

Στοιχεία υπό προέχουσα μονοαξονική κάμψη: Δοκοί

Στα στοιχεία υπό μονοαξονική κάμψη ανήκουν σύμφωνα με τον πίνακα 3.1, οι δοκοί ανωδομής, οι πεδילוδοκοί και οι συνδετήριες δοκοί. Τα δομικά στοιχεία που ανήκουν στην κατηγορία αυτή θα πρέπει να ελέγχονται με τους ελέγχους που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1 Έλεγχοι δομικών στοιχείων υπό προέχουσα μονοαξονική κάμψη

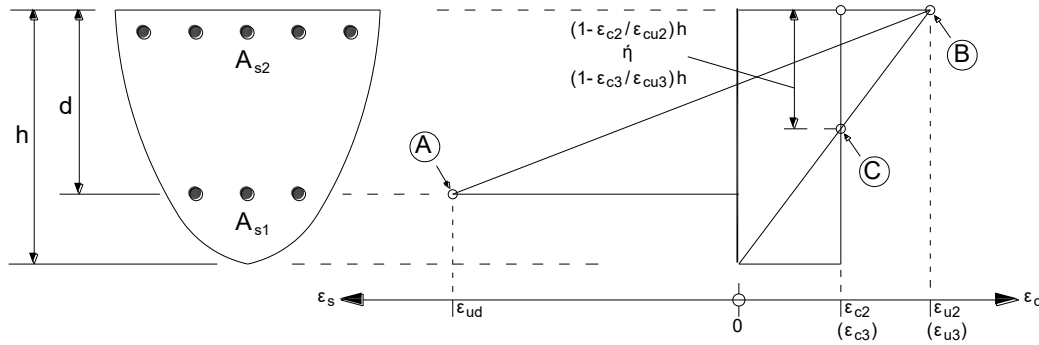
	Έλεγχος σε κάμψη	Έλεγχος σε διάτμηση	Έλεγχος σε στρέψη	Έλεγχος κάμψης πτερυγίων	Έλεγχος διάτμησης πτερυγίων	Έλεγχος τάσεων εδάφους
Δοκοί ανωδομής	✓	✓	X/✓ ⁽¹⁾	X	X	X
Πεδילוδοκοί	✓	✓	X/✓ ⁽¹⁾	✓	✓	✓
Συνδετήριες δοκοί	✓	✓	X/✓ ⁽¹⁾	X	X	X

(1) Εκτελείται μόνον όταν εκπληρώνεται το κριτήριο του εδαφίου 6.3.1(2) του ΕΚ2 (βλ. και παράγραφο 5.3.3.1 του παρόντος εγχειριδίου).

Έλεγχος σε κάμψη

Οι βασικές παραδοχές με τις οποίες θα πρέπει – σύμφωνα με τον ΕΚ2 – να γίνεται ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη είναι οι ακόλουθες:

- οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες (και μετά τη φόρτιση).
- η παραμόρφωση χαλαρών οπλισμών με συνάφεια ή τενόντων με συνάφεια, υπό εφελκυσμό ή θλίψη, είναι η ίδια με εκείνη του περιβάλλοντος σκυροδέματος.
- η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται.
- οι τάσεις του θλιβόμενου σκυροδέματος υπολογίζονται βάσει της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης της παραγράφου 3.1.7 του ΕΚ2.
- οι τάσεις του χαλαρού ή προεντεταμένου οπλισμού υπολογίζονται βάσει των καμπυλών σχεδιασμού των παραγ. 3.2 (Σχήμα 3.8) και 3.3 (Σχήμα 3.10) του ΕΚ2.
- Η περιοχή των επιτρεπόμενων κατανομών των παραμορφώσεων στην οριακή κατάσταση παραμόρφωσης φαίνεται στο Σχήμα 6.1 το οποίο και αναπαράγεται και παρακάτω:



