

# Αριθμητική διερεύνηση μεταλλικών δοκών με κυκλικά διάκενα σε πλαίσια μεγάλων ανοιγμάτων

Αννέτ-Νβάρτ Μπαγκρατούνι

Πολιτικός Μηχανικός

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

a.bagratiuni@yahoo.com

Γεώργιος Παπαγιαννόπουλος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

paragiannopoulos@eap.gr

**Περίληψη** Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των μεταλλικών κυψελωτών δοκών με κυκλικά διάκενα οι οποίες εφαρμόζονται σε πλαίσια μεγάλου ανοίγματος. Με χρήση του λογισμικού Sofistik πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση και στατική επίλυση δέκα δοκών διαφορετικής γεωμετρίας και μήκους υπό δεδομένη φόρτιση, συνοριακές συνθήκες και πλευρικές αντιστηρίξεις. Καταγράφηκαν αποτελέσματα για το φορτίο αστοχίας και το βέλος κάμψης, τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα κανονιστικά (Ευρωκώδικας 3 και βοηθητικά κείμενα). Επίσης διερευνήθηκε η αύξηση του φορτίου αστοχίας και η μείωση του βέλους κάμψης των κυψελωτών διατομών σε σχέση με τις πρότυπες διατομές από τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Τέλος εξετάστηκε η επιρροή της γεωμετρίας των κυψελωτών διατομών στην τελική αστοχία.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Κυψελωτές δοκοί, Κυκλικά διάκενα, Μορφές αστοχίας, Βέλος κάμψης, Διαστασιολόγηση

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εμφάνιση των πρώτων κυψελωτών διατομών τοποθετείται χρονικά περί τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο, για λόγους μείωσης του κόστους του χάλυβα.

Οι κυψελωτές διατομές κατασκευάζονται από τις πρότυπες μεταλλικές διατομές με κοπή τύπου ζιγκ-ζαγκ κατά μήκος του κορμού και επανασυγκόλληση των δύο τμημάτων της δοκού που προκύπτουν.

Η παρουσία οπών σε ένα μέλος επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά του. Οι μορφές αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί είναι οι κάτωθι:

**i) Σε επίπεδο διατομής πλησίον των οπών (τοπικά φαινόμενα)**

- Αστοχία τύπου Vierendeel (VM) η οποία εκδηλώνεται με τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στην περιοχή περιμετρικά των οπών

- Αστοχία του συμπαγούς τμήματος του κορμού στην περιοχή μεταξύ των οπών η οποία μπορεί να συμβεί λόγω των παρακάτω φαινομένων:

a. Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του κορμού (WPB)

b. Διατμητική αστοχία του κορμού (WSH)

c. Καμπτικός λυγισμός του κορμού (WPC) όπου ο κορμός λυγίζει χωρίς να στρίβει όπως συμβαίνει στην περίπτωση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

- Αστοχία της συγκόλλησης η οποία οφείλεται στην δράση οριζόντιας τέμνουσας δύναμης (WPW)

**ii) Σε επίπεδο διατομής – μέλους στην περιοχή εκτός οπών**

- Καμπτική αστοχία (BND)

- Διατμητική αστοχία (SH)

- Στρεπτοκαμπτικός (πλευρικός) λυγισμός της δοκού (LTB)

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ορίζονται τα κάτωθι στάδια μελέτης για τις κυψελωτές διατομές με κυκλικά διάκενα: i) έλεγχος της διαδικασίας σχεδιασμού (διαστασιολόγησης) τους με βάση τον Ευρωκώδικα 3 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998 Παράρτημα N, 4) σε συνδυασμό με άλλα βοηθητικά τεχνικά κείμενα, ii) σύγκριση της φέρουσας ικανότητας τους σε σχέση με τις αντίστοιχες πρότυπες διατομές, iii) εξέταση της επιρροής της γεωμετρίας τους στη μορφή αστοχίας.

