



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

Οπλισμένο Σκυρόδεμα Ι

Ενότητα 2: Η μέθοδος των οριακών καταστάσεων

Γεώργιος Παναγόπουλος
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Η μέθοδος των οριακών καταστάσεων

Βασικές έννοιες, φορτία, συνδυασμοί
δράσεων

Η μέθοδος των οριακών καταστάσεων (1/2)

Βασική σχέση υπολογισμού

$$S_d \leq R_d$$

S_d : δράση σχεδιασμού (d: design)

R_d : αντίσταση σχεδιασμού

- Ως **δράσεις** εννοούμε τις διάφορες **φορτίσεις** του φορέα και κατ' επέκταση τις διάφορες **εσωτερικές δυνάμεις** (εντατικά μεγέθη) που αναπτύσσονται (πχ M , V , N)
- Ο όρος **αντίσταση** χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη δυνατότητα του φορέα να **ανταπεξέλθει** στις διάφορες φορτίσεις. Για παράδειγμα μπορεί να αναφέρεται στη **διαθέσιμη αντοχή** των δομικών στοιχείων
 - Ροπή αντοχής, τέμνουσα αντοχής κ.τ.λ.
 - Επιτρεπόμενα μεγέθη **παραμορφώσεων** (π.χ βέλος κάμψης, άνοιγμα ρωγμής κ.τ.λ.)

Η μέθοδος των οριακών καταστάσεων (2/2)

Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες οριακών καταστάσεων

1. Οριακές καταστάσεις αστοχίας

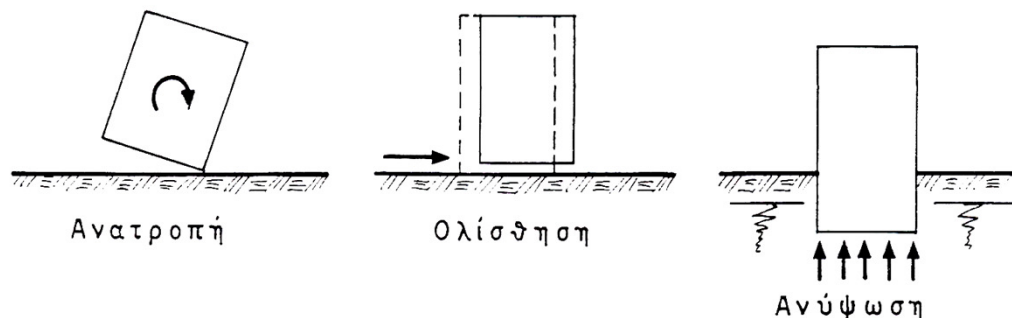
- Σχετίζονται με την **κατάρρευση** ή **αστοχία** μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας ισορροπίας ή ευστάθειας
- Αφορούν μορφές αστοχίας που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την **ασφάλεια** των χρηστών

2. Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας

- Σχετίζονται με την **ευκαμψία** της κατασκευής, δηλαδή την **παραμόρφωση**, τη **ρηγμάτωση** και την **ταλάντωση** που προκαλεί **βλάβη** σε δομικά και μη δομικά στοιχεία
- Πραγματοεύονται τη διασφάλιση της **κανονικής, καθημερινής χρήσης** μιας κατασκευής και την εμπέδωση του **αισθήματος ασφαλείας** των χρηστών καθώς και την αποφυγή με αρνητικών επιδράσεων στην **αισθητική** της κατασκευής

Οριακές καταστάσεις αστοχίας (1/2)

1. **Απώλεια στατικής ισορροπίας** ενός στοιχείου ή του συνόλου της κατασκευής θεωρούμενης ως στερεού σώματος (ανατροπή, ολίσθηση, ανύψωση κτλ)



2. **Μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό**

- Καλύτερη συμπεριφορά σε **υπερστατικούς** φορείς
- Οι περιοχές πιθανής αστοχίας πρέπει να διαθέτουν δυνατότητα ανελαστικής παραμόρφωσης (**πλαστιμότητα**) ώστε να μπορούν να επιτρέπουν παραμορφώσεις χωρίς σημαντική πτώση αντοχής

