



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ**

υπό

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ**

υπό

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022

©2022 Παπαθανασίου Αριστείδης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Καραμάνος Σπυρίδων Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Χουλιάρá Σωτηρία Μέλος ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια και στους φίλους μου για την στήριξη τους κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΚΟΧΛΙΩΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ**

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Η κόπωση αποτελεί ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε κατασκευές, οι οποίες καταπονούνται σε κυκλικά μεταβαλλόμενα φορτία. Σήμερα υπάρχουν πληθώρα προτύπων και κώδικων που αναφέρονται στην αξιολόγηση της βλάβης από την κόπωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα παρουσιαστεί η επεξήγηση ενός τέτοιου προτύπου, του EN1993-1-9, και στην συνέχεια θα γίνει η εφαρμογή του σε κοχλιωτή σύνδεση καπνοδόχου κατασκευασμένη από χάλυβα.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	viii
Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	Error! Bookmark not defined.
1.1 Το φαινόμενο της κόπωσης	Error! Bookmark not defined.
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	Error! Bookmark not defined.
1.3 Εισαγωγή στους ευρωκώδικες.....	Error! Bookmark not defined.
1.4 Πλεονεκτήματα της χρήσης των ευρωκώδικων	4
Κεφάλαιο 2. EN1993.1.9 (2005)	6
2.1 Γενικά	6
2.2 Βασικές προϋποθέσεις και μέθοδοι	6
2.3 Υπολογισμός τάσεων.....	7
2.4 Τάσεις σε δικτυώματα κοίλων δοκών λόγω φόρτισης.....	10
2.5 Υπολογισμός ευρών τάσεων.....	12
2.5.1 Ισοδύναμο εύρος Δσε.....	12
2.5.2 Διορθωτικός συντελεστής λ.....	15
2.6 Αντοχή στην κόπωση	23
2.6.1 Διαγράμματα S-N	23
2.6.2 Τροποποιημένα διαγράμματα S-N	27
2.6.3 Επίδραση της μέσης τάσης	28
2.6.4 Επίδραση του πάχους.....	29
2.7 Σχεδιασμό της κόπωσης	29
2.7.1 Στρατηγικές σχεδιασμού	29
2.7.2 Συντελεστές ασφαλείας γ_{Mf}, γ_{Ff}	32
2.7.3 Ελέγχος κόπωσης.....	32
2.7.4 Κάνονας Palmgren-Miner	33
2.8 Κατηγορίες στοιχείων.....	36
Κεφάλαιο 3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ EN1993.1.9	41
Κεφάλαιο 4. CASE STUDY ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ EN1993.1.9 ΣΕ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟ	45
4.1 Εισαγωγή.....	45
4.1.1 Γενικά	45
4.1.2 Ταλαντώσεις λόγω του ανέμου	46
4.1.3 Κόπωση	47

4.2	Παρουσίαση του προβλήματος	48
4.3	Υπολογισμός των φορτίων του ανέμου	52
4.3.1	Δυναμικές παράμετροι της καπνοδόχου	52
4.3.2	Μέθοδος Ruscheweyh	55
4.3.3	Καμπτικές ροπές.....	58
4.4	Μελέτη της κόπωσης με βάση τον EN1993.1.9	59
4.4.1	Υπολογισμός των κύκλων φόρτισης	59
4.4.2	Επιλογή των κατασκευαστικών στοιχείων.....	60
4.4.3	Επιλογή των συντελεστών $\gamma M_f, \gamma F_f$	61
4.4.4	Υπολογισμός του ευρών τάσεων	61
4.4.5	Αξιολόγηση της κόπωσης.....	63
4.5	Παρατηρήσεις	64
	Βιβλιογραφία	66
	Παράρτημα.....	70

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικά Σμβολα

A	εμβαδόν διατομής
c_r	συντελεστής τραχύτητας
D_d	ποσοστό της βλάβης
E	μέτρο ελαστικότητας
f_y	όριο διαρροής
f_u	όριο αντοχής σε εφελκυσμό
m	συντελεστής κλίσης του διαγράμματος S-N
N	κύκλοι ζωής
N_R	σχεδιαζόμενοι κύκλοι ζωής στους 2 εκατομμύρια κύκλους
n_y	ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης
Q_E	ισοδύναμο φορτίο κόπωσης
$Q_{E,2}$	ισοδύναμο φορτίο κόπωσης εκφρασμένο στους 2 εκατομμύρια κύκλους
Q_K	φορτία που προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων φόρτισης
$Q_{m,j}$	το μέσο συνολικό βάρος των φορτηγών στην λωρίδα j ανά χρόχο
t	πάχος
t_0	πάχος αναφοράς
K	συντελεστής ιδιομορφής
k_f	συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων
k_r	συντελεστής εδάφους
k_s	συντελεστής της επίδρασης του πάχους
K_w	διορθωτικός συντελεστής του μήκους συσχετισμού
k_1	συντελεστής μεγέθυνσης τάσεων
L_i	μήκος συσχετισμού για την ταλάντωση i
V	συντελεστής μεγέθυνσης λόγω συντονισμού
V_{crit}	κρίσιμη ταχύτητα ανέμου

Ελληνικά σύμβολα

γ_{FF}	συντελεστής ασφαλείας για τα φορτία
γ_{MF}	συντελεστής ασφαλείας για το όριο αντοχής σε κόπωση
$\Delta\sigma$	εύρος τάσεων
$\Delta\sigma_{E,2}$	ισοδύναμο σταθερό εύρος τάσεων εκφρασμένο στους 2 εκατομμύρια κύκλους
$\Delta\sigma_c$	όριο αντοχής σε κόπωση στους 2 εκατομμύρια κύκλους
$\Delta\sigma_D$	όριο αντοχής σε κόπωση στους 5 εκατομμύρια κύκλους
$\Delta\sigma_L$	όριο αποκοπής τάσεων
$\Delta\tau$	εύρος διατμητικών τάσεων
$\Delta\tau_{E,2}$	ισοδύναμο σταθερό εύρος διατμητικών τάσεων στους 2 εκατομμύρια κύκλους
$\Delta\tau_D$	όριο αντοχής σε κόπωση (για διάτμηση) στους 5 εκατομμύρια κύκλους
$\Delta\tau_L$	όριο αποκοπής διατμητικών τάσεων
ϵ_0	συντελεστής εύρους ζώνης
λ	ισοδύναμος διορθωτικός συντελεστής
φ	δυναμικός συντελεστής

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

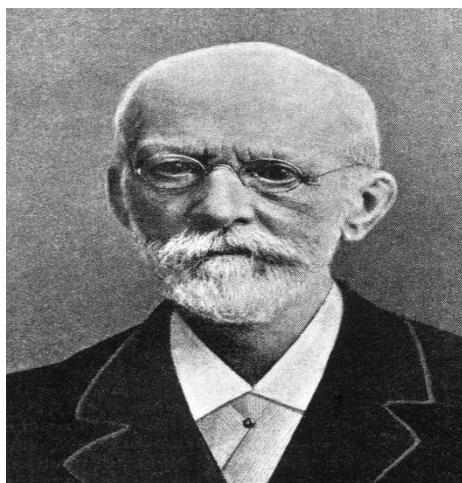
Η κόπωση αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες αιτίες αστοχίας των μεταλλικών στοιχείων και εξαρτημάτων των διάφορων κατασκευών, οι οποίες καταπονούνται με κυκλικές φορτίσεις (ASM Handbook, 1996).

Είναι ένα προοδευτικό τοπικό φαινόμενο στο οποίο η βλάβη, με τη μορφή εντοπισμένης πλαστικής παραμόρφωσης και ρωγμών, συσσωρεύεται λόγω της κυκλικής φόρτισης στην διατομή. Οι ρωγμές συνήθως δημιουργούνται σε σημεία όπου υπάρχει έντονη αλλαγή της γεωμετρίας, διάφορες οπές και εγκοπές στο υλικό επειδή έχει πραγματοποιηθεί κάποια κατεργασία ή λόγω συγκόλλησης. Εκεί παρατηρείται η ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων τάσεων (stress concentrators).

Στα σημεία αυτά δημιουργούνται διάφορες μικρορωγμές οι οποίες με την πάροδο του χρόνου αναπτύσσονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη μέχρι μία να γίνει κυρίαρχη. Καθώς συνεχίζεται η κυκλική φόρτιση η ρωγμή εξελίσσεται σιγά σιγά μέχρι την στιγμή που αρχίζει η μείωση της διατομής. Όταν η διατομή αρχίζει να μειώνεται τότε η ρωγμή εξελίσσεται ραγδαία. Την στιγμή που η διατομή δεν είναι ικανή να μεταφέρει αποτελεσματικά τα διάφορα φορτία τότε η ρωγμή αυξάνεται ακαριαία με αποτέλεσμα την τελική αστοχία.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η κόπωση σαν φαινόμενο άρχισε να γίνεται αντιληπτό στις αρχές του δεκάτου ενάτου αιώνα, όταν διάφορα μεταλλικά κατασκευαστικά στοιχεία του σιδηροδρομικού δικτύου (π.χ. ράγες τραίνων, άξονες βαγονιών) άρχισαν να αστοχούν με την άσκηση επαναλαμβανόμενων φορτίων. Οι τιμές αυτών των φορτίων ήταν μικρότερες από το όριο διαρροής των στοιχείων.



Εικόνα 1.1 August Wöhler (22 Ιουνίου 1819-21 Μαρτίου 1914) (<https://en.wikipedia.org>).

Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα ο August Wöhler ξεκίνησε να κάνει συστηματική έρευνα πάνω στο φαινόμενο μέσω της οποίας απέδειξε ότι οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις με τιμές κάτω από το όριο διαρροής του υλικού μπορεί να οδηγήσει σε θραύση. Με τα πειράματα που διεκπεραίωσε, προήλθαν τα διαγράμματα S-N (διαγράμματα τάσης-ζωής σε κυκλους), τα οποία ονομάζονται και καμπύλες Wöhler. Τα διαγράμματα αυτά περιγράφουν την συμπεριφορά του υλικού στην κόπωση. Επιπλέον, με βάση αυτές τις έρευνες ο Wöhler κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι διάφορες ασυνέχειες και τα σημεία όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων αποτελούν την πηγή δημιουργίας των ρωγμών στην κόπωση.



Εικόνα 12 Θραύση του άξονα αμαξοστοιχίας λόγω κόπωσης (<https://faculty.up.edu>).

Με την έλευση του εικοστού αιώνα το φαινόμενο της κόπωσης άρχισε να γίνεται όλο και πιο έντονο. Αυτό συνέβει επειδή με την εξέλιξη της τεχνολογίας έγινε εφικτή η ευρεία εμφάνιση και χρήση των αυτοκινήτων, των τουρμπίνων, των αεροπλάνων κ.ά.

Σήμερα, παρά τις διάφορες προσπάθειες και έρευνες που έχουν γίνει, ο σχεδιασμός για την αποτροπή της αστοχίας λόγω της κόπωσης παραμένει πραγματικά ένα δύσκολο και περίπλοκο έργο γιατί συνδυάζει διάφορους τομείς της μηχανικής όπως μηχανική των υλικών, μηχανική των κατασκευών, τεχνολογία των συγκολλήσεων, μη καταστρεπτικοί έλεγχοι κ.ά.

1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

Το 1975 η επιτροπή της ευρωπαϊκής κοινότητας (Commission of the European Community) αποφάσισε για την δημιουργία ενός προγράμματος δράσεως πάνω στον κατασκευαστικό τομέα σύμφωνα με το άρθρο 95 της Συνθήκης της Ρώμης. Οι πρώτοι «πειραματικοί» ευρωκώδικες έκαναν την εμφάνιση τους την δεκαετία του '90, οι οποίοι στην συνέχεια αντικαταστάθηκαν από τα σημερινά πρότυπα.

Ο στόχος των ευρωπαϊκών αυτών προτύπων είναι να παράσχουν ένα κοινό, για όλη την Ε.Ε., σύνολο μεθόδων που αφορά τον σχεδιασμό και υπολογισμό της μηχανικής αντοχής των κατασκευαστικών έργων. Ο απώτερος σκοπός των προτύπων είναι να αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα εθνικά πρότυπα.

Οι ευρωκώδικες απαρτίζονται από δέκα κύρια ευρωπαϊκά πρότυπα τα οποία περιλαμβάνουν όλους τους τρόπους δόμησης (από σκυρόδεμα, γεωτεχνικά έργα, χάλυβας, ξύλο, αλουμίνιο κ.ά.) και υποδιαιρούνται σε μέρη λαμβάνοντας υπόψιν και την συμπεριφορά σε σεισμό και φωτιά.

Για κάθε μέρος του ευρωκώδικα εκδίδεται το εθνικό παράρτημα (national annex) που συμπεριλαμβάνει τις εθνικά καθορισμένες παραμέτρους, οι οποίες αντιστοιχούν στις ειδικές γεωγραφικές ή κλιματικές συνθήκες καθώς και τα επιτρεπόμενα επίπεδα προστασίας που επικρατούν σε κάθε κράτος-μέλος της Ε.Ε.

- **EN 1990:** Ευρωκώδικας 0 – Βάσεις σχεδιασμού φερουσών κατασκευών.
- **EN 1991:** Ευρωκώδικας 1 – Δράσεις στις Φέρουσες Κατασκευές.
- **EN 1992:** Ευρωκώδικας 2 – Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από σκυρόδεμα.
- **EN 1993:** Ευρωκώδικας 3 – Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από χάλυβα.
- **EN 1994:** Ευρωκώδικας 4 – Σχεδιασμός σύμμικτων φερουσών κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα.
- **EN 1995:** Ευρωκώδικας 5 – Σχεδιασμός ξύλινων φερουσών κατασκευών.
- **EN 1996:** Ευρωκώδικας 6 – Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από τοιχοποιία.
- **EN 1997:** Ευρωκώδικας 7 – Γεωτεχνικός σχεδιασμός.
- **EN 1998:** Ευρωκώδικας 8 – Αντισεισμικός σχεδιασμός φερουσών κατασκευών.
- **EN 1999:** Ευρωκώδικας 9 – Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από αλουμίνιο.

Σχήμα 1.1 Τα 10 κύρια ευρωπαϊκά πρότυπα.

1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΩΝ

Ο κατασκευαστικός τομέας παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομική ζωή και στην συνολική ανάπτυξη της ευρωπαϊκής ένωσης. Για τον λόγο αυτό, η ομογενοποίηση των διάφορων σχεδιαστικών προτύπων με την δημιουργία ενός κοινού κώδικα για τις χώρες-μέλη θα βοηθήσει σημαντικά στην δημιουργία μιας κοινής αγοράς για τα διάφορα κατασκευαστικά προϊόντα και υπηρεσίες χωρίς να υπάρχουν σημαντικές ανομοιομορφίες.

Επιπρόσθετα, με την ύπαρξη ενός ενιαίου προτύπου, για έναν μηχανικό με την κατάλληλη κατάρτιση, είναι πιο εύκολη η εύρεση εργασίας εντός της ευρωπαϊκής ένωσης. Τέλος, μια εταιρεία π.χ. από την Ελλάδα θα μπορεί να αναλάβει τον σχεδιασμό και την κατασκευή διάφορων έργων σε άλλες χώρες-μέλη της ένωσης.

Παρακάτω θα αναλυθεί κυρίως ο ευρωκώδικας 3 και πιο συγκεκριμένα το μέρος 1-9 που αναφέρεται στην αξιολόγηση της κόπωση των κατασκευών από χάλυβα.

2. EN1993.1.9 (2005)

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το μέρος 1-9 του Ευρωκώδικα 3 παρουσιάζει μεθόδους και τρόπους για τον σχεδιασμό της κόπωσης διάφορων κατασκευαστικών στοιχείων και συνδέσεων, όπως συγκολλήσεις, όταν ασκούνται επαναλαμβανόμενα φορτία.

Σύμφωνα με το πρότυπο, οι μέθοδοι αξιολόγησης έχουν βασιστεί πάνω σε πειράματα κόπωσης που έγιναν με την χρήση δειγμάτων (specimens) μεγάλων διαστάσεων σε χάλυβες S235 και S355 με το εύρος της τάσης να κυμαίνεται από 235 έως 400 N/mm². Αυτό έγινε με σκοπό να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις, οι οποίες υπάρχουν στο υλικό λόγω των γεωμετρικών και των κατασκευαστικών ατελειών, όπως π.χ οι παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται μετά το πέρας της συγκόλλησης.

Το πρότυπο εφαρμόζεται σε όλα τα κράματα των κατασκευαστικών χαλύβων, σε ανοξείδωτους χάλυβες και σε χάλυβες υψηλής αντοχής τύπου corten (COR-TEN), με την προϋπόθεση να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σκληρότητας όπως αυτές διαμορφώνονται σύμφωνα με τον EN1993-1-10. Ακόμα εφαρμόζεται σε μηχανικά στοιχεία που βρίσκονται σε μη διαβρωτικά περιβάλλοντα, σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, σε θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν τους 150°C και δεν υφίστανται ολιγοκυκλική κόπωση. Τέλος, στις μεθόδους αξιολόγησης της κόπωσης που δίνονται δεν περιλαμβάνεται η θραυστομηχανική.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σύμφωνα με το πρότυπο, ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η κατασκευή να λειτουργεί ικανοποιητικά και χωρίς προβλήματα καθ' όλη την διάρκεια ζωής της. Οι μέθοδοι αξιολόγησης της κόπωσης που προτείνονται, βασίζονται στην σύγκριση των τάσεων οι οποίες αναπτύσσονται στα στοιχεία της κατασκευής που είναι επιρρεπή στην κόπωση (action effects) με την αντοχή σε κόπωση των συγκεκριμένων στοιχείων (fatigue strengths).

Για να ισχύει όμως αυτή η σύγκριση, θα πρέπει οι διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τάσεων και της αντοχής σε κόπωση να υπολογίζονται με βάση τους τρόπους που αναφέρονται μέσα στον ευρωκώδικα.

Στην περίπτωση που καλείται να γίνει αξιολόγηση της κόπωσης σε στοιχεία που δεν περιλαμβάνονται στις κατηγορίες (detail categories) που υπάρχουν μέσα στον EC3-1-9, τότε θα πρέπει να διεξαχθούν τεστ κόπωσης. Η διεξαγωγή και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνουν με βάση τις προδιαγραφές που υπάρχουν μέσα στον EN 1990.

Επίσης, διάφορες πληροφορίες για το πώς είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τα όρια αντοχής σε κόπωση μέσα απο τεστ μπορεί να περιέχονται στο εθνικό παράρτημα του κώδικα.

Επιπλέον είναι αναγκαίο να επισημανθεί ότι κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί σε κάποιο σημείο ρωγμή. Όμως αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι παύει και η ασφαλής λειτουργία της.

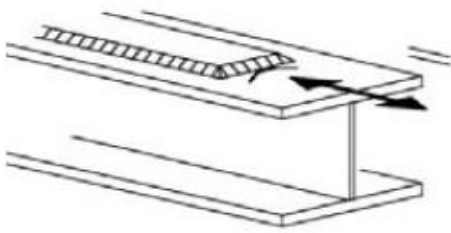
Αν υπάρχει η δυνατότητα επισκευής, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο και φροντίδα έτσι ώστε να μην προκύψουν διάφορες γεωμετρικές ασυνέχειες, όπως τρύπες και εγκοπές. Αυτές θα είχαν ως συνέπεια την δημιουργία τοπικών συγκεντρώσεων τάσεων και θα οδηγήσουν στην επιδείνωση της κατάστασης.

