

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Η διαδικασία ελέγχου αντοχής σε κάμψη. Ο χώρος αντοχής.

Α.1. Εισαγωγή

Το θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού πυρήνα με τον οποίο το ΟΣΚ εκτελεί τους ελέγχους των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι (μονοαξονικής ή διαξονικής) κάμψης με ορθή δύναμη, βασίζεται στο άρθρο: «Schiefe Biegung polygonal umrandeter Stahlbeton-Querschnitte» του Dr.-Ing. H. Werner, το οποίο έχει δημοσιευτεί στο περιοδικό Beton und Stahlbetonbau 4/1974, [13].

Για μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος, με συγκεκριμένη γεωμετρία, συγκεκριμένη διάταξη ράβδων οπλισμού ή/και συγκεκριμένο συνολικά τοποθετημένο οπλισμό και για τα μεγέθη έντασης τα οποία προκύπτουν από την επίλυση του μελετούμενου φορέα από το ΡΑΦ, το ΟΣΚ μπορεί να εκτελέσει το έλεγχο επάρκειας αντοχής της σε κάμψη με ορθή δύναμη.

Στο παρόν παράρτημα, περιγράφονται αναλυτικά οι αρχές του υπολογιστικού μέρους του προγράμματος, καθώς και οι παραδοχές και οι συμβάσεις που γίνονται. Επίσης γίνεται η σύνδεση των παραπάνω με τα αντίστοιχα κεφάλαια του Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΟΣ/2000).

Α.2. Αρχές Σχεδιασμού

«Ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος γίνεται για να εξασφαλιστεί η αντοχή, η λειτουργικότητα και η ανθεκτικότητά του» όπως αναφέρεται στον ΕΚΟΣ/2000, Παράγρ. 6.1.2. Για το σκοπό αυτό και σύμφωνα με το ίδιο άρθρο, θα πρέπει να εξετάζονται δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων, οι οριακές καταστάσεις αστοχίας και οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας. Οι έλεγχοι που γίνονται από το ΟΣΚ όσον αφορά στην κάμψη των διατομών, ανήκουν στην πρώτη από τις παραπάνω οριακές καταστάσεις δηλαδή την *Οριακή Κατάσταση Αστοχίας από Μεγέθη Ορθής Έντασης* όπως αυτή ορίζεται στο κεφάλαιο 10 του ΕΚΟΣ/2000.

Ο έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας, γίνεται γενικά συγκρίνοντας ένα μέγεθος έντασης από τις δράσεις (και πιο συγκεκριμένα από τους συνδυασμούς δράσεων) σχεδιασμού (S_d), με την αντίστοιχη αντίσταση σχεδιασμού (R_d), δηλαδή με την τιμή του ίδιου μεγέθους έντασης που μπορεί να αναλάβει το δομικό στοιχείο χωρίς να αστοχήσει. Θα πρέπει να είναι πάντα:

$$S_d \leq R_d \text{ (σχέση 6.1 ΕΚΟΣ/2000)} \quad (A.1)$$

Οι δράσεις και οι αντιστάσεις σχεδιασμού καθορίζονται με τη μέθοδο των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας (βλ. ΕΚΟΣ/2000, Παράγραφος 6.3). Ο όρος «αντίσταση» χρησιμοποιείται γενικά για να δηλώσει τη συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου (και κατά κανόνα των κρίσιμων διατομών του) στις επιβαλλόμενες δράσεις. Έτσι τα μεγέθη έντασης που προκύπτουν από την ανάλυση πολλαπλασιάζονται (ανάλογα και με το είδος του ελέγχου) με κάποιους *συντελεστές φορτίων*. Έτσι η τιμή σχεδιασμού της καταπόνησης προκύπτει από το συνδυασμό διαφόρων δράσεων πολλαπλασιαζόμενων με τους αντίστοιχους συντελεστές φορτίων (βλ. Κεφάλαιο 4 του παρόντος εγχειριδίου για τις δράσεις σχεδιασμού που σχηματίζει το ΡΑΦ/ΟΣΚ).

Α.3. Πεδίο Εφαρμογής – Παραδοχές Υπολογισμού

Οι έλεγχοι που εκτελεί το ΟΣΚ εφαρμόζονται για γραμμικούς φορείς όπως ορίζονται στην παράγραφο 7.2.1.1 του ΕΚΟΣ/2000, καθώς και για πλάκες και κελύφη των οποίων ο οπλισμός παρουσιάζει αμελητέα απόκλιση – μικρότερη από 15° – από τις διευθύνσεις των ροπών σχεδιασμού.