- Ⓐ όριο παραμόρφωσης εφελκόμενου χάλυβα
 Ⓑ όριο παραμόρφωσης θλιβόμενου σκυροδέματος
 Ⓒ όριο παραμόρφωσης σκυροδέματος υπό καθαρή θλίψη

(η χρήση της τιμής ε_{c2} ή της ε_{c3} ως ορίου για την επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος σύμφωνα με την παράγραφο 3.1.7 και τον πίνακα 3.1 του ΕΚ2)

Το ΡΑΦ-Ο/Σ ακολουθεί τις παραπάνω παραδοχές και εκτελεί τον έλεγχο των δοκών (ανωδομής, πεδιλοδοκών και συνδετήριων) σε κάμψη σε τρία σημεία του εύκαμπτου τμήματος τους: στην αρχή, στο μέσον, και στο πέρας τους.

Τα μεγέθη έντασης που χρησιμοποιούνται για τους ελέγχους (μεγέθη σχεδιασμού) προέρχονται από την περιβάλλουσα ροπών κάμψης των παρακάτω συνδυασμών φόρτισης:

➤ *Ανάλυση με τη Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης*

1. Συνδυασμός $1.35G+1.50Q$
2. Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm E_1$
3. Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm E_2$
4. Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm E_3$
5. Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm E_4$

Όπου το E_i συμβολίζει τις ροπές που προέρχονται από τον αντισεισμικό υπολογισμό για μία από τις $i=1-4$ θέσεις μάζας που προδιαγράφει ο ΕΚ8 και ταυτόχρονη δράση του σεισμού στις διευθύνσεις των καθολικών αξόνων X και Y . Οι τιμές των ροπών που προκύπτουν από τις αναλύσεις αυτές είναι οι πιθανές ακραίες τιμές (extrM), (βλ. Παράγραφο 4.3.2.).

➤ *Ανάλυση με τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης*

- Συνδυασμός $1.35G+1.50Q$
- Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm \Sigma_{1-3}$
- Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm \Sigma_{1-4}$
- Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm \Sigma_{2-3}$
- Συνδυασμός $G+\psi_2Q\pm \Sigma_{2-4}$

Όπου το Σ_{i-j} ($i=1,2 / j=3,4$) συμβολίζει τη ροπή που προέρχεται από την επαλληλία των αναλύσεων με οριζόντια ισοδύναμα σεισμικά φορτία κατά τις διευθύνσεις των δύο

επιλεγμένων αξόνων όταν αυτά εφαρμοστούν σε σημεία των ορόφων που προδιαγράφονται από τον ΕΚ8.

Η διαδικασία ελέγχου των δοκών σε κάμψη είναι η εξής:

- (α) Λαμβάνονται από την επίλυση όλα τα μεγέθη ροπών που υπεισέρχονται στους παραπάνω συνδυασμούς.
- (β) Υλοποιούνται οι συνδυασμοί αυτοί, και σε κάθε ένα από τα τρία σημεία ελέγχου (αρχή, μέσον, πέρας) της δοκού εντοπίζονται η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική ροπή κάμψης. Δηλαδή η μέγιστη ροπή που εφελκύει την άνω ίνα και η μέγιστη ροπή που εφελκύει την κάτω ίνα της δοκού. Έτσι σχηματίζεται η περιβάλλουσα ροπών σχεδιασμού.
- (γ) Με βάση τον χώρο αντοχής της οπλισμένης διατομής που αυτόματα υπολογίζει το ΡΑΦ, προσδιορίζονται οι ροπές αντοχής στα τρία σημεία ελέγχου και για τις δύο φορές των ροπών σχεδιασμού.

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των ροπών αντοχής των δοκών, το ΡΑΦ-Ο/Σ λαμβάνει υπόψη τις ράβδους που βρίσκονται εντός του συνεργαζόμενου πλάτους των πλακοδοκών ανωδομής, όπως και την διατομή σκυροδέματος με το συνεργαζόμενο πλάτος.