Οριακές καταστάσεις αστοχίας (2/2)

3. Οριακές καταστάσεις αντοχής σε κρίσιμες διατομές

- Έναντι ορθών εντατικών μεγεθών (ροπή κάμψης με αξονική δύναμη)
- Έναντι διατμητικών καταπονήσεων (τέμνουσα, στρέψη, διάτρηση, συνάφεια)

4. Οριακές καταστάσεις λυγισμού και ύβωσης

- Πρόκειται για οριακές καταστάσεις αστοχίας λόγω παραμόρφωσης του φορέα. Σε λυγισμό εξετάζονται οι γραμμικοί φορείς και σε ύβωση οι επιφανειακοί
- Αποτελούν πρόβλημα κυρίως των εύκαμπτων κατασκευών (πχ μεταλλικές)

5. Οριακές καταστάσεις κόπωσης

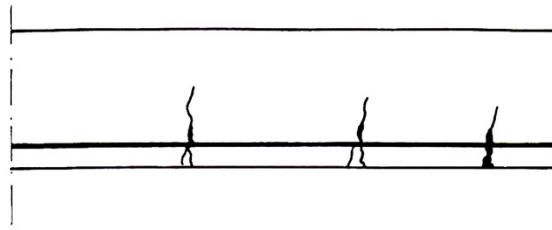
- Επαναλαμβανόμενη φόρτιση, πολλών κύκλων επανάληψης
- Ο σεισμός δεν αποτελεί τέτοια φόρτιση (λίγες επαναλήψεις)
- Δεν αποτελεί πρόβλημα όλων των φορέων, παρά μόνον ειδικών κατασκευών (γέφυρες, βιομηχανικά κτίρια με μηχανές που προκαλούν ταλαντώσεις κ.α.)
- Αστοχία υπό ένταση μικρότερη της οριακής αντοχής μετά από ορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης

Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας

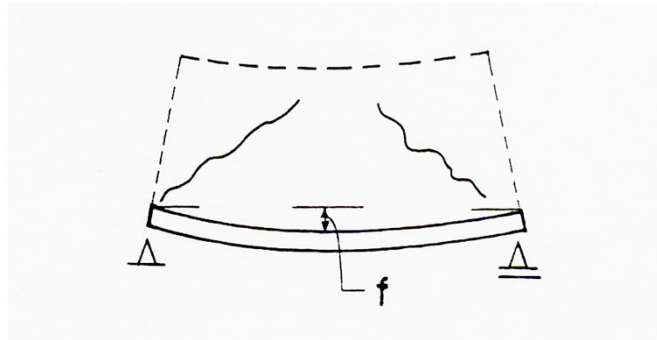
Οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας προέρχονται από:

1. Ρηγμάτωση ή και υπέρβαση τάσεων
2. Παραμορφώσεις ή βέλη
3. Ταλαντώσεις

Ρηγμάτωση του
σκυροδέματος από
εφελκυσμό



Παραμορφώσεις ή
βέλη (κάμψης)