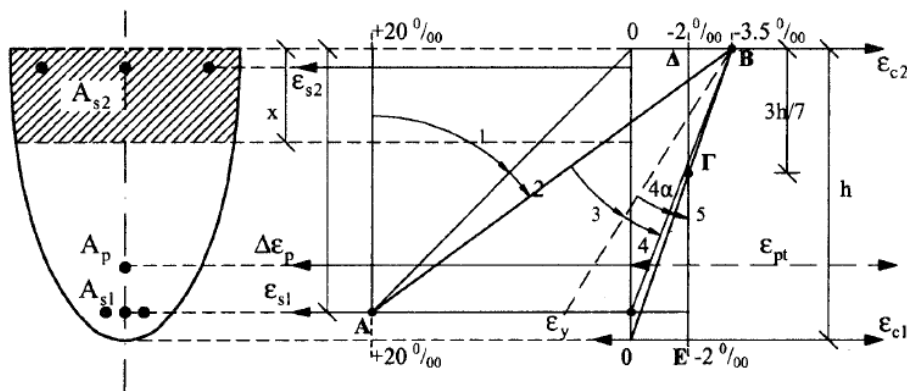
Οι υπολογισμοί ακολουθούν τις παραδοχές που ορίζονται στην παράγραφο 10.4 του ΕΚΟΣ/2000 για *Οπλισμούς με Συνάφεια*. Έτσι θεωρείται ότι ισχύουν τα εξής:

1. Η διατομή παραμένει επίπεδη και κάθετη στον παραμορφωμένο άξονα του στοιχείου.
2. Ο οπλισμός υφίσταται τις ίδιες μεταβολές παραμορφώσεων με το περιβάλλον σκυρόδεμα (πλήρης συνάφεια).
3. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αμελείται.
4. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με:
3.5 ‰ σε κάμψη (καθαρή ή με αξονική δύναμη, ορθή ή λοξή)
2.0 ‰ σε κεντρική θλίψη
5. Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του οπλισμού λαμβάνεται ίση με 20.0 ‰. Η τιμή αυτή ωστόσο είναι δυνατό να ρυθμιστεί από το χρήστη και να δοθεί ως ιδιότητα του υλικού των ράβδων

Ως παραμορφώσεις ορίζονται οι ανηγμένες μηκύνσεις και οι ανηγμένες βραχύνσεις. Ειδικά για τους προεντεταμένους τένοντες, η παραμόρφωσή τους υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την αρχική επιμήκυσή τους, (αυτή που αντιστοιχεί στην αντιπροσωπευτική τιμή της δύναμης προέντασης). Η επιτρεπόμενη πρόσθετη επιμήκυνση πέραν της αρχικής, περιορίζεται σε 10.0‰.

A.4. Κατανομή των παραμορφώσεων

Όσον αφορά στην κατανομή των παραμορφώσεων, οι παραδοχές 1, 4 και 5 της προηγούμενης παραγράφου συμπληρώνονται με βάση όσα θα εκτεθούν παρακάτω (βλ. ΕΚΟΣ/2000, Παράγρ. 10.4.2). Με βάση λοιπόν το σχήμα A.1 για τον υπολογισμό της αντοχής μίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, οι ακραίες παραμορφώσεις διέρχονται από τα τρία σημεία A, B και Γ, όπως αυτά ορίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα A.1 Διάγραμμα παραμορφώσεων διατομών οπλισμένου σκυροδέματος (ΠΗΓΗ: ΕΚΟΣ/2000).

Ένα διάγραμμα παραμορφώσεων το οποίο διέρχεται από το A αντιστοιχεί:

- είτε σε καθαρό εφελκυσμό (γραμμή κάθετη προς τον άξονα του στοιχείου διερχόμενη από το A), ή σε εφελκυσμό με μικρή εκκεντρότητα (ουδέτερη γραμμή εκτός διατομής).
- είτε σε καθαρή κάμψη ή κάμψη με αξονική δύναμη κατά την οποία $\epsilon_c > -3.5 \text{ ‰}$.

Ένα διάγραμμα παραμορφώσεων το οποίο διέρχεται από το B αντιστοιχεί:

- σε καθαρή κάμψη ή κάμψη με αξονική δύναμη κατά την οποία εξαντλείται η αντοχή του σκυροδέματος (ουδέτερη γραμμή μέσα στη διατομή).