- (δ) Έχοντας από τα βήματα (β) και (γ) τις ροπές σχεδιασμού (δράσεις) και τις ροπές αντοχής αντίστοιχα, υπολογίζονται από το ΡΑΦ-Ο/Σ οι αντίστοιχοι λόγοι εξάντλησης CR (Capacity Ratios):

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \Rightarrow CR = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \quad (5.2)$$

Σημειώνεται τέλος, ότι οι έλεγχοι αντοχής των δοκών μπορούν να γίνουν για περισσότερες της μίας διατάξεις όπλισης (εφόσον έχουν οριστεί) χωρίς να απαιτηθεί επανεπίλυση του κτιρίου.

Έλεγχος σε διάτμηση

Ο έλεγχος των δοκών σε διάτμηση στα πλαίσια του ΕΚ8 πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τις διατάξεις του ΕΚ2. Αυτό δηλώνεται στον ΕΚ8.1 § 5.4.3.1.1(1) για τις δοκούς κτιρίων ΚΠΜ, και ΕΚ 8.1 § 5.5.3.1.2(1)Ρ για τις δοκούς κτιρίων ΚΠΥ. Θα πρέπει μάλιστα να τονιστεί ιδιαίτερα ότι στον ΕΚ8.1 5.4.3.1.1(1) δηλώνεται ότι για τις δοκούς κτιρίων ΚΠΜ οι αντοχές σε διάτμηση υπολογίζονται αποκλειστικά με βάση τις διατάξεις του ΕΚ2 οι οποίες παρουσιάζονται στην § 6.2 του συγκεκριμένου κανονισμού. Παρακάτω θα παρουσιαστούν λεπτομέρειες και αριθμητικά παραδείγματα για να καταστεί σαφής η διαδικασία του ελέγχου των δοκών σε διάτμηση, ενώ θα δοθούν και οι απαραίτητες διευκρινήσεις για τις παραδοχές που κάνει το ΡΑΦ-Ο/Σ σε διάφορα σημεία του ελέγχου. Πάντως σε γενικές γραμμές οι διαδικασίες που παρουσιάζονται παρακάτω ακολουθούνται από το ΡΑΦ-Ο/Σ.

ΔΟΚΟΙ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΠΜ

Για τις δοκούς αυτές **ΑΕΝ** απαιτείται διαφοροποίηση της διαδικασίας ελέγχου μεταξύ των κρίσιμων και των μη κρίσιμων περιοχών τους. Δεδομένου ότι οι δοκοί είναι στοιχεία με οπλισμό διάτμησης, οι σχέσεις με τις οποίες γίνεται ο έλεγχος είναι οι εξής:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (5.3\alpha)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1}{2} \cdot (\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}) \cdot \sin(2\theta) \quad (5.3\beta)$$

Οι παραπάνω αντοχές σε τέμνουσα ορίζονται ως εξής:

$V_{Rd,s}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από τον οπλισμό διάτμησης τη στιγμή της διαρροής του.

$V_{Rd,max}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων.

Για τα μεγέθη που υπεισέρχονται στις σχέσεις (5.3α) και (5.3β) ισχύουν τα εξής:

A_{sw} είναι η επιφάνεια του οπλισμού διάτμησης (θεωρείται ότι ο οπλισμός διάτμησης συνίσταται από συνδετήρες). Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

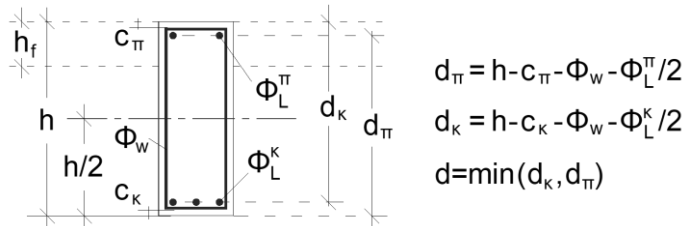
$$A_{sw} = n \cdot A_{sw}^{συνδ.}$$

Όπου n είναι ο αριθμός των σκελών των συνδετήρων και $A_{sw}^{συνδ.}$ είναι η διάμετρος ενός σκέλους.

s είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων συνδετήρων.

z είναι ο μοχλοβραχίονας της διατομής σε ένα στοιχείο σταθερού ύψους, ο οποίος αντιστοιχεί στην καμπτική ροπή που δρα στο στοιχείο. Στο σχεδιασμό έναντι διάτμησης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς αξονικό φορτίο, μπορεί εν γένει να ληφθεί για το μοχλοβραχίονα η προσεγγιστική τιμή $z = 0.9 \cdot d$.

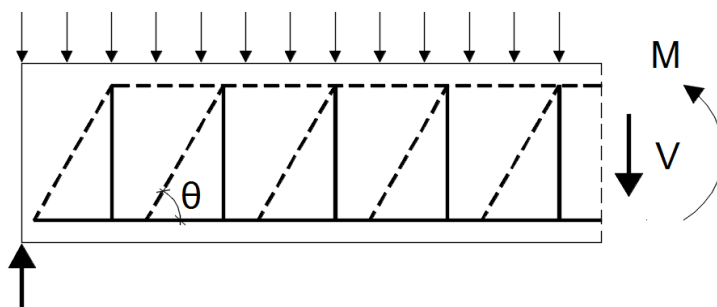
Για τον υπολογισμό του στατικού ύψους d των δοκών, το ΡΑΦ-Ο/Σ κάνει εφαρμογή της σχέσης του παρακάτω σχήματος:



f_{ywd} είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης.

θ είναι η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού. Για τη γωνία αυτή τίθεται ο εξής περιορισμός:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5 \Rightarrow 22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$$



Για τις δοκούς κτιρίων ΚΠΜ δεν συνίσταται κάποια συγκεκριμένη τιμή για τη γωνία θ . Έτσι ο μελετητής μπορεί να καθορίζει αυτός την συγκεκριμένη τιμή.

α_{cw} είναι ένας συντελεστής για να ληφθεί υπόψη η εντατική κατάσταση στο θλιβόμενο πέλμα. Η τιμή του συντελεστή αυτού θα πρέπει να ληφθεί από το αντίστοιχο Ελληνικό Εθνικό προσάρτημα (εκεί αναφέρεται ότι η συνιστώμενη τιμή για μη προεντεταμένες κατασκευές είναι ίση με τη μονάδα).

f_{cd} είναι η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος.

b_w είναι το ελάχιστο πάχος του στοιχείου μεταξύ της εφελκυσμένης χορδής και του θλιβόμενου πέλματος του δικτυώματος. Σε στοιχεία με σταθερό πλάτος διατομής, η συγκεκριμένη παράμετρος ισούται με το πλάτος αυτό.

v_1 είναι ένας δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω διάτμησης. Η τιμή του δείκτη αυτού θα πρέπει να ληφθεί από το αντίστοιχο Ελληνικό Εθνικό προσάρτημα:

$$v_1 = 0.6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Σύμφωνα με το εδάφιο 6.2.1(8) του ΕΚ2:

«Σε στοιχεία που φέρουν κυρίως ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία η τέμνουσα σχεδιασμού δεν χρειάζεται να ελέγχεται σε απόσταση μικρότερη του d από την παρειά της στήριξης. Όλοι οι απαιτούμενοι οπλισμοί διάτμησης πρέπει να συνεχίζονται μέχρι τη στήριξη. Ακόμη, θα πρέπει να ελέγχεται ότι η τέμνουσα στη στήριξη δεν υπερβαίνει την τιμή $V_{Rd,max}$ ».

