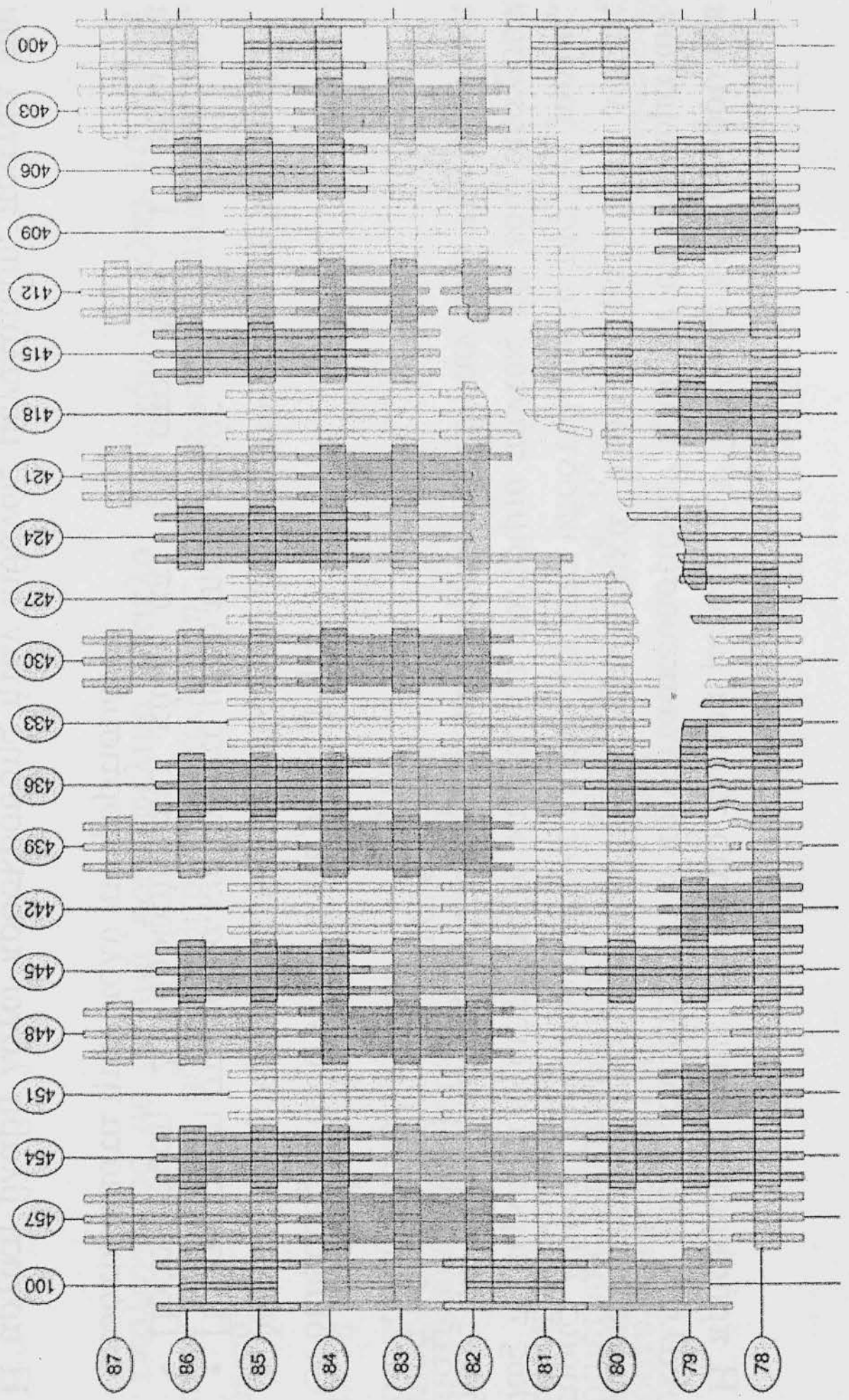


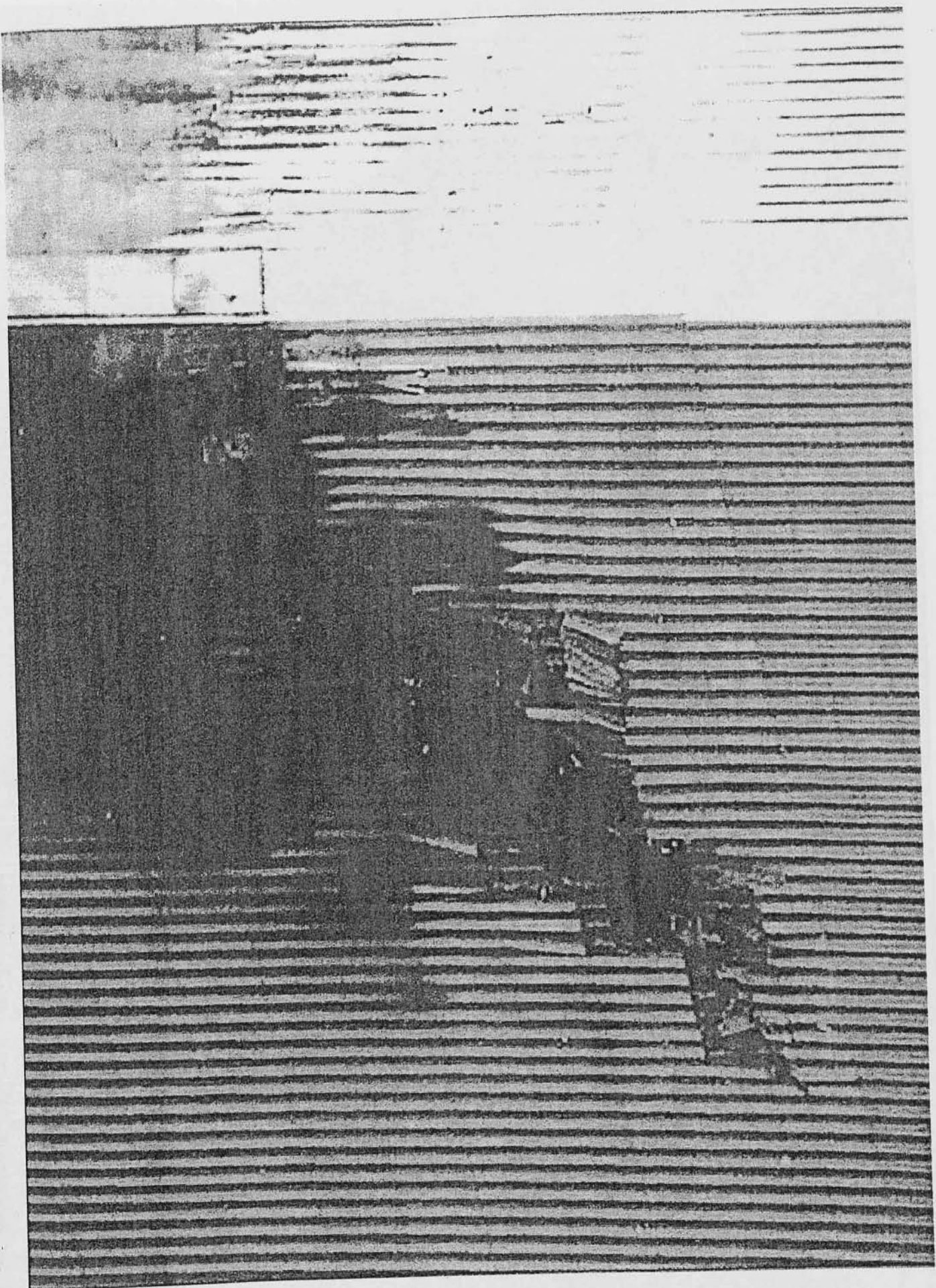
WTC 1 (Bottom)











## WTC 2 (Νότιος πύργος)

□ Η πρόσκρουση έγινε στη νότιο πλευρά μεταξύ των 78<sup>ου</sup> και 84<sup>ου</sup> ορόφου και προκάλεσε άμεση κατάρρευση 6 προκατασκευασμένων τριάδων υποστυλωμάτων. Συνολικά κατέρρευσαν άμεσα 27-32 περιμετρικά υποστυλώματα της νότιας πλευράς. Άμεση ζημιά προκλήθηκε επίσης και στα υποστυλώματα της ΝΑ γωνίας, καθώς το αεροπλάνο διέτρησε το κτίριο. Τα συντρίμια πάντως και εδώ διέσχισαν πλήρως το κτίριο, καθώς οι τροχοί και μια μηχανή βρέθηκαν από την απέναντι πλευρά και στη στέγη του WTC 5.

□ Οι διαφορές μεταξύ WTC 2 και WTC 1 ήταν:

- Μεγαλύτερη ταχύτητα πρόσκρουσης (950 km/h σε σύγκριση με 750 km/h).
- Πρόσκρουση στη γωνία και όχι στο μέσο της πλευράς.
- Πρόσκρουση 20 ορόφους πιο κάτω απ' ότι στο WTC 1, όπου τα υποστυλώματα ήταν πολύ πιο φορτισμένα.