## II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΣΤΑΔΙΑ

### A. Έλεγχος των κανόνων σχεδιασμού

Για τους σκοπούς της παρούσας ενότητας σχεδιάστηκαν δέκα δοκοί i) με χρήση του λογισμικού Sofistik (2018) και ii) με χρήση των κανόνων σχεδιασμού του Ευρωκώδικα (ENV 1993-1-1) σε συνδυασμό με άλλα βοηθητικά τεχνικά κείμενα (Warren 2001; Sonck 2014; Wang et al. 2014). Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ως προς το φορτίο αστοχίας και το βέλος κάμψης, από τις δύο διαδικασίες προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία των διαθέσιμων κανόνων σχεδιασμού.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δέκα δοκών που επιλύθηκαν (κωδικός δοκών NB) δίνονται παρακάτω:

ΠΙΝΑΚΑΣ I  
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΟΚΩΝ

Πρότυπη διατομή	Μήκος δοκού	Ύψος δοκού
IPE400	L=10m	H=600mm
IPE450	L=12m	H=675mm
IPE500	L=15m	H=820mm
IPE550	L=20m	H=1300mm
IPE600	L=25m	H=1600mm
HEA400	L=10m	H=585mm
HEA450	L=12m	H=660mm
HEA500	L=15m	H=735mm
HEA550	L=20m	H=850mm
HEA600	L=25m	H=1150mm

Οι αναλύσεις έγιναν στο λογισμικό Sofistik (5), όπου οι δοκοί προσομοιώθηκαν με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, υπό γραμμικό φορτίο και λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμικότητα του υλικού αλλά και την μη γραμμικότητα της γεωμετρίας. Στις επιλύσεις η μη γραμμικότητα του υλικού λαμβάνεται υπόψη με την

εισαγωγή κατάλληλου καταστατικού νόμου του υλικού, ενώ η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας λαμβάνεται με την εφαρμογή αρχικής ατέλειας ίσης με  $L/1000$  (Sonck and Belis 2016). Η ορθότητα των προσομοιωμάτων επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα 28 πειραμάτων σε κυψελωτές δοκούς με κυκλικά διάκενα κορμού (κωδικός δοκών – EB).

### B. Σύγκριση φέρουσας ικανότητας κυψελωτών διατομών και των αντίστοιχων πρότυπων

Για τη διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας των κυψελωτών διατομών σε σχέση με τις πρότυπες διατομές από τις οποίες κατασκευάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δέκα δοκούς (κωδικός δοκών NB) που προσομοιώθηκαν με χρήση του Sofistik (2018). Επιπρόσθετα, κάνοντας χρήση των ίδιων παραδοχών προσομοίωσης επιλύθηκαν οι αντίστοιχες πρότυπες διατομές που παρουσιάζονται στον πίνακα I.

### C. Επιρροή της γεωμετρίας στην αστοχία των κυψελωτών δοκών

Για τη διερεύνηση της επιρροής της γεωμετρίας των κυψελωτών διατομών στο φορτίο ή στην μορφή αστοχίας χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των αποτελεσμάτων τόσο από τα πειραματικά δεδομένα (κωδικός δοκών EB) όσο και από τις προαναφερθείσες δοκούς που σχεδιάστηκαν και επιλύθηκαν αριθμητικά (κωδικός δοκών NB).

Αρχικά εξετάζεται η επιρροή της παρουσίας των οπών στο φορτίο αστοχίας των κυψελωτών δοκών. Για την αξιολόγηση της επιρροής της συγκεκριμένης παραμέτρου επιλέχθηκε μία δοκός για κάθε διαφορετική μορφή αστοχίας που προέκυψε από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων. Παράλληλα οι δοκοί αυτές επιλύθηκαν θεωρώντας τις ίδιες ιδιότητες (αυξημένο ύψος) χωρίς οπές αλλά με συμπαγή κορμό. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα IV της ενότητας III.

Έπειτα, διερευνήθηκε η επιρροή συγκεκριμένων γεωμετρικών λόγων στην μορφή αστοχίας των δοκών. Οι γεωμετρικοί λόγοι που διερευνήθηκαν στη σειρά δοκών EB είναι οι ακόλουθοι:

- $L/d_w$
- $s/d_w$
- $d_w/t_w$

όπου  $L$  είναι το μήκος μεταξύ των πλευρικών στηρίξεων,  $d_w$  το ύψος του κορμού,  $t_w$  το πάχος του κορμού και  $s$  η αξονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών οπών. Οι αντίστοιχοι γεωμετρικοί λόγοι που διερευνήθηκαν στη σειρά δοκών NB είναι οι ακόλουθοι:

- $L/d_w$
- $s/d_w$
- $d_w/t_w$
- $L/t_w$
- $e/d_w$

όπου τα σύμβολα  $L$ ,  $d_w$ ,  $t_w$ ,  $s$  επεξηγήθηκαν προηγουμένως και  $e$  είναι η καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών οπών