Δεδομένου όμως στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων τα φορτία των δοκών είναι τραπεζοειδή, λόγω της κατανομής των φορτίων των στηριζόμενων πλακών, ο έλεγχος σε τέμνουσα θα πρέπει να γίνεται κατά κανόνα στην στήριξη τους. Το ΡΑΦ-Ο/Σ ακολουθεί την συγκεκριμένη πρόταση.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μία σημαντική διευκρίνιση:

Όπως τονίστηκε και πιο πάνω, η επιλογή της γωνίας θ επαφίεται – στην περίπτωση των δοκών κτιρίων ΚΠΜ – στον μελετητή.

Από τις σχέσεις (5.3α) και (5.3β) προκύπτει ότι η μείωση της γωνίας θ αυξάνει την αντοχή της τέμνουσας που παραλαμβάνεται από τους συνδετήρες, $V_{Rd,s}$ ενώ αντιθέτως, η μείωση της γωνίας θ κάτω των 45° μειώνει την θλιπτική αντοχή της θλιβόμενης διαγωνίου $V_{Rd,max}$.

Διερευνώντας τις οριακές τιμές των αντοχών $V_{Rd,max}$, $V_{Rd,s}$ για τις οριακά επιτρεπόμενες τιμές της γωνίας θ , προκύπτουν οι λόγοι των μέγιστων / ελάχιστων τιμών τους:

$$\frac{V_{Rd,s}(\theta = 22^\circ)}{V_{Rd,s}(\theta = 45^\circ)} = \frac{\max V_{Rd,s}}{\min V_{Rd,s}} = 2.5 \quad (5.5\alpha)$$

$$\frac{V_{Rd,max}(\theta = 45^\circ)}{V_{Rd,max}(\theta = 22^\circ)} = \frac{\max V_{Rd,max}}{\min V_{Rd,max}} = 1.45 \quad (5.5\beta)$$

Επίσης, σύμφωνα με το ελληνικό εθνικό προσάρτημα (ΕΛΟΤ EN 1992-1-1:2005/NA) και την παράγραφο 2.7, τίθεται ο πρόσθετος ακόλουθος περιορισμός για την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της γωνίας θ :

$$1 \leq \cot \theta \leq \cot \theta_a \leq 2.5$$

Όπου:

$$\cot \theta_a = \frac{1.2 - 1.4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V'_{Rd,c} / V_{Ed}} \geq 1$$

$$V'_{Rd,c} = \beta_{ct} 0.10 f_{ck}^{1/3} \left(1 + 1.2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) b_w z$$

$$\text{με } \beta_{ct} = 2.4$$

$$\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \text{ (σε MPa)}$$

N_{Ed} : είναι η αξονική επιπόνηση σχεδιασμού της διατομής υπό εξωτερικές δράσεις ή προένταση ($N_{ed} < 0$ για δύναμη σύνθλιψης).

Επομένως καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

- Μικρές γωνίες θ οδηγούν σε χαμηλή απαίτηση οπλισμού διάτμησης.
- Μεγάλες γωνίες θ οδηγούν σε χαμηλή απαίτηση διατομών σκυροδέματος.

Αυτό σημαίνει ότι ο ΕΚ2 δίνει ευελιξία στον σχεδιασμό έναντι αστοχίας από διάτμηση.

Στο ΡΑΦ-Ο/Σ προσφέρονται στον χρήστη δύο δυνατότητες επιλογών :

- Είτε προσδιορισμός της τιμής της θ από τον χρήστη ($1 \leq \cot \theta \leq \cot \theta_\alpha \leq 2.5 \Rightarrow 22^\circ \leq \theta_\alpha \leq \theta \leq 45^\circ$)
- Είτε αυτόματος προσδιορισμός της βέλτιστης γωνίας θ από το πρόγραμμα.