Ένα διάγραμμα παραμορφώσεων το οποίο διέρχεται από το Γ αντιστοιχεί:

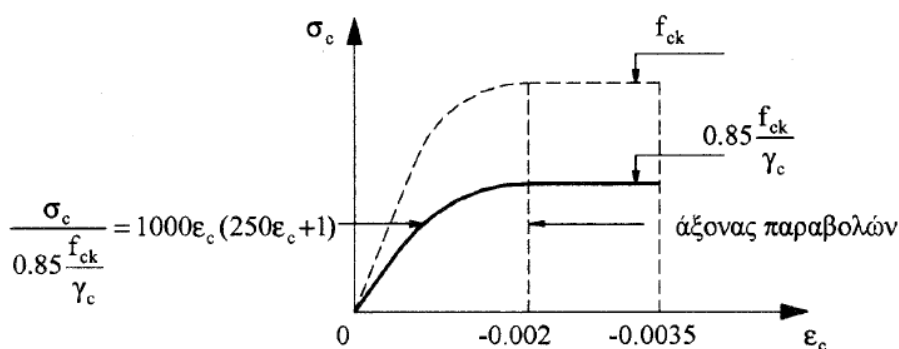
- είτε σε κάμψη με αξονική θλιπτική δύναμη (διατομή υπό θλίψη, ουδέτερη γραμμή εκτός διατομής).

Η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιεί το ΟΣΚ επιβάλλει τον περιορισμό ότι η ποιότητα χάλυβα όλων των ράβδων οπλισμού, μιας διατομής είναι όμοια. Προϋποθέτει επίσης τον σαφή ορισμό των περιοχών 1,2,3,4,4a,5, όπως φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος Α.1. Οι περιοχές αυτές οριοθετούνται από τις χαρακτηριστικές παραμορφώσεις των υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα Α.1, η περιοχή 3 είναι εκείνη στην οποία εξαντλείται η αντοχή της πλέον θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος (δηλαδή η πλέον θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος υπόκειται σε οριακή παραμόρφωση -3.5‰). Στην ίδια περιοχή η παραμόρφωση της πλέον εφελκυσμένης ράβδου, μπορεί να κυμαίνεται από την οριακή παραμόρφωση ($= 20\text{‰}$ για χάλυβα S500s) μέχρι την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα. ($e_v = f_{vd}/E = 434.783/2.1e+8 = 2.0704\text{‰}$).

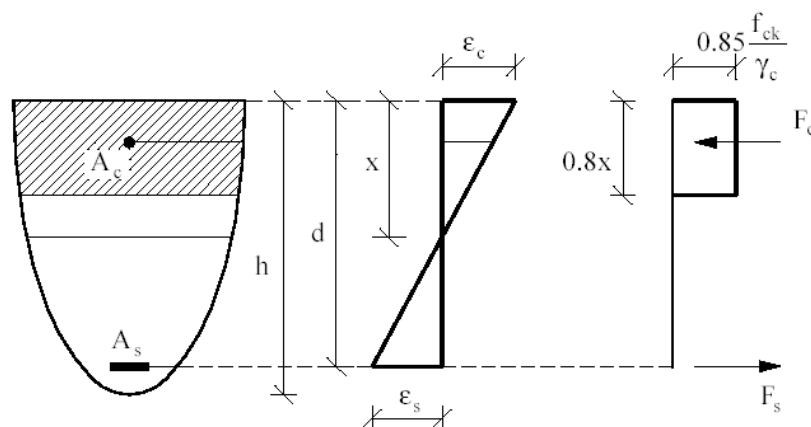
Έτσι αν στην ίδια διατομή υπήρχαν ράβδοι με διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, δεν θα ήταν δυνατό να οριστούν με σαφήνεια οι παραπάνω περιοχές του διαγράμματος, αφού για κάθε διαφορετικό χάλυβα θα είχαμε και διαφορετική οριακή παραμόρφωση και διαφορετική παραμόρφωση διαρροής (η περιοχή 3 του διαγράμματος δεν ορίζεται σαφώς). Τότε όμως δεν μπορεί να γίνει ο εντοπισμός του επιπέδου κάμψης που αντιστοιχεί στην εξωτερική φόρτιση, και ο υπολογισμός αποτυγχάνει. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν επιτρέπεται από το ΡΑΦ η χρησιμοποίηση διαφορετικής ποιότητας χάλυβα στην ίδια διατομή. Για λόγους ασφάλειας η δέσμευση αυτή επιβάλλεται από το πρόγραμμα.

Για τον υπολογισμό της αντοχής μίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη χρησιμοποιείται από το ΟΣΚ για το σκυρόδεμα, το ιδεατό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του παρακάτω σχήματος, το οποίο συστήνει ο ΕΚΟΣ/2000 στην παράγραφο 10.4.3.1.