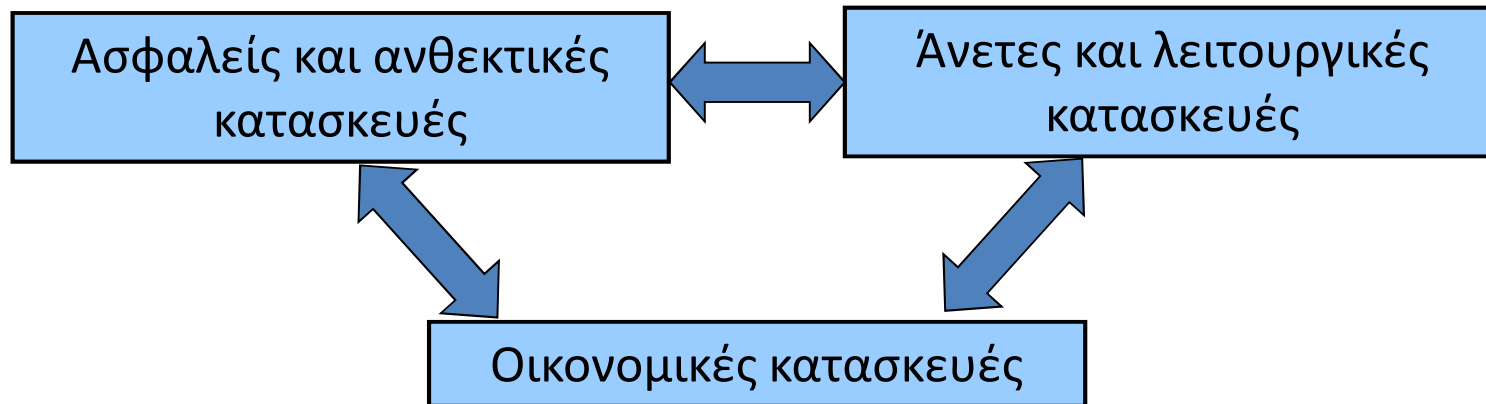


Η υπέρβαση ορισμένων ορίων
επιδρά:

- στην **αισθητική**
- στο **αίσθημα ασφαλείας**
- προκαλεί βλάβες **τοπικού χαρακτήρα** (τελειώματα, υπερκείμενες ψαθυρές τοιχοποιίες πλήρωσης κ.λ.π.)

Στόχος μεθόδου οριακών καταστάσεων

Τελικός στόχος είναι πάντα να σχεδιάζονται



...αλλά

- Οι ιδιότητες των υλικών δεν είναι γνωστές με ακρίβεια
- Τα φορτία δεν είναι γνωστά
- Οι μέθοδοι υπολογισμού είναι προσεγγιστικές

Δράσεις σχεδιασμού (1/2)

- Μόνιμες και μεταβλητές (με διάρκεια)
 - Αναφέρονται στις συνθήκες κανονικής χρήσης
- Τυχηματικές
 - Εξαιρετικές συνθήκες οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή και όχι. Πυρκαγιά, έκρηξη, πρόσκρουση, συνέπειες τοπικής αστοχίας
- Σεισμικές
 - Απόκριση του φορέα σε σεισμικές διεγέρσεις -> Ευρωκώδικας 8
- Παροδικές
 - Καταστάσεις που εμφανίζονται στον φορέα για περιορισμένο χρονικό διάστημα, όπως κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή επισκευής

Δράσεις σχεδιασμού (2/2)

- Οι τιμές των δράσεων σχεδιασμού λαμβάνονται από τα σχετικά μέρη του EN1991 (Ευρωκώδικας 1)
 - **EN 1991-1.1 Πυκνότητες, ίδιο βάρος και επιβαλλόμενα φορτία**
 - EN 1991-1.2 Δράσεις πυρός
 - EN 1991-1.3 Φορτία χιονιού
 - EN 1991-1.4 Ανεμοπίεση
 - EN 1991-1.5 Θερμοκρασιακές δράσεις
 - EN 1991-1.6 Δράσεις κατά την εκτέλεση
 - EN 1991-1.7 Τυχηματικές δράσεις που οφείλονται σε κρούση ή εκρήξεις
 - EN 1991-2 Φορτία κυκλοφορίας γεφυρών
 - EN 1991-3 Δράσεις προκαλούμενες από γερανούς και λοιπά μηχανήματα
 - EN 1991-4 Δράσεις σε σιλό και δεξαμενές
- Δράσεις **ωθήσεων εδάφους** και **πίεσης νερού** λαμβάνονται από τον **Ευρωκώδικα 7**
- Οι **σεισμικές** δράσεις λαμβάνονται από τον **Ευρωκώδικα 8**