## III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται επιλεγμένα αποτελέσματα υπό μορφή πινάκων.

### A. Έλεγχος των κανόνων σχεδιασμού

Αναφορικά με τον έλεγχο των κανόνων σχεδιασμού, παρατίθενται τα αποτελέσματα των επιλύσεων που προέκυψαν για το φορτίο αστοχίας (Πίνακας II) και για το βέλος κάμψης (Πίνακας III). Τα αποτελέσματα φορτίου αστοχίας και βέλους κάμψης στους Πίνακες II και III προέρχονται από το Sofistik (2018) αλλά και από τη χρήση των κανόνων σχεδιασμού του Ευρωκώδικα (ENV 1993-1-1) σε συνδυασμό με τα βοηθητικά τεχνικά κείμενα. Στον Πίνακα II αναφέρεται επίσης και η κρίσιμη μορφή αστοχίας κάθε δοκού όπως ορίστηκε την ενότητα I.

ΠΙΝΑΚΑΣ II

ΦΟΡΤΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ (SOF) & ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ (NUM)

Κωδικός δείγματος	Μορφή αστοχίας	Φορτίο αστοχίας $P_{num}$ (kN)	Φορτίο αστοχίας $P_{sof}$ (kN)	$P_{sof} / P_{num}$
NB1-1	BND	536.84	557.00	1.04
NB1-2	BND	584.02	599.00	1.03
NB1-3	BND	743.28	825.00	1.10
NB1-4	WPB	1130.43	1117.00	0.99
NB1-5	WPB	1339.65	1127.00	0.84
NB2-1	WSH	665.19	734.00	1.10
NB2-2	WSH	733.86	867.00	1.18
NB2-3	WSH/WPB	843.79	978.00	1.16
NB2-4	BND	1041.27	1088.00	1.04
NB2-5	BND	1341.20	1388.00	1.03

ΠΙΝΑΚΑΣ III

ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ VS ΤΥΠΟΛΟΓΙΟΥ

Κωδικός δείγματος	Βέλος κάμψης από υπολογισμούς $\delta_{num}$ (mm)	Βέλος κάμψης από ανάλυση $\delta_{sof}$ (mm)	$\delta_{sof} / \delta_{num}$
NB1-1	49.19	41.80	0.85
NB1-2	70.70	59.00	0.83
NB1-3	92.17	64.00	0.69
NB1-4	83.44	70.50	0.84
NB1-5	108.61	92.10	0.85
NB2-1	27.82	22.70	0.82
NB2-2	41.14	32.60	0.79
NB2-3	74.06	56.00	0.76
NB2-4	159.19	118.00	0.74
NB2-5	172.44	133.00	0.77

### B. Σύγκριση φέρουσας ικανότητας κυψελωτών διατομών και των αντίστοιχων πρότυπων

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των επιλύσεων των κυψελωτών δοκών (κωδικός δοκών NB) και των αντίστοιχων πρότυπων διατομών από τις οποίες κατασκευάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα IV παρουσιάζεται η σύγκριση για το φορτίο αστοχίας ενώ στον Πίνακα V η αντίστοιχη σύγκριση για το βέλος κάμψης

### ΠΙΝΑΚΑΣ IV

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΦΕΛΩΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Κωδικός δείγματος	Πρότυπη διατομή	Φορτίο αστοχίας κυψελωτής δοκού $P_{sof}$ (kN)	Φορτίο αστοχίας πρότυπης διατομής $P_{prt}$ (kN)	$P_{sof}$ (kN)/ $P_{prt}$ (kN)
NB1-1	IPE400	557.00	378.76	1.47
NB1-2	IPE450	599.00	409.63	1.46
NB1-3	IPE500	825.00	421.01	1.96
NB1-4	IPE550	1117.00	399.75	2.79
NB1-5	IPE600	1127.00	402.18	2.80
NB2-1	HEA400	734.00	742.46	0.98
NB2-2	HEA450	867.00	774.46	1.12
NB2-3	HEA500	978.00	757.78	1.30
NB2-4	HEA550	1088.00	662.95	1.64
NB1-5	HEA600	1388.00	612.66	2.26

### ΠΙΝΑΚΑΣ V

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΦΕΛΩΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ

Κωδικός δείγματος	Πρότυπη διατομή	Βέλος κάμψης κυψελωτής δοκού από ανάλυση $\delta_{sof}$ (mm)	Βέλος κάμψης πρότυπης διατομής $\delta_{prt}$ (mm)	$\delta_{prt}$ (mm)/ $\delta_{sof}$ (mm)
NB1-1	IPE400	41.80	85.13	2.03
NB1-2	IPE450	59.00	123.79	2.09
NB1-3	IPE500	64.00	214.43	3.35
NB1-4	IPE550	70.50	501.12	7.10
NB1-5	IPE600	92.1	910.31	9.88
NB2-1	HEA400	22.70	44.42	1.95
NB2-2	HEA450	32.60	66.34	2.03
NB2-3	HEA500	56.00	120.83	2.15
NB2-4	HEA550	118.00	302.22	2.56
NB1-5	HEA600	133.00	594.31	4.46