□ Η αρχική βλάβη λόγω πρόσκρουσης ήταν πιθανώς μεγαλύτερη, πράγμα που εξηγεί το μικρότερο χρόνο κατάρρευσης.



## WTC 2 (Νότιος πύργος)

□ Υπολογισμός με μόνιμα και ωφέλιμα (έπιπλα, περιεχόμενο κλπ) 10 kg/m<sup>2</sup>, έδειξαν τον εξής μέσο βαθμό εκμετάλλευσης των υποστυλωμάτων του 80<sup>ου</sup> ορόφου:

**πριν τη πρόσκρουση:**

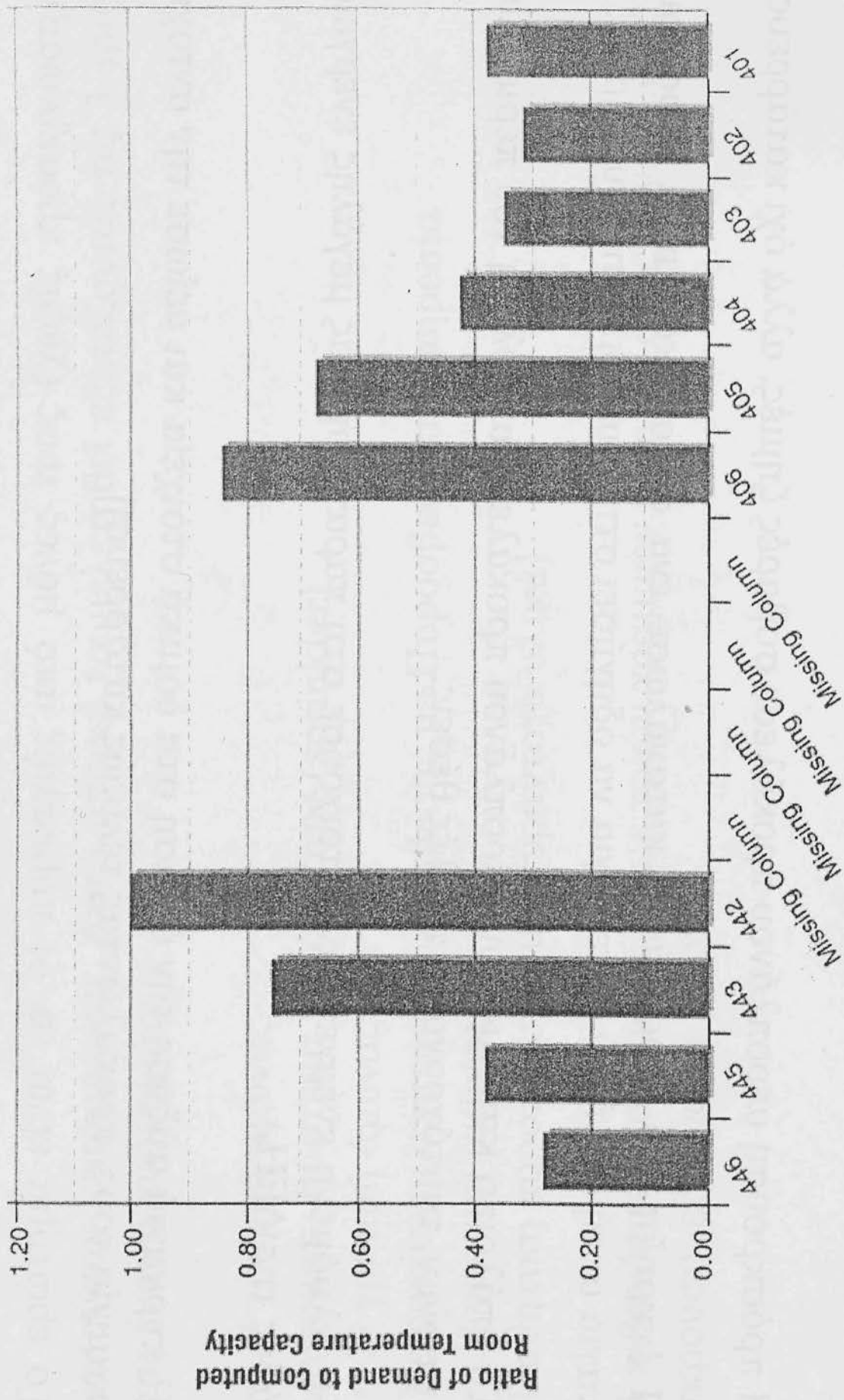
|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Περιμετρικά υποστυλώματα | 20% |
| Υποστυλώματα πυρήνα      | 60% |

**μετά τη πρόσκρουση:**

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| Περιμετρικά υποστυλώματα | μεταξύ 100% και 30% |
| Υποστυλώματα πυρήνα      | 80%                 |