2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ

Οι συντάκτες του ευρωκώδικα για τον υπολογισμό των τάσεων επιλέγουν τρεις προσεγγίσεις:

- Ονομαστικές τάσεις
- Τροποποιημένες ονομαστικές τάσεις
- Γεωμετρικές τάσεις (structure/hot spot stresses)

Για τον υπολογισμό των ονομαστικών τάσεων χρησιμοποιείται η ελαστική θεωρία. Κατά την ανάλυση είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν όλες οι ορθές, διατμητικές και καμπτικές τάσεις. Προτείνεται να υπολογίζονται κοντά στις περιοχές που είναι πιο ευάλωτες στην κόπωση, δηλαδή σημεία όπου παρατηρείται κάποια συγκεντρωση τάσεων και με κατεύθυνση σύμφωνα με το βέλος που υπάρχει για την κάθε κατηγορία στοιχείου (detail category) στους πίνακες 8.1 έως 8.10 του EN 1993.1.9.



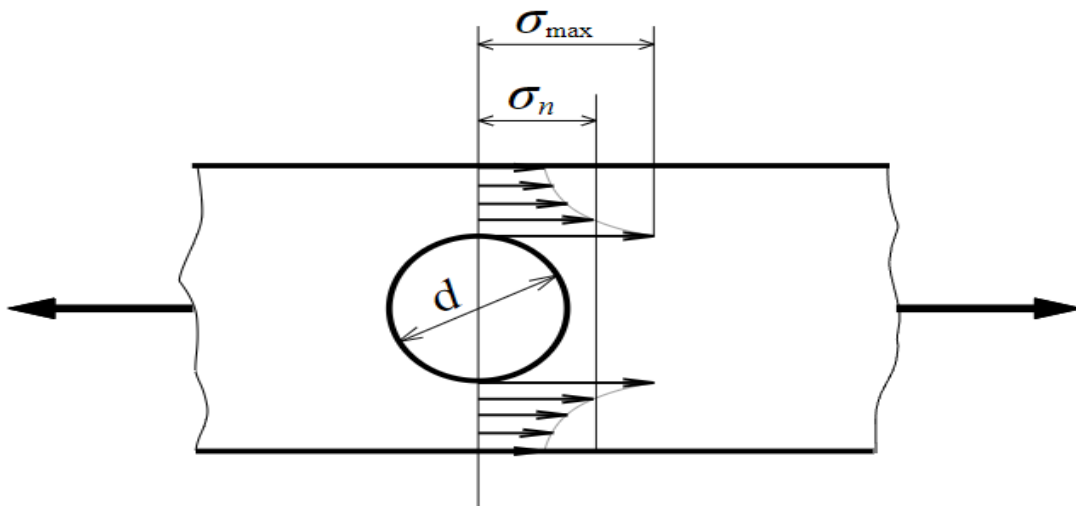
Εικόνα 1.8 Κατασκευαστικό στοιχείο 6/Πίνακας 8.5/EN 1993.1.9.

Η κατεύθυνση και το επίπεδο που υπολογίζεται η τάση καθώς και το σημείο εμφάνισης της ρωγμής.

Τα κατασκευαστικά αυτά στοιχεία συμπεριλαμβάνουν τις επιδράσεις από τις διάφορες συγκεντρώσεις στην αντοχή της κόπωσης, οι οποίες εμφανίζονται λόγω των κατασκευαστικών ατελειών και ασυνεχειών που υπάρχουν, καθώς και στην ύπαρξη των παραμενουσών τάσεων εξαιτίας των συγκολλήσεων. Στην περίπτωση που κάποια γεωμετρική επίδραση δεν έχει ληφθεί υπόψη από την ταξινόμηση των στοιχείων, τότε χρησιμοποιείται ο κατάλληλος συντελεστής συγκεντρώσεων τάσεων (SCF).

Η τροποποιημένη ονομαστική τάση προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του SCF με την ονομαστική τάση.

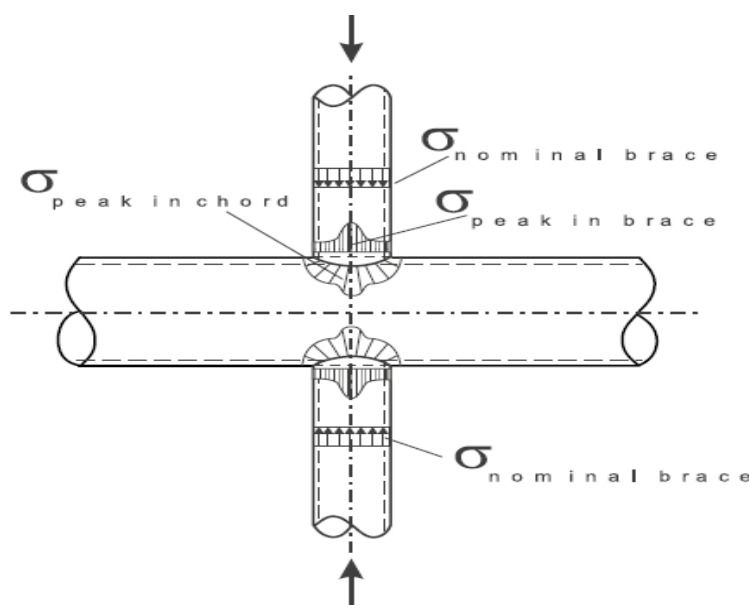
$$\sigma(\text{modified}) = \text{SCF} \times \sigma(\text{nominal}) \quad (1.1)$$



Εικόνα 1.9 Συγκέντρωση τάσεων κοντά στην περιοχή της τρύπας διαμέτρου d.

Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι για απλές διατομές και γεωμετρίες είναι εύκολο να υπολογιστούν οι ασκούμενες τάσεις.

Η τρίτη και τελευταία προσέγγιση αποτελούν οι γεωμετρικές τάσεις (structural stresses). Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν πιο εξευγενισμένο τρόπο υπολογισμού, ο οποίος λαμβάνει υπόψιν την γεωμετρία όλης της συνδεσμολογίας και τις επιδράσεις των φορτίων που δέχεται συνολικά όλη η κατασκευή.

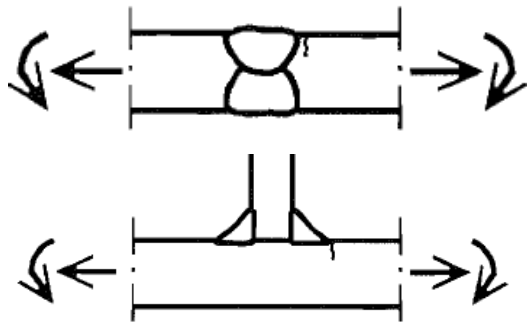


Εικόνα 2 Κατανομή των γεωμετρικών τάσεων κοντά στη συγκόλληση των σωληνοειδών δοκών οι οποίοι δέχονται αξονική φόρτιση (CIDECT 2001).

Να επισημανθεί ότι ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως σε συγκολλήσεις, σε περιπτώσεις που είναι δύσκολο να υπολογιστούν οι ονομαστικές τάσεις. Οι γεωμετρικές αυτές τάσεις προκύπτουν με την βοήθεια τριών τρόπων:

- Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA)
- Συντελεστές συγκεντρώσεων τάσεων (SCF)
- Πραγματικές μετρήσεις

Σύμφωνα με το παρόν πρότυπο, οι γεωμετρικές τάσεις υπολογίζονται με την βοήθεια ειδικών SCF και για τις κατηγορίες στοιχείων που εμπεριέχονται στον πίνακα B.1 του παραρτήματος Β.



Εικόνα 2.1 και *Εικόνα 2.2* Παράδειγμα δύο κατασκευαστικών στοιχείων που υπάρχουν στον πίνακα Β.1.

2.4 ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ ΚΟΙΛΩΝ ΔΟΚΩΝ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

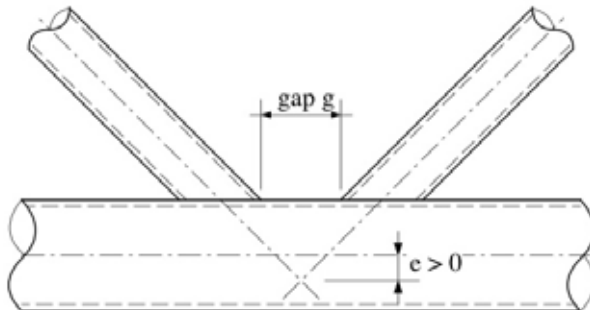
Οι δοκοί με κοίλες διατομές (hollow sections), είτε σωληνοειδής είτε ορθογωνικής μορφής, χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλά κατασκευαστικά έργα όπως σε γέφυρες, γεραμούς κ.α. Η ανάλυση των δικτυωμάτων τα οποία αποτελούνται από τέτοιες δοκούς, βασίζεται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο όπου οι συνδέσεις μεταξύ των συγκολλημένων δοκών θεωρούνται σαν ακίνητοι κόμβοι.



Εικόνα 1.3 Δικτύωμα σε γέφυρα

Λόγω της δυσκαμψίας αυτών των κόμβων και των εκκενρωτήτων που υπάρχουν δημιουργούνται δευτερεύουσες ροπές κάμψης, οι οποίες ασκούνται στις συνδέσεις των δοκών. Από την μεριά της στατικής ανάλυσης αυτές οι ροπές δεν παίζουν σημαντικό ρόλο και δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Όταν όμως στην κατασκευή ασκηθούν μεταβαλλόμενα φορτία, η επίδραση των ροπών αυτών είναι

σημαντική γιατί δημιουργούν υψηλές τοπικές τάσεις οι οποίες δεν γίνεται να αγνοηθούν στο σχεδιασμό για την κόπωση (Albuquerque, 2015).



Εικόνα 1.4 Εκκεντρότητα e σε συγκολλητή συνδεση κοίλων δοκών (CIDECT 2001).

Σύμφωνα με τον EC3-1-9 για να ληφθούν υπόψιν οι επιδράσεις των δευτερευουσών καπτικών ροπών πρέπει τα εύρη των τάσεων τα οποία προκύπτουν από την αξονική φόρτιση των δοκών, που αποτελούν μέρος της σύνδεσης, να πολλαπλασιαστούν με τον συντελεστή k_1 . Παρακάτω παραθέτονται οι τιμές του συντελεστή k_1 :

Type of joint		Chords	Verticals	Diagonals
Gap joints	K type	1,5	$\sqrt{AC_2}$ -	1,3
	N type / KT type	1,5	1,8	1,4
Overlap joints	K type	1,5	- $\sqrt{AC_2}$	1,2
	N type / KT type	1,5	1,65	1,25

Σχήμα 1.2 Τιμές του συντελεστή k_1 για συνδεσμολογία κοίλων σωληνοειδών δοκών σε επίπεδη φόρτιση.

Type of joint		Chords	Verticals	Diagonals
Gap joints	K type	1,5	$\sqrt{AC_1}$ - $\sqrt{AC_1}$	1,5
	N type / KT type	1,5	2,2	1,6
Overlap joints	K type	1,5	$\sqrt{AC_1}$ - $\sqrt{AC_1}$	1,3
	N type / KT type	1,5	2,0	1,4

Σχήμα 1.3 Τιμές του συντελεστή k_1 για συνδεσμολογία κοίλων ορθογωνικών δοκών σε επίπεδη φόρτιση.

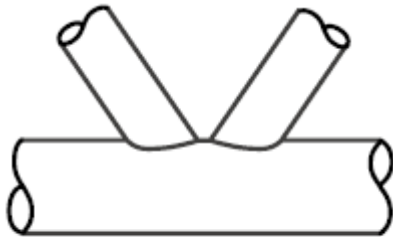
Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι οι τιμές του k_1 εξαρτώνται από το γεγονός αν οι κοίλοι δοκοί είναι κυκλικοί ή ορθογωνικοί και από το είδος της σύνδεσης (overlap or gap joint, τύπου K,N,KT).



Εικόνα 1.5 Συνδεσμολογία ορθογωνικών διατομών τύπου K (overlap).



Εικόνα 1.6 Συνδεσμολογία ορθογωνικών διατομών τύπου K (gap).



Εικόνα 1.7 Συνδεσμολογία κυκλικών διατομών τυπου K (gap).

Οι τιμές αυτές προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δικτυώματα και σε αναλύσεις που έγιναν με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν ικανοποιείται ένα συγκεκριμένο εύρος γεωμετρικών παραμέτρων για τις συνδέσεις των δοκών. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων δίνονται μέσα στον κώδικα.

2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΡΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

2.5.1. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΕΥΡΟΣ $\Delta\sigma_E$

Στην πράξη, τα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή έχουν ως αποτέλεσμα εύρη τάσεων με μεταβαλλόμενα πλάτη τα οποία είναι πολύπλοκα και γενικά δύσκολο να συμπεριληφθούν στον σχεδιασμό. Για διευκόλυνση εισάγεται η συμβατική έννοια του ισοδύναμου εύρους τάσης $\Delta\sigma_E$. Το ισοδύναμο εύρος τάσης είναι ένα εύρος τάσης με σταθερό πλάτος το οποίο όταν εφαρμοστεί στο υλικό θα προκλέσει την ίδια βλάβη με αυτήν που προκαλούν τα πραγματικά μεταβαλλόμενα φορτία στους ίδιους κύκλους ζωής.

Για την περαιτέρω διευκόλυνση στον σχεδιασμό για την κόπωση, οι συντάκτες του κώδικα υποδεικνύουν την χρήση του συντελεστή λ . Με την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου φόρτισης (Fatigue Load Model), σύμφωνα με τον EN 1991, και ύστερα από τους απαραίτητους υπολογισμούς προκύπτει και το αντίστοιχο εύρος τάσης $\Delta\sigma$ ($\gamma_{FF}Qk$). Όμως αυτά τα εύρη τάσεων είναι θεωρητικά, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις από τα εύρη τάσεων που προκύπτουν από τα πραγματικά εφαρμοζόμενα φορτία και δεν αναπαριστάται πλήρως η πραγματική επίδραση της κόπωσης στην κατασκευή.

Για να βρεθεί η τιμή του εύρους της ισοδύναμης τάσης πολλαπλασιάζουμε το εύρος τάσεων, που έχουν υπολογιστεί με βάση τα μοντέλα φόρτισης, με τον συντελεστή λ (damage equivalent factor). Με τον τρόπο αυτό λαμβάνουμε υπόψη τις επιδράσεις που υπάρχουν από τα πραγματικά φορτία.

$$\gamma_{FF}\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma (\gamma_{FF} Qk) \quad (1.2)$$

όπου:

γ_{FF} : συντελεστής ασφάλειας για τα φορτία

$\Delta\sigma_{E,2}$: το ισοδύναμο εύρος τάσεων στους 2 εκατομμύρια κύκλους

Qk : τα φορτία που προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων φόρτισης

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, ο λ αποτελεί έναν διορθωτικό συντελεστή ο οποίος συνδέει την αναλύση που πραγματοποιήθηκε με την χρήση των θεωρητικών μοντέλων, με το ισοδύναμο εύρος τάσεων που έχουν ως αποτέλεσμα τα πραγματικά φορτία. Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν πιο απλοποιημένο τρόπο αξιολόγησης της κόπωσης (Śledziwski, 2017).

Σύμφωνα με τον EN1993.1.9 ο υπολογισμός του εύρους τάσεων μπορεί να γίνει ακολουθώντας τις προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για τις τάσεις:

- i. Υπολογισμός ονομαστικών ευρών τάσεων

- ii. Στην περίπτωση που υπάρχουν συγκεντρώσεις τάσεων λόγω διάφορων γεωμετρικών μεταβλητών που δεν συμπεριλαμβάνονται στα διαγράμματα S-N, τότε χρησιμοποιείται ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_f (SCF). Οι τιμές του K_f δίνονται μέσα από διάφορα εγχειρίδια και από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}=k_f(\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}) \quad (1.3)$$

- iii. Στην ανάλυση συνδεσμολογίας συγκολλητών κοίλων δοκών γίνεται η χρήση του συντελεστή k_1 , οι τιμές του οποίου βρίσκονται στους πίνακες 4.1 και 4.2 του EN 1993-1-9.

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}=k_1(\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}) \quad (1.4)$$

- iv. Υπολογισμός γεωμετρικών ευρών για συγκολλητό στοιχείο με την χρήση του αντίστοιχου συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων.

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}=k_f(\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}) \quad (1.5)$$

Οι ίδιοι τύποι ισχύουν και στις περιπτώσεις που μελετούνται εύρη διατμητικών τάσεων $\Delta\tau$.

Να επισημανθεί ότι το ισοδύναμο εύρος $\Delta\sigma_E$ υπολογίζεται στους 2 εκατομμύρια κύκλους, έτσι ώστε να γίνει έπειτα η σύγκριση με την αντοχή σε κόπωση του εξεταζόμενου στοιχείου, το οποίο είναι και αυτό υπολογισμένο στους ίδιους κύκλους.

2.5.2 Ο ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ λ

Η μέθοδος του ισοδύναμου συντελεστή λ χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε σιδηροδρομικές γέφυρες αλλά αργότερα επεκτάθηκε και για τις γέφυρες του οδικού δικτύου. Επιπρόσθετα, με την ύπαρξη κάποιων τροποποιήσεων εφαρμόζεται σε κατασκευές που υποστηρίζουν γερανούς, σε καμινάδες και πύργους.



Εικόνα 2.1 Πύργος τηλεπικοινωνιών



Εικόνα 2.2 Γέφυρα πάνω από το ποταμό Βιστούλα στην Πολωνία

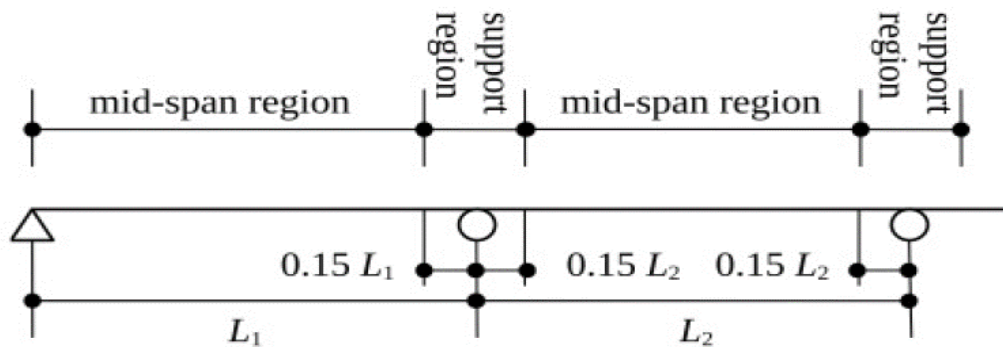
Η τιμή του λ εξαρτάται από την σύνθεση και τον όγκο της κυκλοφορίας, από την διάρκεια ζωής που επιθυμούμε να έχει η κατασκευή, από την επίδραση που έχουν τα μεταβαλλόμενα φορτία και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής. Στον ευρωκώδικα ο συντελεστής λ διαχωρίζεται σε τέσσερις μερικούς συντελεστές $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ έτσι ώστε να ληφθούν υπόψιν στην μελέτη περισσότερες παράμετροι.

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad (1.6)$$

Όπου ο συντελεστής λ_{max} είναι ένα άνω όριο το οποίο συμπεριλαμβάνει την αντοχή στην κόπωση.

Ο υπολογισμός των συντελεστών $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ για γέφυρες γίνεται με βάση τον EN 1993-2.