Ο συντελεστής 0.85, λαμβάνει υπόψη τη μείωση της θλιπτικής αντοχής που οφείλεται στην μακροχρόνια και επαναλαμβανόμενη δράση των φορτίων και δεν έχει το ρόλο συντελεστή ασφάλειας.

Εάν η διατομή δεν βρίσκεται ολόκληρη υπό θλίψη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία απλοποιημένη ορθογωνική κατανομή των θλιπτικών τάσεων.



Σχήμα Α.3 Παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος.

Η κατανομή αυτή ορίζεται ως εξής (x είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής):

1) Σε ένα μήκος $0.20 \cdot x$ από την ουδέτερη γραμμή η τάση είναι μηδέν.

2) Στο υπόλοιπο ύψος $0.80 \cdot x$ η τάση είναι σταθερή και έχει τιμή:

$0.85 \cdot f_{cd}$ για θλιβόμενες ζώνες σταθερού πλάτους ή ζώνες των οποίων το πλάτος αυξάνει προς τις ίνες που θλίβονται περισσότερο.

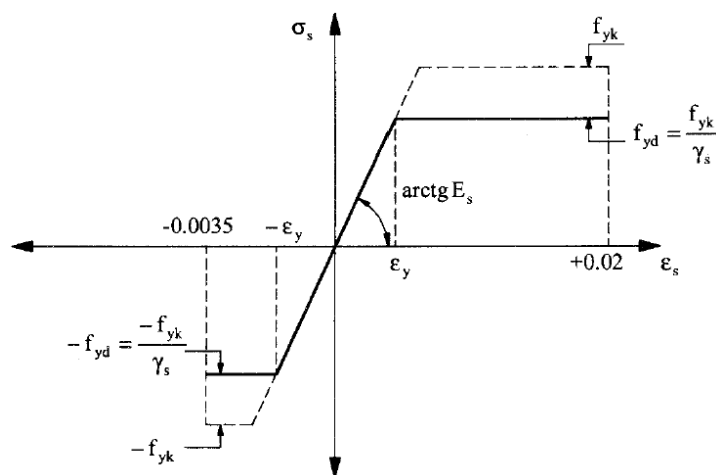
$0.80 \cdot f_{cd}$ για θλιβόμενες ζώνες των οποίων το πλάτος μειώνεται προς τις ίνες που θλίβονται περισσότερο.

Η περίπτωση αφορά διάγραμμα παραμορφώσεων το οποίο διέρχεται από το Α ή το Β του παραπάνω σχήματος. Αν το διάγραμμα διέρχεται από το Γ, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί το ορθογωνικό διάγραμμα, με την προϋπόθεση ότι η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση της πλέον θλιβόμενης ίνας, δεν διαφέρει πολύ από -3.5 ‰ .

Ο συντελεστής $0.80 \cdot f_{cd}$ αφορά π.χ. ζώνες κυκλικές ή τριγωνικές με την κορυφή προς την ακραία θλιβόμενη ίνα ή τραπεζοειδείς (περίπτωση ορθογωνικών διατομών υπό λοξή κάμψη).

Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα

Το διάγραμμα σχεδιασμού ενός συνήθους χάλυβα ή ενός χάλυβα προέντασης, προκύπτει από το χαρακτηριστικό τους διάγραμμα, μέσω διαιρέσεως του ορίου αναλογίας και των τάσεων των μεγαλύτερων του ορίου αναλογίας με τον συντελεστή ασφάλειας γ_s .



Σχήμα Α.4 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα (ΠΗΓΗ: ΕΚΟΣ/2000).

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα σχεδιασμού για τους μαλακούς χάλυβες ή τους χάλυβες ψυχρής επεξεργασίας με διέγκυση ή/και εξέλαση, όπως προέκυψε από το απλοποιημένο διάγραμμα.

A.5. Διαξονική Κάμψη με Ορθή Δύναμη

Στο ΟΣΚ η φέρουσα ικανότητα, δηλαδή η αντοχή μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη θεωρείται ότι εξαντλείται όταν συμβεί ένα από τα παρακάτω:

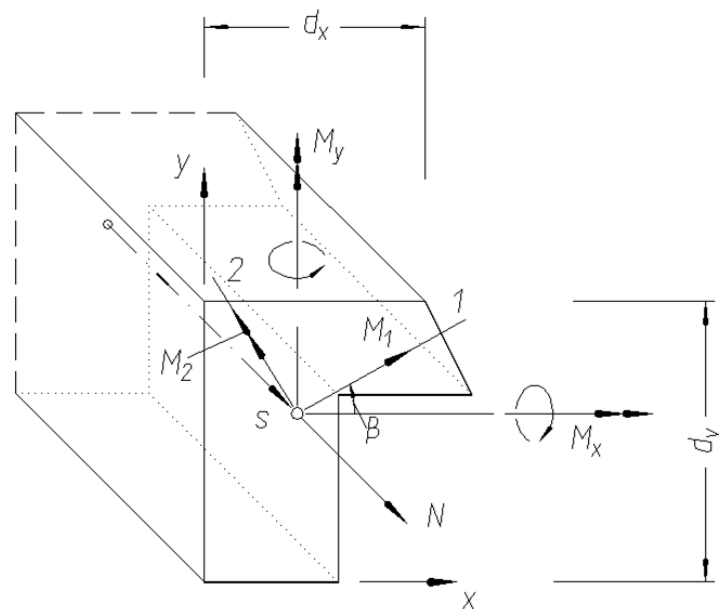
- ✓ Η ακρότατη (ως προς τον Ουδέτερο Άξονα) ίνα σκυροδέματος στην περιοχή της θλίψης, φτάσει στην οριακή τιμή $\varepsilon_{c,min}$ ($= -3.5\text{‰}$).
- ✓ Η ακραία (ως προς τον Ουδέτερο Άξονα) ράβδος οπλισμού στην περιοχή του εφελκυσμού, φθάσει στην οριακή τιμή $\varepsilon_{s,max}$ ($= 20\text{‰}$).
- ✓ Για κεντρική θλίψη, η παραμόρφωση φθάσει την οριακή τιμή $\varepsilon_{c,κεντρ}$ ($= -2\text{‰}$).

Τα εντασιακά μεγέθη αστοχίας δεν υπολογίζονται ποτέ από τις τιμές αντοχής των υλικών αλλά αναζητείται η κατάσταση παραμόρφωσης στην οποία οι μηκύνσεις φθάνουν την επιτρεπόμενη τιμή σε ένα τουλάχιστο σημείο της διατομής. Στόχος είναι:

Ο Υπολογισμός της Οριακής Αντοχής (Έλεγχος Επάρκειας). Αναζητούνται δηλαδή τα εσωτερικά εκείνα εντατικά μεγέθη (αντοχές) με τα οποία εκπληρώνεται μία τουλάχιστο από τις παραπάνω συνθήκες.

A.6. Επίπεδο Κάμψη

Έστω μια τυχαία διατομή Οπλισμένου Σκυροδέματος με τους κύριους της άξονες 1 και 2 όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα A.5. Οι κύριοι άξονες της διατομής είναι στραμμένοι ως προς ένα καρτεσιανό τοπικό σύστημα αξόνων X,Y κατά την γωνία β .



Σχήμα A.5 Διατομή οπλισμένου σκυροδέματος τυχούσας γεωμετρίας.

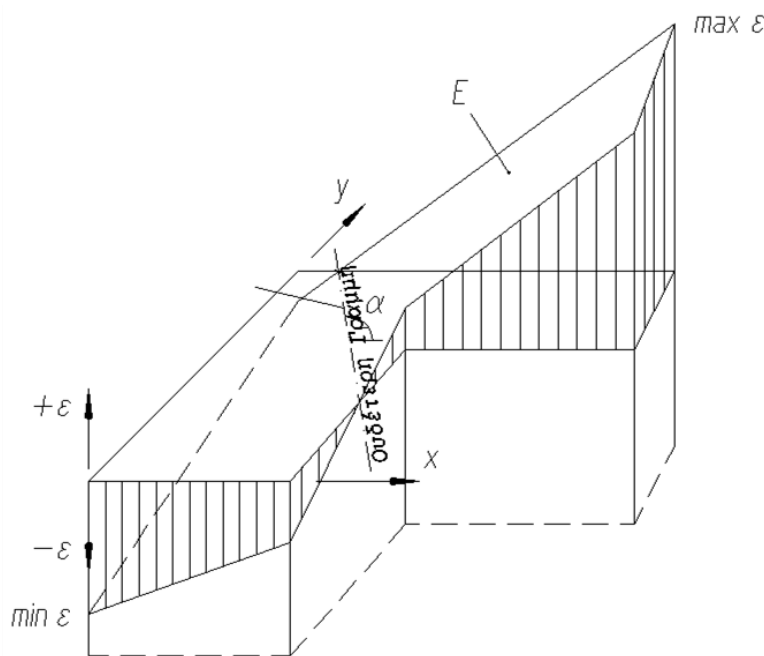
Η διατομή φορτίζεται με τις ροπές M_1 και M_2 κατά τους κύριους άξονες 1,2 και την αξονική δύναμη N . Οι προβολές των M_1 και M_2 επί των αξόνων X, Y είναι :