Τιμές σχεδιασμού

- Οι τιμές με τις οποίες οι δράσεις και οι αντιστάσεις εισάγονται στους υπολογισμούς (δηλαδή στην ανίσωση $S_d \leq R_d$) ονομάζονται **τιμές σχεδιασμού** και λαμβάνουν το **δείκτη d** (design).
- Οι τιμές σχεδιασμού S_d μιας δράσης προκύπτουν από τον **πολλαπλασιασμό** της χαρακτηριστικής της τιμής S_k επί τους επιμέρους συντελεστές ασφάλειας γ_f .

$$S_d = \gamma_f \cdot S_k$$

- Οι τιμές σχεδιασμού R_d ενός μεγέθους αντίστασης προκύπτουν από τη **διαίρεση** της χαρακτηριστικής του τιμής R_k με τους επιμέρους συντελεστές ασφάλειας γ_m

$$R_d = R_k / \gamma_m$$

Μόνιμες δράσεις

Στις μόνιμες δράσεις με χαρακτηριστική τιμή G_k περιλαμβάνονται:

- Το ίδιο βάρος της φέρουσας κατασκευής
- Το βάρος του οργανισμού πλήρωσης (π.χ. τοιχοπληρώσεις), των επιστρώσεων (π.χ. δάπεδα) και επικαλύψεων
- Γενικά το βάρος κάθε πρόσθετης κατασκευής που θα παραμείνει μονίμως στο έργο

$$G_d = \gamma_g \cdot G_k$$

Επιμέρους συντελεστές ασφάλειας γ_G			
Οριακές καταστάσεις	Συνδυασμοί	Επιρροή δράσης	
		Δυσμενής	Ευμενής
Αστοχίας	Βασικοί	1.35	1.00
	Τυχηματικοί	1.00	1.00
Λειτουργικότητας	Βασικοί	1.00	1.00

Μεταβλητές δράσεις

Στις μεταβλητές δράσεις με χαρακτηριστική τιμή Q_k περιλαμβάνονται:

- Τα ωφέλιμα φορτία μιας κατασκευής (εξοπλισμός, ένοικοι, οχήματα κτλ)
- Περιβαλλοντικές δράσεις όπως άνεμος, χιόνι κτλ
- Έμμεσες δράσεις / επιβαλλόμενες παραμόρφωσης (διαφορικές καθιζήσεις, θερμοκρασία, συστολή ξήρανσης κλπ.)

$$Q_d = \gamma_q \cdot Q_k$$

Επιμέρους συντελεστές ασφάλειας γ_q			
Οριακές καταστάσεις	Συνδυασμοί	Επιρροή δράσης	
		Δυσμενής	Ευμενής
Αστοχίας	Βασικοί	1.50	0.00
	Τυχηματικοί	1.00	0.00
Λειτουργικότητας	Βασικοί	1.00	0.00

Τυπική φόρτιση κτιριακών κατασκευών

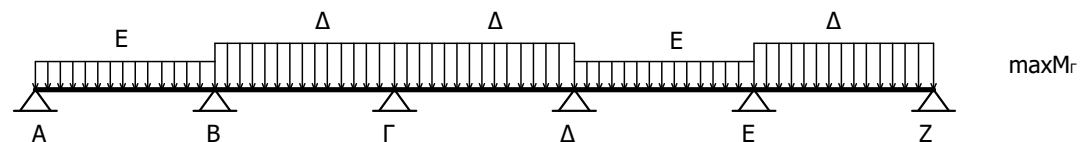
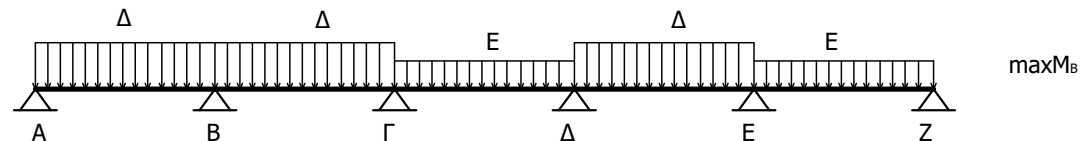
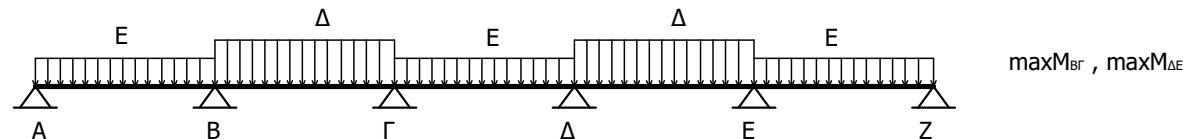
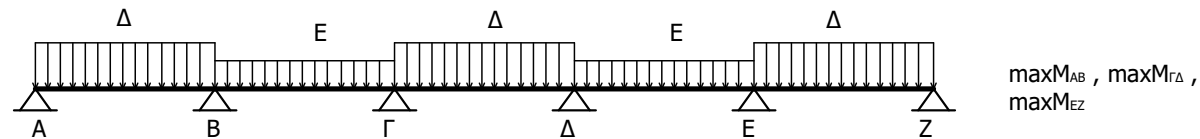