- Ο συντελεστής λ_1 λαμβάνει την επίδραση της απόστασης μεταξύ δύο ενδιάμεσων στηρίξεων (span length) σε συνδυασμό με το είδος του φορτίου (διατμητικό, καμπτικό).

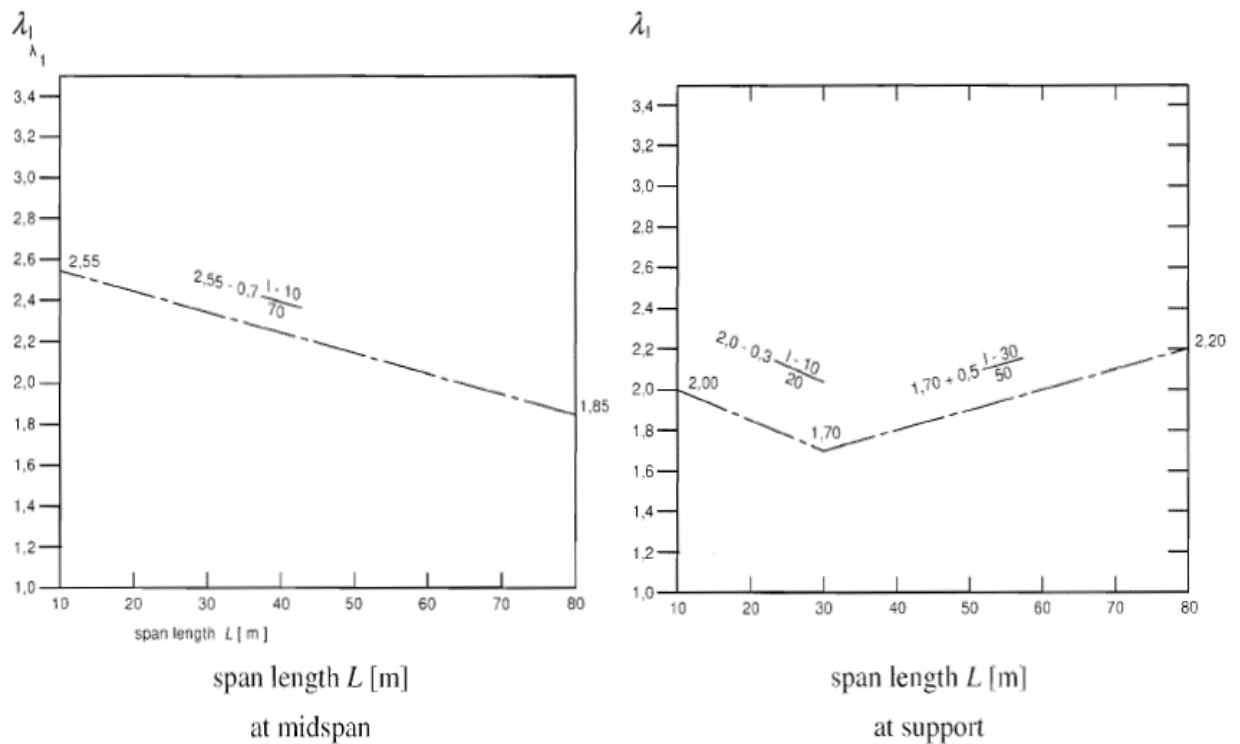


Σχήμα 1.4 Ορισμός των περιοχών ενδιαφέροντος σε γέφυρα για τον υπολογισμό του συντελεστή λ_1 .

Η τιμή του λ_1 στις γέφυρες του οδικού δικτύου εξαρτάται από την θέση του κατασκευαστικού στοιχείου που μελετάμε και η τιμή του ορίζεται για ανοίγματα γεφυρών από 10 έως 80 μέτρα. Σύμφωνα με την ενότητα 9.5.2 του EN1993-2 ο λ_1 υπολογίζεται ως εξής:

- Όταν η περιοχή που μελετάμε είναι μακριά από την στήριξη (mid-span) τότε $\lambda_1 = 2.55 - 0.7(L-10)/70$ όπου L το μήκος ανοίγματος σε μέτρα (m). Όταν η περιοχή που μελετάμε είναι κοντά στην στήριξη (support region) και το μήκος ανοίγματος είναι από 10 έως 30 μέτρα τότε $\lambda_1 = 2 - 0.3(L-10)/20$, όπου $L = L_1 + L_2$
- Όταν η περιοχή είναι πάλι στην στήριξη (support region) αλλά το άνοιγμα είναι μεταξύ 30 και 80 μέτρα τότε $\lambda_1 = 1.7 + 0.5(L-30)/50$, όπου πάλι $L = L_1 + L_2$

Αυτές οι σχέσεις προκύπτουν από τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία υπάρχουν μέσα στον κώδικα EN1993-2.



Σχήμα 1.5 Διαγράμματα για τον υπολογισμό του λ_1 σύμφωνα με την ενότητα 9.5.2 του EN 1993.2.

Στις σιδηροδρομικές γέφυρες ο λ_1 ορίζεται για ανοίγματα γεφυρών έως και 100 μέτρα. Οι διάφορες τιμές του συντελεστή δίνονται από τους πίνακες 9.3 και 9.4 του EN 1993-2.

- Ο συντελεστής λ_2 λαμβάνει υπόψη την ετήσια κυκλοφοριακή ροή καθώς και την σύνθεση της.

Για τις οδικές γέφυρες ο λ_2 προκύπτει με την προσαρμογή της πραγματικής κυκλοφορίας προς την κυκλοφορία αναφοράς και υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\lambda_2 = \frac{Qm1}{Qo} \left(\frac{Nobs}{No} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1.7)$$

Όπου:

$$N_o = 0,5 \times 10^6$$

$$Q_o = 480 \text{ KN}$$

N_o, Q_o : είναι τιμές αναφοράς

N_{obs} είναι ο συνολικός αριθμός των φορτηγών ανά χρόνο

Q_{m1} είναι το μέσο συνολικό βάρος (σε KN) των φορτηγών που κινούνται στη λωρίδα αργής κυκλοφορίας. Δίνεται από την σχέση:

$$Q_{m1} = \left(\frac{\sum n_i Q_i^5}{\sum n_i} \right)^{1/5} \quad (1.8)$$

Όπου:

Q_i είναι το συνολικό βάρος του φορτηγού i στην λωρίδα της αργής κυκλοφορίας

N_i είναι ο αριθμός των φορτηγων με βάρος Q_i

Για δεδομένες τιμές του Q_{m1} και N_{obs} ο λ_2 δίνεται κατευθείαν από τον πίνακα 9.1 της ενότητας 9.5.2 του EN 1993-2.

Q_{m1}	N_{Obs}							
	$0,25 \times 10^6$	$0,50 \times 10^6$	$0,75 \times 10^6$	$1,00 \times 10^6$	$1,25 \times 10^6$	$1,50 \times 10^6$	$1,75 \times 10^6$	$2,00 \times 10^6$
200	0,362	0,417	0,452	0,479	0,500	0,519	0,535	0,550
300	0,544	0,625	0,678	0,712	0,751	0,779	0,803	0,825
400	0,725	0,833	0,904	0,957	1,001	1,038	1,071	1,100
500	0,907	1,042	1,130	1,197	1,251	1,298	1,338	1,374
600	1,088	1,250	1,356	1,436	1,501	1,557	1,606	1,649

Σχήμα 1.6 Δεδομένες τιμές για Q_{m1} και N_{obs} .

Αντίστοιχα για τις σιδηροδρομικές γέφυρες οι αριθμητικές τιμές του λ_2 δίνονται από τον πίνακα 9.2 της ενότητας 9.5.2

Traffic per year [10^6 t/track]	5	10	15	20	25	30	35	40	50
λ_2	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

Σχήμα 1.7 Αριθμητικές τιμές για τον συντελεστή λ_2 (σιδηροδρομικές γραμμές).

- Ο συντελεστής λ_3 εξαρτάται από την σχεδιαζόμενη διάρκεια ζωής και υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_3 = \left\{ \frac{t_{LD}}{100} \right\}^{1/5} \quad (1.9)$$

Όπου t_{LD} είναι η σχεδιαζόμενη διάρκεια ζωής της γέφυρας σε χρόνια.

- Ο συντελεστής λ_4 εκφράζει την επίδραση σε στοιχείο της κατασκευής που υπάρχει όταν έχουμε περισσότερες από μία φορτίσεις.

Στις οδικές γέφυρες ο λ_4 περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις των φορτίων όταν υπάρχει κυκλοφορία στις υπόλοιπες λωρίδες και ο υπολογισμός του συντελεστή πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\lambda_4 = \left[1 + \sum_{j=2}^k \frac{N_j}{N_1} \left(\frac{\eta_j Q_{mj}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^m \right]^{1/m} \quad (2)$$

Όπου:

k είναι ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας με συχνή κυκλοφορία

N_j ο αριθμός των φορτηγών στην λωρίδα j ανά χρόνο

Q_{mj} είναι το μέσο συνολικό βάρος των φορτηγών στην λωρίδα κυκλοφορίας j

Όταν έχουμε μία μόνο λωρίδα κυκλοφορίας τότε ο συντελεστής λ_4 παίρνει την τιμή 1.

Αντίθετα, στις σιδηροδρομικές γραμμές ο συντελεστής λ_4 εκφράζει το γεγονός ότι δεν υπάρχουν τραίνα, την ίδια χρονική στιγμή, πάνω στην γέφυρα. Ο σχεδιασμός γέφυρας με δύο σιδηροδρομικές γραμμές γίνεται με τις δύο γραμμές φορτισμένες ταυτόχρονα έτσι ώστε να υπολογιστεί το μεγαλύτερο εύρος τάσης στο χειρότερο δυνατό σενάριο φόρτισης. Για τον λόγο αυτό η τιμή του λ_4 είναι μικρότερη της μονάδας. Οι τιμές του δίνονται από τον πίνακα 9.7 του EN1993-2.

$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
λ_4	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71

Σχήμα 1.8 Αριθμητικές τιμές για τον συντελεστή λ_4 (σιδηροδρομική γέφυρα).

Όπου:

$\Delta\sigma_1$ το εύρος τάσης στο στοιχείο της γέφυρας που δημιουργείται από την εφαρμογή του μοντέλου φόρτισης FLM 71 στην πρώτη γραμμή.

$\Delta\sigma_{1+1}$ το εύρος τάσης στο ίδιο στοιχείο που δημιουργείται από την εφαρμογή του FLM 71 και στις δύο γραμμές.

Αν όμως το ποσοστό κίνησης πάνω στην γέφυρα είναι διαφορετικό από 12% (παράμετρος p) πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\lambda_4 = [p + (1+p)(\alpha^5 + (1-\alpha)^5)]^{1/5} \quad (2.1)$$

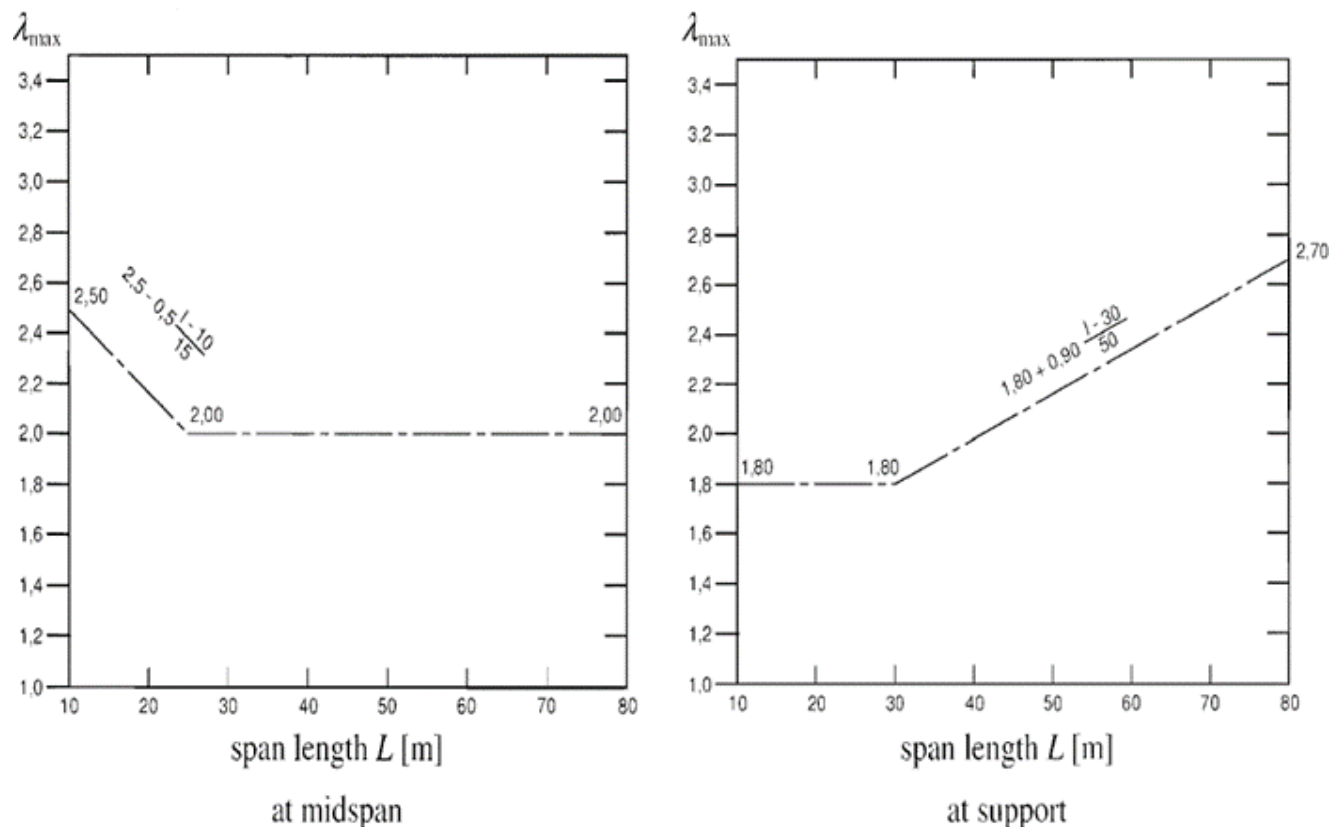
Όπου:

η είναι το ποσοστό της κυκλοφορίας

α είναι ο λόγος $\Delta\sigma_1$ προς $\Delta\sigma_{1+1}$

- Ο συντελεστής λ_{\max} προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ και αποτελεί κατά κάποιον τρόπο ένα ανώτατο όριο αντοχής της κόπωσης του εξεταζόμενου στοιχείου

Στις οδικές γέφυρες η χρήση του μοντέλου φόρτισης FLM 3 για τους συντελεστές λ δεν δίνει ένα ανώτατο όριο, όπως τα μοντέλα στις σιδηροδρομικές γέφυρες, για τις μέγιστες τάσεις. Έτσι η τιμή του λ_{\max} , όπως και ο λ_1 , εξαρτώνται από το μήκος του ανοίγματος της γέφυρας (span) και από την θέση του εξεταζόμενου στοιχείου. Ο λ_{\max} καθορίζεται με την βοήθεια των δύο παρακάτω διαγραμμάτων.



Σχήμα 1.9 Διαγράμματα για τον υπολογισμό του λ_{\max} για γέφυρες του οδικού δικτύου.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στις σιδηροδρομικές γέφυρες το μοντέλο φόρτισης δίνει ένα μέγιστο όριο όσον αναφορά τις τάσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή του. Όμως οι τιμές αυτών των τάσεων δεν μπορούν να ξεπερνάνε την τιμή του CALF ($\Delta\sigma_d$). Οπότε το λ_{\max} μπορεί να εκφραστεί:

$$\lambda_{\max} = (\Delta\sigma_c / \Delta\sigma_D) = (5/2)^{1/3} = 1.36 \quad (2.2)$$

Στον EN 1993-2 η τιμή του λ_{\max} στρογγυλοποιείται στο 1.4.

Επίσης να επισημανθεί ότι τα εθνικά παραρτήματα μπορεί να δίνουν διαφορετικές τιμές και περαιτέρω πληροφορίες για τον υπολογισμό των λ -συντελεστών σε σχέση με όσα αναφέρονται στον EN 1993-2.

Στις κατασκευές που υποστηρίζουν γερανούς, η μελέτη για την κόπωση βασίζεται σε τυποποιημένα εύρη τάσεων που ακολουθούν την κατανομή του Gauss σύμφωνα με τον EN 1991.3. Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής λ αποτελεί τον διορθωτικό συντελεστή για την χρήση των τυποποιημένων αυτών μοντέλων φόρτισης και για την μετατροπή των ισοδύναμων φορτίων στους δύο εκατομμύρια κύκλους ζωής.

$$Q_{E,2} = \phi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{\max,i} \quad (2.3)$$

όπου:

$Q_{E,2}$: τα ισοδύναμα φορτία στους 2 εκατομμύρια κύκλους

ϕ_{fat} : δυναμικός συντελεστής

$Q_{\max,i}$: η μέγιστη τιμή του χαρακτηριστικού φορτίου i

Ο διορθωτικός συντελεστής λ_i χωρίζεται σε δύο παράγοντες $\lambda_{1,i}$ και $\lambda_{2,i}$.

$$\lambda_i = \lambda_{1,i} \cdot \lambda_{2,i} \quad (2.4)$$

Ο παράγοντας $\lambda_{1,i}$ αποτελεί τον διορθωτικό συντελεστή για την χρήση των τυποποιημένων φορτίων φόρτισης ενώ ο συντελεστής $\lambda_{2,i}$ χρησιμοποιείται για την μετατροπή στους 2 εκατομμύρια κύκλους.