$$M_x = M_1 \cdot \cos \beta - M_2 \cdot \sin \beta$$

$$M_y = M_1 \cdot \sin \beta + M_2 \cdot \cos \beta$$

Στα εξωτερικά φορτία M_x , M_y και N ανθίστανται οι εσωτερικές δυνάμεις (αντοχές) της διατομής $\underline{M}_x$, $\underline{M}_y$ και $\underline{N}$. Οι αντοχές $\underline{M}_x$, $\underline{M}_y$ και $\underline{N}$, μπορούν να ερμηνευθούν σαν εσωτερικές δυνάμεις της διατομής οι οποίες προέρχονται από την παραμόρφωση της διατομής, δηλαδή την βράχυνση ή την μήκυνση της διατομής λόγω επιβολής των εξωτερικών φορτίων.

Οι μηκύνσεις ή οι βραχύνσεις της διατομής βρίσκονται σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, που θα το ονομάζουμε «επίπεδο κάμψης». Η τομή του επιπέδου κάμψης με το απαραμόρφωτο αρχικό επίπεδο της διατομής, είναι η «Ουδέτερη Γραμμή» ή «Ουδέτερος Άξονας» (Ο.Α.) της διατομής με τον συγκεκριμένο οπλισμό και την συγκεκριμένη φόρτιση. Συνεπώς το Επίπεδο Κάμψης και ο Ουδέτερος Άξονας, εξαρτώνται από την ποιότητα σκυροδέματος και χάλυβα, την γεωμετρία της διατομής, τον οπλισμό και την φόρτιση της.



Σχήμα Α.6 Ορισμός της ουδέτερης γραμμής σε τυχούσα διατομή υπό διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη

Για μια δεδομένη θέση του επιπέδου κάμψης οι λόγοι των αντίστοιχων «εσωτερικών» και «εξωτερικών» δυνάμεων είναι ίσοι μεταξύ τους.

$$k = \frac{\overline{M}_x}{M_x} = \frac{\overline{M}_y}{M_y} = \frac{\overline{N}}{N} \quad (A.2)$$

Η απόσταση των σημείων του επιπέδου κάμψης από την απαραμόρφωτη διατομή, περιορίζεται από τις μέγιστες επιτρεπόμενες μηκύνσεις και βραχύνσεις τόσο των ράβδων οπλισμού όσο και των ακραίων ινών σκυροδέματος της διατομής. Εάν ο λόγος k είναι $k < 1$ η διατομή είναι υπερδιαστασιολογημένη, εάν $k > 1$ είναι υποδιαστασιολογημένη και εάν $k = 1$, είναι ακριβώς διαστασιολογημένη.

Προσδιορισμός του επιπέδου κάμψης – Χώρος Αντοχής

Ο προσδιορισμός του επιπέδου κάμψης σε δεδομένη διατομή και με δεδομένα φορτία, δεν προκύπτει από μια «κλειστή» υπολογιστική λύση, αλλά είναι επαναληπτικά προσεγγιστικός. Χρησιμοποιούμε τα ανηγμένα μεγέθη:

$$n = \frac{N}{N_1} \quad m_x = \frac{M_x}{M_{1x}} \quad m_y = \frac{M_y}{M_{1y}} \quad (\text{A.3}\alpha)$$

και

$$\bar{n} = \frac{\bar{N}}{N_1} \quad \bar{m}_x = \frac{\bar{M}_x}{M_{1x}} \quad \bar{m}_y = \frac{\bar{M}_y}{M_{1y}} \quad (\text{A.3}\beta)$$

με A_c την επιφάνεια σκυροδέματος και f_{cd} την αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος:

$$N_1 = A_c \cdot f_{cd} \quad (\text{A.4}\alpha)$$

$$M_{1x} = \frac{2 \cdot I_x \cdot f_{cd}}{d_y} \quad (\text{A.4}\beta)$$

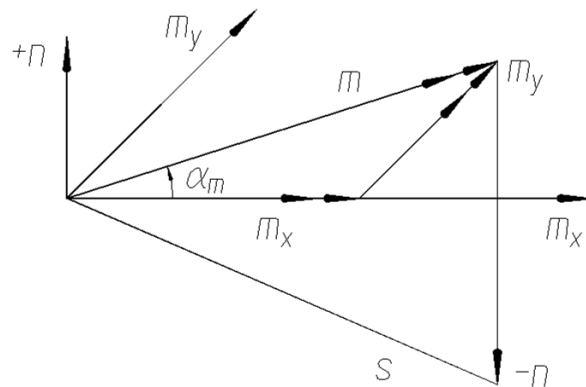
$$M_{1y} = \frac{2 \cdot I_y \cdot f_{cd}}{d_x} \quad (\text{A.4}\gamma)$$