## WTC 2 (Νότιος πύργος)

- ❑ Μεταφορά δυνάμεων από τα περιμετρικά υποστυλώματα πάνω από τον όροφο πρόσκρουσης στα υποστυλώματα του πυρήνα μέσω του δικτυώματος κορυφής. Στους ανώτερους ορόφους ( $> 80$ ) ο βαθμός εκμετάλλευσης έφτανε το 100%.
- ❑ Στο κτίριο αυτό υπήρχαν λιγότερα θύματα, γιατί ήδη είχε αρχίσει η εκκένωση μετά την πρόσκρουση στο WTC 1. Η εκκένωση γινόταν και με ασανσέρ. Μετά την πρόσκρουση δόθηκε αγγελία από τα μεγάφωνα ότι το κτίριο είναι ασφαλές και να παραμείνουν στις θέσεις τους. Όμως οι περισσότεροι το εκκένωσαν. Ελάχιστοι ανέβηκαν στη στέγη για να εκκενωθούν με ελικόπτερο.



South Face Column Mark

□ Το ερώτημα είναι αν οι πυρκαγιές από μόνες τους (χωρίς πρόσκρουση), θα προκαλούσαν κατάρρευση. Αυτό μπορεί να μελετηθεί εξετάζοντας τις 3 γραμμές άμυνας έναντι πυρκαγιάς:

- 1<sup>η</sup> γραμμή άμυνας

Αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης (sprinkler)

- 2<sup>η</sup> γραμμή άμυνας

Χειροκίνητο σύστημα πυρόσβεσης με Πυροσβεστική Υπηρεσία

- 3<sup>η</sup> γραμμή άμυνας

Παθητική πυροπροστασία (πυράντοχα υλικά)

□ Η πιθανότητα αστοχίας και των τριών γραμμών άμυνας, όπως συνέβη κατά την πρόσκρουση, είναι πολύ μικρή.

## 5. Συμπεράσματα

- ❑ Η πρόσκρουση αεροπλάνου προκάλεσε σοβαρές ζημιές, αλλά όχι κατάρρευση.
- ❑ Η έκρηξη του αεροπλάνου κατανάλωσε ένα σημαντικό τμήμα καυσίμου. Η πυρκαγιά αυτή δεν ήταν αρκετή για να οδηγήσει στην κατάρρευση του κτιρίου.
- ❑ Το υπόλοιπο καύσιμο του αεροπλάνου προκάλεσε ανάφλεξη του περιεχομένου των κτιρίων, ταυτόχρονα σε πολλές θέσεις.
- ❑ Η εκλυόμενη ενέργεια αντιστοιχούσε στη παραγωγή μιας μεγάλης ενεργειακής μονάδας της ΔΕΗ.
- ❑ Η πυρκαγιά αύξησε την ένταση στα δομικά στοιχεία και μείωσε την αντοχή και δυσκαμψία τους, προκαλώντας τελικώς κατάρρευση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- D.I. Nwosu and V.K.R. Kodur, Behaviour of steel frames under fire conditions Can. J. Civ. Eng. 26: 156–167 (1999)
- Insights, Performance of Metal Buildings in High Winds, No. 9 - January 1999 ISSN 1089-6058
- Huang, Z., Burgess, I.W. and Plank, R.J., NON-LINEAR MODELLING OF THREE FULL-SCALE STRUCTURAL FIRE TESTS, Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, S1 3JD, UK. School of Architectural Studies, University of Sheffield, S10 2TN, UK.
- DR B R KIRBY Corus Fire Engineering Consultancy, Swinden Technology Centre, Rotherham, S60 3AR, United Kingdom, NEW RESEARCH IN THE UNDERSTANDING OF STEEL FRAMES IN FIRE AND THE DEVELOPMENT OF NEW FIRE ENGINEERED SOLUTIONS APPLICABLE TO TALL BUILDINGS, Proceedings of the CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings, October 2003, Malaysia
- ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, Γραφείο Επιστημονικού Έργου, ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 2η ΔΙΑΛΕΞΗ 18 ΜΑΡΤΙΟΥ 2003, ΘΕΜΑ: « Πυροπροστασία μεταλλικών κατασκευών » ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ
- ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ, Γραφείο Επιστημονικού Έργου, ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 2η ΔΙΑΛΕΞΗ 18 ΜΑΡΤΙΟΥ 2003 ΘΕΜΑ: « Η κατάρρευση των Δίδυμων Πύργων στη Ν. Υόρκη », ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΒΑΓΙΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ, Μέλος της ΕΕΕ Π.Μ.