Σε καμινάδες και πύργους ο συντελεστής λ χρησιμοποιείται μόνο για την μετατροπή του ισοδύναμου εύρους τάσης που εφαρμόζεται στους 2 εκατομμύρια κύκλους και υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{1/m} \quad (2.5)$$

όπου m η κλίση της σχετικής καμπύλης του διαγράμματος S-N

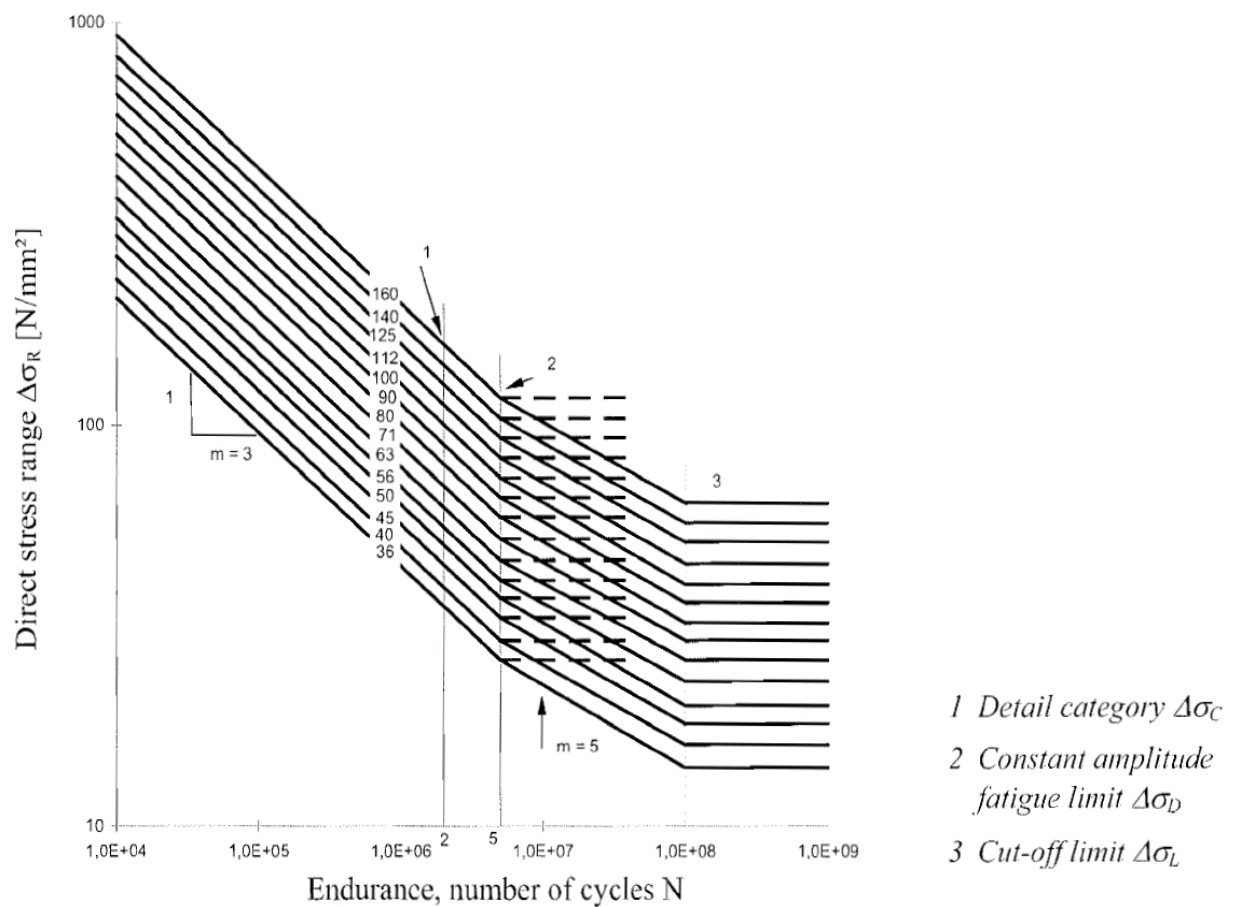
2.6 ANTOXH ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ

2.6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ S-N

Η πιο απλή μεθοδολογία για την αξιολόγηση της κόπωσης αποτελεί ο υπολογισμός των μεταβαλλόμενων τάσεων, που ασκούνται στο υπό εξέταση στοιχείο, και στην συνέχεια η σύνδεση και σύγκριση με τα αντίστοιχα διαγράμματα S-N, τα οποία συσχετίζουν το όριο αντοχής (fatigue strength) με την διάρκεια ζωής.

Περιλαμβάνονται 14 καμπύλες S-N για τις διάφορες κατηγορίες στοιχείων που εμπεριέχονται στους πίνακες 8.1-8.10 του ευρωκώδικα. Κάποια παραδείγματα κατασκευαστικών στοιχείων θα δωθούν στην ενότητα 2.8.

Οι καμπύλες αυτές βασίζονται σε διάφορες πειραματικές μετρήσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν το σχήμα της συνδεσμολογίας, ορισμένες γεωμετρικές και κατασκευαστικές παραμέτρους και τις συνθήκες φόρτισης του στοιχείου.



Σχήμα 2. Το σετ των 14 καμπύλων S-N που περιλαμβάνει ο EN1993.1.9.

Είναι σχεδιασμένες σε λογαριθμική κλίμακα, παράλληλες και ισαπέχουν μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή αντικατοπτρίζει μια διαφορά περίπου 12% ως προς το εύρος της τάσης. Σε κάθε καμπύλη αντιστοιχεί ένας αριθμός που ισούται με το $\Delta\sigma_C$, το οποίο αποτελεί την αντοχή σε κόπωση (fatigue strength) εκφρασμένη στους δύο εκατομμύρια κύκλους ζωής.

Κάθε καμπύλη αποτελείται από τρία ευθύγραμμα τμήματα. Στο πρώτο σημείο όπου αλλάζει η κλίση, αντιστοιχεί το $\Delta\sigma_D$ το οποίο ονομάζεται CAFL (constant amplitude fatigue limit) και είναι εκφρασμένο στους 5 εκατομμύρια κύκλους. Στην περίπτωση που έχουμε φόρτιση σταθερού πλάτους, το CAFL αποτελεί σημείο αποκοπής, δηλαδή τα εύρη τάσεων μικρότερα της τιμής του CAFL δεν λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη.

Μετά από το σημείο CAFL ο συντελεστής της κλίσης m μεταβάλλεται από 3 σε 5. Αυτό σημαίνει ότι για διάρκεια ζωής μικρότερης των 5 εκατομμυρίων κύκλων ο συντελεστής m παίρνει την τιμή 3. Για διάρκεια ζωής μεταξύ των 5 και των εκατό εκατομμυρίων κύκλων ο συντελεστής m μεταβάλλεται από 3 σε 5.

Στους 100 εκατομμύρια κύκλους αντιστοιχεί το όριο αποκοπής $\Delta\sigma_L$. Τα εύρη των τάσεων που είναι μικρότερα του ορίου αποκοπής μπορούν να παραληφθούν στο σχεδιασμό γιατί θεωρητικά δεν συμβάλλουν στην εξέλιξη της βλάβης. Αν και στην πραγματικότητα τα εφαρμοζόμενα $\Delta\sigma$ που είναι μικρότερα από το όριο $\Delta\sigma_L$ έχουν κάποια επιρροή στον σχηματισμό μικρορωγμών.

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση για εύρη τάσεων μικρότερα ή μεγαλύτερα του $\Delta\sigma_D$ ο EN1993-1-9 μας δίνει τους εξής τύπους:

$$\text{Για } m=3 \text{ και } N \leq 5 \times 10^6: \Delta\sigma_R^3 N_R = \Delta\sigma_c^3 2 \times 10^6 \quad (2.6)$$

$$\text{Για } m=5 \text{ και } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8: \Delta\sigma_R^5 N_R = \Delta\sigma_D^5 5 \times 10^6 \quad (2.7)$$

Αν στην σχέση 2.6 αντικαταστήσουμε $N_R = 5 \times 10^6$ και $\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_D$ προκύπτει:

$$\Delta\sigma_D = (2/5)^{1/3} \Delta\sigma_c = 0.737 \Delta\sigma_c$$

Δηλαδή το $\Delta\sigma_D$ ισούται περίπου με το 74% του $\Delta\sigma_c$.

Αντίστοιχα, αν στην σχέση 2.7 αντικαταστήσουμε $N_R = 10^8$ και $\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_L$ προκύπτει:

$$\Delta\sigma_L = (5/100)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0.549 \Delta\sigma_D$$

Δηλαδή το $\Delta\sigma_L$ ισούται περίπου με το 55% του $\Delta\sigma_D$.

Τα εύρη $\Delta\sigma_c, \Delta\sigma_D, \Delta\sigma_L$ έχουν ως μονάδα μέτρησης το N/mm^2 .

Με βάση τους παραπάνω τύπους γίνεται ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής N_R όταν το εύρος τάσης $\Delta\sigma_R$ είναι γνωστό:

$$\text{Για } m_1=3 \text{ και } 1.5 f_y > \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D \quad N_R = (\Delta\sigma_c / \Delta\sigma_R)^3 2 \times 10^6 \quad (2.8)$$

$$\text{Για } m_1=5 \text{ και } \Delta\sigma_D > \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_L \quad N_R = (\Delta\sigma_c / \Delta\sigma_R)^3 5 \times 10^6 \quad (2.9)$$

$$\text{Για } \Delta\sigma_R < \Delta\sigma_L \quad N_R = \infty \quad (3)$$

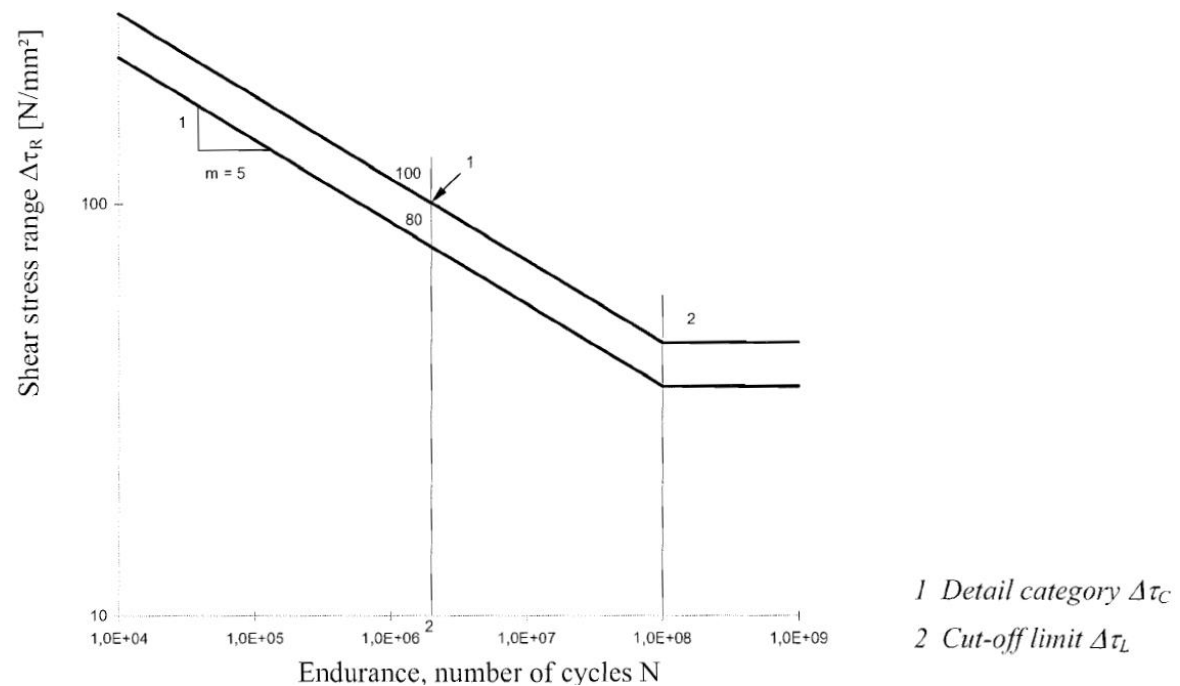
Αντίστροφα άμα γνωρίζουμε την διάρκεια ζωής N_R είναι δυνατόν να υπολογιστεί το εφαρμοζόμενο εύρος τάσης:

$$\text{Για } N_R \leq N_D \quad \Delta\sigma_R = \Delta\sigma_c (2 \times 10^6 / N_R)^{1/3} \quad (3.1)$$

$$\text{Για } N_D < N_R \leq N_L \quad \Delta\sigma_R = \Delta\sigma_D (5 \times 10^6 / N_R)^{1/5} \quad (3.2)$$

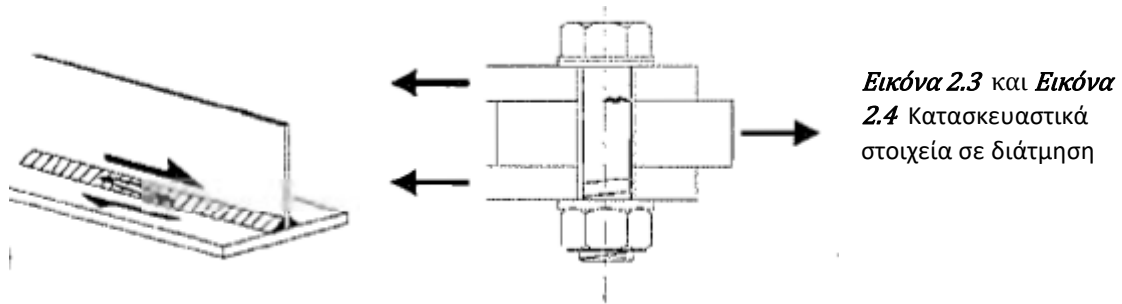
$$\text{Για } N_R > N_L \quad \Delta\sigma_R = \Delta\sigma_L \quad (3.3)$$

Στην περίπτωση στοιχείων που υφίστανται καταπόνηση με διατμητικά εύρη τάσεων $\Delta\tau$, το πρότυπο παρέχει τα αντίστοιχα διαγράμματα S-N.



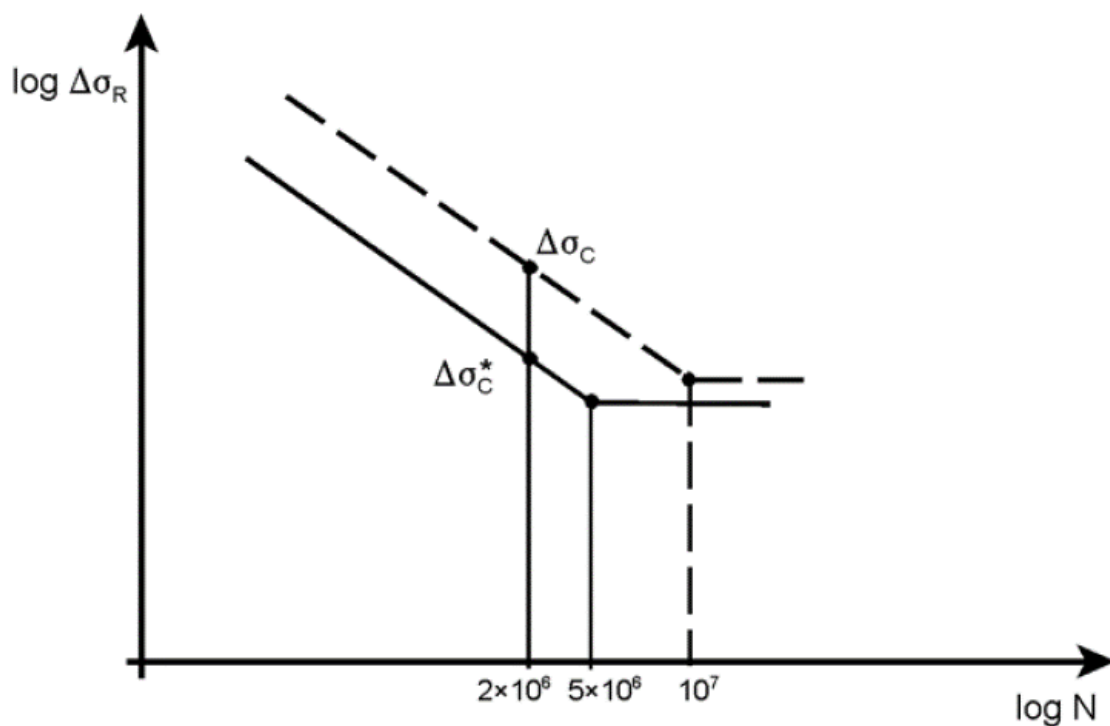
Σχήμα 2.1 Διαγράμματα S-N για διατμητικά εύρη τάσεων $\Delta\tau$.

Οι καμπύλες αυτές έχουν μεγαλύτερη κλίση $m=5$, το όριο αποκοπής $\Delta\sigma_c$ αντιστοιχεί στους 100 εκατομμύρια κύκλους, ενώ δεν υπάρχει το CALF. Επειδή ο EN1993.1.9 εξετάζει ελάχιστα στοιχεία που υφίστανται διάτμηση (Πίνακας 8.1, στοιχεία 6,7,15/Πίνακας 8.5, στοιχεία 8,9), για τον λόγο αυτό συμπεριλαμβάνονται μόνο δύο καμπύλες S-N, οι οποίες είναι αρκετές για την μελέτη.



2.6.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ S-N

Κάποιες κατηγορίες στοιχείων δεν συμπίπτουν ακριβώς με τις παραπάνω καμπύλες S-N τα οποία περιγράφονται με ένα αστερίσκο. Για να αποφευχθούν μη συντηρητικές συνθήκες αυτά τα, στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν μια κατηγορία πιο χαμηλά από το απαιτούμενη αντοχή στους 2 εκατομμύρια κύκλους.



Σχήμα 2.2 Τροποποιημένες καμπύλες S-N.

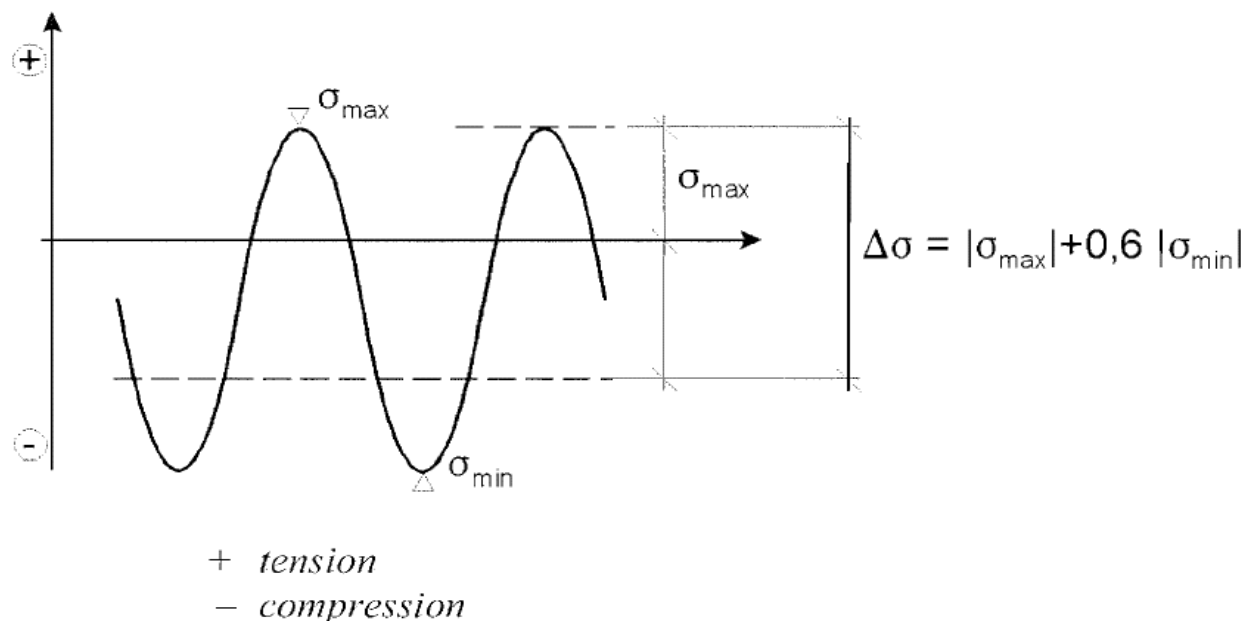
Μια διαφορετική προσέγγιση είναι να αυξήσουμε την κατηγορία του στοιχείου κατά μία κατηγορία με την προϋπόθεση ότι το CAFL θεωρείται το όριο αντοχής στην κόπωση στους 10 εκατομμύρια κύκλους και υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\Delta\sigma_D(\text{στους } 10 \text{ εκ. κύκλους}) = (0.2)^{1/3} \cdot 1.12 \cdot \Delta\sigma_c^* \quad (3.3)$$

2.6.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Για τα μη συγκολλητά στοιχεία ή για συγκολλήσεις που έχουν υποστεί διαδικασίες ανακούφισης τάσεων (stress relieved), μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι δεν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις, οπότε μπορεί να ληφθεί υπόψιν η επίδραση της μέσης τάσης στην κόπωση. Αυτό όμως ισχύει μόνο όταν οι τάσεις που ασκούνται είναι θλιπτικές.

Ο EN1993-1-9 προτείνει ότι το ενεργό εύρος τάσης που ασκείται μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας στο εφελκυστικό μέρος της τάσης και το 60% του μεγέθους της θλιπτικής τάσης.