Τα ωφέλιμα φορτία είναι συνήθως της τάξης του 20% του συνόλου της φόρτισης της κατασκευής⁽¹⁾

⁽¹⁾ Κωνσταντινίδης Απ. (2008) "Αντισεισμικά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, Τόμος Α - Η Τέχνη της Κατασκευής και η Μελέτη Εφαρμογής", π-SYSTEMS INTERNATIONAL A.E., Αθήνα

Δυσμενείς και ευμενείς δράσεις

- **Δυσμενής** είναι μία δράση όταν λόγω της θέσης και της έντασής της προκαλεί τη δυσμενέστερη επίπτωση στο εξεταζόμενο μέγεθος.
- **Ευμενής** είναι μία δράση όταν προκαλεί την αντίθετη ακριβώς επίπτωση.



Συνδυασμοί δράσεων (1/3)

Οριακές καταστάσεις αστοχίας

- Θεμελιώδεις συνδυασμοί για μόνιμες και παροδικές καταστάσεις σχεδιασμού

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\begin{cases} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} & 0,85 \leq \xi \leq 1,00 \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{cases}$$

- Θεμελιώδεις συνδυασμοί για τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Θεμελιώδεις συνδυασμοί για σεισμικές καταστάσεις σχεδιασμού

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Συνδυασμοί δράσεων (2/3)

Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας

- Χαρακτηριστικός συνδυασμός (μη αναστρέψιμη ΟΚΛ)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Συχνός συνδυασμός (αναστρέψιμες ΟΚΛ)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Οιονεί μόνιμος συνδυασμός (αναστρέψιμες ΟΚΛ)