Κατά τον αυτόματο προσδιορισμό, ακολουθούνται τα εξής κριτήρια προσδιορισμού της θ :

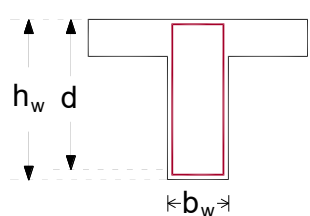
1. Ελαχιστοποίηση της $\theta \rightarrow \min$. ώστε : $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$
2. Ελαχιστοποίηση της $\theta \rightarrow \min$. ώστε : $V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$

Η παραπάνω διαδικασία ισχύει για τις κατηγορίες πλαστιμότητας ΚΠΧ και ΚΠΜ καθώς και για δοκούς, υποστυλώματα και για τοιχώματα.

Αριθμητικό Παράδειγμα

Στο αριθμητικό παράδειγμα που ακολουθεί, θα εφαρμοστεί η διαδικασία του ελέγχου σε τέμνουσα όπως ακριβώς την προτείνει ο ΕΚ2 και ο ΕΚ8 για δοκούς κτιρίων ΚΠΜ.

Με τα παραπάνω δεδομένα, ζητείται η εκτέλεση του ελέγχου αντοχής σε τέμνουσα με βάση τις διατάξεις του ΕΚ2.

	$b_w=0.25\text{m}$	$f_{ck}=20\text{MPa}$	<u>Συνδετήρες:</u>	<u>Τέμνουσα</u>
	$h_w=0.60\text{m}$	$f_{yk}=500\text{MPa}$	$\Phi 8/10$	<u>σχεδιασμού:</u>
	$d=0.55\text{m}$	$\gamma_c=1.5$		$V_{Ed}=350\text{kN}$
		$\gamma_s=1.15$		

- Επιλέγεται αρχικά γωνία $\theta=22^\circ$, δηλαδή η ελάχιστη επιτρεπτή σύμφωνα με τον κανονισμό. Με βάση την γωνία αυτή, από τις σχέσεις (5.3α) και (5.3β) προκύπτουν:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta = \left[\frac{2 \cdot \left[\frac{\pi \cdot 8^2}{4} \right]}{10 \cdot 10} \right] \cdot (0.9 \cdot 0.55) \cdot \left(\frac{500}{1.15} \right) \cdot \cot(22^\circ) = 535.51 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1 \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.55 \cdot \left[0.6 \cdot \left(1 - \left(\frac{20}{250} \right) \right) \right] \cdot (20/1.5)}{\left[\cot(22^\circ) + \tan(22^\circ) \right] \cdot 10^{-3}} = 316.35 \text{ kN}$$

- Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν:

$$CR_{VRd,max} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(22^\circ)} = \frac{350}{316.35} = 1.1$$

$$CR_{VRd,s} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s}(22^\circ)} = \frac{350}{535.51} = 0.65$$

Από τους παραπάνω λόγους εξάντλησης γίνεται σαφές ότι δεν επαρκεί η διατομή του σκυροδέματος. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει ένα από τα ακόλουθα:

(α) Να αυξηθεί η γωνία θ , ή

(β) Να αυξηθούν οι διαστάσεις της διατομής.

Επιλέγεται η αύξηση τη γωνίας θ στις 30° , οπότε προκύπτουν αντίστοιχα.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = \left[\frac{2 \cdot [(\pi \cdot 8^2)/4]}{10 \cdot 10} \right] \cdot (0.9 \cdot 0.55) \cdot \left(\frac{500}{1.15} \right) \cdot \cot(30^\circ) = 374.75 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1 \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.55 \cdot [0.6 \cdot (1 - (20/250))] \cdot (20/1.5)}{[\cot(30^\circ) + \tan(30^\circ)] \cdot 10^{-3}} = 394.39 \text{ kN}$$

Έτσι οι αντίστοιχοι λόγοι εξάντλησης είναι:

$$CR_{VRd,max} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(30^\circ)} = \frac{350}{394.39} = 0.89$$

$$CR_{VRd,s} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s}(30^\circ)} = \frac{350}{374.75} = 0.93$$

Παρατηρούμε ότι και οι δυο λόγοι εξάντλησης είναι κάτω τις μονάδας και επομένως η διατομή με τον οπλισμό της είναι επαρκής.