Σχήμα 2.3 Τροποποιημένο εύρος τάσης για μη συγκολλητά στοιχεία ή για στοιχεία που έχουν υποστεί διαδικασίες ανακούφισης τάσεων.

2.6.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ

Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η επιδράση του μεγέθους στην κόπωση λόγω του πάχους των μεταλλικών πλακών και των άλλων γεωμετρικών διαστάσεων. Ο EN προτείνει σε αυτήν την περίπτωση την μείωση της αντοχής $\Delta\sigma_c$. Η καινούργια αντοχή σε κόπωση δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\sigma_c(\text{reduced}) = k_s \cdot \Delta\sigma_c \quad (3.4)$$

όπου:

$$K_s = \left\{ \frac{t_0}{t} \right\}^n \quad (3.5)$$

Το t_0 ονομάζεται πάχος αναφοράς και για πάχη μεγαλύτερα από αυτό, πρέπει να θεωρηθεί η επίδραση που υπάρχει στην μείωση της αντοχής $\Delta\sigma_c$. Συνήθως παίρνει την τιμή 25 ενώ ο εκθέτης τιμές μεταξύ 0.1 έως 0.4. Στον παρόν ο εκθέτης n ισούται με 0.2 για μετωπικές συνδέσεις (butt joints) και με 0.25 για τους κοχλίες σε προένταση.

2.7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

2.7.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στον EN1993.1.9 προτείνονται δύο στρατηγικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό κατά της κόπωσης: η ασφαλής ζωής (safe life method) και η ανοχή στην βλάβη (damage tolerance method).

Η μέθοδος της ασφαλούς ζωής αποτελεί μια πιο συντηρητική προσέγγιση που βασίζεται στην υπόθεση ότι δεν θα δημιουργηθούν ρωγμές λόγω κόπωσης στην κατασκευή καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας. Χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα για επιθεωρήσεις ή επισκευή της κατασκευής ή όταν η αστοχία έχει τεράστιες ανθρώπινες και οικονομικές επιπτώσεις. Συνήθως δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με την επιθυμητή διάρκεια κατά τον σχεδιασμό. Έχει μεγάλο αρχικό κόστος σε σχέση με την ανοχή στην βλάβη αλλά θεωρητικά δεν προκύπτουν στην πορεία άλλα κόστη όπως π.χ για επιθεώρηση και συντήρηση.

Από την άλλη μεριά η ανοχή στην βλάβη βασίζεται στην υπόθεση ότι η κατασκευή θα εμφανίσει ρωγμές αλλά θα μπορούν να εντοπιστούν εγκαίρως και να επισκευαστούν εύκολα χωρίς να οδηγήσουν σε αστοχία έτσι ώστε η κατασκευή να συνεχίσει την λειτουργία της ικανοποιητικά και με ασφάλεια. Η προσέγγιση αυτή έχει μικρότερο αρχικό κόστος αλλά πρέπει να συνυπολογιστούν τα κόστη που θα προκύψουν στο μέλλον όπως τα διάφορα κόστη που θα απαιτούνται για τις συντηρήσεις. Η στρατηγική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν ισχύουν οι εξής προϋθέσεις (Borges, Davaine & Nussbaumer, 2011):

- 1) όταν τα στοιχεία της κατασκευής είναι εύκολα προσβάσιμα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει με ευκολία η επιθεώρηση και η επισκευή τους.
- 2) τα στοιχεία της κατασκευής, τα υλικά και τα εύρη των τάσεων να είναι τέτοια έτσι όταν αρχίσουν να δημιουργούνται ρωγμές, αυτές να έχουν μικρό ρυθμό διάδοσης της ρωγμής και μεγάλο κρίσιμο μήκος ρωγμής a_f .
- 3) να υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής των φορτίων που δέχεται η κατασκευή. Έτσι στην περίπτωση που ένα στοιχείο παρουσιάσει βλάβη, η κατασκευή να μπορεί να λειτουργεί χωρίς να οδηγήθει σε ολική αστοχία.
- 4) στην χρήση στοιχείων τα οποία μπορούν να περιορίσουν την διάδοση των ρωγμών και να αποτρέψουν την ολοκληρωτική αστοχία (crack arresting details).

Στον ευρωκώδικα γίνεται αναφορά για τον συντελεστή γ_{Mf} (partial factor for fatigue strength). Ο συντελεστής χρησιμοποιείται για να ληφθούν υπόψιν στο σχεδιασμό οι θεωρήσεις που έγιναν στους υπολογισμούς, οι αβεβαιότητες που υπάρχουν στον τρόπο που ορίζεται και υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση (fatigue strength), τα μοντέλα των φορτίσεων και τα διάφορα ελαττώματα στο υλικό που δεν έχουν συμπεριληφθεί στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Με την χρήση του γ_{Mf} επιτυγχάνεται ο περιορισμός ως το δυνατόν περισσότερο του κινδύνου, που προκύπτει λόγω αστοχίας, στην ανθρώπινη ζωή και στο περιβάλλον.

Οι αριθμητικές τιμές που παίρνει ο συντελεστής, εξαρτώνται από την προσέγγιση που επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της κόπωσης (ασφαλής ζωής ή ανοχή στην βλάβη) και τις επιπτώσεις που έχει η αστοχία της κατασκευής. Παρακάτω δίνονται οι προτεινόμενες τιμές του γ_{Mf} σύμφωνα με τον ευρωκώδικα.

<i>Στρατηγική σχεδιασμού</i>	<u>Χαμηλή επίπτωση αστοχίας</u>	<u>Υψηλή επίπτωση αστοχίας</u>
<i>Ανοχή στην βλάβη</i>	1.00	1.15
<i>Ασφαλής ζωή</i>	1.15	1.35

Σχήμα 2.4 Προτεινόμενες τιμές για τον συντελεστή γ_{Mf} σύμφωνα με τον EN1993.1.9.

Σε κάθε εθνικό παράρτημα του ευρώκωδικα υπάρχει η πιθανότητα να δίνονται υποδείξεις για την επιλογή της στρατηγικής σχεδιασμού, για τις τιμές του συντελεστή και για το πως διαχωρίζεται η επίπτωση της βλάβης σε υψηλή ή χαμηλή.

Όμως πως μπορεί να διαχωριστεί σε υψηλή ή σε χαμηλή η επίπτωση που θα έχει η αστοχία της κατασκευής ή πως μπορεί να οριστεί π.χ. ο όρος «υψηλή επίπτωση»; Όπως είναι γνωστό, οι επιπτώσεις μιας αστοχίας έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομία και κυρίως στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη ζωή.

<u>Κλάση επιπτώσεων</u> (consequence class)	<u>Περιγραφή</u>	<u>Παραδείγματα</u>
CC3	Υψηλή επίπτωση στην απώλεια ανθρώπινων ζώων.Μεγάλες συνέπειες στην κοινωνικοοικονομική ζωή και στο περιβάλλον.	Εξέδρες γηπέδων, αίθουσες συνεδριάσεων κ.ά.
CC2	Μέτρια επίπτωση στην απώλεια ανθρώπινων ζώων.Σημαντικές συνέπειες στην κοινωνικοοικονομική ζωή και στο περιβάλλον	Πολυκατοικίες, κτήρια που στεγάζουν γραφεία κ.ά.
CC1	Χαμηλή επίπτωση στην απώλεια ανθρώπινων ζώων.Αμελητέες συνέπειες στην κοινωνικοοικονομική ζωή και στο περιβάλλον	Κτήρια που δεν εισέρχονται συχνά άνθρωποι. π.χ. αποθήκες, θερμοκήπια

Σχήμα 2.5 Ορισμός των κλάσεων των επιπτώσεων σύμφωνα με τον EN1990 (παράρτημα Β).

Στο EN 1990, και συγκεκριμένα στο παράρτημα Β, δίνονται κάποιες υποδείξεις για το πως ορίζονται οι επιπτώσεις της αστοχίας σε μικρή, μεσαία και μεγάλη κλάση.

Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται κυρίως για να υπάρχει ένα επίπεδο διαφοροποίησης της αξιοπιστίας της κάθε κατασκευής που θα συμπεριλαμβάνει και τον αντίκτυπο της αστοχίας στον άνθρωπο, στην οικονομία και στο περιβάλλον.

Όμως, μέσα στον ευρωκώδικα δεν δίνεται κάποια οδηγία ή υπόδειξη άμα υπάρχει σύνδεση με τον διαχώρισμό που γίνεται σε «υψηλή» ή «χαμηλή» με τον αντίστοιχο που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5.

2.7.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ γ_{FF}, γ_{MF}

Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα, η επαλήθευση για την κόπωση βασίζεται στην ιδέα των συντελεστών ασφαλείας (partial factors) γ_{FF}, γ_{MF} . Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για να ληφθούν υπόψιν στην μελέτη οι διάφορες αβεβαιότητες που υπάρχουν στον σχεδιασμό, όπως οι υποθέσεις που γίνονται στο μαθηματικό μοντέλο.

Επίσης, μέσω των συντελεστών πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, όσο είναι επιτρεπτό, ο κίνδυνος που υπάρχει στους ανθρώπους και στο περιβάλλον στην περίπτωση αστοχίας της κατασκευής. Για τον συντελεστή γ_{MF} έγινε αναφορά παραπάνω οπότε στην συνέχεια θα αναφερθούμε στον συντελεστή γ_{FF} .

Σύμφωνα με το παράρτημα D του EN1991 η προτεινόμενη τιμή του γ_{FF} είναι ίση με 1.0 αν και πολλά εθνικά πρότυπα δίνουν τιμές λίγο μεγαλύτερες. Ο συντελεστής σχετίζεται με την διάρκεια ζωής και με τις υποθέσεις που γίνονται σχετικά με την φόρτιση της κατασκευής και την κατανομή των φορτίων.

2.7.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

Ο έλεγχος της κόπωσης πραγματοποιείται συγκρίνοντας το ισοδύναμο εύρος τάσης στους δύο εκατομμύρια κύκλους $\Delta\sigma_{E,2}$ (ή $\Delta\tau_{E,2}$ στην περίπτωση που ασκούνται διατμητικές τάσεις) με την αντοχή στη κόπωση (fatigue strength) του στοιχείου που εξετάζουμε, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας γ_{FF}, γ_{MF} όπως φαίνεται και στην σχέση 3.6.

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} \quad (3.6)$$

Στην περίπτωση που έχουμε διατμητικά εύρη τάσεων τότε:

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2} \leq \Delta\tau_c / \gamma_{Mf} \quad (3.7)$$

Όταν έχουμε συνδυασμό $\Delta\sigma$ και $\Delta\tau$ τότε:

$$[(\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}) / (\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf})]^3 + [(\gamma_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}) / (\Delta\tau_c / \gamma_{Mf})]^5 \leq 1.0 \quad (3.8)$$

2.7.4 ΚΑΝΟΝΑΣ PALMGREN-MINER

Σύμφωνα με το παράρτημα Α του EN1993-1-9, όταν γνωρίζουμε το εύρος των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή, ο έλεγχος για την κόπωση μπορεί να γίνει και με βάση τον κανόνα Palmgren-Miner. Ο κανόνας του Miner βασίζεται στην υπόθεση ότι η ζημιά λόγω κόπωσης που συσσωρεύεται στο στοιχείο μπορεί να προσδιοριστεί ως και μία γραμμική άθροιση της ζημιάς που προκαλεί το κάθε διαφορετικό εύρος τάσεων.

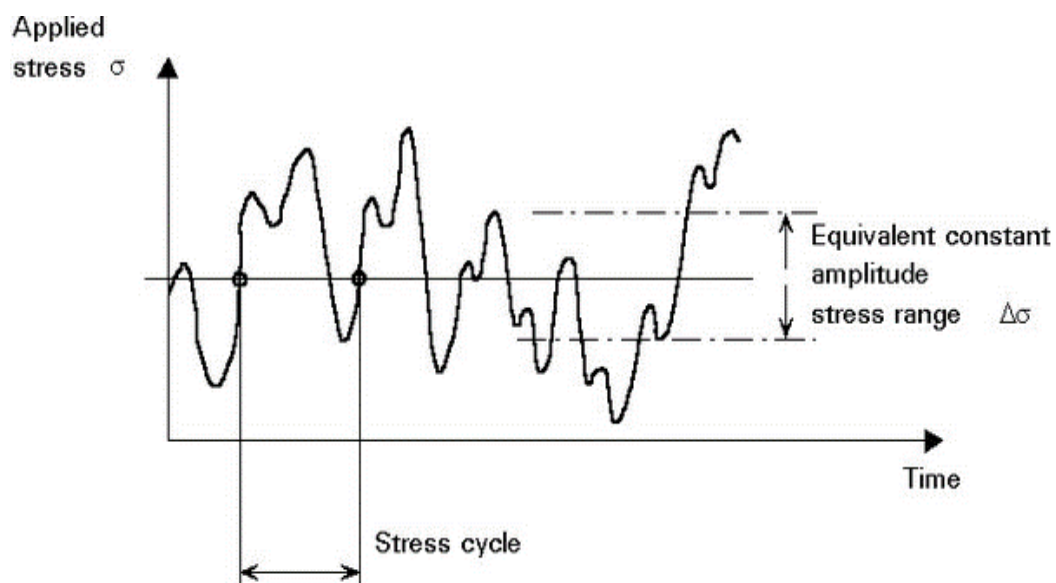
$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1.0 \quad (3.9)$$

Όπου n_{Ei} ο αριθμός των κύκλων που ασκείται το εύρος τάσης $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$ στο τμήμα i της κατασκευής και N_{ri} η διάρκεια ζωής του τμήματος i .

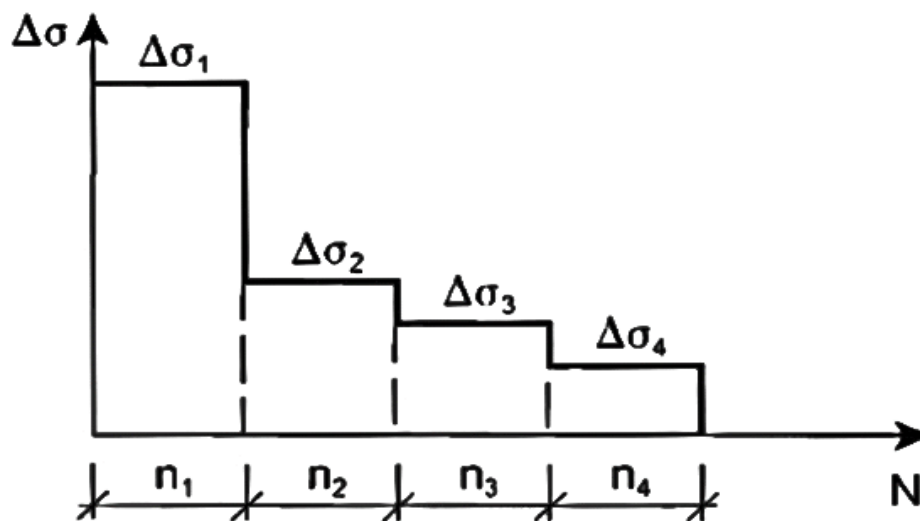
Για να μην υπάρχει αστοχία, πρέπει η συνολική ζημία D_d που προκαλείται στο στοιχείο, να είναι μικρότερη της μονάδας. Αν στην αντίθετη περίπτωση ο παράγοντας D_d είναι μεγαλύτερος ή και ίσος της μονάδας τότε έχουμε οδηγηθεί σε αστοχία. Επίσης ορισμένα μοντέλα φόρτισης, όπως το LM4 για τις οδικές γέφυρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση σε συνδυασμό με τον κανόνα Miner.

Όμως, στην πραγματικότητα δεν είναι ποτέ γνωστά εξ' αρχής τα επαναλαμβανόμενα φορτία που ασκούνται και κατ' επέκταση το ιστορικό φόρτισης της κατασκευής. Αν το ιστορικό φόρτισης είναι γνωστό τότε χρησιμοποιούμε κάποια μέθοδο μέτρησης κύκλων (cycling count method).

Οι μέθοδοι αυτές αναλύουν το ιστορικό των μεταβαλλόμενων φορτίων που ασκούνται, δίνοντας τα διάφορα εύρη τάσεων και τους κύκλους που αντιστοιχούν. Στη συνέχεια με τα δεδομένα αυτά δημιουργείται το ιστόγραμμα των τάσεων.



Σχήμα 2.6 Τυχαίο ιστορικό φόρτισης μιας κατασκευής.



Σχήμα 2.7 Τυχαίο ιστόγραμμα ευρών τάσεων.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι μέτρησης κύκλων αλλά οι πιο κοινές που χρησιμοποιούνται σε κώδικες και πρότυπα είναι οι:

- α)reservoir method
- β)rain flow method

Αυτές τις δύο μεθόδους προτείνει και ο ευρωκώδικας στο παράρτημα Α.

Η μέθοδος reservoir είναι μία πιο απλή μέθοδος σε σχέση με την rain flow και πιο πρακτική για υπολογισμούς στο χέρι.Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι φορτίσεις είναι πιο απλές και γίνονται σε μικρό χρονικό ορίζοντα.

Αντίθετα, η μέθοδος rain flow χρησιμοποιείται κυρίως όταν έχουμε σύνθετα ιστορικά φορτίσεων και το χρονικό διάστημα είναι αρκετά μεγάλο, ενώ είναι αρκετά εύκολος ο προγραμματισμός της σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.Να επισημανθεί ότι οι δύο αυτές μέθοδοι δεν δίνουν τα ίδια αποτελέσματα.

Γνωρίζοντας τα εύρη των τάσεων μπορούμε να αξιοποιήσουμε το διάγραμμα S-N έτσι ώστε να βρούμε την διάρκεια ζωής N_r για το κάθε εύρος τάσεων που ασκείται στο αντίστοιχο στοιχείο και να υπολογίσουμε την συνολική ζημιά D_d .Προσοχή πρέπει να δωθεί για τις τάσεις οι οποίες είναι μικρότερες από το όριο αποκοπής $\Delta\sigma_L$.

Για την αξιολόγηση της βλάβης από κόπωση είτε η χρήση του κανόνα Palmgren-Miner είτε το ισοδύναμο εύρος τάσης, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο.

Συνοψίζοντας, ο κανόνας Palmgren-Miner αποτελεί μια μέθοδο για την εκτίμηση της εναπομείναντας διάρκειας ζωής σε κόπωση όταν είναι γνωστό το εύρος των μεταβαλλόμενων φορτίων. Όταν $D_d=1$ θεωρείται ότι υπάρχει αστοχία του υπό εξέταση τμήματος. Όμως, καινούργιες πειραματικές μελέτες έχουν υποδείξει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως συγκολλητά στοιχεία τα οποία έχουν υποστεί κάποια κατεργασία μετά το πέρας της συγκόλλησης (post weld treatment), η αστοχία πραγματοποιήθηκε ακόμα και όταν το D_d ήταν μικρότερο της μονάδας (Borges, Davaine & Nussbaumer, 2011).

Στις πιο πρόσφατες εκδόσεις του προτύπου για την αξιολόγηση της κόπωσης από το διεθνές ινστιτούτο για τις συγκολλήσεις (IIW recommendations), προτείνεται σαν μια πιο συντηρητική προσέγγιση ο παράγοντας D_d να είναι μικρότερος ή και ίσος με 0.5 ($D_d \leq 0.5$). Στο παρόν, οι συνάκτες του προτύπου υιοθετούν την πιο διαδεδομένη προσέγγιση που υπάρχει ($D_d \leq 1$).