χρησιμοποιείται για μακροχρόνιες επιδράσεις και για την εμφάνιση του φορέα

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

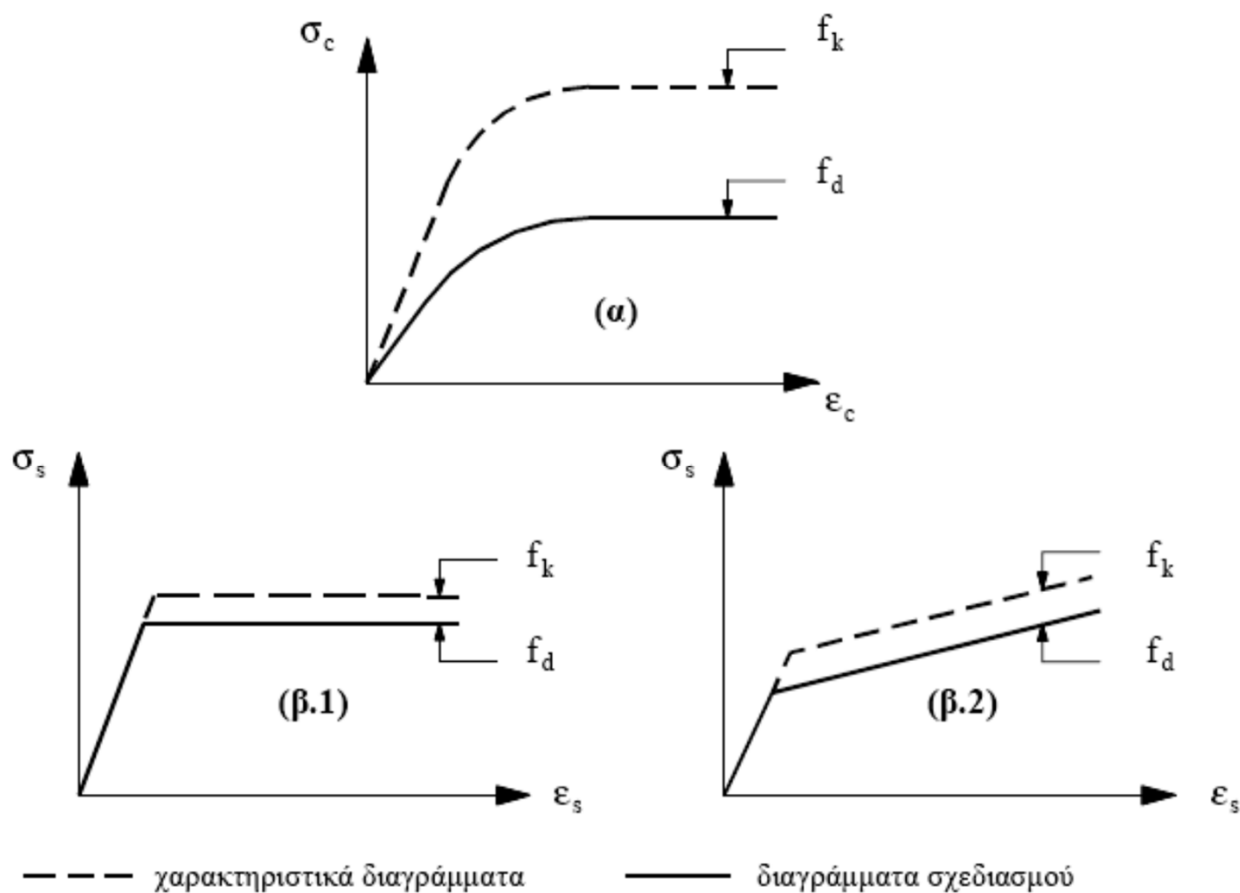
Συνδυασμοί δράσεων (3/3)

Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ψ για κτίρια

Δράσεις	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτήρια, κατηγορία (βλέπε EN 1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθη κτήρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων			
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} < \text{βάρος οχημάτων} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία H: στέγες	0,7 0	0,5 0	0,3 0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-3)*			
Φιλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H > 1000\text{ m}$	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H \leq 1000\text{ m}$	0,50	0,20	0
Φορτία ανέμου σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Θερμοκρασία (μη-πυρκαϊάς) σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι τιμές ψ μπορούν να καθορισθούν από το Εθνικό Προσάρτημα.			
* Για χώρες οι οποίες δεν αναφέρονται παρακάτω, βλέπε συναφείς τοπικές συνθήκες.			

Τιμές σχεδιασμού αντοχών (1/2)

Χρησιμοποιούνται ιδεατά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών



Τιμές σχεδιασμού αντοχών (2/2)

Επιμέρους συντελεστές ασφάλειας γ_m			
Οριακές καταστάσεις	Συνδυασμοί	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
		γ_c	γ_s
Αστοχίας	Βασικοί	1.50	1.15
	Τυχηματικοί	1.20	1.00
	Τυχηματικοί με σεισμό	1.50	1.15
Λειτουργικότητας	Βασικοί	1.00	1.00

Πχ για B500C:

$$f_{yk}=500\text{MPa} \rightarrow f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 500/1.15=434.78\text{MPa}$$