Για λόγους όμως παραμετρικής διερεύνησης θα γίνει υπολογισμός των συγκεκριμένων λόγων εξάντλησης για δύο ακόμα περιπτώσεις τιμών της γωνίας θ :

(I) Για την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της γωνίας θ που είναι οι 45 μοίρες:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = \left[\frac{2 \cdot [(\pi \cdot 8^2)/4]}{10 \cdot 10} \right] \cdot (0.9 \cdot 0.55) \cdot \left(\frac{500}{1.15} \right) \cdot \cot(45^\circ) = 216.36 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1 \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.55 \cdot [0.6 \cdot (1 - (20/250))] \cdot (20/1.5)}{\cot(45^\circ) + \tan(45^\circ)} = 455.4 \text{ kN}$$

Οι αντίστοιχοι λόγοι εξάντλησης είναι:

$$CR_{VRd,max} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(45^\circ)} = \frac{350}{216.36} = 1.62$$

$$CR_{VRd,s} = \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,s}(45^\circ)} = \frac{350}{216.36} = 1.62$$

Παρατηρούμε ότι για γωνία $\theta=45^\circ$ η διατομή σκυροδέματος είναι επαρκής αλλά δεν είναι επαρκής ο οπλισμός διάτμησης.

(II) Για την οριακή γωνία θ για την οποία ο λόγος εξάντλησης $CR_{VRd,max}$ γίνεται ίσος με τη μονάδα.

Με εφαρμογή της σχέσης (5.4) προκύπτει ότι η γωνία αυτή είναι ίση με:

$$\theta_{\text{οριακ}} = \frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{2 \cdot V_{\text{Ed}}}{\alpha_{\text{cw}} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{\text{cd}}} \right] = \frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{2 \cdot 350 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.55 \cdot 0.552 \cdot \frac{20}{1.5}} \right] = 25.11^\circ$$

Για τη γωνία αυτή προκύπτουν αντίστοιχα:

$$V_{\text{Rd,s}} = \frac{A_{\text{sw}}}{s} \cdot z \cdot f_{\text{ywd}} \cdot \cot \theta = \left[\frac{2 \cdot [(\pi \cdot 8^2)/4]}{10 \cdot 10} \right] \cdot (0.9 \cdot 0.55) \cdot \left(\frac{500}{1.15} \right) \cdot \cot(25.11^\circ) = 461.62 \text{ kN}$$

$$V_{\text{Rd,max}} = \frac{\alpha_{\text{cw}} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{\text{cd}}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1 \cdot 0.25 \cdot 0.9 \cdot 0.55 \cdot [0.6 \cdot (1 - (20/250))]}{\cot(25.11^\circ) + \tan(25.11^\circ)} \cdot (20/1.5) = 350 \text{ kN}$$

Και οι αντίστοιχοι λόγοι εξάντλησης είναι:

$$CR_{V_{\text{Rd,max}}} = \frac{V_{\text{Ed}}}{V_{\text{Rd,max}}(25.11^\circ)} = \frac{350}{350} = 1.00$$

$$CR_{V_{\text{Rd,s}}} = \frac{V_{\text{Ed}}}{V_{\text{Rd,s}}(25.11^\circ)} = \frac{350}{461.62} = 0.76$$

Παρατηρούμε επομένως ότι για γωνία $\theta=25.11^\circ$ ο οπλισμός διάτμησης είναι επαρκής. (Η επάρκεια της διατομής σκυροδέματος είναι δεδομένη αφού η γωνία $\theta=25.11^\circ$ αφενός προκύπτει από την συνθήκη $V_{\text{Rd,max}}=V_{\text{Ed}}$ και αφετέρου είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία των 45°).