2.8 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

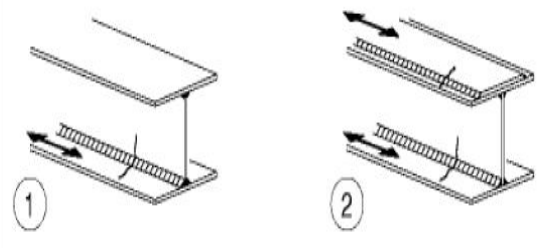
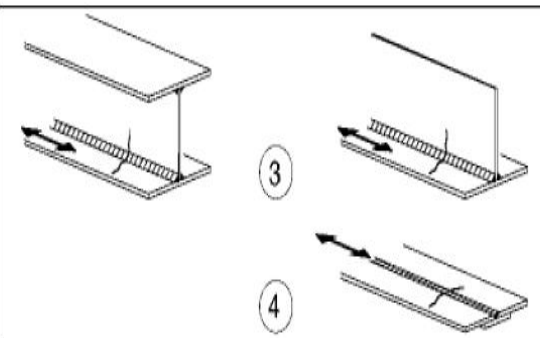
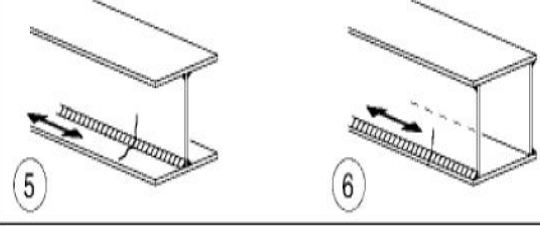
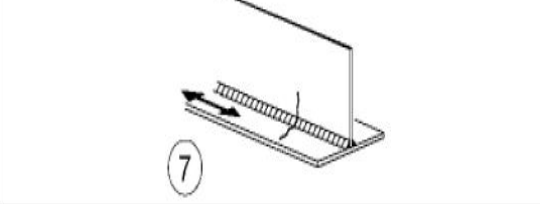
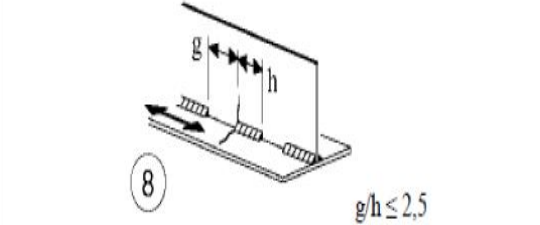
Στον ευρωκώδικα τα κατασκευαστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην μελέτη για την κόπωση ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες. Σε κάθε κατηγορία είναι δυνατόν να περιλαμβάνονται περισσότερα από ένα στοιχεία.

Επιπλέον, κάθε κατηγορία χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό ο οποίος αναπαριστά το σχεδιαστική αντοχή σε κόπωση $\Delta\sigma_c$ στους 2 εκατομμύρια κύκλους (με μονάδα μέτρησης το N/mm^2) και αντιστοιχεί σε μία καμπύλη στο διάγραμμα S-N.

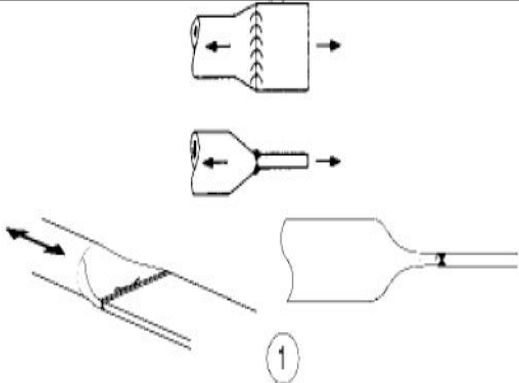
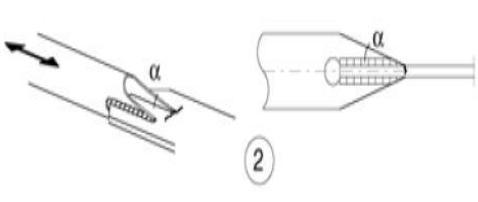
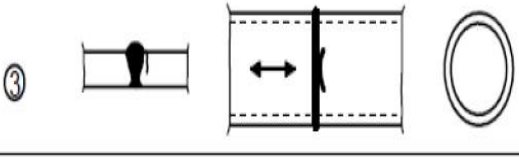
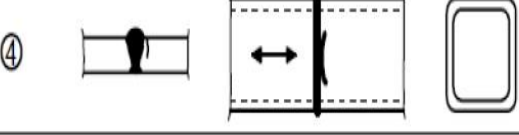
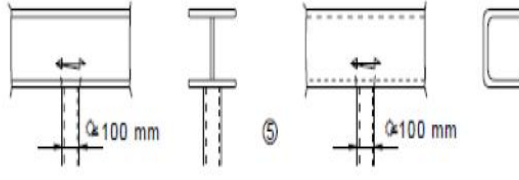
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8, η πρώτη στήλη περιλαμβάνει το όριο αντοχής $\Delta\sigma_c$, ενώ η δεύτερη απεικονίζει τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στην αντίστοιχη κατηγορία.

Επίσης, στο κάθε στοιχείο βρίσκεται και η πιθανή θέση εμφάνισης της ρωγμής. Το διπλό βελάκι δείχνει την κατεύθυνση που ασκούνται οι μεταβαλλόμενες τάσεις και χρησιμοποιείται βοηθητικά για τον υπολογισμό των ευρών των τάσεων.

Κάθε κατηγορία εμπεριέχει και ορισμένα σχόλια που αφορούν την διαδικασία ή τον τρόπο της συγκόλλησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, σε ποια στοιχεία πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πάχους, αν απαιτείται κάποια επιθεώρηση κ.α.

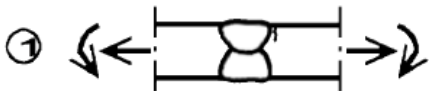
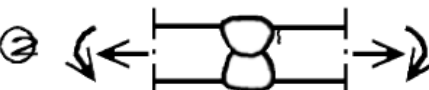
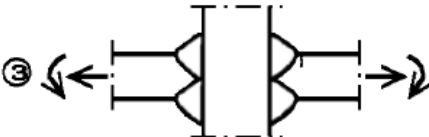
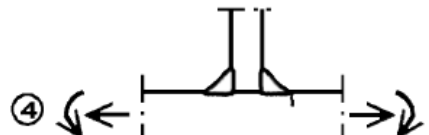
Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
125		<u>Continuous longitudinal welds:</u> 1) Automatic butt welds carried out from both sides. 2) Automatic fillet welds. Cover plate ends to be checked using detail 6) or 7) in Table 8.5.	<u>Details 1) and 2):</u> No stop/start position is permitted except when the repair is performed by a specialist and inspection is carried out to verify the proper execution of the repair.
112		3) Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions. 4) Automatic butt welds made from one side only, with a continuous backing bar, but without stop/start positions.	4) When this detail contains stop/start positions category 100 to be used.
100		5) Manual fillet or butt weld. 6) Manual or automatic butt welds carried out from one side only, particularly for box girders	5), 6) A very good fit between the flange and web plates is essential. The web edge to be prepared such that the root face is adequate for the achievement of regular root penetration without break-out.
100		7) Repaired automatic or manual fillet or butt welds for categories 1) to 6).	7) Improvement by grinding performed by specialist to remove all visible signs and adequate verification can restore the original category.
80		8) Intermittent longitudinal fillet welds.	8) $\Delta\sigma$ based on direct stress in flange.

Σχήμα 2.8 Κατηγορίες συγκολλητών στοιχείων του EN1993.1.9.

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
71		1) Tube-plate joint, tubes flattened, butt weld (X-groove)	1) $\Delta\sigma$ computed in tube. Only valid for tube diameter less than 200 mm.
71		2) Tube-plate joint, tube slitted and welded to plate. Holes at end of slit.	2) $\Delta\sigma$ computed in tube. Shear cracking in the weld should be verified using Table 8.5, detail 8).
63			
71		<u>Transverse butt welds:</u> 3) Butt-welded end-to-end connections between circular structural hollow sections.	<u>Details 3) and 4):</u> - Weld convexity $\leq 10\%$ of weld width, with smooth transitions. - Welded in flat position, inspected and found free from defects outside the tolerances EN 1090.
56		4) Butt-welded end-to-end connections between rectangular structural hollow sections.	- Classify 2 detail categories higher if $t > 8$ mm.
71		<u>Welded attachments:</u> 5) Circular or rectangular structural hollow section, fillet-welded to another section.	5) - Non load-carrying welds. - Width parallel to stress direction $l \leq 100$ mm. - Other cases see Table 8.4.

Σχήμα 2.9 Κατηγορίες στοιχείων κοίλων διατομών του EN1993.1.9.

Στην περίπτωση που απαιτείται η χρήση των γεωμετρικών τάσεων, οι αντίστοιχες κατηγορίες στοιχείων βρίσκονται στον πίνακα Β.1 του παραρτήματος Β.

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
112		1) Full penetration butt joint.	1) - All welds ground flush to plate surface parallel to direction of the arrow. - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides, checked by NDT. For misalignment see NOTE 1.
100		2) Full penetration butt joint.	2) - Weld not ground flush - Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed, plate edges to be ground flush in direction of stress. - Welded from both sides. For misalignment see NOTE 1.
100		3) Cruciform joint with full penetration K-butt welds.	3) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - For misalignment see NOTE 1.
100		4) Non-load carrying fillet welds.	4) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$. - See also NOTE 2.

Σχήμα 3 Κατηγορίες στοιχείων για την χρήση γεωμετρικών τάσεων.

3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ EN1993.1.9

Για να συνεχίσει ο ευρωκώδικας να είναι επίκαιρος και να αποτελεί ένα αξιόπιστο σχεδιαστικό πρότυπο, είναι αναγκαία η αναθεώρηση του έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει τις νέες εξελίξεις στα υλικά, στις κατασκευαστικές μεθόδους κ.ά.

Ένα σημαντικό βήμα αποτελεί η πιο κατανοητή και εύκολη διατύπωση των σχεδιαστικών κανόνων. Παραδείγματος χάριν, στους πίνακες των ταξινομημένων στοιχείων οι απαιτήσεις κατασκευής σε ορισμένα σημεία είναι κάπως ασαφής και υπάρχει περίπτωση παρερμηνείας. Οι πληροφορίες που αφορούν συγκολλητές συνδεσμολογίες είναι σημαντικές επειδή έχουν επιρροή στην συμπεριφορά κατά την κόπωση.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, δεν υπάρχει σαφή σύνδεση του τρόπου επιλογής των τιμών του συντελεστή γ_{Mf} σε σχέση με τις κλάσεις επιπτώσεων (consequence classes) όπως προσδιορίζεται στον EN 1990. Μια πρόταση για την λύση του προβλήματος αυτού, αποτελεί ο πίνακας με τις προτεινόμενες τιμές του γ_{Mf} που περιέχεται στο εθνικό παράρτημα της Δανίας (Lukic, 2019). Είναι επιτακτική ανάγκη η εναρμόνηση του EN1993.1.9 με τους υπόλοιπους ευρωκώδικες, έτσι ώστε να υπάρχει ένα ομοιόμορφο και αποδεκτό επίπεδο ασφαλείας.

Design method	Consequence of failure	
	Low	High
Safe life	1.15	1.35
Damage tolerant	1.00	1.15

Σχήμα 3.1 Τιμές του συντελεστή γ_{Mf} στον EN 1993.1.9.

Design method	Consequence of failure		
	CC1	CC2	CC3
Safe life	1.26	1.54	1.88
Damage tolerant	1.00	1.00	1.00

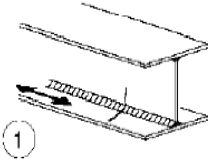
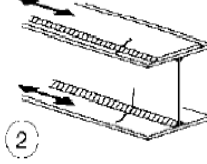
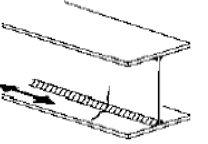
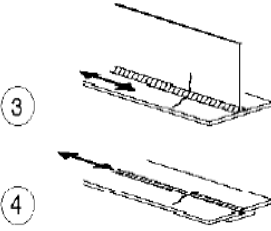
Σχήμα 3.2 Οι αντίστοιχες τιμές στο εθνικό παράρτημα της Δανίας.

Στον σύγχρονο σχεδιασμό παρατηρείται όλο και πιο συχνά η χρήση της ανάλυσης με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Στο πρότυπο δεν γίνεται κάποια νύξη άμα είναι πιθανή η χρήση τέτοιων μεθόδων. Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό των γεωμετρικών τάσεων. Όμως, ο πίνακας των στοιχείων που υπάρχουν στο παράρτημα Β δεν δίνει κάποια σαφή πληροφόρηση. Μία πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για τα πεπερασμένα στοιχεία, η οποία θα συμφωνεί με του γενικούς κανόνες του κώδικα, θα αποτελέσει ένα σημαντικό σχεδιαστικό εργαλείο για την αξιολόγηση της κόπωσης.

Επιπλέον, αναγκαία αποτελεί η αξιολόγηση και αναθεώρηση των κατηγοριών των κατασκευαστικών πινάκων 8.1 έως 8.10 του EN1993.1.9. Τα στοιχεία αυτά χρειάζονται ορισμένες συμπληρωματικές πληροφορίες έτσι ώστε να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος ταξινόμησης και πιο εύκολος ο τρόπος υπολογισμού των ευρών τάσεων που ασκούνται (Lukić, 2019). Επίσης, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν και καινούργια κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία υπάρχουν στις σύγχρονες κατασκευές όπως π.χ. νέες κοχλιωτές συνδέσεις (Kuhlmann, Bone, Breunig, & Drebenstedt, 2018). Για τον σκοπό αυτόν έχουν προταθεί διάφορες προτάσεις για την βελτίωση των πινάκων. Στο σχήμα 3.3 παρατίθεται μια τέτοια πρόταση.

Detail category	Constructional detail	Symbol	Description	Requirements
125			① Automatic or fully mechanized butt welds, welded from both sides, without stop-starts	
112			as aforementioned, but with stop-starts	
125			② Automatic or fully mechanized fillet welds, without stop-starts	For cover plates two parallel single fillet welds are necessary.
112			as aforementioned, but with stop-starts	NOTE Cover plate ends should be checked using detail ⑥ or ⑦ in Table 8.5

Σχήμα 3.3 Πρόταση της νέας μορφής των κατασκευαστικών στοιχείων 14 (Lukić, 2019).

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
125	 	<p>Continuous longitudinal welds:</p> <p>1) Automatic or fully mechanized butt welds carried out from both sides.</p> <p>2) Automatic or fully mechanized fillet welds. Cover plate ends to be checked using detail 6) or 7) in Erreur ! Source du renvoi introuvable..</p> <p>3) Automatic or fully mechanized fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions.</p>	<p>Details 1) and 2):</p> <p>No stop/start position is permitted except when the repair is performed by a specialist and inspection is carried out to verify the proper execution of the repair.</p>
112	 	<p>4) Automatic or fully mechanized butt welds made from one side only, with a continuous backing bar, but without stop/start positions.</p>	<p>4) When this detail contains stop/start positions category 100 to be used.</p>

Σχήμα 3.4 Υπάρχοντα στοιχεία του EN1993.1.9.

Όπως φαίνεται από την σύγκριση, ο νέος πίνακας προσφέρει μία πιο κατανοητή και φιλική προσέγγιση για τα στοιχεία, παρέχοντας πιο σαφείς πληροφορίες για το είδος και την κατασκευαστική μεθοδολογία των συγκολλήσεων καθώς και για τις ασκούμενες τάσεις.

Τέλος, κρίνεται σημαντικό στο μέλλον να ενσωματωθούν και ορισμένες υποδείξεις για την επιλογή κατεργασιών μετά το τέλος της συγκόλλησης (post weld treatment). Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής τέτοιων κατάλληλων κατεργασιών οδηγούν στην βελτίωση της αντοχής σε κόπωση των στοιχείων. Αυτό αποτελεί σημαντική επιλογή για τον σχεδιαστή, όταν στην περίπτωση μίας κατασκευής η οποία βρίσκεται ήδη στα αρχικά στάδια της λειτουργίας, απαιτηθεί ύστερα από τον κατάλληλο έλεγχο, επέκταση της διάρκειας ζωής.

4. CASE STUDY ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ EN1993.1.9 ΣΕ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι καπνοδόχοι αποτελούν σημαντικές κατασκευές στην βιομηχανία, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να διοχετεύσουν τους ρύπους στην ατμόσφαιρα. Λόγω της απαίτησης για πιο αυστηρό έλεγχο των επιπέδων της αέριας ρύπανσης, οι ανυψώσεις των καπνοδόχων έχουν προοδευτικά ξεπεράσει τα 100m ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν και τα 400m.

Εξαιτίας των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, το ύψος h είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την διάμετρο b , οι ψηλές αυτές κατασκευές είναι ιδιαίτερες ευαίσθητες στην επίδραση των ανέμων.



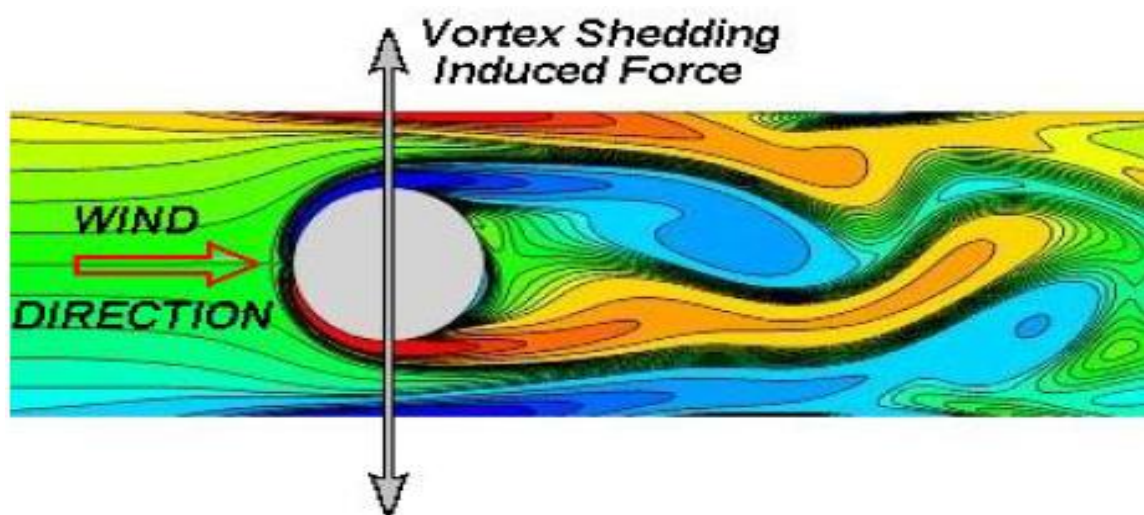
Εικόνα 2.5 Μεταλλική καπνοδόχος σε βιομηχανία.

4.1.2 ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Τα φορτία των ανέμων που επιδρούν, έχουν ως συνέπεια την δημιουργία έντονων φαινομένων ταλάντωσης. Η μελέτη των ταλαντώσεων πραγματοποιείται με την ανάλυση τους σε δύο συνιστώσες.