Τις εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις τις εκφράζουμε σαν διανύσματα ως εξής:

$$s = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ n \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \underline{s} = \begin{bmatrix} \bar{m}_x \\ \bar{m}_y \\ \bar{n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

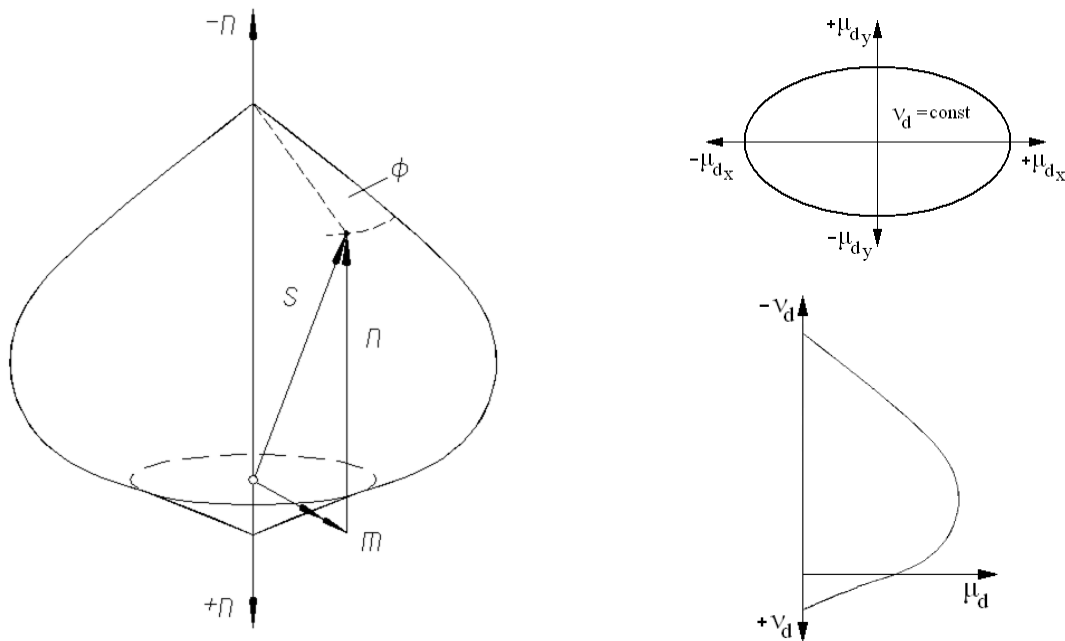
Η απεικόνιση των παραπάνω διανυσμάτων s και $\underline{s}$ μπορεί να γίνει σε έναν τρισδιάστατο χώρο m_x, m_y, n σύμφωνα με το σχήμα Α.7.

Στον τρισδιάστατο χώρο το διάνυσμα των εσωτερικών δυνάμεων αντοχής $\underline{s}$ κινείται στην επιφάνεια ενός προκαθορισμένου κελύφους. Το κέλυφος αυτό εξαρτάται από την γεωμετρία της διατομής και από τον σπλισμό της.



Σχήμα Α.7 Απεικόνιση των διανυσμάτων s και $\underline{s}$ στον τρισδιάστατο χώρο m_x, m_y, n .

Δηλαδή σε συγκεκριμένη διατομή με την αλλαγή του επιπέδου κάμψης, δηλαδή με την αλλαγή φορτίων (και διατήρηση των επιτρεπομένων παραμορφώσεων του χάλυβα και του σκυροδέματος), η κορυφή του διανύσματος αντοχών $\underline{s}$ αλλάζει θέση, αλλά εξακολουθεί να κινείται επί μιας κελυφοειδούς επιφανείας Φ . Όλα τα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία του διανύσματος $\underline{s}$ που ευρίσκονται εντός του κελύφους Φ μπορούν να αναληφθούν από την συγκεκριμένη διατομή.



Σχήμα Α.8 Ο τρισδιάστατος χώρος αντοχής μίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, και οι τομές του.

Σε περίπτωση διάτρησης του κελύφους του χώρου αντοχής Φ από ένα διάνυσμα εξωτερικών φορτίων $\underline{s}$ τότε έχουμε ανεπάρκεια της διατομής για την συγκεκριμένη φόρτιση.