### C. Επιρροή της γεωμετρίας στην αστοχία των κυψελωτών δοκών

Τα αποτελέσματα αναφορικά με την επιρροή της παρουσίας των οπών στο φορτίο αστοχίας των κυψελωτών δοκών δίνονται στον Πίνακα VI.

### ΠΙΝΑΚΑΣ VI

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΥΦΕΛΩΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΣΥΜΠΑΓΗ ΚΟΡΜΟ

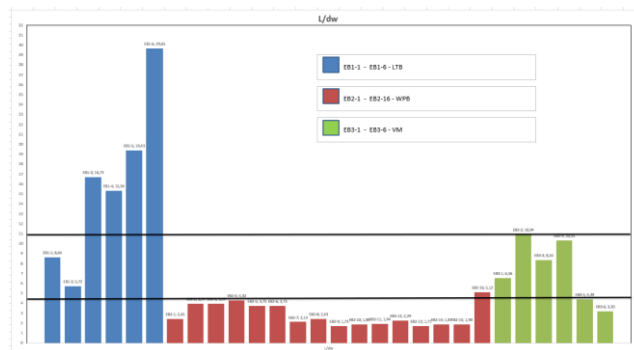
Κωδικός δείγματος	Πρότυπη διατομή	Φορτίο αστοχίας A (kN) – προσομοίωμα με οπές	Φορτίο αστοχίας B (kN) – προσομοίωμα χωρίς οπές	Λόγος Φορτίου αστοχίας B/A	Μορφή αστοχίας
EB1-4	IPE160	29.0	30.7	1.05	LTB
EB2-2	UB457x152x52	335.7	824.3	2.45	WPB
EB3-3	UB203x133x25	119.2	159.2	1.33	VM
NB1-2	IPE450	599.0	700.0	1.16	BND
NB2-1	HEA400	734.0	1252.0	1.70	WSH

Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα VI παρατίθενται το φορτίο και η κρίσιμη μορφή αστοχίας (ενότητα I) πέντε διαφορετικών δοκών με και χωρίς οπές στον κορμό. Για καθεμιά από αυτές τις δοκούς με και χωρίς οπές θεωρούνται τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Τα αποτελέσματα αναφορικά με την επιρροή της γεωμετρίας στην μορφή αστοχίας δίνονται ενδεικτικά στα σχήματα (γραφήματα) 1 και 2. Τα αποτελέσματα των Σχ.1 και 2 προέκυψαν για το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων τα οποία αποτελούνται από 28 πειράματα σε δοκούς (κωδικός δοκών EB) και 10 δοκούς οι οποίες επιλύθηκαν στην παρούσα εργασία (κωδικός δοκών NB).

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1 γράφημα δείχνεται η επιρροή του λόγου  $L/d_w$  της σειράς δοκών EB. Το κριτήριο αστοχίας που προέκυψε για κάθε δοκό δείχνεται με διαφορετικό χρώμα:

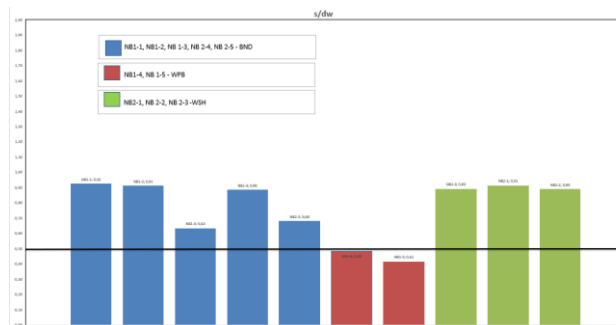
- το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό (LTB)
- το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό του κορμού (WPB)
- το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν από μηχανισμό Vierendeel (VM)



Σχήμα 1. Επιρροή του λόγου  $L/d_w$  στη μορφή αστοχίας

Στο Σχήμα 2 δείχνεται η επιρροή του λόγου  $s/d_w$  της σειράς δοκών NB. Το κριτήριο αστοχίας που προέκυψε για κάθε δοκό δείχνεται με διαφορετικό χρώμα:

- το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν από κάμψη του μέλους (BND)
- το βαθύ κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό του κορμού (WPB)
- το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στις δοκούς που αστόχησαν λόγω διάτμησης του κορμού (WSH)



Σχήμα 2. Επιρροή του λόγου  $s/d_w$  στη μορφή αστοχίας

#### IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται συνοπτικά συμπεράσματα για τα τρία στάδια μελέτης της παρούσας εργασίας.

##### A. Έλεγχος των κανόνων σχεδιασμού

Παρατηρήθηκε άλλοτε υποεκτίμηση και άλλοτε υπερεκτίμηση του φορτίου αστοχίας που παρέχει ο Ευρωκώδικας (ENV 1993-1-1) και τα βοηθητικά τεχνικά κείμενα (Warren 2001; Sonck 2014; Wang et al. 2014). Συγκεκριμένα

- Για αστοχία τύπου BND το φορτίο αστοχίας υποεκτιμάται κατά περίπου 5%.
- Για αστοχία τύπου WPB το φορτίο αστοχίας υποεκτιμάται κατά περίπου 10%.
- Για αστοχία τύπου WSH το φορτίο αστοχίας υποεκτιμάται κατά περίπου 15%

Για το βέλος κάμψης οι διαθέσιμες σχέσεις του Sonck (2014) είναι συντηρητικές σε ποσοστό 15%-25%.

##### B. Σύγκριση φέρουσας ικανότητας κυψελωτών διατομών και των αντίστοιχων πρότυπων

Παρατηρήθηκε i) αύξηση του φορτίου αστοχίας των κυψελωτών διατομών κατ' ελάχιστον περίπου 50% και ii) μείωση του βέλους κάμψης των κυψελωτών διατομών κατά περίπου 65%

##### C. Επιρροή της γεωμετρίας στην αστοχία των κυψελωτών δοκών

Αναφορικά με την επιρροή της παρουσίας των οπών στο φορτίο αστοχίας προέκυψαν τα κάτωθι αποτελέσματα σύμφωνα με την 5<sup>η</sup> στήλη του Πίνακα VI):

- Αστοχία τύπου LTB → επιρροή της τάξης του 5%
- Αστοχία τύπου BND → επιρροή της τάξης του 15%
- Αστοχία τύπου VM → επιρροή της τάξης του 35%
- Αστοχία τύπου WSH → επιρροή της τάξης του 70%
- Αστοχία τύπου WPB → επιρροή της τάξης του 150%

Ως προς την επιρροή της γεωμετρίας στην μορφή αστοχίας **δοκού χωρίς συνεχή πλευρική εξασφάλιση υπό ένα ή δύο συγκεντρωμένα φορτία** (σειρά δοκών EB) προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Για  $L/t_w > 11$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του μέλους (LTB).
- Για  $L/t_w < 4$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού (WPB).
- Για  $4 < L/t_w < 11$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο μηχανισμός Vierendeel (VM).
- Για  $s/d_w < 1$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού (WPB).
- Για  $d_w/t_w > 50$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού (WPB).

Ως προς την επιρροή της γεωμετρίας στην μορφή αστοχίας **δοκού με πλευρική εξασφάλιση υπό γραμμικό φορτίο** (σειρά δοκών NB) προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Για  $L/d_w > 18$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι η καμπτική (BND).
- Για  $s/d_w < 0.5$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού (WPB).
- Για  $d_w/t_w > 90$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του συμπαγούς τμήματος του κορμού τύπου (WPB).
- Για  $L/t_w < 1300$  η πιο πιθανή μορφή αστοχίας είναι η διάτμηση του κορμού (WSH).
- Για  $e/d_w < 0.2$  η αστοχία της δοκού πιθανώς να αφορά τον κορμό και είναι μεταξύ στρεπτοκαμπτικού λυγισμού του ή διατμητικής αστοχίας του (WPB ή WSH).

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ENV 1993-1-1:1992/A2:1998; *General Annex N, Eurocode 3, European Committee for Standardization, Brussels*
- Sofistik AG -SSD 2018-Educational Version
- Sonck D. *Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns; Phd dissertation, Ghent University - 2014.*
- Sonck D., Belis J. *Lateral-Torsional buckling resistance of castellated beams; Journal of Structural Engineering of ASCE 2016 (143): 04016197.*
- Wang P., Wang X., Ma N., *Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings; Engineering Structures 2014 (75): 315 - 326.*
- Warren J. *Ultimate load and deflection behaviour of cellular beams; Master of Science, University of Natal; Durban - 2001.*