Την πρώτη συνιστώσα αποτελούν οι αυτοδιεγειρόμενες ταλαντώσεις παράλληλα με την κατεύθυνση του ανέμου, οι οποίες προκαλούνται λόγω έντονων ριπών αέρα. Η ένταση των ταλαντώσεων αυτών εξαρτάται τόσο από την τυρβότητα και την ταχύτητα του ανέμου, όσο και από την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

Η δεύτερη συνιστώσα περιλαμβάνει τις ταλαντώσεις κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου, οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας των περιδινήσεων του αέρα. Το φαινόμενο συμβαίνει όταν δίνες αέρα σχηματίζονται εναλλάξ στις απέναντι πλευρές της κατασκευής. Στην υπήνεμη πλευρά δημιουργούνται περιοχές με χαμηλή πίεση οι οποίες αναγκάζουν την κατασκευή να μετακινηθεί προς αυτές τις περιοχές προκαλώντας ταλάντωση (Sockel, 1994).



Εικόνα 2.6 Δημιουργία περιδινήσεων κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου σε κύλινδρο. Οι περιοχές που υπάρχουν χαμηλές πιέσεις διακρίνονται με μπλε χρώμα (Eng., Giosan, 2005)

Όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει σε μια κρίση τιμή μεταξύ 5 με 15 m/s, η οποία εξαρτάται από την κατασκευή, ξεκινά η δημιουργία των περιδινήσεων. Στην περίπτωση κυλινδρικών κατασκευών, για αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από 3×10^5 έως 3×10^6 , εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού (Tanner, Mackenzie, Moyle, 2017).

4.1.3 ΚΟΠΩΣΗ

Κατά τον συντονισμό παρατηρούνται μεγάλα πλάτη ταλάντωσης, ενώ οι μετατοπίσεις των δομικών στοιχείων είναι οι μέγιστες. Σε περιπτώσεις όπου τα φαινόμενα συντονισμού επαναλαμβάνονται συχνά (περιοδικότητα του φαινομένου), έχει παρατηρηθεί η δημιουργία ρωγμών λόγω κόπωσης, οι οποίες έχουν οδηγήσει και σε αστοχία (Ρορονιό, Rakočenić, 2018).



Εικόνα 2.7 Αστοχία κεραίας τηλεπικοινωνιών λόγω κόπωσης (Eng., Giosan, 2005).

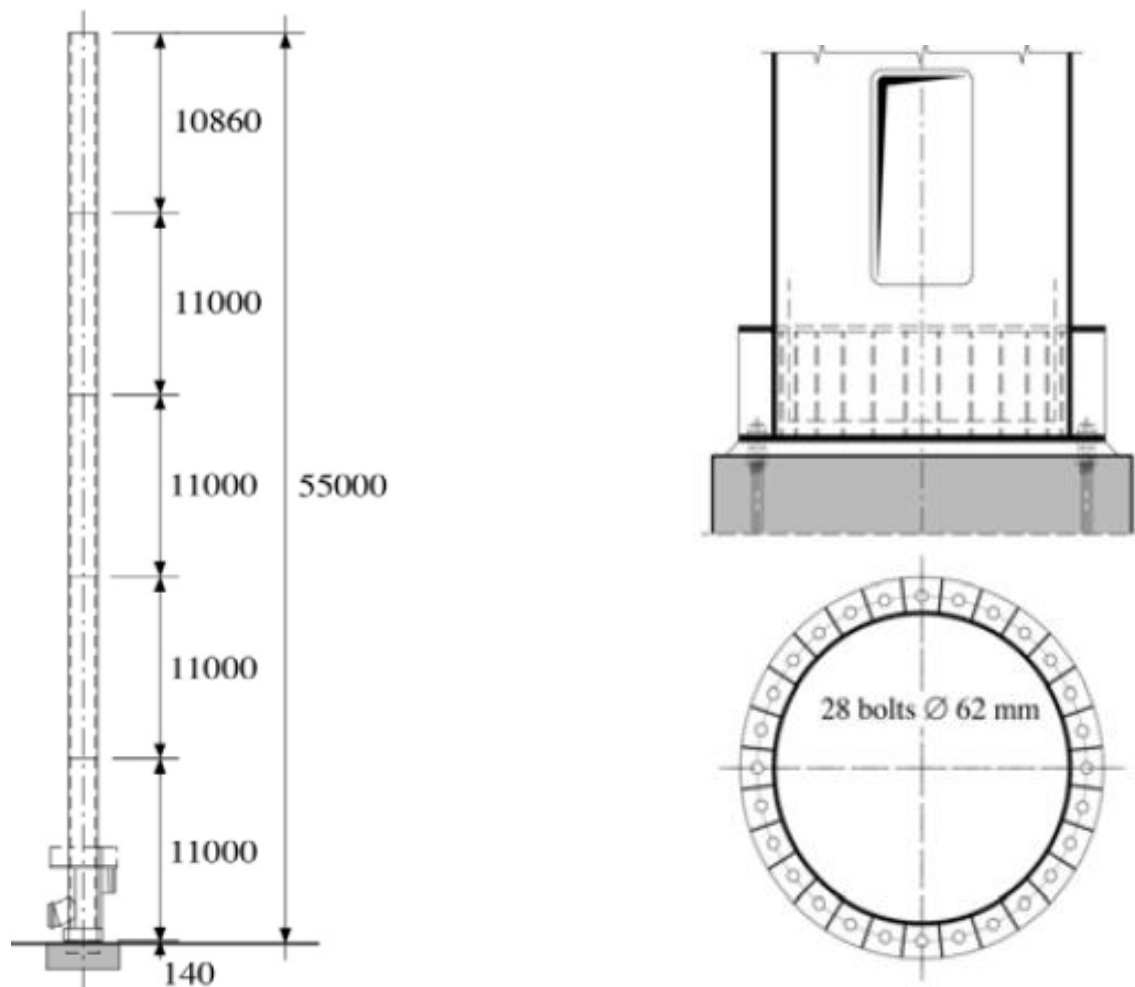
Για «λυγερές» κατασκευές, όπως οι καπνοδόχοι, έχει ξεκινήσει να γίνεται επιτακτική η αξιολόγηση της κόπωσης εξαιτίας των επιδράσεων των ανέμων. Σύμφωνα με τον EN1993.3.2 (σχεδιασμός μεταλλικών καπνοδόχων), κυρίαρχο ρόλο στην ανάλυση έχουν οι επιδράσεις των περιδινήσεων, ενώ τα φαινόμενα των αυτοδιεγειρούμενων ταλαντώσεων σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να παραληφθούν.

Ο υπολογισμός του φάσματος του εύρους των τάσεων πραγματοποιείται με την βοήθεια του παραρτήματος E του EN1991.1.4 (δράσεις ανέμων). Για ελαφριές μεταλλικές κατασκευές, οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται έχουν περίπου το ίδιο πλάτος, οπότε το εύρος των φορτίων που ασκούνται μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερό.

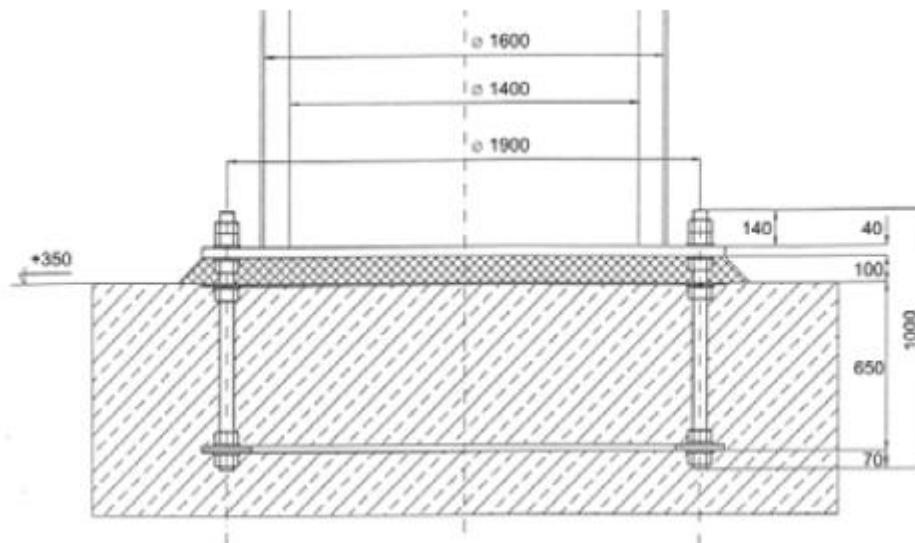
Στην αξιολόγηση της κόπωσης για μία τυπική μεταλλική καπνοδόχο πρέπει να εξεταστούν τα κατασκευαστικά στοιχεία που είναι πιο επιρρεπή για την δημιουργία ρωγμών. Τέτοια στοιχεία αποτελούν οι κοχλιωτές συνδέσεις των πελμάτων μεταξύ δύο τμημάτων, τα συγκολλητά δοκίδια υποστηρίξεως και οι κοχλίες αγκυροβόλησης και οι ανθρωποθυρίδες. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, η μελέτη θα περιοριστεί στους κοχλίες που συνδέουν τα πέλαμα των τμημάτων και στους κοχλίες αγκυροβόλησης.

4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

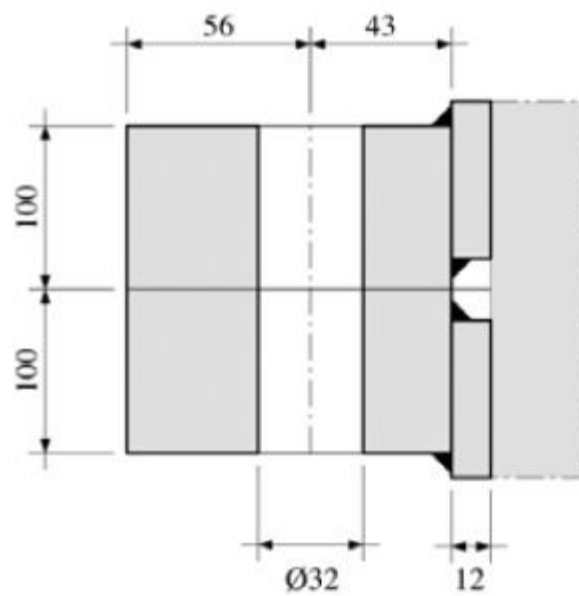
Το παράδειγμα της συγκεκριμένης καπνοδόχου έχει δημοσιευθεί αρχικά στο Stahlbaukalender (2006). Η καπνοδόχος βρίσκεται σε μια επίπεδη οικιστική περιοχή στα περίχωρα ενός αστικού κέντρου. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα S235 και έχει ύψος 55 μέτρων με εξωτερική σταθερή διάμετρο 1.63 μέτρα (σχήμα 3.5). Ο κύριος κορμός αποτελείται από πέντε ξεχωριστά τμήματα τα οποία ενώνονται με κοχλιοσυνδέσεις στα μεταξύ τους πέλματα (σχήμα 3.9). Στη βάση υπάρχει δακτύλιος ενίσχυσης, ενώ η καπνοδόχος στηρίζεται στο έδαφος με την χρήση 28 κοχλίων αγκυροβόλησης. Επιπλέον, στο κάτω μέρος βρίσκεται ανθρωποθυρίδα, η οποία χρησιμοποιείται για επιθεωρήσεις (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.5 Σχεδιάγραμμα της καπνοδόχου *Σχήμα 3.6* Διάγραμμα του κάτω μέρους της καπνοδόχου



Σχήμα 3.7 Η επιδαπέδια πλάκα βάσης μαζί με τους κοχλίες αγκυροβόλησης.



Σχήμα 3.8 Η συνδεσμολογία των πελμάτων μεταξύ δύο τμημάτων στα 11.49m.

➤ Καπνοδόχος

Ύψος: $h=55$ m

Εξωτερική διάμετρος: $b=1.63$ m

Λόγος λεπτότητας: $\lambda=h/b=33.7$

Πάχος τοιχώματος: $s=12$ mm

Συνολική μάζα ανά μήκος κατασκευής: $m_e=340$ kg/m

Λογαριθμική μείωση: $\delta=0.03$

Λογαριθμική μείωση εξαιτίας της απόσβεσης της κατασκευής: $\delta_s=0.012$

➤ Κοχλίες αγκυροβόλησης

Κοχλίες M60 8.8

Διάμετρος: $D_{M60}=60$ mm

Διατομή: $A_{s,60}=2362$ mm²

Συνολικός αριθμός κοχλίων: $n=28$

Απόσταση κοχλία από το τοίχωμα: $a=135$ mm

Απόσταση μεταξύ κοχλίων: $e=213.2$ mm

BCD: $d=2r_s=2 \times 950=1900$ mm

- Συνδεσμολογία μεταξύ των τμημάτων στα 11.49 m

Κοχλίες M30 10.9:

Διάμετρος: $D_{M30}=30$ mm

Διατομή: $A_{M30}=561$ mm²

Φορτίο προέντασης: $F_p=350$ kN

Συνολικός αριθμός κοχλίων: $n=42$

Απόσταση κοχλία από το τοίχωμα: $\alpha=43$ mm

Απόσταση μεταξύ των κοχλίων: $e=128.4$ mm

Διαστάσεις ροδέλας:

$d_a=56$ mm

$d_i=31$ mm

$t_w=5$ mm

Διαστάσεις πέλματος:

$t_f=50$ mm

$w=99$ mm

$b'=w-\alpha=56$ mm

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

4.3.1 ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ

Αρχικά θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των δυναμικών παραμέτρων για την καπνοδόχο σύμφωνα με τον EN1991.1.4.

Η καπνοδόχος βρίσκεται σε επίπεδη οικιστική περιοχή με τυπική κάλυψη από τα γύρω κτήρια. Σύμφωνα με τα παράρτημα Α του EN1991.1.4, η περιοχή κατατάσσεται ως κατηγορία III.

Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$ λαμβάνει υπόψιν τις μεταβολές στην μέση ταχύτητα εξαιτίας της ανύψωσης από το έδαφος και των χαρακτηριστικών της προσήμενης πλευράς της κατασκευής.

$$c_r(z) = \begin{cases} \{ k_r \ln(z/z_0) \}, & z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ \{ c_r(z_{\min}) \}, & z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

Όπου:

z_0 το μήκος τραχύτητας

k_r συντελεστής εδάφους

$$k_r = 0.19 (z_0/z_{0,II})^{0.07} \quad (4.1)$$

Από τον πίνακα 4.1 του EN1991.1.4:

$z_0 = 0.3\text{m}$

$z_{\min} = 5\text{m}$

$z_{0,II} = 0.05\text{m}$

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

Σχήμα 3.9 Τιμές για z_0 και z_{min} σύμφωνα με τον EN1991.1.4.

Κάνοντας αντικατάσταση στη έκφραση 4.1 προκύπτει ότι $kr=0.216$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η θεμελιώδης συχνότητα πρώτης μορφής. Η συχνότητα αυτή αποτελεί την μικρότερη αριθμητικά ιδοσυχνότητα της καπνοδόχου.

$$n_1 = \varepsilon_1 \cdot b / h_{eff}^2 (W_s / W_t)^{0.5} \quad (4.2)$$

Όπου:

h_{eff} : το ενεργό ύψος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισούται με το συνολικός ύψος της καπνοδόχου $h_{eff}=h=55m$

W_s/W_t : ο λόγος του βάρους των κατασκευαστικών στοιχείων που συνεισφέρουν στην δυσκαμψία της καπνοδόχου ως προς το συνολικό βάρος $W_s/W_t=0.84$

ε_1 : σταθερά που ισούται με 1000 για καπνοδόχους από χάλυβα

Εκτελώντας τις πράξεις:

$$n_1 = (10^3 \cdot 1.63) / 55^2 \cdot (0.84)^{0.5} = 0.494 \text{ Hz}$$

Κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου για την θεμελιώδης συχνότητα n_1 :

$$v_{cr,1} = b \cdot n_1 / St \quad (4.3)$$

Όπου St ο αριθμός Strouhal. Για κυλινδρικές διατομές $St=0.18$

- ❖ Ο αριθμός Strouhal παραμένει σταθερός για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου και εκφράζει την σχέση μεταξύ της κρίσιμης ταχύτητας v_{cr} και της ιδιοσυχνότητας κατά την αντίστοιχη ταλάντωση.

$$v_{cr,1} = 1.63(0.494/0.18) = 4.47 \text{ m/s}$$

Αριθμος Scruton:

$$Sc = 2 \cdot \delta s \cdot m_e / (\rho \cdot b^2) \quad (4.4)$$

$$Sc = 2 \cdot 0.012 \cdot 340 / (1.25 \cdot 1.63^2) = 2.46$$

- ❖ Ο αριθμός Scruton εκφράζει την επιδεκτικότητα σε ταλάντωση σε σχέση με την απόσβεση και με τον λόγο της μάζας της κατασκευής ως προς την μάζα του αέρα.

Αριθμός Reynolds:

$$Re = b \cdot v_{crit,1} / \nu \quad (4.5)$$

$$Re = 1.63 \cdot 4.47 / 15 \cdot 10^{-6} = 4.86 \cdot 10^5$$

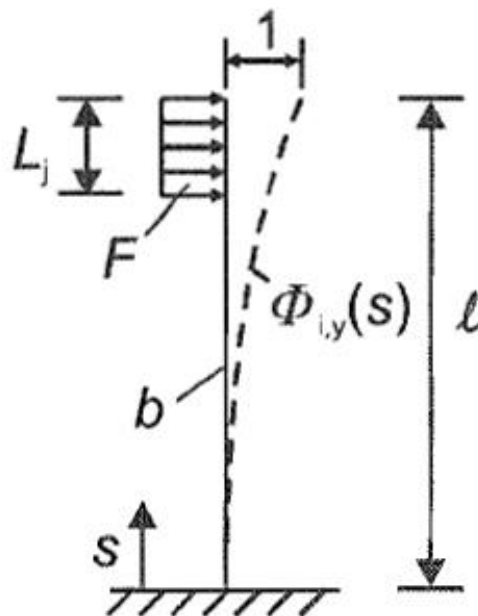
4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ RUSCHEWEYH

Η μέθοδος του Ruscheweyh αποτελεί μία επαναληπτική μέθοδο με την οποία υπολογίζεται το πλάτος της ταλάντωσης $Y_{f, \max}$ και το ενεργό μήκος συσχετισμού L κατά το οποίο δρουν τα φορτία. Το μήκος συσχετισμού αποτελεί μια στοχαστική θεωρηση, σκοπός της οποίας είναι να ληφθούν υπόψιν οι αεροελαστικές επιδράσεις (Ρορονιός, Ρακοčενιός, 2018).

$$(Y_{f, \max}/b) < 0.1 \quad L_1/b=6 \quad (4.6)$$

$$0.1 \leq (Y_{f, \max}/b) < 0.6 \quad L_1/b=4.8+12(Y_{f, \max}/b) \quad (4.7)$$

$$(Y_{f, \max}/b) > 0.6 \quad L_1/b=12 \quad (4.8)$$



Εικόνα 2.9 Ταλάντωση της πρώτης ιδιομορφής για την περίπτωση της καπνοδόχου (EN1991.1.4).

Με βάση το παράρτημα Ε του EN1991.1.4:

Συντελεστής ιδιομορφής $K=0.13$

Συντελεστής $c_{lat,0}$ (εκφράζει την τυπική απόκλιση των φορτίων): $c_{lat,0}=0.2$

Για την πρώτη επανάληψη θεωρούμε ότι $(Y_{f, max}/b) < 0.1$ οπότε $L_1=6b=9.78$ m

Ο διορθωτικός συντελεστής K_w υπολογίζεται ως εξής:

$$K_w = 3 \frac{L_p/d}{\lambda} \left[1 - \frac{L_p/d}{\lambda} + \frac{1}{3} \left(\frac{L_p/d}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (4.9)$$

Κάνοντας την αντικατάσταση προκύπτει $K_w=0.444$

Ο συντελεστής c_{lat} δίνεται ως συνάρτηση του λόγου $v_{crit,1}/v_{m,L}$. Για να η υπολογιστεί η μέση ταχύτητα $v_{m,L}$ πρέπει πρώτα να βρεθεί ο παράγοντας τραχύτητας c_r .