A.7. Μέθοδοι Υπολογισμού

Τα δεδομένα για τους υπολογισμούς, είναι:

- Οι διάφορες παραδοχές όπως αναφέρθηκαν παραπάνω
- Τα δεδομένα ποιότητας υλικών σκυροδέματος και χάλυβα ράβδων (επιτρεπόμενες τάσεις, συντελεστές ασφάλειας, όρια διαρροής, οριακές παραμορφώσεις κ.α.)
- Η γεωμετρία της διατομής.
- Η θέση των ράβδων οπλισμού και το ποσοστό κατανομής του οπλισμού σε κάθε μία θέση ή/και ο συνολικός τοποθετημένος οπλισμός ($A_{s,tot}$).
- Τα επιτρεπόμενα ποσοστά οπλισμού, ελάχιστο (ρ_{min}) και μέγιστο (ρ_{max}) και από αυτά και το εμβαδό της διατομής (A_c), ο ελάχιστος οπλισμός ($A_{s,min}$) και ο μέγιστος ($A_{s,max}$).
- Τα εξωτερικά φορτία ως αξονική δύναμη N_{sd} και ροπές κάμψης M_{sdx} και M_{sdy} .

Όλοι οι έλεγχοι και οι υπολογισμοί που γίνονται από το ΡΑΦ/ΟΣΚ βασίζονται στον «Έλεγχο των τάσεων για δεδομένο επίπεδο κάμψης».

Έλεγχος για δεδομένη Θέση του Επιπέδου Κάμψης

Γνωρίζοντας τη θέση του επιπέδου κάμψης, το ζητούμενο είναι να υπολογιστούν τα εσωτερικά εντατικά μεγέθη ή αντοχές M_{Rx} , M_{Ry} και N_R , που αντιστοιχούν στη θέση αυτή του επιπέδου.

Τα ζητούμενα εντατικά μεγέθη μπορούν να υπολογιστούν με μία και μόνο **ολοκλήρωση** της διατομής η οποία γίνεται ως εξής:

- ✓ Προσδιορίζεται η παραμόρφωση (ϵ) στα σημεία ολοκλήρωσης της διατομής.
- ✓ Υπολογίζεται η αντίστοιχη τάση $\sigma = f(\epsilon)$ στα ίδια σημεία με βάση το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου υλικού.
- ✓ Αθροίζονται για όλες τις «ίνες» της διατομής και είναι:

$$N = \iint_{A_c} \sigma \cdot dA \quad (A.6\alpha)$$

$$M_x = \iint_{A_c} \sigma \cdot y \cdot dA \quad (A.6\beta)$$

$$M_y = \iint_{A_c} \sigma \cdot x \cdot dA \quad (A.6\gamma)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι θα πρέπει να υπολογιστεί ένα επιφανειακό ολοκλήρωμα. Αντί για την επιφανειακή ολοκλήρωση που είναι πολύ δύσκολη για τυχαίες διατομές, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος που επιτρέπει το μετασχηματισμό του επιφανειακού ολοκληρώματος σε επικαμπύλιο. Με τον τρόπο αυτό μια διατομή τυχαίας γεωμετρίας μπορεί να ολοκληρωθεί αριθμητικά ακριβώς, κατά μήκος του περιγράμματός της.

Έλεγχος Αντοχής της Διατομής R_d .

Στον έλεγχο επάρκειας της αντοχής μιας διατομής ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του «λόγου εξάντλησης» (CR). Ο λόγος εξάντλησης ορίζεται ως εξής:

$$CR = \frac{M_{Sdx}}{M_{Rdx}} = \frac{M_{Sdy}}{M_{Rdy}} = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \quad (A.7)$$

Συνεπώς εκφράζει το ποσοστό εξάντλησης της διατομής με τις δεδομένες δράσεις σχεδιασμού.

Ο έλεγχος γίνεται με πολλαπλούς υπολογισμούς (ολοκληρώσεις) για δεδομένη θέση του επιπέδου κάμψης όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι ο υπολογισμός ξεκινά με εντοπισμό του επιπέδου κάμψης για τα δεδομένα εξωτερικά φορτία/δράσεις και κατόπιν υπολογίζονται τα εσωτερικά εντατικά μεγέθη γι' αυτή τη θέση. Στη συνέχεια και εφ' όσον δεν υπάρχει σύγκλιση, τα φορτία μεταβάλλονται μέχρις ότου επιτευχθεί η σύγκλιση με κριτήριο την ισότητα των παραπάνω λόγων, δηλαδή:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = \frac{M_{Sdx}}{M_{Rdx}} = \frac{M_{Sdy}}{M_{Rdy}} \quad (A.8)$$