Από την σχέση 4 : $c_r=0.216 \ln(50.11/0.3)=1.10553$

$v_{m,L}=c_r \cdot c_0 \cdot v_b = 1.10553 \cdot 1 \cdot 28 = 30.95$ m/s

Critical wind velocity ratio	C_{lat}
$\frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} \leq 0,83$	$C_{lat} = C_{lat,0}$
$0,83 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} < 1,25$	$C_{lat} = \left(3 - 2,4 \cdot \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} \right) \cdot C_{lat,0}$
$1,25 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}}$	$C_{lat} = 0$

Σχήμα 4 (EN1991.1.4) Ο συντελεστής C_{lat} ως συνάρτηση του λόγου της κρίσιμης ταχύτητας.

$v_{crit,1}/v_{m,L}=0.1444 < 0.83$ οπότε σύμφωνα με το σχήμα 4.1 $C_{lat}= C_{lat,0}=0.2$

Από την σχέση 4.7: $Y_{f,max}=237$ mm ή 0.237 m

$Y_{f,max}/b = 0.145 > 0.1$

Για την 2^η επανάληψη:

$L_1=10.67$ m $K_w=0.476$

$Y_{f,max}=253$ mm $Y_{f,max}/b = 0.155$

Για την 3^η επανάληψη:

$L_1=10.86$ m $K_w=0.483$

$Y_{f,max}=257$ mm $Y_{f,max}/b = 0.158$

Για την 4^η επανάληψη:

$$L_1 = 10.91 \text{ m} \quad K_w = 0.485$$

$$Y_{f,\max} = 258 \text{ mm} \quad Y_{f,\max}/b = 0.158$$

Στην 5^η επανάληψη για $L_1 = 10.92 \text{ m}$ προκύπτει ότι $Y_{f,\max} = 258 \text{ mm}$ άρα η επαναληπτική μέθοδος συγκλίνει.

4.3.3 ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

Το εύρος της μεταβαλλόμενης δύναμης του ανέμου ΔP :

$$\Delta P = 2(\rho/2 \cdot v_{\text{crit},1}^2 \cdot C_{\text{lat}} \cdot b \cdot L_1) \quad (5)$$

Κάνοντας την αριθμητική αντικατάσταση:

$$\Delta P = 1.25 \cdot (4.47)^2 \cdot 0.2 \cdot 1.63 \cdot 10.92 = 89 \text{ N}$$

Συντελεστής μεγέθυνσης λόγω συντονισμού: $V = \pi/\delta = 105$

Για να ληφθούν στην ανάλυση οι τυχόν επιδράσεις από τις δευτερεύουσες καμπτικές ροπές, σύμφωνα με τον EN1993.3.2 χρησιμοποιείται ο συντελεστής μεγέθυνσης τάσεων n . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο συντελεστής ισούται με $n = 1.02$, οπότε θα μπορούσε και να παραληφθεί.

Καμπτικό εύρος ροπών ΔM_1 που ασκείται στην συνδεσμολογία σε ύψος 11.49 m:

$$\Delta M_1 = n \cdot V \cdot \Delta P \cdot (h - L_1/2 - 11.49) = 1.02 \cdot 105 \cdot 89 \cdot (55 - 5.46 - 11.49) = 362.7 \text{ kNm}$$

Καμπτικό εύρος ροπών ΔM_2 που ασκείται στην βάση:

$$\Delta M_2 = n \cdot V \cdot \Delta P \cdot (h - L_1/2 - 0.35) = 1.02 \cdot 105 \cdot (55 - 5.46 - 0.35) = 468,9 \text{ kNm}$$

4.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ EN1993.1.9

4.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Προτού ξεκινήσει η αξιολόγηση της κόπωσης θα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι σχετικοί κύκλοι φόρτισης που προκαλούνται από τα φαινόμενα περιδίνησης σύμφωνα με την έκφραση (5.1). Οι κύκλοι φόρτισης αποτελούν συνάρτηση της συχνότητας εμφάνισης της κρίσιμης ταχύτητας ανέμου για την έναρξη περιδινήσεων, με την θεώρηση ότι ο σχεδιαστικός χρόνος λειτουργίας της κατασκευής είναι τα 50 χρόνια.

$$Nv = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_o \cdot (v_{crit}/v_o)^2 \cdot \exp[-(v_{crit}/v_o)^2] \quad (5.1)$$

T : διάρκεια ζωής που ισούται με $3.2 \cdot 10^7$ πολλαπλασιασμένο με το σχεδιαστικό χρόνο λειτουργίας

n_y : ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής

ε_o : συντελεστής εύρους ζώνης που κυμαίνεται από 0.1 έως 0.3 ($\varepsilon_o = 0.3$ για πιο συντηρητική προσέγγιση)

$$v_o: v_o = 0.2 \cdot v_m$$

Χρησιμοποιώντας την (5.1) προκύπτει $Nv = 14.75 \cdot 10^7$ κύκλοι

Επειδή οι κύκλοι φόρτισης είναι πολύ μεγάλοι, για να ικανοποιηθεί η ασφαλής λειτουργία, ο σχεδιασμός θα γίνει λαμβάνοντας ως αντοχή σε κόπωση το $\Delta \sigma_D$ του κάθε υπό εξέταση στοιχείου.

4.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

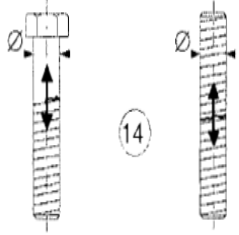
Το επόμενο βήμα αποτελεί η εξέταση των κατασκευαστικών στοιχείων που είναι πιο επιρρεπή σε κόπωση και η σωστή επιλογή τους από τους πίνακες του EN1993.1.9.

Όπως αναφέρθηκε, ο έλεγχος θα περιοριστεί για του κοχλίες που συνδέουν τα πέλματα των τμημάτων στο ύψος των 11.49 μέτρων και στους κοχλίες αγκυροβόλησης.

Οι κοχλίες σύμφωνα με τον πίνακα 8.1 ανήκουν στην κατηγορία 50.

$$\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_D = 0.74 \cdot \Delta\sigma_c = 0.74 \cdot 50 = 37 \text{ N/mm}^2$$

50	size effect for $t > 30\text{mm}$: $k_s = (30/t)^{0.25}$		<p>14) Bolts and rods with rolled or cut threads in tension. For large diameters (anchor bolts) the size effect has to be taken into account with k_s.</p>	<p>14) $\Delta\sigma$ to be calculated using the tensile stress area of the bolt. Bending and tension resulting from prying effects and bending stresses from other sources must be taken into account. For preloaded bolts, the reduction of the stress range may be taken into account.</p>
----	--	--	---	--

Σχήμα 4.1 (EN1991.3.9) Κοχλίες σε προένταση

Για τους κοχλίες αγκυροβόλησης επειδή η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 30 mm είναι αναγκαίο να ληφθεί η επίδραση του μεγέθους στην αντοχή της κόπωσης.

Από τις εκφράσεις 3.4 και 3.5 :

$$k_s = 0.841 \quad \text{και} \quad \Delta\sigma_{red} = 42.05 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{D,red} = 0.74 \cdot \Delta\sigma_{red} = 31.12 \text{ N/mm}^2$$

4.4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ γ_{Mf} , γ_{Ff}

Μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι τόσο οι κοχλίες των πελμάτων όσο και οι κοχλίες αγκυροβόλησης έχουν ανοχή στην βλάβη. Και οι δύο περιπτώσεις είναι εύκολα προσβάσιμες και μπορούν να επιθεωρηθούν συχνά.

Επειδή συνεχώς η κατεύθυνση του ανέμου αλλάζει, ο κοχλίας που δέχεται την μεγαλύτερη καταπόνηση είναι διαφορετικός κάθε φορά. Επιπρόσθετα, η αστοχία ενός κοχλία δεν συνεπάγεται με την μη ασφαλή λειτουργία και αστοχία της καπνοδόχου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επίπτωση της αστοχίας μπορεί να θεωρηθεί μικρή οπότε με βάση το σχήμα 1.2 ο συντελεστής γ_{Mf} ισούται με 1.

Το παράρτημα D του EN1991 προτείνει ο συντελεστής γ_{Ff} να ισούται με 1.

$$\gamma_{Mf} = 1$$

$$\gamma_{Ff} = 1$$

4.4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΕΩΝ

Το εύρος των τάσεων που ασκείται στο κέλυφος της καπνοδόχου στα 11.49 m:

$$\Delta\sigma_{shell} = \Delta M_1 / W_y = 468.9 / 24493 \cdot 10^3 = 14.81 \text{ N/mm}^2$$

Όμως το εύρος των δυνάμεων δεν επιδρά ξεχωριστά στους κοχλίες αλλά συνολικά στην συνδεσμολογία. Για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων τάσεων θα χρησιμοποιηθούν πληροφορίες και μαθηματικές εκφράσεις από την βιβλιογραφία (Borges, Davaine & Nussbaumer, 2011.)

Για τις δυνάμεις στον κοχλία που ασκούνται τα μεγαλύτερα φορτία:

$$\Delta N = e \cdot s \cdot \Delta\sigma_{shell} \cdot \left\{ \frac{(b-s)}{2} \right\} \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{(\alpha+s/2)}{b'} \right] \right\} / \{ b/2 + \alpha \} \quad (5.2)$$

όπου:

e: απόσταση μεταξύ των κοχλίων

s: πάχος του κελύφους της καπνοδόχου

b: διάμετρος της καπνοδόχου

a: η απόσταση μεταξύ κελύφους και κοχλίων

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει ότι $\Delta N = 40.44 \text{ kN}$

Για την δυσκαμψία του κοχλίου:

$$C_B = (E \cdot A_{\text{bolt}}) / L_{\text{bolt}} = (E \cdot \pi \cdot D^2 / 4) / (2 \cdot t_f + 2 \cdot t_w) = 1350 \text{ kN/mm}$$

Για την δυσκαμψία του πέλματος:

$$C_f = (E / 2 \cdot t_f) \cdot \pi / 4 \cdot \{(d_a + 0.2 \cdot t_f)^2 - d_i^2\} = 5600 \text{ kN/mm}$$

Για την δυσκαμψία της ροδέλας:

$$C_w = (E / t_w) \cdot \pi / 4 \cdot (d_a^2 - d_i^2) = 71746 \text{ kN/mm}$$

Για την δυσκαμψία της συνδεσμολογίας:

$$C_p = 1 / (1 / C_{p,f} + 2 / C_{p,w}) = 4843 \text{ kN/mm}$$

$$p = C_B / (C_B + C_p) = 0.218$$

Τελικά το εύρος δύναμης που ασκείται στον κοχλία είναι:

$$\Delta F = p \cdot \Delta N = 0.218 \cdot 40.44 = 8.82 \text{ kN}$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι περίπου το 22% (συντελεστής ρ) των συνολικών μεταβαλλόμενων φορτίων ασκείται στον κορμό του κοχλία.

Επομένως το εύρος της τάσης στον κοχλία είναι:

$$\Delta\sigma_E = \Delta F / A_s = 8.82 / 561 = 15.73 \text{ N/mm}^2$$

Το εύρος των δυνάμεων που ασκείται στους κοχλίες αγκυροβόλησης (Brandon, Cook, 2001):

$$\Delta F = \Delta M_2 \cdot c / I_{\text{boltgroup}} = \Delta M_2 \cdot r_s / (r_s^2 \cdot n / 2) = 2 \cdot \Delta M_2 / (n \cdot r_s) = 35.26 \text{ kN}$$

$$\text{Επομένως } \Delta\sigma_E = \Delta F / A_s = 35.26 / 2362 = 14.93 \text{ N/mm}^2$$

4.4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ

Το τελικό βήμα της ανάλυσης αποτελεί η αξιολόγηση των στοιχείων για κόπωση σύμφωνα με το κριτήριο του EN1991.3.9.

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} \quad (5.3)$$

Όπως αναφέρθηκε, λόγω των μεγάλων κύκλων φόρτισης του ανέμου ($N=1.475 \cdot 10^8$) ο έλεγχος για την κόπωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αντοχή στους 5 εκατομμύρια κύκλους (CALF) $\Delta\sigma_D$. Αυτό σημαίνει ότι τα εύρη τάσεων που ασκούνται πρέπει να παραμείνουν επαρκώς μικρά, έτσι ώστε τα κατασκευαστικά στοιχεία να έχουν θεωρητικά άπειρη διάρκεια ζωής.

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \quad (5.4)$$

Για τους κοχλίες της συνδεσμολογίας:

$$\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}=37/1=37 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E=1 \cdot 15.73=15.73 \leq 37 \text{ N/mm}^2$$

Για τους κοχλίες αγκυροβόλησης:

$$\Delta\sigma_{D,red}/\gamma_{Mf}=31.12/1=31.12 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_E=1 \cdot 14.92=14.92 \leq 31.12 \text{ N/mm}^2$$

Και στις δύο περιπτώσεις ικανοποιείται σχέση 5.4, άρα οι κοχλίες που εξετάστηκαν λειτουργούν ικανοποιητικά έναντι της κόπωσης, για τα αντίστοιχα μεταβαλλόμενα φορτία που δέχονται.

4.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Να επισημανθεί ότι αν και η καπνοδόχος αποτελείται από πέντε τμήματα που ενώνονται σε τέσσερα σημεία, ο έλεγχος επικεντρώθηκε στην συνδεσμολογία σε ανύψωση 11.49 m. Στο σημείο αυτό ασκούνται οι μεγαλύτερες καμπτικές ροπές, δηλαδή εκεί υπάρχει το πιο δυσμενές σενάριο φόρτισης όπου πρέπει να γίνει η αξιολόγηση της κόπωσης.

Σε μία ολοκληρωμένη μελέτη, η ανάλυση της κόπωσης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει και τα φορτία που δημιουργούνται λόγω ταλάντωσης της δεύτερης ιδιομορφής. Ο σκοπός του case study που παρουσιάστηκε είναι να αποτελέσει ένα απλό και κατανοητό παράδειγμα της εφαρμογής του EN1993.1.9. Για τον λόγο αυτό, δεν συμπεριλήφθηκε ο υπολογισμός και η αξιολόγηση των μεταβαλλόμενων δυνάμεων, οι οποίες προκαλούνται στην περίπτωση της ταλάντωσης δεύτερης ιδιομορφής, στο παρόν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Albuquerque, C, (2015). Advanced methodologies for the assessment of the fatigue behavior of railway bridges. Doctoral thesis, University of Porto
2. Alencar, G., Correia, J.A.F.O., (2016). A user-friendly tool for fatigue assessment of steel structures according to Eurocode 3. Proceedings of the 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure, Porto/Portugal
3. ASM Handbook, (1996). Fatigue and fracture, Volume 19, ASM international, Materials Park, OH, USA, ISBN 0-87170-385-8
4. Baddoo, N., (2017). Design manual for structural stainless steel (4th edition). UK, Silwood Park, Ascot, Berkshire: SCI
5. Bartsch, H., Drebenstedt, K., Seyfried, B., Feldmann, M., Kuhlmann, U., & Ummenhofer, T. (n.d.). Analysis of fatigue test data to reassess EN 1993-1-9 detail categories. doi: 10.1002/stco.202000019
6. Borges, L., Davaine, L., Nussbaumer, Al., (2011). Fatigue design of steel and composite structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-9 – Fatigue Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Mem Martins, Portugal: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork
7. Brandon, B., Cook, R., (2001). Design guidelines for annular base plates. Structures research report N. 716, Final project report. Gainesville, Florida: University of Florida
8. Eng., P., Giosan, I., (2005). Vortex Shedding Induced Loads on Free Standing Structures. Structural Vortex Shedding Response Estimation Methodology and Finite Element Simulation.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.582.3179&rep=rep1&type=pdf>
9. Zhao, X. L., Herion, S., Packer J. A., Puthli, R. S., Sedlacek, G., Wardenier, J., Weynand, K., Van Wingerde, A. M., Yeomans, N. F., (2001). Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading. Köln: TÜV-Verlag GmbHGrala

10. Kuhlmann, U., Bove, S., Breunig, S., Drebenstedt, K., (2018). Fatigue of steel bridges. 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures. Universitat Politècnica de València, València, Spain. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.7212>
11. Lukačević, I., Lukić, M., Androić, B., (2011). Fatigue reliability in future generation of Eurocodes. EUROSTEEL 2011, Budapest, Hungary
12. Lukić, L., (2019). Programme for maintenance and evolution of Eurocodes: Drafting of the future EN 1993-1-9 on fatigue of steel structures. Procedia Structural Integrity 19, Fatigue design 2019
13. Moore, D.B., Wald, F., (2003). Design of structural connections to Eurocode 3 frequently asked questions. Watford: Building Research Establishment Ltd
14. Nussbaumer A, (2006). European standard for fatigue design of steel structures and perspectives, First International Conference on Fatigue and fracture in the Infrastructure, Philadelphia, USA
15. Pipinato, A., (2015). Assessment and retrofitting of existing structures. Background document as preparation for CEN/TC250/WG2
16. Popović, S, Rakočević, M, (2018). Calculation procedure for determining wind action from vortex-induced vibration with verification of fatigue strength of steel structures. Građevinar, 70, 793-809. <https://doi.org/10.14256/JCE.2125.2017>
17. Sánduly, An., Tóth, A., Lőrincz, B.A., (2019). The missing holistic approach in design application of Eurocode 3. Műszaki Tudományos Közlemények vol. 11, 171–174. doi: 33894/mtk-2019.11.38
18. Sedlacek, G., Bijlaard, F., Gérardin, M., Pinto, A., Dimova, S., (2008). Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life. Prepared under the JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities
19. Śledziewski, Kr., (2017). Fatigue assessment of bridge structures according to Eurocodes. Journal of civil engineering, environment and architecture, z. 64 (4/17), 187-206. doi: 10.7862/rb.2017.205

20. Sockel, H, (1994).CISM Courses and Lectures - No. 335: Wind-excited vibrations of structures. Vienna: Technical University
21. Stahlbaukalender, (2006). Nussbaumer A, Gunther H-P. Ermüdung *Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode*, Stahlbaukalender, Ed. U. Kuhlmann, Springer Verlag, Germany.
22. Tanner, K., Mackenzie, N., Moyle, T., (2017). Cross-wind Response for Cylindrical Towers. Proceedings of Acoustics 2017, Perth
23. Vičan, J., Gocál, J., (2007). Fatigue assessment of existing bridge members. University of Žilina, Faculty of Civil Engineering, Department of Structures and Bridges. Slovak Republic
24. Κατσαμάς, Αντ., Χαϊδεμενόπουλος, Γρ., (2005). Μηχανική συμπεριφορά υλικών. Βόλος: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας
25. Παντελής, Δ., Παπάζογλου, Β., Χαϊδεμενόπουλος, Γρ., (2017). Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Λίστα των προτύπων του ευρωκώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη:

EN 1990 (2002): Eurocode - Basis of structural design

EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges

EN 1991-1-4 (2005): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions

EN 1993-1-9 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue

EN 1993-2 (2006): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 2: Steel bridges

EN 1993-3-2 (2006): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys

EN 1991-3 (2006): Eurocode 1: Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machinery

EN 1993-6 (2007): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures

EN 1993-1-8 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints