



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (ADERS)

"Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση
Μεταλλικών Καπνοδόχων

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΡ. ΑΝΔΡΕΟΥ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός και Μηχανικός Περιβάλλοντος

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Μεταλλικών Καπνοδόχων

Μεταπτυχιακή Εργασία
του Ανδρέου Παναγιώτη

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 17/10/2011

Γ. Ιωαννίδης, Καθηγητής,(Υπογραφή)

Β. Κουμούσης, Καθηγητής,(Υπογραφή)

Χ. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής,(Υπογραφή)

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία με τίτλο "Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Μεταλλικών Καπνοδόχων" πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures".

Στο σημείο αυτό, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την υποστήριξη του. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη προθυμία να με βοηθήσει με κάθε τρόπο, ήταν πρωταρχικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους Πέτρο Κωμοδρόμο, Γιάννη Μπαλάφα και Δήμο Χαρμπή, Καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου για την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν στο να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα αλλά και για συνεχή υποστήριξη σε οποιαδήποτε δυσκολία.

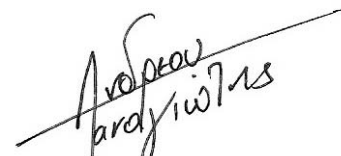
Με τη μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται η παρουσία μου στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα. Στο χρόνο αυτό απέκτησα αρκετούς φίλους και γνώρισα άξιους συναδέλφους. Ευχαριστώ όλους τους συμφοιτητές μου, για το ευχάριστο κλίμα στις αίθουσες, και όχι μόνο, του Δ.Π.Μ.Σ., την υποστήριξή τους και τη συνεργασία.

Θα ήταν παράλειψη μου, να μην ευχαριστήσω προσωπικά το φίλο και συνάδερφο Βαρνάβα Βαρνάβα αλλά και τον αδελφό μου Ανδρέα Ανδρέου για τη διαρκή βοήθεια και στήριξη που μου παρείχαν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, που με το δικό του τρόπο ο καθένας, με ενθάρρυναν και με στήριζαν καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω αυτούς που πάντα στέκονται δίπλα μου, τόσο στις καλές όσο και στις κακές στιγμές: τους γονείς μου Χριστόδουλο και Χρυσούλα.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011


Παναγιώτης Χρ. Ανδρέου

*"Ένα όνειρο για να το ζήσεις πρέπει να το κωνηγήσεις
ξανά και ξανά και ξανά..."*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Συμπεριφορά, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Μεταλλικών Καπνοδόχων

Μεταπτυχιακή Εργασία
του Ανδρέου Παναγιώτη

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η συμπεριφορά, η ανάλυση καθώς και η διαδικασία διαστασιολόγησης μεταλλικών καπνοδόχων με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων. Μέσω των καπνοδόχων μεταβιβάζονται καυσάερια σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, τα οποία προέρχονται κυρίως από λέβητες βιομηχανιών. Είναι συνήθως κυλινδρικού σχήματος και με ύψος που ξεπερνά τα 40 m. Γενικά, λόγω των διαστάσεων τους μπορούν να χαρακτηριστούν ως εύκαμπτες κατασκευές και επομένως είναι επιρρεπείς στη ροή του ανέμου. Λόγω της ροής του ανέμου οι καπνοδόχοι επηρεάζονται, συν τοις άλλοις, από στροβιλώδη διέγερση, οπότε η περιοδική διάχυση των δινών επιφέρει στη καπνοδόχο ταλαντώσεις εγκάρσια στη ροή του ανέμου.

Η όλη εργασία απαρτίζεται από δέκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή για τη χρήση, τα υλικά κατασκευής, τις μεθοδολογίες σχεδιασμού καπνοδόχων, αλλά και για τα σημαντικά γεγονότα που ήταν καθοριστικά για τη διάθρωση και σύνταξη των σημερινών κανονιστικών κειμένων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο ρόλος των καπνοδόχων για το περιβάλλον. Γίνεται αναφορά στο πως η γεωμετρία, οι συνθήκες λειτουργίας της καπνοδόχου αλλά και η κατάσταση της ατμόσφαιρας επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων που εξάγονται από την καπνοδόχο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής των θεμελιώσεων αυτοϊσορροπούμενων καπνοδόχων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της πίεσης αλλά και της συνολικής δύναμης λόγω της ροής του ανέμου στην καπνοδόχο. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το EN1991-1-4. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κριτήρια και η μεθοδολογία ελέγχου της καπνοδόχου έναντι στροβιλώδους

διέγερσης. Στην αρχή του κεφαλαίου παρατίθεται το γνωστικό υπόβαθρο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των καπνοδόχων υπό τη δράση του ανέμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία ανάλυση της καπνοδόχου υπό σεισμικά φορτία με βάση το EN1998-1.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται οι διατάξεις του EN1991-1-5 για τον υπολογισμό των θερμικών δράσεων.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις πρόνοιες του EN1993-1-6 σχετικά με την αντοχή και ευστάθεια των κελυφών. Περιγράφονται οι δυνατές μέθοδοι ανάλυσης και σχεδιασμού κελυφών. Επίσης παρουσιάζονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας, ήτοι Πλαστική Αστοχία (LS1), Πλαστικότητα σε Ανακύλιση (LS2), Λυγισμός (LS3) και Κόπωση (LS4). Επίσης, αναφέρεται και ο έλεγχος έναντι λειτουργικότητας.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις του EN1993-3.2 σχετικά με το σχεδιασμό των μεταλλικών καπνοδόχων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους μείωσης του μέγιστου εύρους ταλάντωσης εγκάρσια στη ροή του ανέμου, λόγω στροβιλώδους διέγερσης. Οι μέθοδοι αφορούν την χρήση αεροδυναμικών συσκευών ή αποσβεστήρων.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής. Το παράδειγμα αφορά την ανάλυση και διαστασιολόγηση της μεταλλικής καπνοδόχου που θα κατασκευαστεί στα πλαίσια επέκτασης του ηλεκτροπαραγωγού σταθμού στη Σύρο. Η καπνοδόχος είναι κυλινδρικού σχήματος με σταθερή εξωτερική διάμετρο 3.753 m και ύψος 60 m. Το πάχος του κελύφους της καπνοδόχου μεταβάλλεται καθ' ύψος. Υπολογίζονται αναλυτικά όλα τα φορτία που επιβάλλονται στην κατασκευή, τουτέστιν ίδια βάρη, φορτία ανέμου (πίεσεις ανέμου και δυνάμεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης), σεισμικές και θερμικές δράσεις. Γίνεται προσομοίωση της καπνοδόχου στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για τους σκοπούς της ανάλυσης αναπτύσσονται δύο στατικά προσομοιώματα: ένα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους και το άλλο με τη χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται έλεγχος για τις τέσσερις οριακές καταστάσεις αστοχίας (LS1, LS2, LS3 και LS4) όπως και έλεγχος για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας με βάση το EN1993-1-6. Για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας αναπτύσσονται όλες οι δυνατές μέθοδοι ελέγχου, ήτοι έλεγχος με βάση τη μεμβρανική θεωρία μέσω των αναλυτικών σχέσεων του Παραρτήματος Α και Β του EN1993-1-6 αλλά και μέσω αριθμητικών μη γραμμικών αναλύσεων. Σε κάθε έλεγχο οριακής κατάστασης αστοχίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από όλες τις μεθόδους ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, οι έλεγχοι πραγματοποιούνται και με τα δύο στατικά προσομοιώματα του αναπτύχθηκαν. Στα πλαίσια της οριακής κατάστασης αστοχίας LS4, μελετάται η μείωση του μέγιστου εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης μέσω αεροδυναμικών συσκευών αλλά και με τη χρήση αποσβεστήρα.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά, ανάλυση και διαστασιολόγηση μεταλλικών καπνοδόχων, όπως προέκυψαν από την παρούσα εργασία. Επίσης, παρατίθενται προτάσεις για θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο για μελλοντικές μελέτες.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
Laboratory of Steel Structures

Behaviour, Analysis and Design of Steel Chimneys

Master's Thesis
of Panayiotis Andreou

Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor N.T.U.A.

Abstract

In this master's thesis the behaviour, analysis and design of steel chimneys is studied, using the final version of Eurocodes. Gases are passed through the chimney in the upper level of the atmosphere, mainly originating from industrial boilers. They are usually cylindrical, with height exceeding 40 m. In general, due to their dimensions, they are considered to be flexible constructions and as such they are prone to wind flow. Because of wind flow, the chimneys are also affected by vortex shedding. Then, the periodic alternately shedding of vortices leads to chimneys' oscillations transverse to the wind flow.

This work consists of ten chapters. The first chapter is a flashback to the chimneys' usage, construction materials, design methodologies and other important events that have contributed to the development of the current regulatory documents.

The second chapter presents the role of the chimneys to the environment. Reference is made to how geometry, operating conditions of the chimney and the state of the atmosphere affect the dispersal of pollutants exported from the chimney.

The third chapter refers to the design and construction methodologies of foundations of self-supported chimneys.

The fourth chapter presents the methodology for calculating the pressure and the total force acting to the chimney due to wind flow. The calculations are made according to EN1991-1-4. In the same section, the criteria and the methodology for the check of the chimney against vortex shedding are presented. In the

beginning of the chapter the background for understanding the behavior of chimneys under wind flow is cited.

The fifth chapter describes the process of analyzing the chimney under seismic loads, based on the EN1998-1.

In the sixth chapter the provisions of EN1991-1-5 for the calculation of thermal actions are provided.

The seventh chapter includes the provisions of EN1993-1-6 regarding the strength and stability of shells. It describes all possible methods of analysis and design of shells. It also presents the required checks for pertinent limit states: Plastic limit state (LS1), Cyclic plasticity limit state (LS2), Buckling limit state (LS3), Fatigue limit state (LS4) and also the serviceability limit state.

The eighth chapter presents the provisions of EN1993-3.2 on the design of steel chimneys. Also, information on methods of reducing the cross wind amplitude due to vortex shedding is provided. The methods concern the use of aerodynamic devices or dampers.

The ninth chapter presents an example of steel chimney. The example concerns the analysis and design of a steel chimney to be built in the framework of extension of the power station in the Greek island of Syros. The chimney is cylindrical with a constant outer diameter 3.753 m and height 60 m. The thickness of the chimney's shell is being reduced according to height. In this chapter all the loads imposed on the structure, i.e., self weight, wind loads (wind pressures and forces due to vortex shedding), seismic and thermal effects, are being calculated analytically. The chimney is modeled by using the finite elements software ADINA. For the purposes of the analysis two models are developed; model 1 by using shell finite elements; model 2 by using beam elements. Checks are performed for the four ultimate limit states (LS1, LS2, LS3 and LS4) as well as for the serviceability limit state. For every limit state all possible check methods are being developed, i.e., check based on membrane theory through the analytical functions of the Annex to EN1993-1-6, as well as with numerical non linear analyses. For each analysis there is presentation and discussion of the results produced from every applied method. Additionally, the checks are carried out for both model 1 and model 2. At the ultimate limit state LS4 the reduction of the maximum width and model of transverse oscillation is being examined through aerodynamic devices and with the use of a damper.

Finally, the tenth chapter presents general conclusions about the behaviour, analysis and design of steel chimneys, as they have emerged from the present study. Furthermore, it proposes ad hoc suggestions for future studies on issues that need further investigation.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
Laboratory of Steel Structures

Behaviour, Analysis and Design of Steel Chimneys

Master's Thesis
of Panayiotis Andreou

Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor N.T.U.A.

Extended Summary

1. Introduction

The present thesis studies the behaviour, analysis and the design process of steel chimneys using the latest versions of Eurocodes. The design of the chimney is performed using all the proposed check methods for the ultimate limit state of shell structures, as defined by EN1993-1-6 (Capacity and stability of shells). EN1993-1-6 offers the possibility to evaluate the ultimate limit state through analytical formulas (Appendix A and B) or through numerical nonlinear analysis. In the context of numerical analysis two static simulants were developed, ie static simulant 1: using shell finite elements and static simulant 2: using bar finite elements. In the end, there is a comparison of the results of the chimney design based on nonlinear analysis, deriving from both simulants and the check through analytical formulas.

2. Description of the chimney

The chimney studied is a mutineer double skin type with an outer diameter of 3.735m, 60m tall and is made of steel CORTEN S355-A. It consists of 5 individual sections of cylindrical shells of different height and thickness but standard outer diameter. Different thicknesses are used for economic reasons. The corresponding dimensions and thicknesses of the sections are shown in *Figure 1*. The chimney will be assembled on site using appropriate bolted connections.

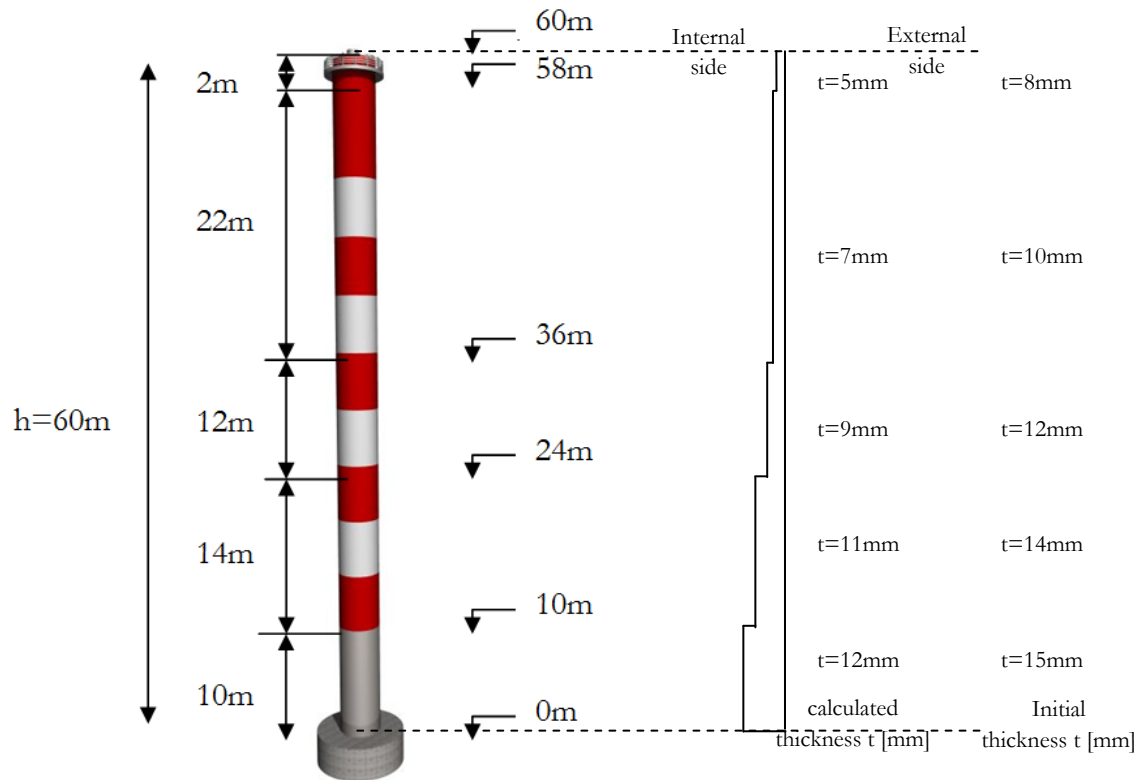


Figure 1: An outline of the chimney

Capacity design will be used for the connections in order to prevent their failure before the failure of the shell. In place of the compounds diaphragmatic function is defined.

Table1: Initial and reduced thickness of the structure vertically

Part	Length (m)	Total Length (m)	Initial Thickness (mm)	Reduced Thickness (mm)	Internal Model Diameter (mm)
1	10.00	10.00	15	12	3723
2	14.00	24.00	14	11	3724
3	12.00	36.00	12	9	3726
4	22.00	58.00	10	7	3728
5	2.00	60.00	8	5	3730

As mentioned in EN1993-3.2, the section thickness reduction due to corrosion has to be taken into account for the shell body of the structure. For the chimney studied here it is assumed that regular

maintenance with paint takes place (1mm/year). So, based on EN1993-3.2, in the analysis the total impairment of the section (because of external and internal corrosion) of the shells is 3mm. The thickness of the shell section of the chimney in height before and after the impairment due to corrosion is shown in **Table 1**. For modelling purposes it is assumed that the diameter of the model remains constant (3.735mm) and only the thickness varies.

3. Calculation of the loads

For the analysis and design of the chimney, are taken into account the loads due to its weight, wind, seismic and thermal loads.

The weight of the shell of the chimney without impairment of the thickness due to corrosion is considered to be dead load. The weights of the flue and insulation were not taken into account.

The wind loads are calculated according to EN1991-1-4. The chimney is considered to be designed for wind speeds exceeding 200km/h. Both the distribution of wind around the chimney and the total wind power over the height of the structure are calculated.

From calculations it appears that the chimney is affected by turbulent agitation. The calculation of the maximum vibration range and the inertial force due to turbulent agitation is performed in accordance with Annex E of EN1991-1-4. For comparison purposes, the maximum range of vibration is calculated using the two methods proposed by EN1991-1-4 and the formulas suggested by CICIND [1]. The results are presented in **Table 2**.

Table 2: Maximum vibration range at the top of the chimney for methods 1 and 2 proposed by EN 1991-1-4 and CICIND

	EN 1991-1-4, Method 1	EN 1991-1-4, Method 2	CICIND
y_{Fmax}	1.006m	2.671m	2.811m

As can be seen from the results and according to Zdravkovich PM and Kawecki J. (2007) [9] The method 1 proposed by EN1991-1-4 significantly underestimates the maximum range of vibration. From the same is proposed to calculate the range of vibration according to method 2. Therefore the chimney's maximum range of vibration is considered equal to $y_{max} = 2.671m$.

It should be noted that the proposed formula (formula E.17 EN1991-1-4, Appendix E) to calculate the peak rate k_p is problematic. The problems are confirmed again by Zdravkovich PM and Kawecki J. (2007) [9]. The peak rate is calculated by the formula 7.4.14 proposed by Dyrbye and Hansen (1996) [2].

The seismic design of the chimney was based on the EN1998-1. The seismic loads were calculated using the spectral method. To calculate the design spectrum, the maximum seismic acceleration is taken $a = 0.16$, soil category A, significance coefficient $\gamma_I = 1.4$, and behaviour factor $q = 1.5$.

For the chimney, the shell temperature is calculated for operating conditions equal to the 50°C . The influence of the temperature on the chimney's stability is taken into account through the impairment of the mechanical characteristics of the structural steel. The values of the latter were taken from EN 13084-7. The modulus of elasticity was taken equal to 170GPa and the yield stress equal to 345MPa .

4. Analysis and design of the chimney

The chimney was evaluated for the stability and serviceability criteria proposed by EN1993-1-6. The boundary conditions LS1 - plastic failure or tensile breakage, LS2 - Plasticity in cyclic loading, LS3- Buckling and LS4 - Fatigue were evaluated. All checks are performed using the analytical formulas but also through non-linear numerical analysis.

For the purposes of the non-linear analyses, the metal chimney was simulated with the finite element software ADINA. Two static simulants were developed; ie static simulant 1 (S.S.1) using shell finite elements and static simulants 2 (S.S.2): using bar finite elements.

In S.S.1, a preliminary analysis of the effect of dimensional lattice of finite element on the results was investigated. After several testings, a grid of nine-node finite elements with dimensions $0.70\text{m} \times 0.70\text{m}$ was chosen. Joint conditions were used at the base with rotational release in the directions X and Y. Also designated static diaphragms were used in the positions of thickness change of the shell in order to simulate this way the rigid, in their level, frontal plates used for the connections of the different parts. The flanges have annular shape and thickness about $1\text{-}3\text{cm}$. For this reason, they are considered to be rigid at their level.

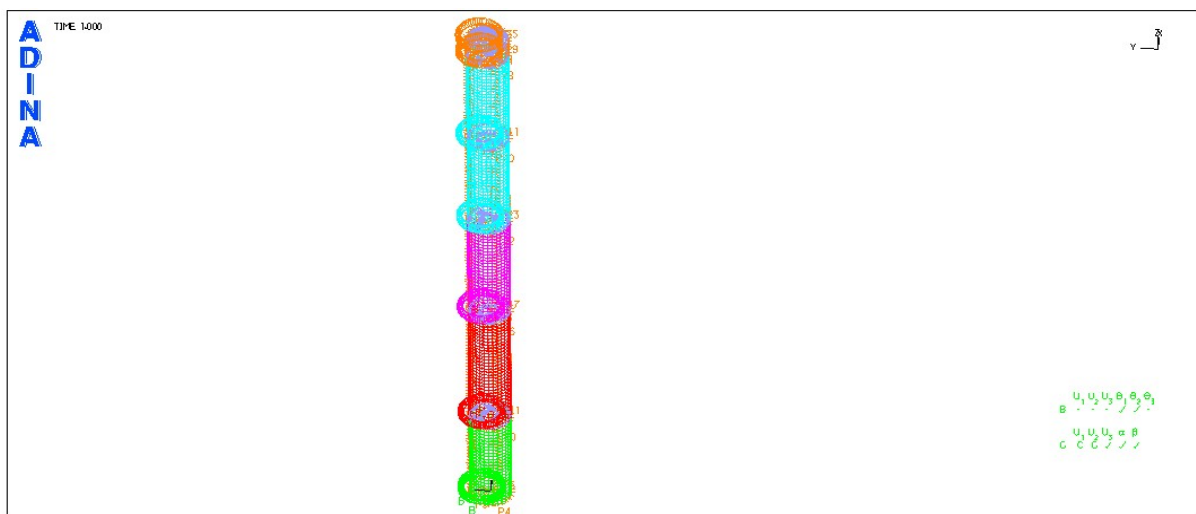


Figure 2: Static simulant with shell elements

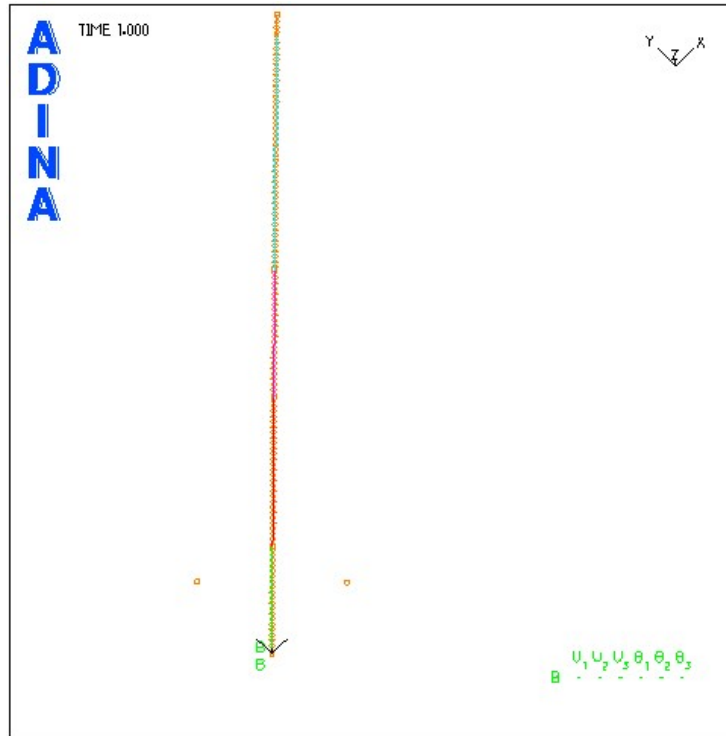


Figure 3: Static simulant with bar elements

The S.S.2 was divided into equal parts of 0.20m. Fully anchorage conditions were considered at the base. In **Figures 2** and **3** the static simulants are shown, as simulated in the software ADINA. Different colors designate different thicknesses of the elements. Initially, static analysis was performed in both static simulants in order to determine their characteristics and natural frequencies. In Figure 4-13 the first five modals. Respectively, in **Table 3** are the values of natural frequency. The natural frequency of the chimney was also calculated using the function F3 proposed by EN1991-1-4. As derives from the figures, but also from the values, the first four modals that were calculated for the two static simulants are matching. Very good was also the estimation of the first modal calculated by the formula of EN1991-1-4.

Table3: Modals and natural frequencies in as calculated for S.S.1 & S.S.2 and the formula of EN1991-1-4

Modal	S.S.1: shll finite elements, natural frequency [Hz]	S.S.2: bar finite elements, natural frequency in [Hz]	EN1991-1-4, natural frequency in [Hz]
1 st modal - flexural	1.087	1.089	1.038
2 nd modal - flexural	1.087	1.089	----
3 rd modal - flexural	5.509	5.690	----
4 th modal - flexural	5.509	5.690	----
5 th modal - elleptical	9.516	12.560	----

The fifth modal of the S.S. finite element shell is elliptical and varies in value from the corresponding "fifth" modal of the S.S. using bar finite elements. Elliptic modal, understandably, can not be observed using S.S.2 due to bar elements. At this point, it should also be noted that the simulation of frontal plates as diaphragms in the mounting position of the chimney's body plays a key role in the modal analysis of the structure. Without the diaphragms, the modals arising in S.S.1 are all elliptical.

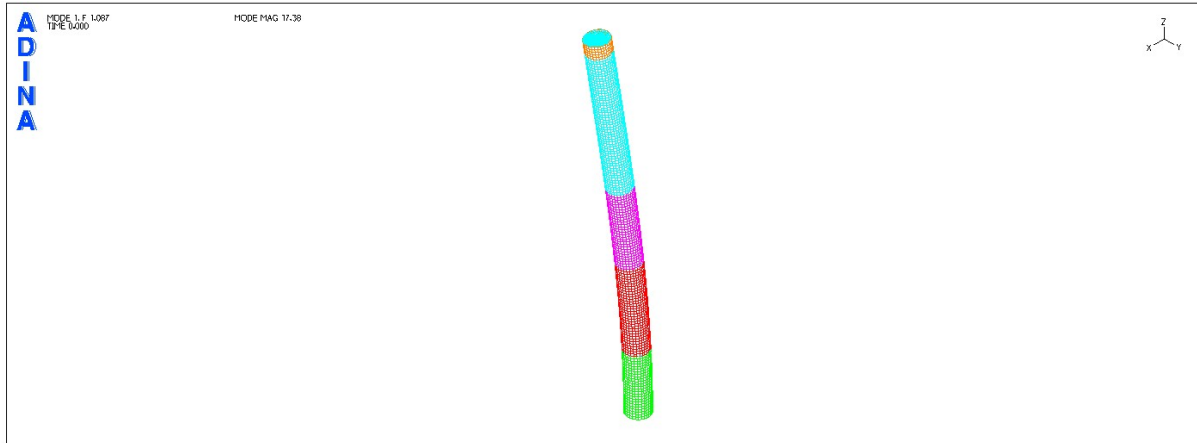


Figure 4: Static stimulant with shell finite elements, 1st modal

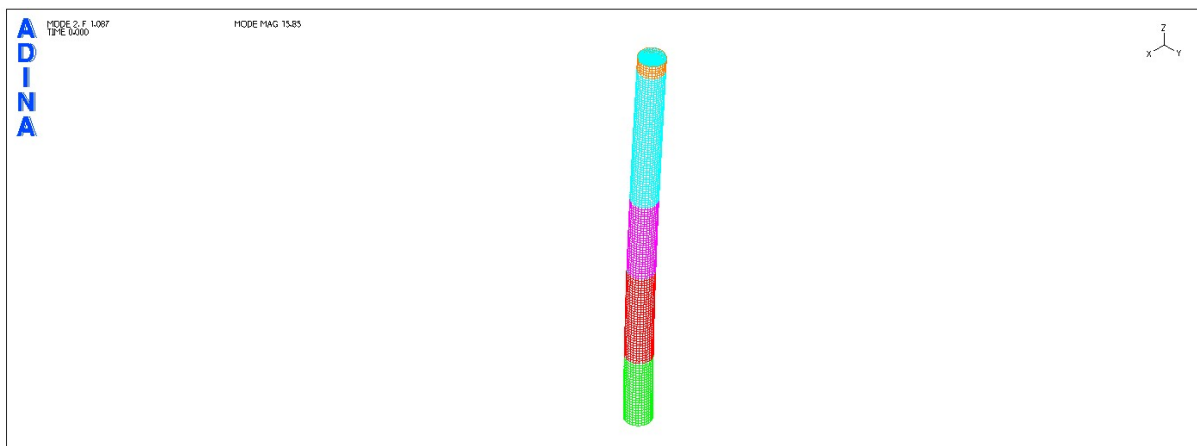


Figure 5: Static stimulant with shell finite elements, 2nd modal

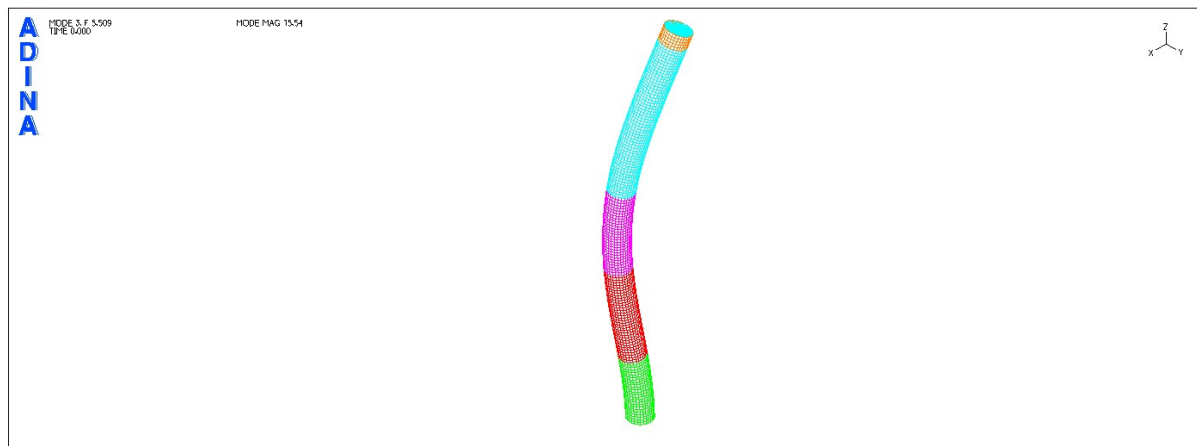


Figure 6: Static stimulant with shell finite elements, 3rd modal

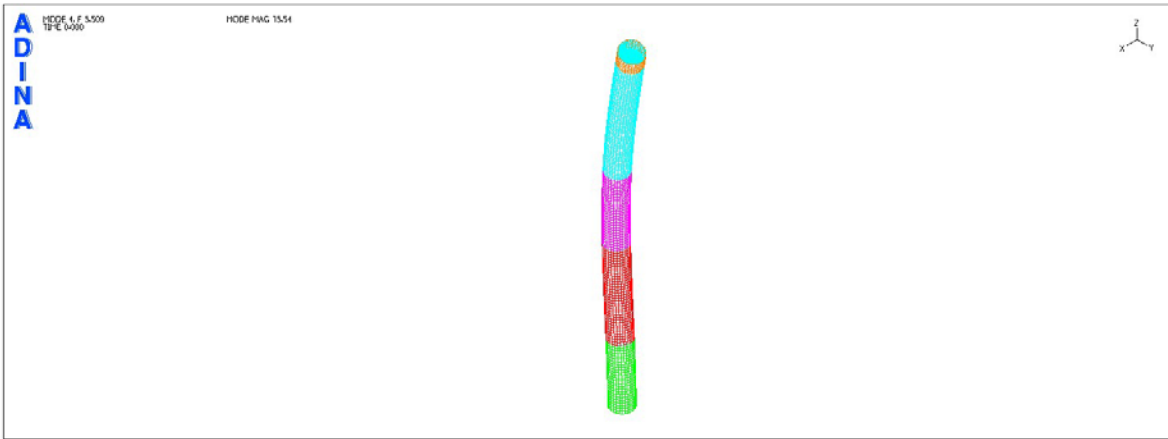


Figure 7: Static stimulant with shell finite elements, 4th modal

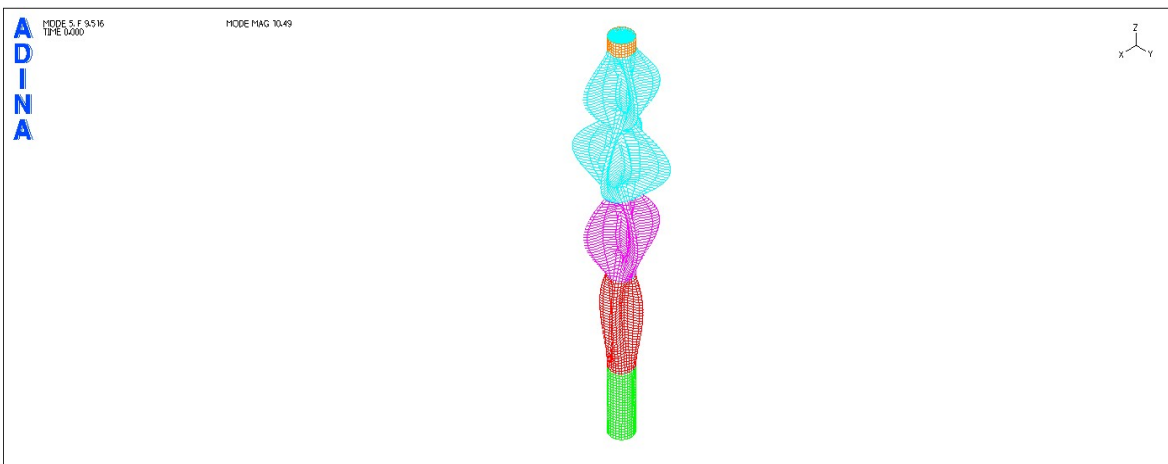


Figure 8: Static stimulant with shell finite elements, 5th modal

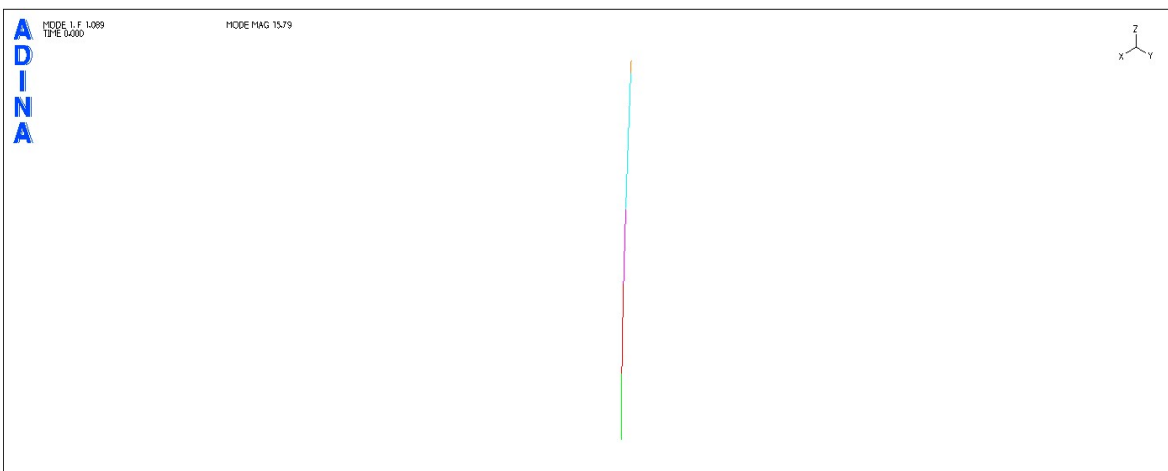


Figure 9: Static stimulant with bar finite elements, 1st modal

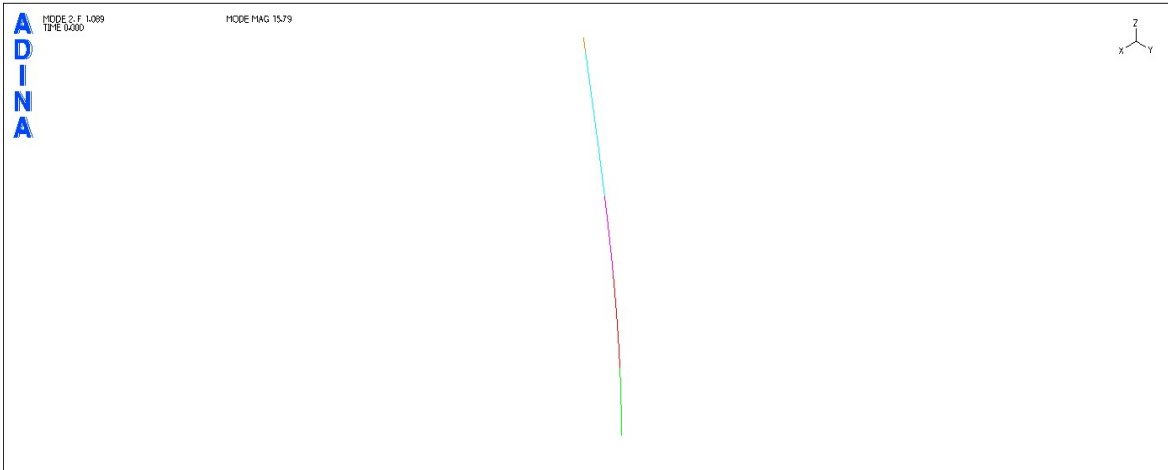


Figure 10: Static stimulant with bar finite elements, 2nd modal

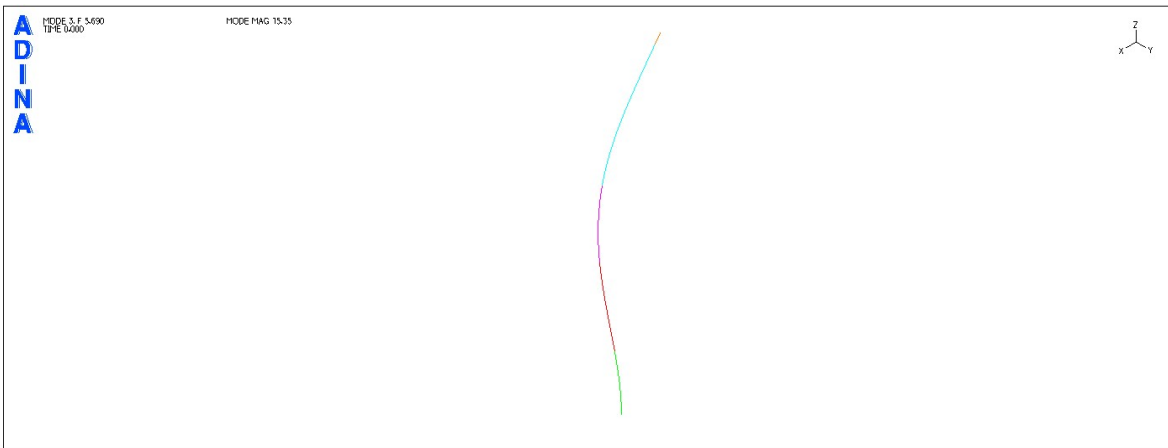


Figure 11: Static stimulant with bar finite elements, 3rd modal

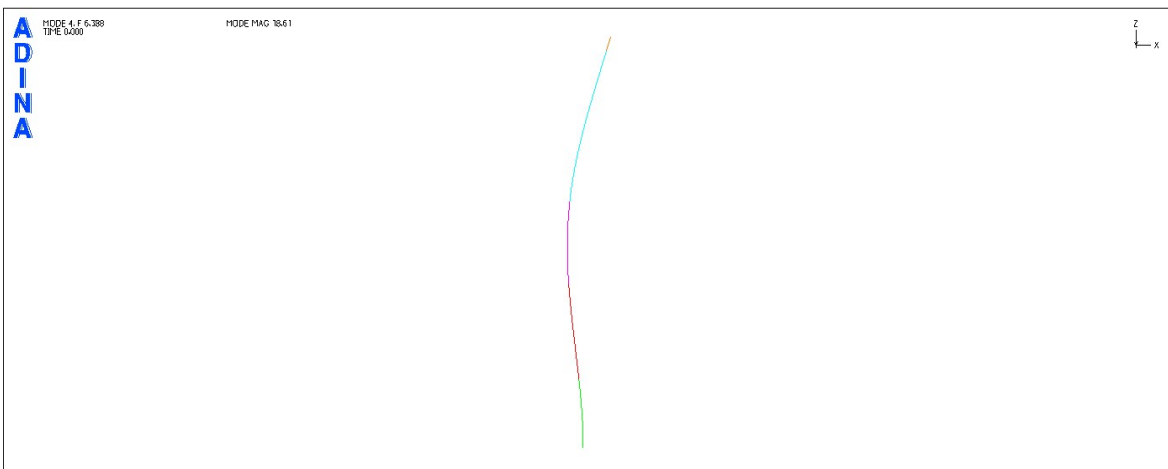


Figure 12: Static stimulant with bar finite elements, 4th modal

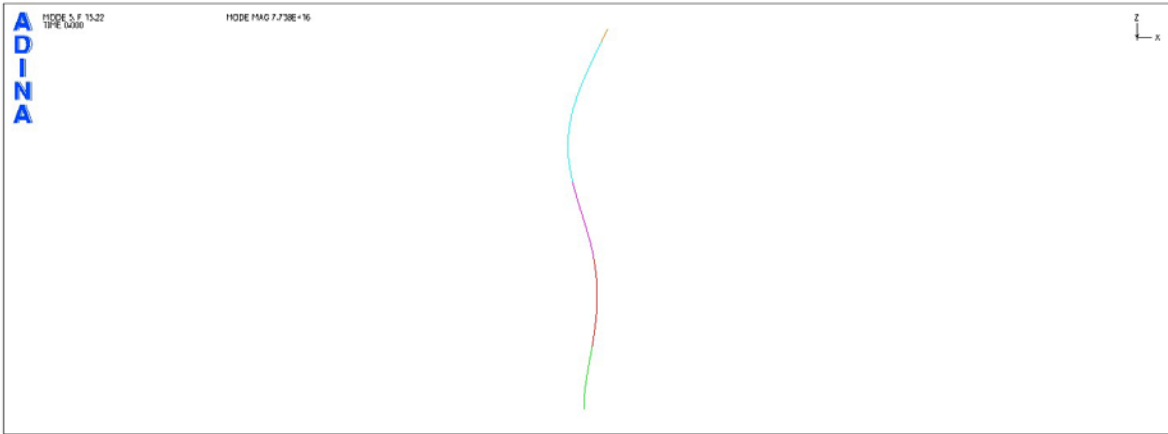


Figure 13: Static stimulant with bar finite elements, 5th modal

The limit state analysis is performed for the four limit states proposed by EN1993-1-6 (Strength and stability of shells). For the corresponding limit state conditions, all the proposed check methods are used. Initially, however, for purposes of simplification of the calculations and analyses, a preliminary elastic analysis was carried out in order to determine worst case scenario. The chimney is evaluated for the combined loads with main load the wind and for the seismic combination.

In the following Figures, the analysis results from two load combinations are presented. It's obvious from the results that the worst combination is the one with the wind as the main load. As understood, the structure because of its relatively small mass is more prone to the wind load, than to any seismic excitation.

Therefore, all subsequent analyses performed, for purposes of simplification, were based on the load combinations with the wind as the main load. From the preceding preliminary analyses, it appears that the von Mises stress is at the yielding capacity F_{yd} of the steel S355. So it was considered appropriate to increase the thickness of the shells near the base. The new shell thicknesses are presented in **Table 4**.

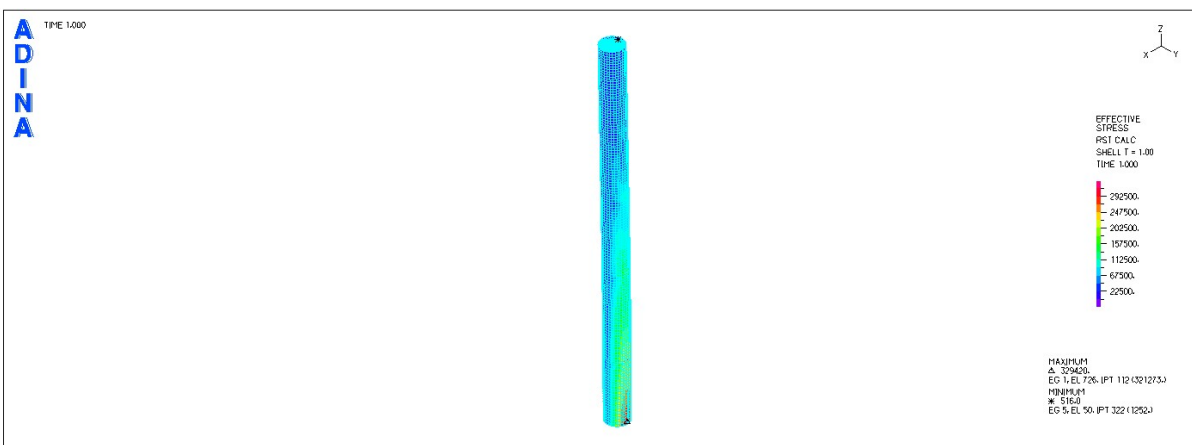


Figure 14: Analysis results for the static stimulant with shell finite elements for load combination with main load the wind. von Mises stress = 329.420 MPa

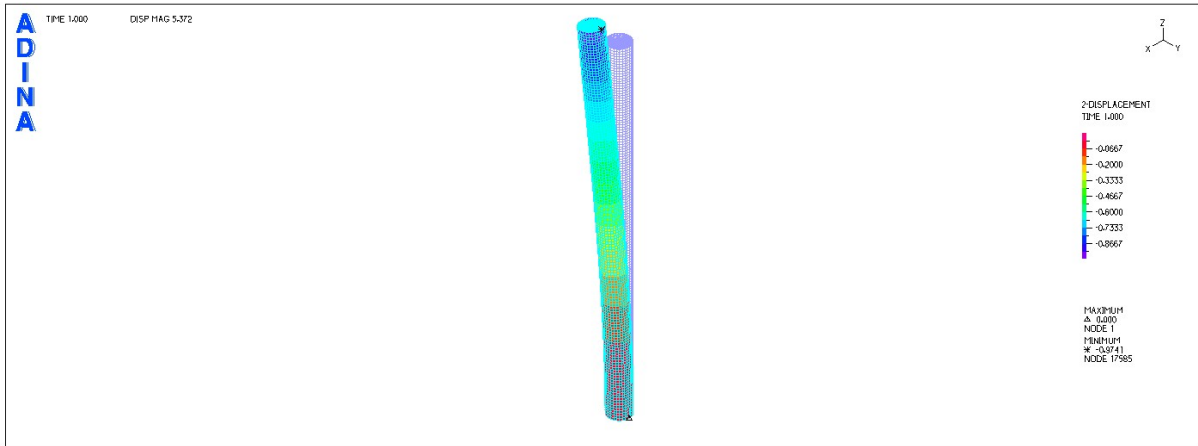


Figure 15: Analysis results for the static stimulant with shell finite elements for load combination with main load the wind. Maximum displacement 0.97cm



Figure 16: Analysis results for the static stimulant with shell finite elements for the seismic load combination. von Mises stress = 120.212 MPa

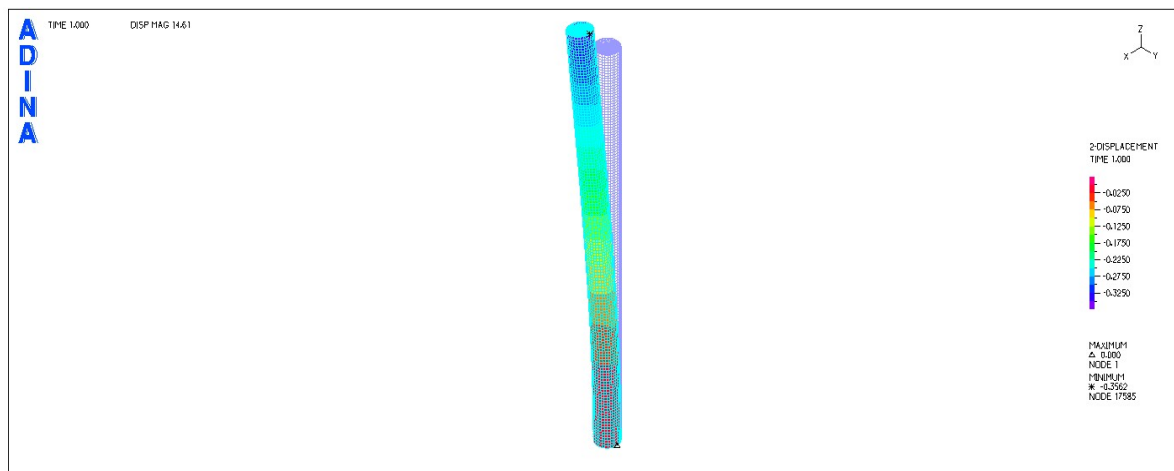


Figure 17: Analysis results for the static stimulant with shell finite elements for the seismic load combination. Maximum displacement 0.36cm

Table 4: New initial and reduced thickness of the chimney vertically

Part	Length (m)	Total Length (m)	Initial Thickness (mm)	Reduced Thickness (mm)	Model Internal Diameter (mm)
1	10.00	10.00	20	17	3,723
2	14.00	24.00	18	15	3,724
3	12.00	36.00	12	9	3726
4	22.00	58.00	10	7	3728
5	2.00	60.00	8	5	3730

4.1. Plastic limit state (LS1)

The analysis is performed according to the worst combination. The loads applied to the simulants are increased by the rates $\gamma_Q = 1.35$ and $\gamma_G = 1.50$.

In this case, the maximum von Mises stress is compared to the yield capacity of the material f_{yd} .

The von Mises maximum stress is taken straight from the software (maximum von Mises stress = 199.315 MPa) for S.S.1, while for S.S.2, it's calculated from the internal forces M, Q, N using the formulas proposed by EN1993-1-6.

In **Table 5** the von Mises equivalent stress results and the resulting safety factors are presented. As can be seen from the results, the application of the membrane theory (through analytical formulas proposed by EN1993-1-6) underestimates the maximum von Mises stress, giving a greater safety factor. This seems to happen because, by definition, the membrane theory ignores any bending effects (which can emerge in the base, because of the support conditions) that contribute to the stress of the body.

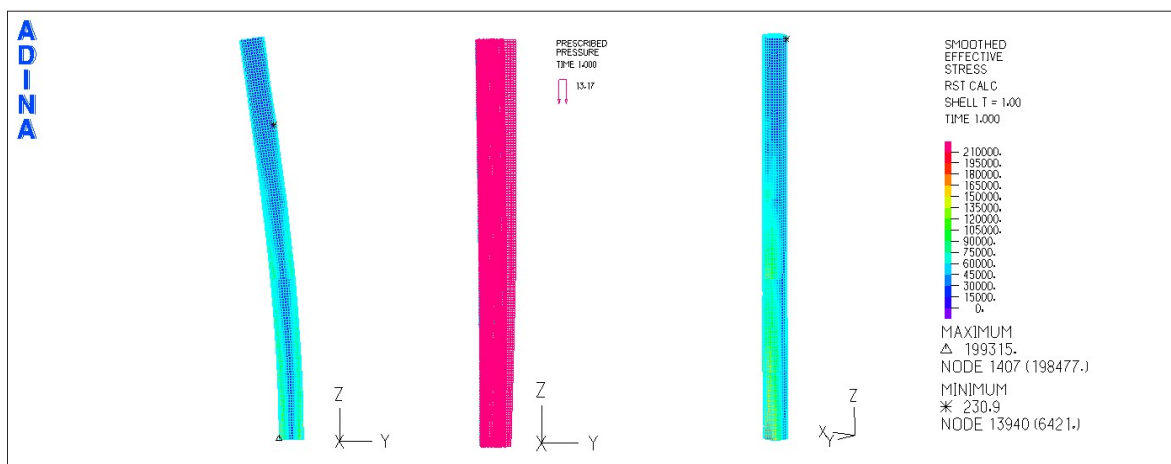


Figure 18: LS1 analysis results for the static simulant with shell finite elements

Also, as can be seen from **Figure 18** the maximum stress occurs in the compression area of the chimney. This is because of the fact that, in the area of compression, the chimney is borne by its weight load.

Table5: The von Mises equivalent stress and load ration factor using the finite element method and membrane theory.

	Numerical analysis with finite elements	Membrane theory
The von Mises equivalent stress [MPa]	199.315	173.493
Load ration factor r_{Rk}	1.731	1.989
Load ration factor r_{Rd}	1.731	1.989

The check of the LS1 can be achieved through material non-linear analysis (MNA), but also through geometry and material nonlinear analysis (GMNA). The check is performed using the plastic resistance ratio r_{Rpl} as determined in EN1993-1-6.

The loads as resulted from the worst combination (design actions taking into account the factors γ_Q and γ_G). Using the software Adina, collapse analysis is performed, initially for nonlinearity of material (MNA) and then for nonlinearity of material and geometry (GMNA). Collapse analysis is performed using the load scaling factor " λ " (Lambda). During the analysis procedure, the value of the factor gradually increases to the point of failure. Collapse analysis continues after the point of failure (branching point). It is noticeable that, in order to perform the collapse analysis, the software requires as an initial small drift somewhere in the body must be defined. The drift, obviously, is defined in the direction where the structure is expected to be deformed under the effect of specific loads (the direction is known from preliminary linear analyses).

After the end of the analysis, the equilibrium path for a given node of the model is determined (load increasing coefficient versus deformation diagram). For the chimney, a node at the top is selected to show the maximum displacement. In **Figure 19** the four equilibrium paths, which correspond to the static analysis of two simulants, are presented (with shell and bar elements) for the MNA and GMNA analyses.

It is evident that for all four analyses the equilibrium paths are linear and almost identical for displacement up to 1.20m. Follows the branching point and then abrupt change of the slope. It is noteworthy that in S.S.2 the equilibrium path shows a sharp change in slope, with an obvious point branching. On the contrary, in the case of GMNA analysis, for the S.S.1 the equilibrium path becomes progressively nonlinear. The difference is because of the diversity of the elements used in the simulants. In S.S.1 the material yielding takes place in several discrete points of the body region, because the grid of finite elements. In contrast, in S.S.2 check of the material yielding is performed within fewer discrete

points, so there is "abrupt" yielding of the material. What should be noted is that the two static simulants for MNA analysis show almost the same value for the ratio of plastic resistance r_{Rk} .

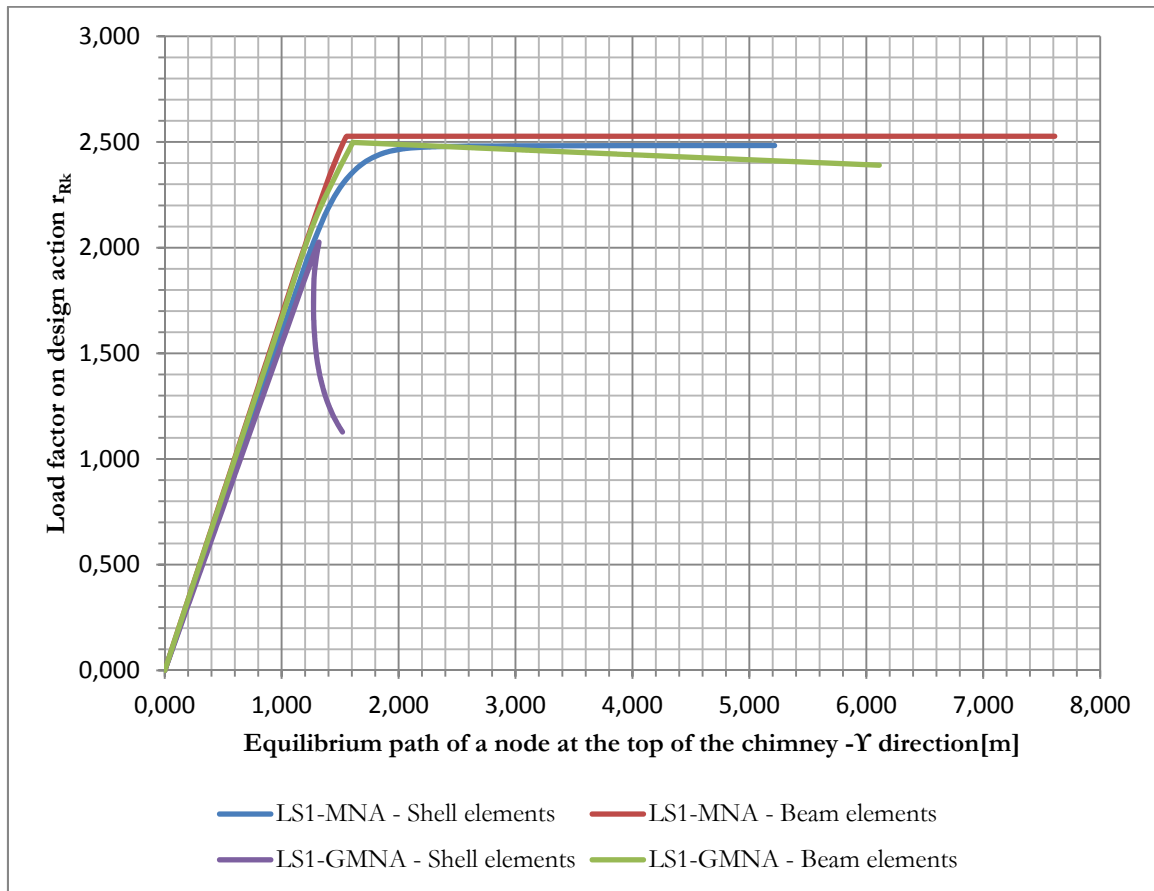


Figure 19: Equilibrium path of a node at the top of the chimney for MNA and GMNA analyses, for both static simulants

For GMNA analysis the equilibrium paths obtained from the two static simulants differ. In S.S.1 the equilibrium path shows before any other analysis, branching point and then follows an abrupt fall. This abrupt equilibrium path corresponds to brittle failure of the chimney due to local buckling at the base. Because of its relatively large height, any significant diversion of the chimney from the vertical axis, which is obtained through the nonlinearity in the geometry, bornes the compression zone at the base with the structure's weight. This results in encouraging the local buckling. On the contrary, in S.S.2 the equilibrium path from the GMNA analysis seems identical, to the branching point, with the corresponding equilibrium path extracted by MNA analysis. After the branching point for GMNA analysis, the equilibrium path shows a slight decline. In S.S.2, because of the bar elements used, buckling phenomena might occur local. The fall in the equilibrium is because of the flexural buckling.

In **Table 6** the values of the plastic resistance coefficients r_{Rk} , defined as the maximum value obtained from the equilibrium path for each of the analyses described above. As S.S.1 and S.S.2 are considered the static simulants with shell and bar finite elements respectively. It is easy to observe that the ratio r_{Rk} takes

almost the same value for all the GMNA analyses in S.S.1, for the reasons mentioned above. The ratio r_{Rd} obtained by the function:

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M0}}$$

Where $\gamma_{M0}=1.00$

Table 6: Values of the plastic resistance ratios r_{Rk} and r_{Rd} for limit state LS1, received by MNA and GMNA analyses.

	MNA		GMNA	
	S.S.1	S.S.2	S.S.1	S.S.2
r_{Rk}	2,483	2,527	2,025	2,498
r_{Rd}	2,483	2,527	2,025	2,498

Based on the EN1993-1-6, the chimney is considered to be safe versus resistant plastic limit state if applies: $r_{Rd} \geq 1$. Therefore, based on the results, the chimney is considered to satisfy the constraints for the ultimate limit state LS1 with a minimum safety factor of 2.025.

It is noteworthy that for GMNA analysis in S.S.1 and check using the analytical formulas comparable values of the safety factor are obtained. From the later derives that, for the LS1 check, the GMNA analysis is appropriate, since it simulates better the behaviour of the structure.

In **Figure 20** an overview of the evolution of the deformations on the chimney using GMNA analysis is presented (at discrete points of the equilibrium path), while in **Figure 21-24** is presented the stress state of the base during the change of loads. From the figures, it is easy to indicate that the failure of the chimney comes from local buckling and yielding of the material at the base.

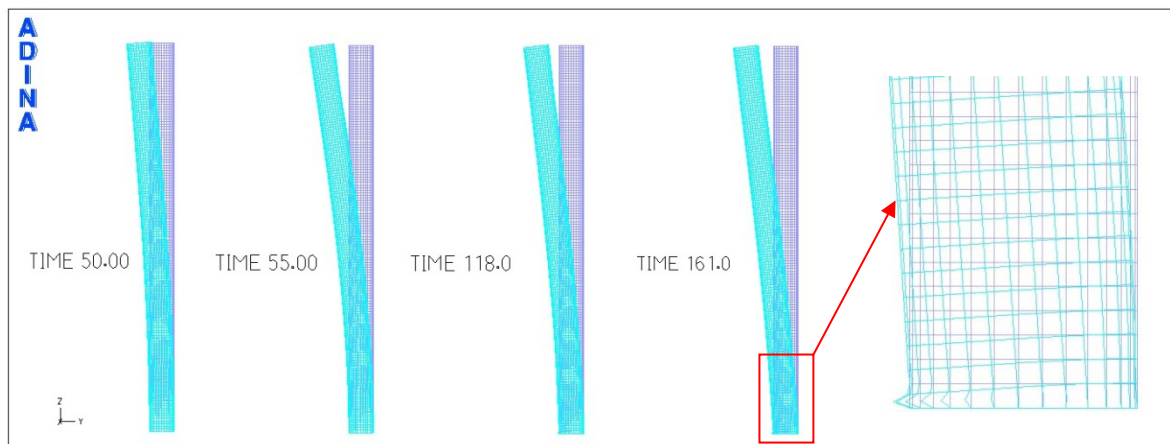


Figure 20: Evolution of the deformations is specific points of the equilibrium path of the chimney, for GMNA analysis

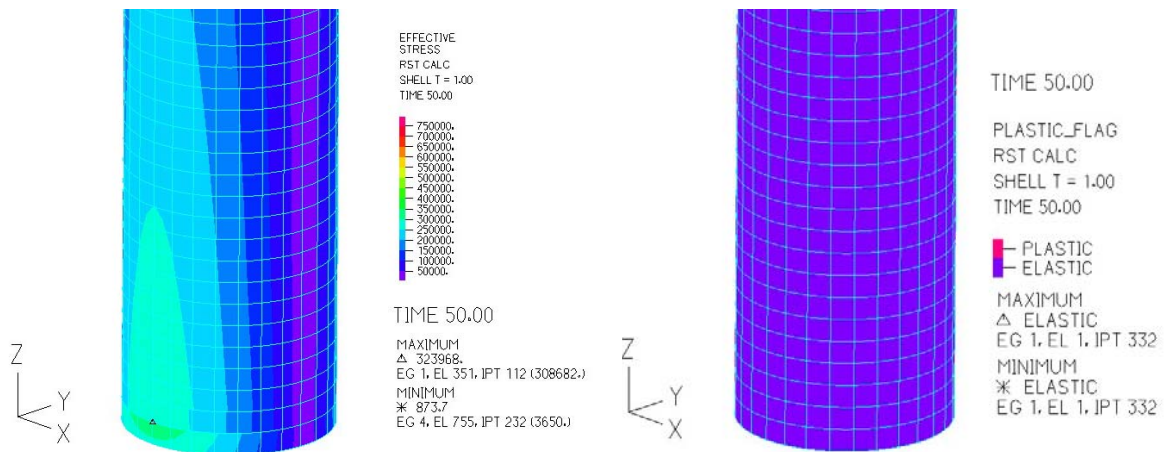


Figure 21: Stress curves and deformations by GMNA analysis for load increment coefficient $r_{Rk}=0.913$ – pre-yielding state

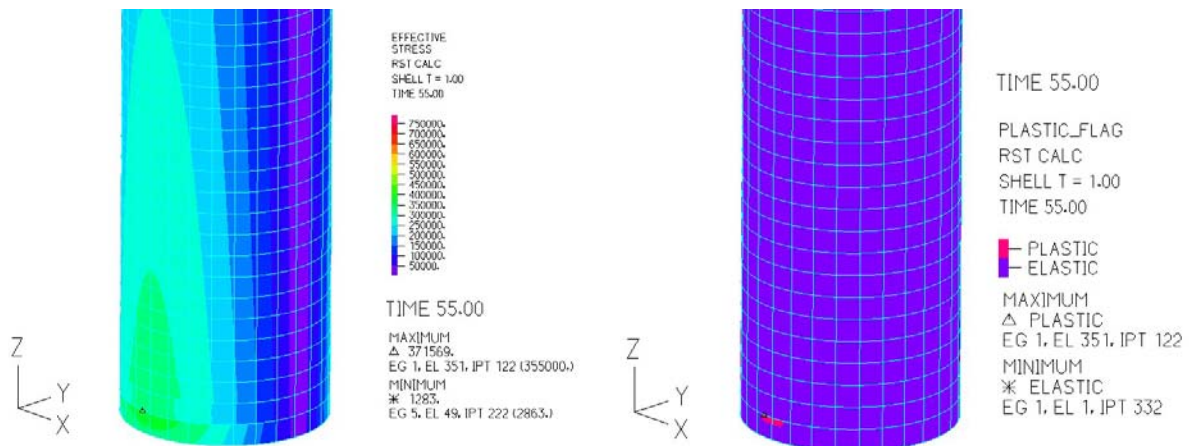


Figure 22: Stress curves and deformations by GMNA analysis for load increment coefficient $r_{Rk}=1.048$ – post-yielding state

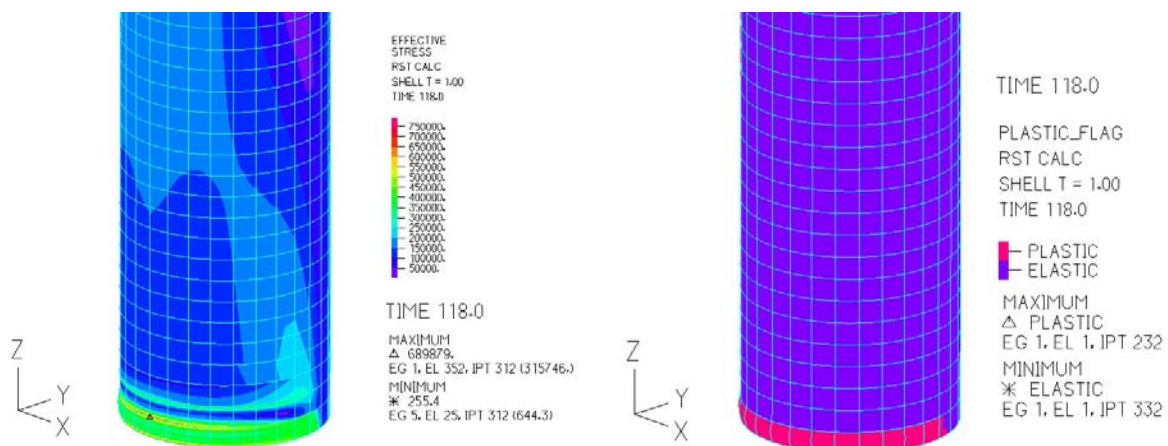


Figure 23: Stress curves and deformations by GMNA analysis for load increment coefficient $r_{Rk}=1.941$ – before local buckling occurrence

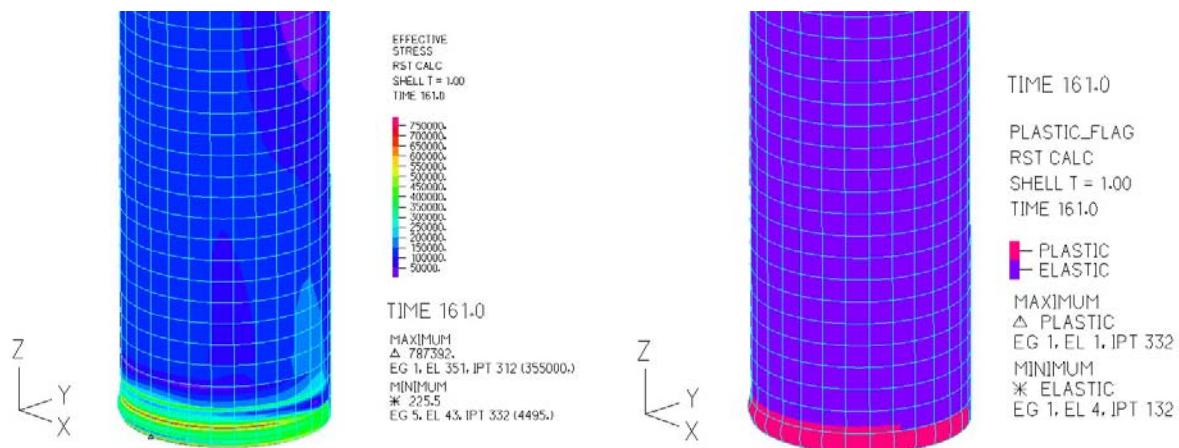


Figure 24: Stress curves and deformations by GMNA analysis for load increment coefficient $r_{Rk}=1.128$ – after local buckling occurrence (end of analysis)

4.2. Limit state of plasticity in cyclic loading (LS2)

In the LS2 analysis the typical values ($\gamma_Q = 1.00$ and $\gamma_G = 1.00$) of the actions that may be applied and removed from the structure more than three times are used.

In S.S.2 an LA analysis is performed and the values of M, Q, N are calculated. As in LS1, the values of the respective stresses are calculated using the analytical formulas of Annex A of EN1993-1-6.

From changes in the stresses, the design value of the variation of the equivalent von Mises stress is estimated according to the formula:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,d}^2 + \sigma\Delta\theta_{\theta,d}^2 - \Delta\sigma_{x,d} \cdot \Delta\sigma_{\theta,d} + 3 \cdot \Delta\tau_{x\theta,d}^2} = 231.893MPa$$

The resistance to equivalent range of von Mises stress variations is determined by:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2 \cdot f_{yd} = 2 \cdot 345MPa = 690MPa$$

So, since:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = 231.893MPa \leq \Delta f_{eq,Rd} = 690MPa$$

The chimney is safe against plasticity in cyclic loading.

In the case of check via non-linear numerical analysis, EN1993-1-6 defines that the total accumulated von Mises stress equivalent plastic deformation should be calculated e_p , e_q , E_d at the end of the design life of

the chimney. Because the operation loads are unable to cause plastic deformation, the check of limit state LS2 through numerical nonlinear analysis is not performed.

4.3. Buckling limit state (LS3)

The analysis is performed under the worst combination of loads as for LS1. The loads applied to the simulants are increased by the rates γ_Q and γ_G .

The support boundary conditions of the chimney on top and base are BC2f and BC1f respectively (according to Figure 8.1. of EN1993-1-6). However, the proposed formulas in section D1.2.1 can be applied. So, based on the stress data obtained by the LA analysis in S.S.2, the necessary checks against buckling are performed through analytical formulas defined in EN1993-1-6.

In Table 7, the results of the checks for the ultimate limit state LS3 are presented. As can be seen from the results, the testing against circumferential compression is critical. This is generally a matter to the fact that the shell of the chimney is relatively thin, so it is prone to circumferential buckling.

Table 7: Check results, using stresses, for limit state LS3

Check		
Check in meridian compression		$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{eqEd} = 173.493MPa \leq 205.043 MPa$
Check in circumferential compression	<i>Upper part</i>	$\sigma_{\theta Ed} = 0.96MPa < \sigma_{\theta Rd} = 0.995MPa$
	<i>Bottom part</i>	$\sigma_{\theta Ed} = 0.624MPa < \sigma_{\theta Rd} = 1.119MPa$
Check in shear stress		$\tau_{x\theta,d} = 9.13MPa < \tau_{Rd} = 44.723MPa$
Interaction between shear stress, meridian and circumferential stress		$\left(\frac{173.493MPa}{205.043MPa}\right)^{1.74} + \left(\frac{0.624MPa}{1.119MPa}\right)^{1.252} + \left(\frac{9.13MPa}{44.723MPa}\right)^{1.806} = 0.941 < 1$

Thus, using the specific thicknesses of the shell, the design of the chimney against buckling takes safety factor equal to:

$$r_{Rk} = \frac{\sigma_{\theta Rd} = 0.995MPa}{\sigma_{\theta Ed} = 0.96MPa} = 1.036 > 1$$

which is obtained by checking against circumferential compression in the upper part of the chimney.

Then the buckling checks are performed through numerical MNA and LBA analyses. From the MNA analysis performed in paragraph 4.1 are received the values of plastic resistance ratios r_{Rk} .

For the calculation of the critical elastic buckling resistance ratio r_{Rcr} buckling modal analysis (LBA) is performed based on the calculated linear elastic state of stress of the perfect shell geometry (LA) in the design values of loads. The coefficient is taken as the smallest eigenvalue obtained (branching factor of the load). The values of the elastic buckling resistance ratio r_{Rcr} , for the first five buckling modals are presented in **Table 8**.

Table 8: Values of the elastic buckling resistance ratio r_{Rcr} , for the first five buckling modals for static simulant 1.

LBA	
Buckling modal	r_{Rcr}
1	4.457
2	4.540
3	4.592
4	4.675
5	4.685

Figure 26-29 show the first five buckling modals received for the static simulant with shell finite elements. Note that for purposes of LBA analysis 0.25% of the final design load was applied. Therefore, the accretion rate shown in the first five buckling modals should be multiplied by 0.25. As can be seen, all five modals correspond to local buckling phenomena at the base of the chimney. The first buckling modal corresponds to the classic case of shell buckling due to folding (cavities in the meridian). On the following modals it is obvious that cavities appear in the region.

It is understandable that local buckling phenomena, as mentioned, can not be observed in static simulations with fluted points (S.S.2). The ratio of the critical elastic buckling resistance r_{Rcr} for static S.S.2 take on values very large ($\gg 50$) which, in this case was not considered realistic.

Noteworthy is the fact that ground elastic buckling resistance r_{Rcr} is a value higher than the plastic reference resistance ratio r_{Rpl} . This is because the chimney is not stressed by significant axial loads and so it seems that the structural material yields before the local buckling occurs.

Thus, from the results, the ratio of the characteristic buckling resistance r_{Rk} is calculated as:

$$r_{Rk} = \chi_{ov} \cdot r_{Rpl}$$

where χ_{ov} is the buckling reduction factor, which is calculated as $\chi_{ov} = f(\bar{\lambda}_{ov}, \bar{\lambda}_{ov,0}, a_{ov}, \beta_{ov}, \eta_{ov})$

The total normalized slenderness λ_{ov} of the shell is calculated by:

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{F_{Rpl}}{F_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}} = 0.746$$

Values of $\lambda_{ov}, \lambda_0, \beta_{ov}, \eta_{ov}$ και r_{Rov} are calculated conservatively in Section D.1.2.2 as:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_{ov,0} &= \bar{\lambda}_{x0} = 0.20 \\ \beta_{ov} &= \beta = 0.60 \\ \eta_{ov} &= \eta = 1.0\end{aligned}$$

The total defects reduction factor α_{ov} is calculated from the formula:

$$a_{ov} = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{w_k}{t} \right)^{1.44}}$$

From previous reports (9.4.2.2.):

$$a_{ov} = 0.304$$

So the value of the plastic normalized slenderness limit is:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} = 0.871$$

Therefore, because $\bar{\lambda}_{ov,0} \leq \bar{\lambda}_{ov} \leq \bar{\lambda}_p$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda}_{ov} - \bar{\lambda}_{ov,0}}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{ov,0}} \right)^\eta = 0.512$$

Έτσι ο λόγος της χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rk} είναι:

$$r_{Rk} = 0.512 \cdot 2.483 = 1.271$$

Thus the ratio of the characteristic buckling resistance r_{Rk} is:

$$r_{Rd} = 1.271 / 1.1 = 1.155 > 1$$

Because the coefficient r_{Rd} takes a value greater than one, the chimney is considered to be safe against buckling.

As can be seen, the check of the ultimate limit state through LS3 using MNA analysis gives greater safety factor than the previous corresponding calculations through stresses. This happens because in the MNA analysis, the material nonlinearity is also taken into account.

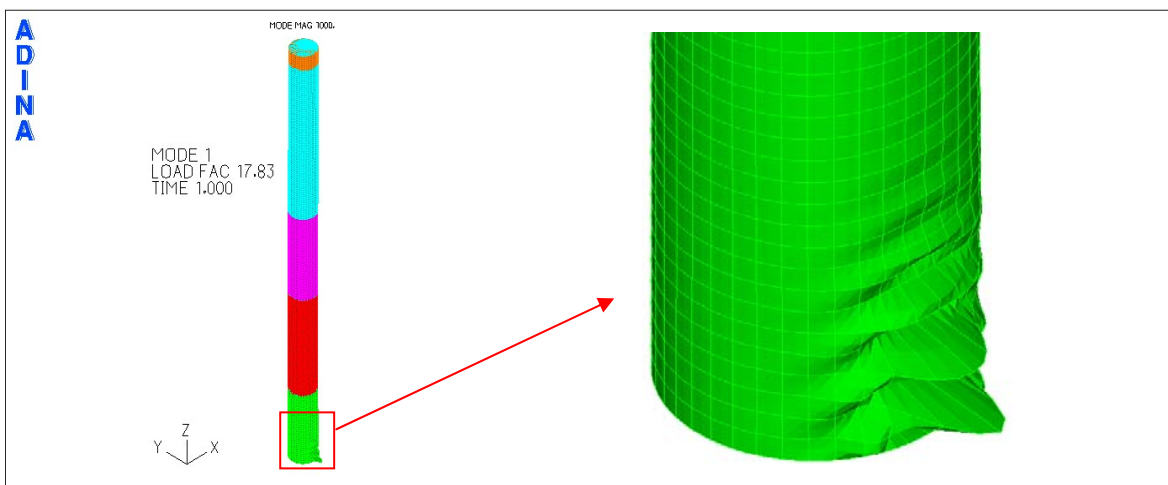


Figure 25: 1st buckling modal of the static stimulant with shell finite elements – LBA analysis.

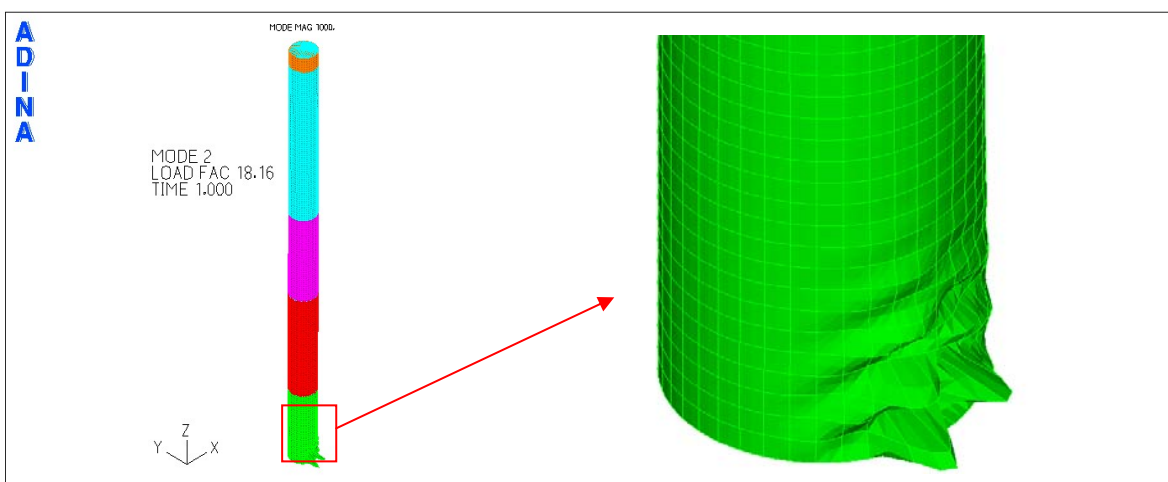


Figure 26: 2nd buckling modal of the static stimulant with shell finite elements – LBA analysis.

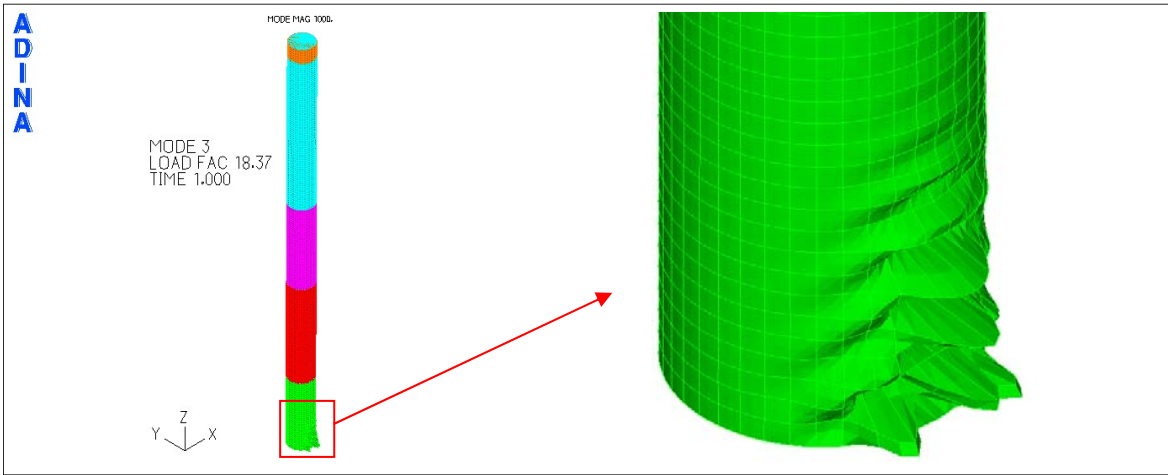


Figure 27: 3rd buckling modal of the static stimulant with shell finite elements – LBA analysis.

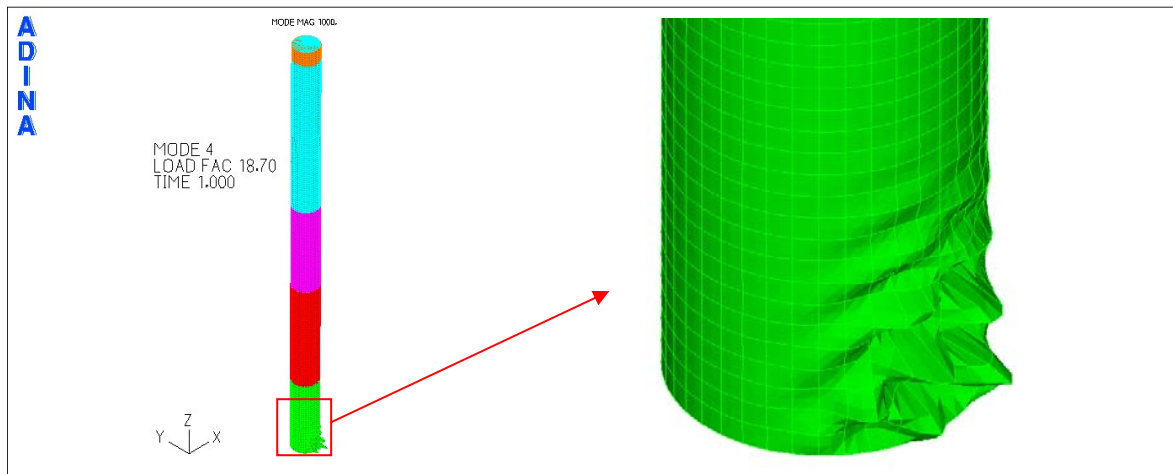


Figure 28: 4th buckling modal of the static stimulant with shell finite elements – LBA analysis.

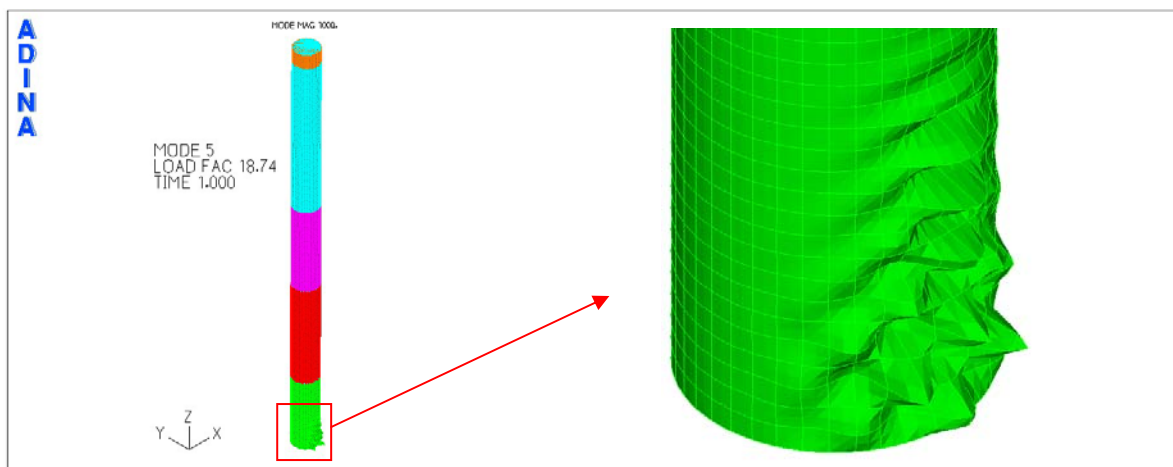


Figure 29: 5th buckling modal of the static stimulant with shell finite elements – LBA analysis.

The check against buckling can be also achieved through non-linear numerical analysis that takes into account the nonlinearity of material and geometry, as well as potential flaws in the structure's shell (GMNIA). EN1993-1-6 defines three types of defects that could appear in a shell body and should be considered in the analysis. Defects regarding a possible deviation from the circular shape, random eccentricity and due to folding.

For the purposes of this study, only possible defects due to body folding are taken into account. The defects are considered in the analysis by the buckling modal and are defined by the relevant displacements of the nodes of the model for the first modal buckling. For this specific example, the first five buckling modals are taken into account. For each modal is detected the node of the grid of finite elements with the maximum displacement and there is defined the maximum displacement due to defects. The displacements of the other nodes are proportional to the maximum specified displacement.

For the shell of the chimney an offset from the circular shape is considered equal to $U_{r,max} = 0.016$. This value corresponds to the maximum value of the tolerance parameter for the crimp of the shell. So, the maximum allowed defect of the shell due to folding is calculated as follows:

$$l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 1.01m$$

$$U_{0,i} = \frac{\Delta w_{0i}}{l_{gi}} \Rightarrow \Delta w_{0x} = U_{0,x} \cdot l_{gx} = U_{r,max} \cdot l_{gx} = 0.016 \cdot 1.01m = 16.16mm$$

Following, a non-linear analysis of geometry and material, including defects (GMNIA). From this analysis the equilibrium path of a node at the top of the chimney which is shown in **Figure 30** is extracted. In the same figure, for comparison purposes, is given the equilibrium path obtained through GMNA analysis. As can be seen, the two equilibrium paths differ greatly and this verifies the influence of defects on the stability of the structure. The influence of defects is evident from the beginning of the chimney's deformation. From the equilibrium position until 0.80 m peak deformation, the equilibrium path remains linear but with less pitch from that obtained from the equilibrium path of the peak under GMNA analysis. For only 1.30m peak displacement, the chimney develops the highest resistance for GMNIA analysis. Immediately after this point, failure due to local buckling occurs at the base, so the path follows a downward direction. Then, the equilibrium path tends to become horizontal. For reasons of computational "cost", the analysis was interrupted for peak deformation equal to 3m. For supervisory purposes, in **Figure 31** and **32** are presented respectively the deformation and stress on the base of the chimney, after the end of the analysis.

From the GMNIA analysis the ratio of endless elasto-plastic buckling resistance r_{RGMNIA} is received as the maximum value derived from the equilibrium path (see Figure 7.9). Thus:

$$r_{RGMNIA} = 1.268$$

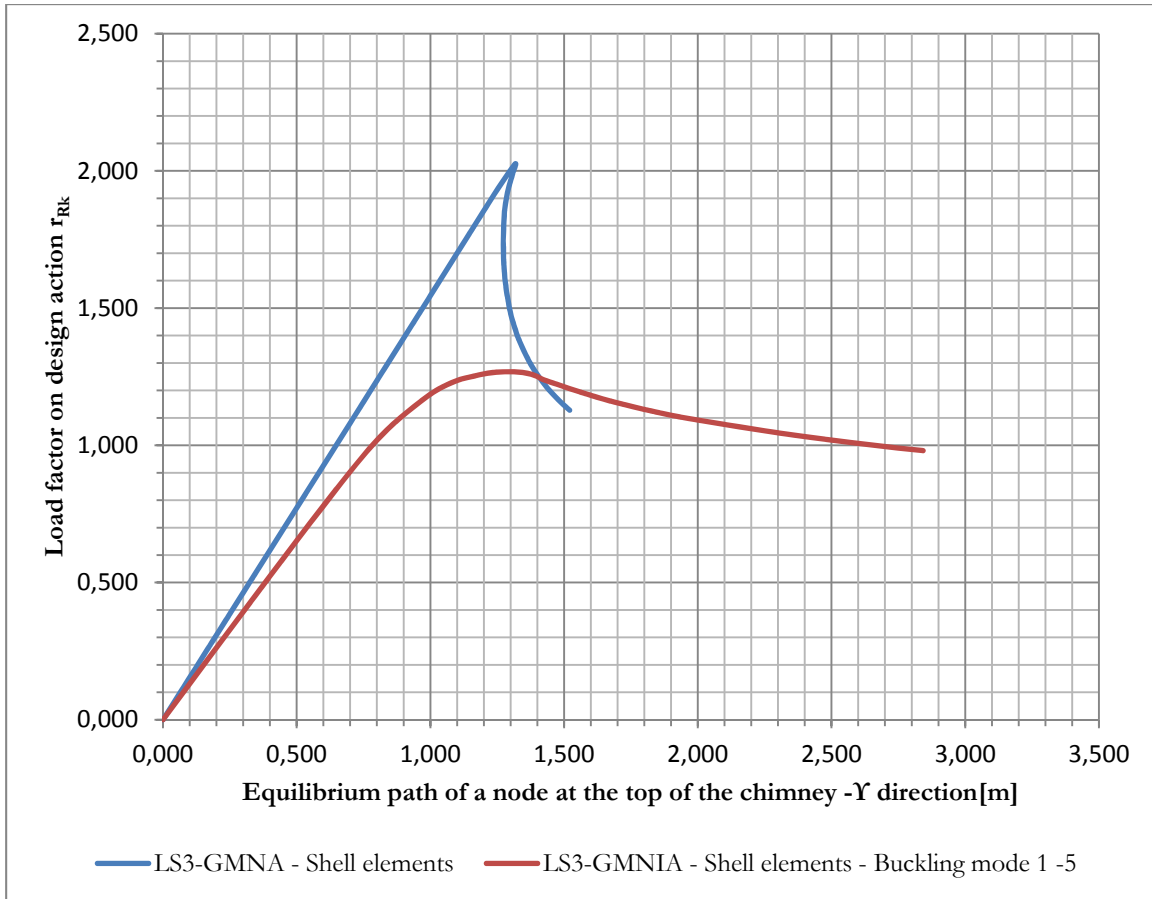


Figure 30: Equilibrium path of a node at the top of the chimney - GMNA and GMNIA analyses

EN1993-1-6 defines that there should be check for the reliability of the figures identified numerically defined endless elasto-plastic buckling resistance ratio $r_{R,GMNIA}$. From checks, the calibration coefficient k_{GMNIA} is extracted. The calculated value of the ratio should not exceed 1.0. Also, the coefficient should not take values beyond:

$$0.8 \leq k_{GMNIA} \leq 1.2$$

For the purposes of this study, the calibration coefficient is taken conservatively equal to:

$$k_{GMNIA} = 0.9$$

Thus the ratio of the ratio of the characteristic buckling resistance is:

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} \cdot r_{R,GMNIA} = 0.9 \cdot 1.268 = 1.141$$

And so the design resistance ratio to buckling r_{Rd} is:

$$r_{Rd} = 1.141 / 1.1 = 1.037 > 1$$

So the chimney is safe against buckling.

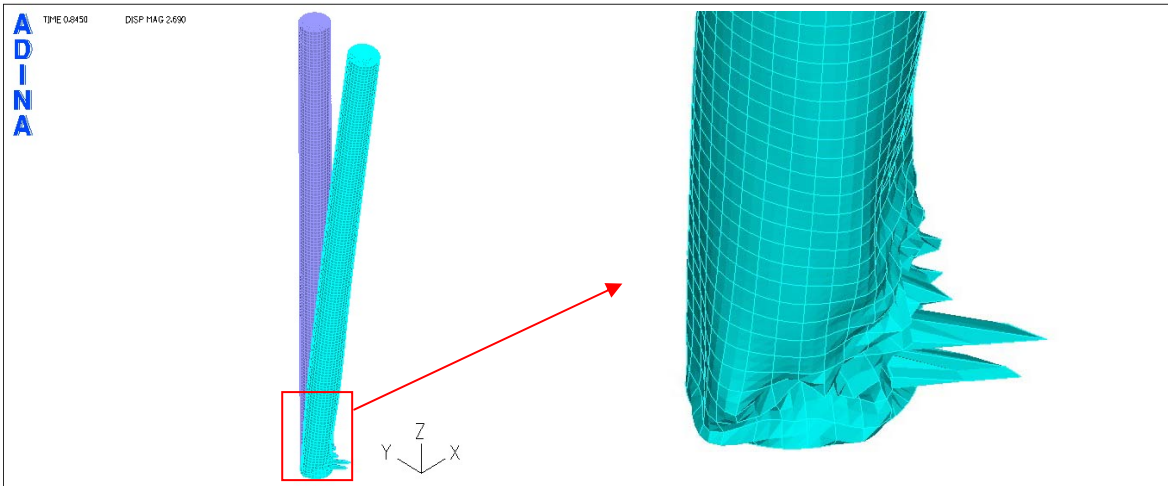


Figure 31: Deformation of the chimney by GMNIA analysis

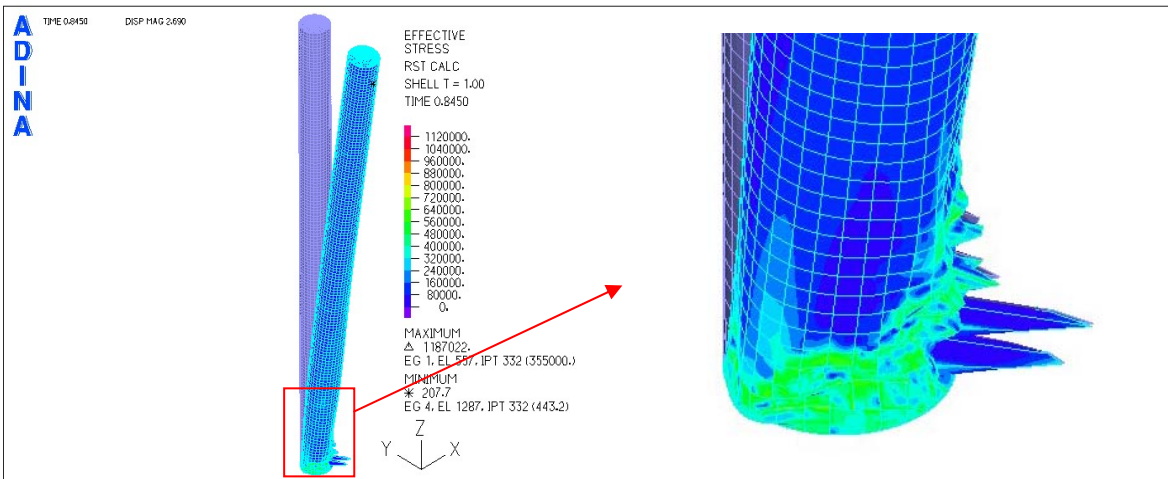


Figure 32: Maximum stresses in the chimney by GMNIA analysis

It is evident from the results, that from GMNIA analysis lower safety factor is received, than from GMNA analysis. Defects in the shell apparently play an important role in the stability of the chimney.

The choice of the most relevant defects, which will result in lower safety factor, is a major matter for a GMNIA analysis. EN1991-1-6 provides that the choice of defects should be performed after a test procedure.

For purposes of this work, parametric analysis is performed for the selection of an adequate number buckling modals. Regarding the latter, it should be noted that the number of modals, which will be taken into account in the analysis, is not always depending on the disfavour of the results. It is very likely, in case of combination of buckling modals, that the deformations will cancel each other, due to sign difference. For this reason, it was considered appropriate to investigate whether in this case is appropriate to take a number of buckling modals or should each one individually.

In *Figure 33* the equilibrium paths of a node at the top of the chimney for GMNIA analysis are presented. For the chimney two extra different GMNIA analyses were performed considering separately the first and second buckling modal.

As can be seen, in this case the combination of the first five buckling modals seems to result in the smallest buckling safety factor. Unlike, when the GMNIA analysis was performed for individually the first and second buckling modals, the safety factor seems to have received higher values.

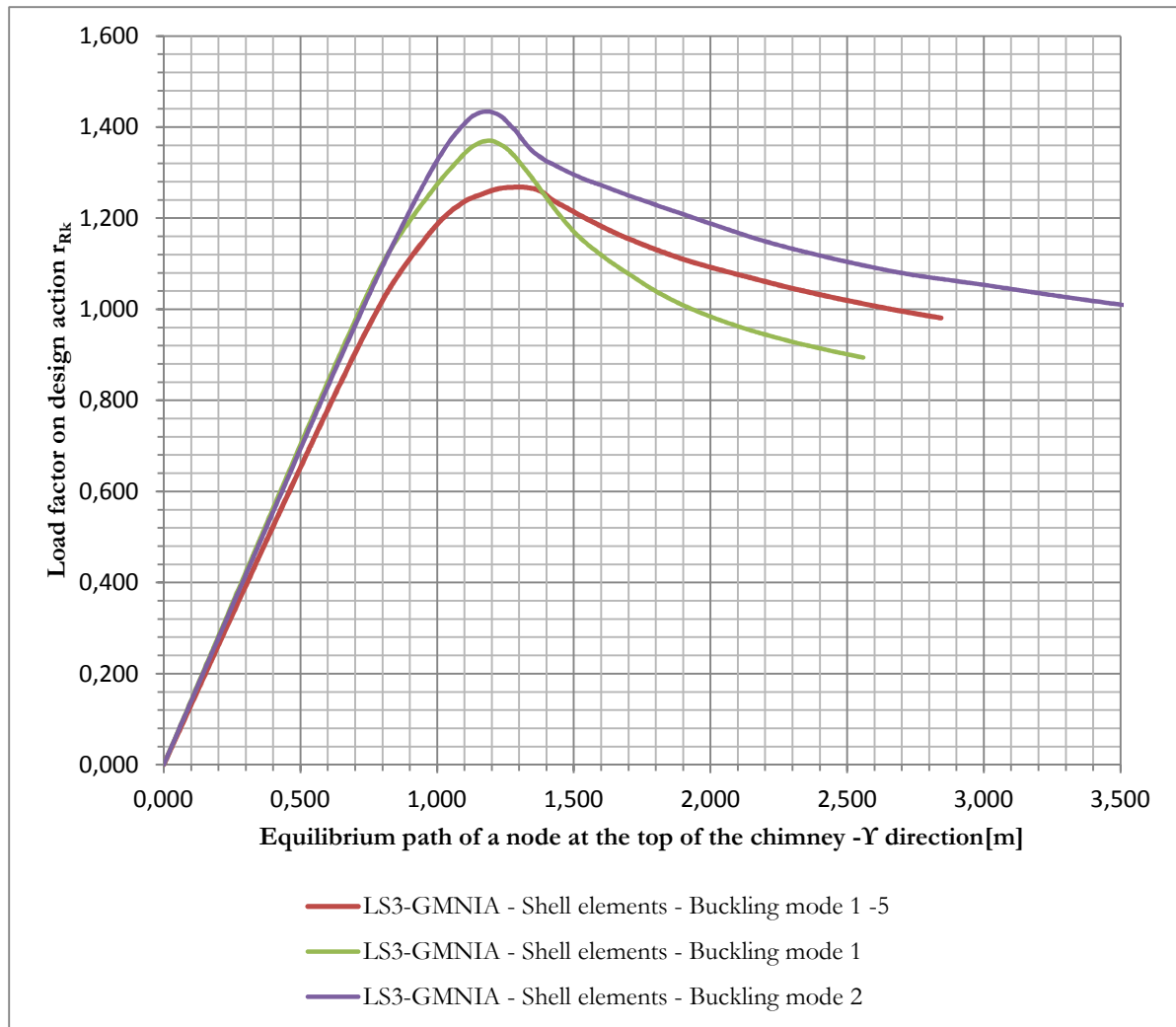


Figure 33: Equilibrium path of a node at the top of the chimney received by GMNIA analysis for a different number of buckling modals

4.4. Fatigue (LS4)

As set out in Section 3, the chimney should be evaluated against turbulent excitation. Based on the calculations, the range of vibration calculated for the chimney, under the influence of turbulent excitation, is 2.69m. According to EN1993-3.2, this range is prohibitive. For this reason, measures to reduce the range of vibration should be taken. For the reduction of the range of vibration, aerodynamic devices and / or dampers can be used. If aerodynamic devices are used, the maximum range of vibration should be calculated in accordance with the method 1. However, as described in Section 3, this method underestimates the range of vibration. So, in the example the results emerged from the second method are used. For this reason, in order to reduce the transverse vibration range, tuned mass damper is placed on the chimney (TMD).

But, for purposes of this study and for comparison reasons, the reduction of the transverse vibration range using aerodynamic equipment is estimated. So, if the method 1 (for the calculation of the maximum vibration range) gave realistic results, then by the formula:

$$a = \left(1 - \frac{P_s}{h}\right)^3$$

and under the assumption that spiral spoiler will be mounted on the 1/3 of the top height of the chimney, then:

$$a = \left(1 - \frac{20}{60}\right)^3 = 0.30$$

and therefore the aerodynamic device would provide a reduction in the maximum range of vibration equal to 70%. Therefore, the final range of vibration, based method 1, would be:

$$y_{Fj} = 0.269 \cdot 0.3 \cdot b = 0.301m$$

So, assuming that the chimney is of reliability class 2, then the maximum range of vibration due to turbulent agitation should not be larger than $0.10 \cdot b = 0.37m$. Therefore the maximum range of vibration satisfies the restrictions.

Finally, however, it is considered that damper will be placed in the chimney, which will add to the chimney damping equal to $\delta_s = 0.3$. Therefore the Struton number becomes:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} = 39.105$$

and

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = 0.014$$

therefore, the maximum range of vibration, according to method 2 of EN1991-1-4, is:

$$y_{F,\max} = 0.051m < 0.37m$$

Based on this range, the inertial force, due to turbulent agitation, is calculated in accordance with Annex E of EN1991-1-4.

The loads are applied to two static simulants. The check for fatigue takes place at the base of the chimney in accordance with EN1993-1-9. For the chimney a lifetime of $T = 25$ years is used. The chimney is welded at its base on a frontal plate with a 40mm thick front-butt T welding.

According to the case (20) in Table C.1 of EN1993-3-2, the weld should be checked at two points, i.e. at the upper point of the weld which in contact with the shell of the chimney (20mm thick) and bottom point, which is in contact with the frontal plate.

Design against fatigue using stresses (LA) or numerical analysis (GNA) is considering the variation of the stresses due to turbulent stimulation. EN1993-1-6 does not provide any specific instructions regarding the LA or GNA analysis.

The calculation of the design stress at the base of the chimney is performed by calculating the design moment for S.S.2 and calculation of average stress design by S.S.1. In **Table 9** are presented the values of the above mentioned, as received from the two static simulants.

Table 9: Stress magnitudes used in the check against fatigue for the two simulants.

	Simulant 1	Simulant 2
$\Delta\sigma_c$ [MPa]	33.076	---
M_{sd} [kNm]	---	2138

Since the wind direction is random, variation in stresses for simulant 2 is taken as twice the maximum stress developed in one wind direction:

$$\Delta\sigma_s = \frac{2 \cdot M_{sd}}{w} = \frac{2 \cdot M_{sd}}{\pi \cdot r^2 \cdot t} = 30.652 \text{MPa}$$

The number of cycles of vibration due to turbulent agitation (N) is calculated, and from the curves of fatigue capacity (EN1993-1-6) the coefficient k is received equal to:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 = 2.672$$

The check against fatigue is performed at the top and bottom of the weld

- Check of the upper point of the base welding

For high-quality performance welding at both sides of the plate, the matter of detail are:

$$\Delta\sigma_c = 125MPa$$

The determination of safety against fatigue due to turbulent excitation is as follows:

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_s = 1.20 \cdot 2.672 \cdot 33.076MPa = 106.055MPa \leq \frac{125MPa}{1.15} = 108.696MPa$$

So the criterion is satisfied.

- Check of the bottom point of the base welding

The bottom point of the welding is designed in accordance with the detail (11.2) of Table C.1. So, for continuous transverse welding of the shell to the base plate and welding quality 5, the category of detail is:

$$\Delta\sigma_c = 90MPa$$

The variation of acting stresses is:

$$\Delta\sigma_s = 30.652 \cdot \frac{20}{40} = 16.538MPa$$

Thus, the determination of safety against fatigue due to turbulent excitation is as follows:

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_s = 1.20 \cdot 2.672 \cdot 16.538MPa = 53.027MPa \leq \frac{90MPa}{1.15} = 78.261MPa$$

So the criterion is satisfied.

As can be seen, the check against fatigue of the connections plays an important role in the design of the chimney. From the calculations, can be determined that the welding at the base of the chimney meets the security checks at the rate of only 1.024 (upper welding point check). In order to increase the rate of disuse the weld thickness of the shell at the base with the front plate should be increased.

4.5. Serviceability limit state check

The limit value of deformation in the direction of the wind at the top of a self-standing chimney, due to the frequent repetition of the wind load, is estimated by:

$$\delta_{\max} = \frac{h}{50}$$

where h is the height of the chimney.

The regular value of the wind results from the design value multiplied by the design factor $\psi_1=0.6$. So, the load combination for the serviceability limit state is:

$$1.00G + 0.6W$$

The values of the top displacement of the chimney for the load combination above, for both static simulants, are shown in *Table 10*. Respectively, in *Figures 34 and 35* the deformation of the chimney is presented in magnification.

Table 10: Top displacements of the chimney, based on the load combination for serviceability limit state.

Absolut value of the chimney's top displacement [m]	
S.S.1	0.259
S.S.2	0.258

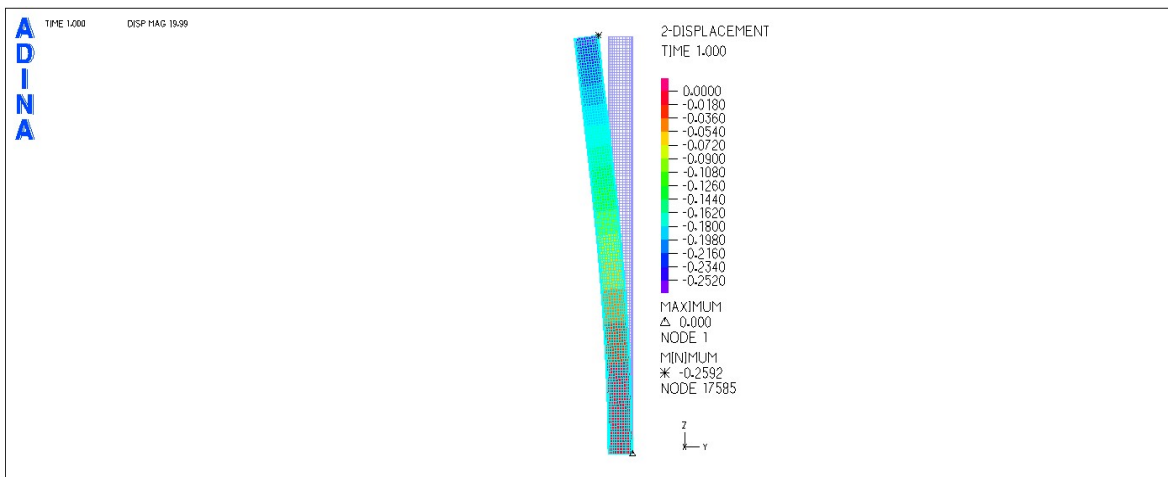


Figure 34: Chimney's deformation for the frequent magnitude of the wind pressure for S.S.1

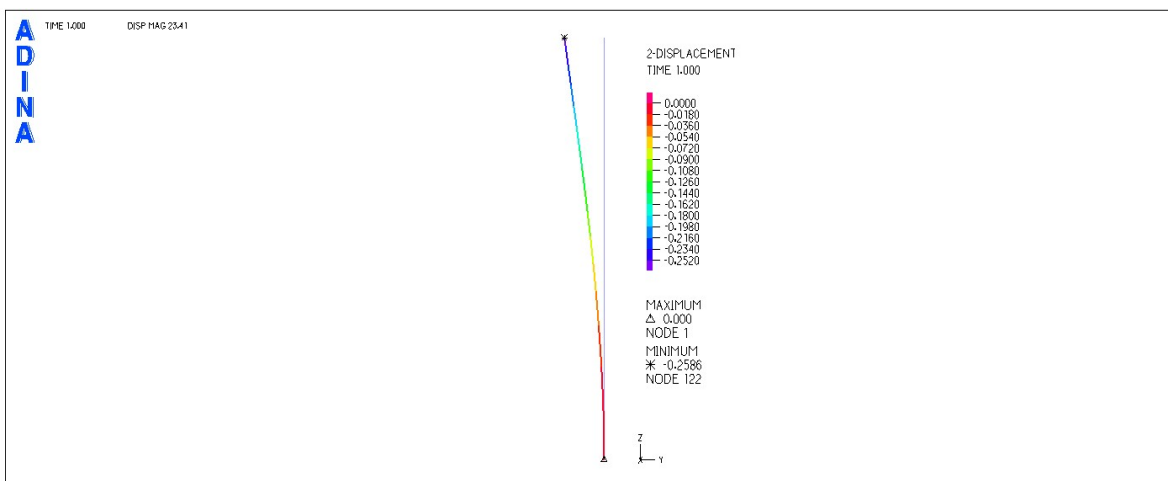


Figure 35: Chimney's deformation for the frequent magnitude of the wind pressure for S.S.2

The maximum allowed deformation in the direction of the wind is:

$$\delta_{\max} = \frac{60m}{50} = 1.20m$$

Obviously:

$$\delta = 0.259m < \delta_{\max} = 1.20m$$

so the travelled distances due to wind load is within the limits.

5. Conclusions

In the present thesis was studied the simulation and design process of a steel chimney with diameter 3.735m and height 60m.

As proved in this example, the stability of the chimney appears to be more affected by wind loads rather than the seismic loads. Because of its dimensions, the chimney seemed to be affected more by the periodic diffusion of the vortexes due to wind flow. The maximum range of vibration due to turbulent excitation calculated did not satisfy the constraints of EN1993-3.2. So, the chimney was supposed to be equipped with a tuned mass damper at the top, which will provides damping $\delta_s = 0.3$. After consideration of the additional damping, due to damper, the maximum range of vibration, due to turbulent agitation, decreased dramatically.

From the limit state checks set by EN1993-1-6, was shown that the formulas proposed in the same article give the smallest safety factor for the respective checks by nonlinear analyses.

From the non-linear analyses performed, was shown that the GMNIA analysis gives the smallest safety factor for design against ultimate limit state. Through GMNIA analysis can be simulated possible defects in the shell of the chimney. As shown, possible defects in the shell play a key role in the stability of the chimney. Both the behaviour and the safety factors resulting from GMNIA and GMNA analyses differ. This verifies the influence of defects on the resistance and behaviour of steel chimneys.

Finally, it appeared that for the check of the chimney, the static stimulant with bar finite elements is not considered to be appropriate. Because the elements used, defects on the shell of the chimney can not be taken into account. It is also not possible in the analysis to occur failures due to local buckling in the shell of the chimney. So, it's not advisable to use static stimulant with bar elements for modelling chimneys, since it seemed to overestimate the safety coefficient against limit state failure.

6. References

- [1] CICIND, *Model Code for Steel Chimneys*, Revision 1 – December 1999
- [2] Dyrbye, C., Hansen, S.O. *Wind Loads on Structures*. Wiley, New York, 1996.
- [3] EN 1993-1-6 Eurocode 3: Part 3.2, Towers, masts and chimney -Chimneys.
- [4] EN 1993-1-6 Eurocode 3: Part 1.9, Fatigue.

- [5] EN 1991-1-4 Eurocode 1: Wind loads
- [6] EN 1991-1-5 Eurocode 1: Thermal loads
- [7] EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
- [8] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.
- [9] Zdravkovich, M.M, Kawecki J. *Cross-wind vibration of steel chimney – A new case history*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95 (2007) 1166-1175.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ	2
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ	2
1.2.1. Υλικό κατασκευής καπνοδόχων.....	2
1.2.2. Επικάλυψη καπνοδόχων.....	3
1.2.3. Κανονισμοί ρύπανσης.....	3
1.2.4. Σχεδιασμός καπνοδόχων	4
1.3. ΤΥΠΟΙ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ	5
1.4. ΟΙ ΨΗΛΟΤΕΡΕΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	6
1.4.1. Οι ψηλότερες καπνοδόχοι στην Ελλάδα	12
1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	14
Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	15
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2.2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	17
2.3. ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ	18
2.4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΙΑΧΥΣΗ	21
2.4.1. Γενικά	21
2.4.2. Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου	22
2.4.3. Ταξινόμηση ευστάθειας ατμόσφαιρας –τάξη διάχυσης.....	22
2.4.4. Ανύψωση πλουμίου	24
2.4.5. Πρόβλεψη σχήματος διάχυσης του πλουμίου.....	26
2.4.6. Παράδειγμα εφαρμογής.....	28
2.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	30
ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ	31
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
3.2. ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	32
3.3. ΕΙΔΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ	34
3.3.1. Επιφανειακές θεμελιώσεις	34
3.3.2. Πασσαλοθεμελίωση	35
3.3.3. Θεμελίωση σε υποδομές ή με στήριξη σε μεταλλική κατασκευή	36
3.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ	37
3.5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ	38
3.6. ΚΟΣΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	39
3.7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	40
ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ	41
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	41
4.1.1. Η σημασία των φορτίων ανέμου για τις καπνοδόχους	41
4.1.2. Ανεμοπίεση.....	42
4.1.3. Πιέσεις ανέμου	42
4.1.4. Δυνάμεις ανέμου	45
4.1.4.1. Οπισθέλκουσα δύναμη	45
4.1.4.2. Δυνάμεις άνωσης.....	46
4.1.5. Αεροδυναμική και αεροελαστική αστάθεια	46
4.1.5.1. Ταλάντωση λόγω διάχυσης των δινών	47
4.1.5.2. Καλπάζουσα αστάθεια.....	49
4.1.1. Υπολογισμό ανεμοπίεση με βάση τα κείμενα των Ευρωκωδίκων.....	50
4.2. ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΑΝΕΜΟΥ W_E	52
4.2.1. Πίεση ταχύτητας αιχμής.....	53

4.2.2.	Μέσος άνεμος v_m	54
4.2.2.1.	Μεταβολή καθ' ύψος	54
4.2.2.2.	Επιρροή της τραχύτητας και του ανάγλυφου του εδάφους c_f , c_o	54
4.2.3.	Στροβιλισμός ανέμου	56
4.2.4.	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης c_{pe} - κυκλικοί κώνδυλοι (καπνοδόχοι)	56
4.3.	ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΝΕΜΟΥ - ΚΥΚΛΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ (ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΙ)	61
4.4.	ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ.....	65
4.4.1.	Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα n_1	65
4.4.2.	Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα $n_{1,0}$	65
4.4.3.	Η θεμελιώδης ιδιομορφή	66
4.4.4.	Ισοδύναμη μάζα	66
4.4.5.	Λογαριθμική μείωση της απόσβεσης	67
4.5.	ΣΤΡΟΒΙΛΩΔΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	69
4.5.1.	Στροβιλώδης διέγερση.....	69
4.5.1.1.	Κριτήρια στροβιλώδους διέγερσης	69
4.5.1.2.	Κρίσιμη ταχύτητα ανέμου $v_{crit,i}$	70
4.5.1.3.	Αριθμός Strouhal St.....	70
4.5.1.4.	Αριθμός Scruton Sc	70
4.5.1.5.	Αριθμός Reynolds Re	71
4.5.1.6.	Δράση στροβιλώδους διέγερσης.....	71
4.5.1.7.	Υπολογισμός του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης	71
4.5.2.	Καλπάζουσα αστάθεια.....	74
4.5.2.1.	Κρίσιμη ταχύτητα ανέμου	75
4.6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	76
ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	77	
5.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	77
5.2.	ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	78
5.2.1.	Ελαστικό φάσμα απόκρισης– Φάσμα σχεδιασμού	78
5.2.2.	Προσομοίωση με χρονοϊστορία	81
5.2.3.	Σεισμικοί συνδυασμοί	82
5.3.	ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ	82
5.3.1.	Συντελεστής σπουδαιότητας.....	82
5.3.2.	Σεισμική μάζα	83
5.3.3.	Ακαμψία	83
5.3.4.	Απόσβεση	83
5.3.5.	Συντελεστής συμπεριφοράς	83
5.1.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ	85	
6.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	85
6.2.	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	86
6.3.	ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	89
6.3.1.	Τάση διαρροής.....	89
6.3.2.	Μέτρο ελαστικότητας.....	89
6.4.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ	91	
7.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ.....	91
7.2.	ΓΕΝΙΚΑ	93
7.3.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	95
7.3.1.	Τιμές σχεδιασμού του γεωμετρικού αρχείου	95
7.3.2.	Γεωμετρικές ανοχές και ατέλειες	95

7.3.3.	Συνοριακές συνθήκες κελύφους.....	96
7.4.	ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	96
7.4.1.	Οριακές καταστάσεις αστοχίας.....	96
7.5.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΕΛΥΦΩΝ	99
7.5.1.	Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)	100
7.5.2.	Οριακή κατάσταση πλαστικότητας σε ανακύλιση (LS2)	102
7.5.3.	Οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3)	103
7.5.4.	Οριακή κατάσταση κόπωσης (LS4).....	116
7.6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ		119
8.1.	ΓΕΝΙΚΑ	120
8.2.	ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	120
8.2.1.	Δράσεις και επιρροή του περιβάλλοντος	122
8.2.1.1.	Μόνιμες δράσεις	122
8.2.1.2.	Μεταβλητές δράσεις.....	122
8.2.1.2.1.	Ωφέλημα φορτία	122
8.2.1.2.2.	Φορτία ανέμου.....	122
8.2.1.2.3.	Εσωτερικές πιέσεις.....	122
8.2.1.2.4.	Θερμικές δράσεις	122
8.2.1.2.5.	Φορτία χιονιού	123
8.2.1.2.6.	Σεισμικές δράσεις.....	123
8.2.1.2.7.	Πυρκαγιά	123
8.2.1.2.8.	Χημικές δράσεις	123
8.2.2.	Έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας.....	123
8.2.3.	Γεωμετρία	124
8.3.	ΥΛΙΚΑ.....	124
8.3.1.	Χάλυβες κατασκευής	124
8.4.	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΚΕΙΑ – ΔΙΑΒΡΩΣΗ	124
8.5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	126
8.5.1.	Προσομοίωση γεωμετρίας καπνοδόχου.....	126
8.5.2.	Υπολογισμός συνισταμένων τάσεων και εντάσεων	126
8.5.3.	Ατέλειες.....	127
8.5.4.	Καθολική ανάλυση.....	127
8.6.	ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	128
8.6.1.	Γενικά	128
8.6.2.	Κέλυφος	128
8.7.	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ.....	129
8.7.1.	Γενικά	129
8.7.2.	Κοχλιωτές συνδέσεις	129
8.8.	ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	130
8.8.1.	Γενικά	130
8.8.2.	Ειτροπές.....	130
8.9.	ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	131
8.9.1.	Γενικά	131
8.9.2.	Κόπωση λόγω στροβιλώδους διέγερσης.....	131
8.9.3.	Αντοχή σε κόπωση λόγω υψηλών κύκλων ταλάντωσης.....	131
8.9.4.	Αντοχή σε κόπωση λόγω χαμηλών κύκλων	131
8.9.5.	Έλεγχος δυσμέλειας της κόπωσης.....	132
8.10.	ΜΕΤΡΑ ΚΑΤΑ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΡΟΒΙΛΩΔΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ	133
8.10.1.	Αεροδυναμικές συσκευές	133
8.10.2.	Αποσβεστήρες.....	136
8.11.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	140
9.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ.....	140
9.2. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	142
9.2.1. Συνθήκες στήριξης.....	142
9.2.2. Υλικό κατασκευής.....	142
9.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	144
9.3.1. Μόνιμα φορτία.....	144
9.3.2. Φορτία ανέμου.....	145
9.3.2.1. Υπολογισμός πίεσης ανέμου.....	145
9.3.2.2. Υπολογισμός δύναμης ανέμου.....	152
9.3.2.3. Στροβιλώδης διέγερση και αεροελαστική αστάθεια.....	161
9.3.3. Σεισμικές δράσεις.....	171
9.3.4. Θερμοκρασιακές δράσεις.....	174
9.4. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ADINA	175
9.4.1. Υπολογισμός ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων.....	176
9.4.2. Έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας.....	180
9.4.2.1. Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1).....	183
9.4.2.1.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων.....	183
9.4.2.1.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA και GMNA.....	186
9.4.2.2. Οριακή κατάσταση πλαστικότητας σε ανακύλιση (LS2).....	190
9.4.2.2.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων.....	190
9.4.2.2.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA και GMNA.....	192
9.4.2.3. Οριακή κατάσταση λυγισμού(LS3).....	192
9.4.2.3.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων.....	192
9.4.2.3.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις αναλύσεις MNA και LBA ..	202
9.4.2.3.3. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιώντας την ανάλυση GMNIA.....	208
9.4.2.4. Κόπωση (LS4).....	212
9.4.3. Έλεγχος σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.....	218
9.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	219
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	220
10.1. ΓΕΝΙΚΑ	220
10.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	221
10.3. ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΑ ΚΕΙΜΕΝΑ	224
10.4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	224

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.2: Καπνοδόχος στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό GRES-2 - Καζακιστάν (GRES-2 Power Plant). [3].....	8
Εικόνα 1.3: Καπνοδόχος στο λατομείο εξόρυξης χαλκού "Anaconda" – Μοντάνα, ΗΠΑ. [3].....	9
Εικόνα 1.4: Καπνοδόχος "Inco Superstack" στο εργοστάσιο μεταλλουργίας χαλκού "Inco Copper Cliff".- Καναδά [3].....	10
Εικόνα 1.5: Καπνοδόχος "Γrbovlje" στην κοιλάδα Sava – Σλοβενία. [3].....	11
Εικόνα 1.6: Καπνοδόχος στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό "Drax" – Ηνωμένο Βασίλειο. [3].....	11
Εικόνα 1.7: Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός στο Αμύνταιο με την υψηλότερη καπνοδόχο στην Ελλάδα, ύψους 210m. [4].....	13
Εικόνα 1.8: Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Αγίου Δημητρίου με τρεις καπνοδόχους ύψους 174m. [4].....	13
Εικόνα 2.1: Βιομηχανική περιοχή κατεργασίας χάλυβα στο Έσσεν, Γερμανία. Η περιοχή απαρτίζεται με πάνω από 50 καπνοδόχους[4].....	16
Εικόνα 2.2: Αριστερά, Καπνοδόχος ύψους 360m στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό καύσης λιγνίτη στην Σλοβενία. Δεξιά, Καπνοδόχος ύψους 343m και διαμέτρου 10m σε ηλεκτροπαραγωγό σταθμό στη Ισπανία ^[4]	17
Εικόνα 3.1: Κατασκευή θεμελίωσης 200m καπνοδόχου στην Νότια Αφρική.....	39

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση βιομηχανικών καπνοδόχων.[1]	6
Σχήμα 2.1: Κατανομή της συγκέντρωσης σε σχέση με την παράμετρο $dy(x)$ [m].....	19
Σχήμα 2.2: Κατανομή στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με βάση το Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης	21
Σχήμα 2.3: Πρόβλεψη συμπεριφοράς αέριας μάζας σε σχέση με την κατανομή της θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα- χαρακτηρισμός σταθερότητας της ατμόσφαιρας.	23
Σχήμα 2.4: Ανύψωση καυσαερίων-πλουμίου μετά την έξοδο από την καπνοδόχο[2]	24
Σχήμα 2.5: Διαμόρφωση του σχήματος εμπροσθίου αερίου νέφους ανάλογα με την κατανομή της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα.....	27
Σχήμα 2.6: Νομογράφημα για το υπολογισμό του ύψους της καπνοδόχου ^[4]	29
Σχήμα 3.1: Ειδικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες σε θεμελιώσεις καπνοδόχων με μειωμένες αντοχές εδάφους	35
Σχήμα 3.2: Τυπική τομή θεμελίωσης καπνοδόχου με πασσάλους.....	36
Σχήμα 4. 1: Η αλλαγή της ροής γύρω από κυκλικό κύλινδρο αναλόγως της τιμής του $\alpha\text{r.Reynolds}$ [5]	43
Σχήμα 4. 2: Κατανομή του συντελεστή πίεσης γύρω από την επιφάνεια κυκλικού κυλίνδρου για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds [4]	44
Σχήμα 4. 3: Οπισθέλκουσα δύναμη F_D	45
Σχήμα 4. 4: Μεταβολές του συντελεστή οπισθέλκουσας σε σχέση με τον $\alpha\text{r.Reynolds}$ για κυκλικό κύλινδρο ο οποίος εκτίθενται σε ομοιόμορφη στρωτή ροή. [5].....	45
Σχήμα 4.5: Δυνάμεις άνωσης F_L	46
Σχήμα 4. 6: Εξάπλωση των στροβιλισμών (δινών) πίσω από ένα κυκλικό κύλινδρο, Courtesy, Cesareo de La Rosa Siqueira.....	47
Σχήμα 4. 7: Μεταβολή του αριθμού Stouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κυκλικό κύλινδρο και στρωτή ροή.[2]	48
Σχήμα 4. 8: Το φαινόμενο Lock-in.[2]	49
Σχήμα 4. 9: Εγκάρσιος καλπασμός.[2]	50
Σχήμα 4. 10: Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z)$ για $c_o(z)=1,0$ και $k_I=1,0$	53
Σχήμα 4. 11: Κατανομή πιέσεων για κυλίνδρους για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων	58
Σχήμα 4. 12: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας φ και της λυγηρότητας λ	59
Σχήμα 4. 13: Διαδικασία υπολογισμού της συνολικής δύναμης ανέμου.....	62
Σχήμα 4. 14: c_{s,c_d} για καπνοδόχους από χάλυβα με επένδυση και διάφορες τιμές του δ_s σύμφωνα με τον	63
Σχήμα 4. 15: c_{s,c_d} για καπνοδόχους από χάλυβα χωρίς επένδυση και διάφορες τιμές του δ_s σύμφωνα με τον63	
Σχήμα 4. 16: Συντελεστής δύναμης $c_{f,0}$ για κυκλικούς κυλίνδρους χωρίς ροή ελευθέρων άκρων για διάφορες ισοδύναμες τραχύτητες k/b	64
Σχήμα 4. 17: Γεωμετρικοί παράμετροι για καπνοδόχους.....	65
Σχήμα 4. 18: Θεμελιώδης καμπτική ιδιομορφή για κτίρια, πύργους και καπνοδόχοι μορφής προβόλου.....	66
Σχήμα 5.1: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας στη Ελλάδα.....	80

Σχήμα 5.2: Φάσματα σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση, για τις κατηγορίες εδάφους A-E, απόσβεση 5%, ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II και συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I=1,2$, κατά EN1998-1.	81
Σχήμα 6.1: Προφίλ θερμοκρασίας στις καπνοδόχους [6]	86
Σχήμα 6.2: Κατανομή θερμοκρασίας σε στοιχείο με δύο στρώσεις [2]	88
Σχήμα 6.3: (α) Χάρτης μέγιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σιιά T_{max} , (β) Χάρτης ελάχιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σιιά T_{min} [1]	88
Σχήμα 7.1: κατανεμημένες εσωτερικές δυνάμεις σε κελύφη εκ περιστροφής. (α) Ορθές και διατμητικές δυνάμεις, (β) Τέννουσες δυνάμεις, (γ) Ροπές κάμψεως και συστροφής.	92
Σχήμα 7.2: Γεωμετρία κυλίνδρου, μεμβρανικές τάσεις και συνισταμένες αυτών	101
Σχήμα 7.3: Μέτρηση των διαμέτρων για την εκτίμηση της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα	104
Σχήμα 7.4: Τυχηματική εκκινητικότητα κα επιδιωκόμενη μετάθεση σε ένωση	105
Σχήμα 7.5: Μετρίσεις του βάθους Δw_0 αρχικών πτυχώσεων	107
Σχήμα 7.6: Καμπύλη κύρωσης κελυφών	108
Σχήμα 7.7: Παραδείγματα ομάδων αλληλεπίδρασης των σχετικών συνιστωσών μεμβρανικών τάσεων	110
Σχήμα 7.8: Ορισμός του λόγου πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} και του λόγου κρίσιμης αντίστασης σε λυγισμό r_{Ref} , που προκύπτουν από καθολικές αναλύσεις MNA και LBA	111
Σχήμα 7.9: Ορισμός της αντίστασης λυγισμού από καθολική ανάλυση GMNIA.	113
Σχήμα 8.1: Κατηγοριοποίηση καπνοδόχων και περιγραφή παρελκόμενων	121
Σχήμα 8.2: (α) Καπνοδόχος με ελάσματα σε σπειροειδή διάταξη (strakes) (β) Καπνοδόχος με αεροδυναμική συσκευή shrouds	134
Σχήμα 8.3: Καπνοδόχος με σπειροειδή αεροτομή για μείωση του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης.	135
Σχήμα 8.4: (α) Αποσβεστήρας TMD's "τύπος 1" (β) ελατήριο σύνδεσης του μεταλλικού δακτύλιου με το κέλυφος της καπνοδόχου	137
Σχήμα 8.5: Αποσβεστήρας TLD	138
Σχήμα 8.6: (α) Αποσβεστήρας TLD's τοποθετημένος στο κέντρο ομάδας καπνοδόχων (β) Αποσβεστήρας TLD's τοποθετημένος στη άνω πλατφόρμα της καπνοδόχου	138
Σχήμα 9.1: Διαστάσεις καπνοδόχου	141
Σχήμα 9.2: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης υλικού	143
Σχήμα 9.3: Συντελεστής αιχμής k_r	153
Σχήμα 9.4: Παράδειγμα εφαρμογής του μήκους συσχέτισης για την πρώτη ιδιομορφή	164
Σχήμα 9.5: Τιμές του συντελεστή αιχμής k_r συναρτήσει του λόγου αεροδυναμικής απόσβεσης	169
Σχήμα 9.6: Φάσματα σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση, για τις κατηγορίες εδάφους A, απόσβεση 5%, ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I και συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I=1.4$, κατά EN1998-1	172
Σχήμα 9.7: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους	175
Σχήμα 9.8: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων ραβδωτών στοιχείων	176
Σχήμα 9.9: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 1 ^η ιδιομορφή	177
Σχήμα 9.10: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 2 ^η ιδιομορφή	177
Σχήμα 9.11: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 3 ^η ιδιομορφή	178
Σχήμα 9.12: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 4 ^η ιδιομορφή	178
Σχήμα 9.13: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 5 ^η ιδιομορφή	178
Σχήμα 9.14: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 1 ^η ιδιομορφή	179
Σχήμα 9.15: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 2 ^η ιδιομορφή	179
Σχήμα 9.16: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 3 ^η ιδιομορφή	179

Σχήμα 9.17: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 4 ^η ιδιομορφή.....	180
Σχήμα 9.18: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 5 ^η ιδιομορφή.....	180
Σχήμα 9.19: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον πρώτο συνδυασμό φορτίσεων. Τάση κατά von Mises = 329.420 MPa.....	181
Σχήμα 9.20: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον πρώτο συνδυασμό φορτίσεων. Μέγιστη μετατόπιση 0.97cm.....	181
Σχήμα 9.21: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον δεύτερο συνδυασμό φορτίσεων (τυχηματικό). Τάση κατά von Mises = 120.212 MPa.....	182
Σχήμα 9.22: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον δεύτερο συνδυασμό φορτίσεων (τυχηματικό).. Μέγιστη μετατόπιση 0.36cm	182
Σχήμα 9.23: Αποτελέσματα ανάλυσης LS1 στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους.	183
Σχήμα 9.24: Διαγράμματα και μέγιστες τιμές εντατικών μεγεθών για τις χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων στο στατικό προσομοίωμα 2 για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS1	185
Σχήμα 9.25: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για αναλύσεις MNA και GMNA και για τα δύο στατικά προσομοιώματα.	187
Σχήμα 9.26: Εξέλιξη παραμορφώσεων της καπνοδόχου με ανάλυση GMNA σε διακριτά σημεία (του δρόμου ισορροπίας)	189
Σχήμα 9.27: Ισοστατικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=0.913$ - πριν την διαρροή του χάλυβα	189
Σχήμα 9.28: Ισοστατικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.048$ - μετά την διαρροή του χάλυβα	189
Σχήμα 9.29: Ισοστατικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.941$ - πριν ανάπτυξη τοπικού λυγισμού.....	190
Σχήμα 9.30: Ισοστατικές καμπύλες και παραμορφώσεις για ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.128$ - μετά την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού (στο τέλος της ανάλυσης).....	190
Σχήμα 9.31: Διαγράμματα και μέγιστες τιμές εντατικών μεγεθών για τις χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων στο στατικό προσομοίωμα 2 για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS2	191
Σχήμα 9.32: Μετατροπή βαθμιδωτού κυλίνδρου σε ισοδύναμο κύλινδρο. (α) κύλινδρος με βαθμιδωτά μεταβλητό πάχος τοιχώματος, (β) ισοδύναμος κύλινδρος αποτελούμενος από τρία τμήματα, (γ) ισοδύναμος κύλινδρος σταθερού πάχους τοιχώματος	196
Σχήμα 9.33: Ορισμός του λόγου πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rp1} και του λόγου κρίσιμης αντίστασης σε λυγισμό r_{Rc} , που προκύπτουν από καθολικές αναλύσεις MNA και LBA.....	203
Σχήμα 9.34: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση MNA και για τα δύο στατικά προσομοιώματα.	204
Σχήμα 9.35: 1 ^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους -ανάλυση LBA.....	206
Σχήμα 9.36: 2 ^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους -ανάλυση LBA.....	206
Σχήμα 9.37: 3 ^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.	207
Σχήμα 9.38: 4 ^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.	207
Σχήμα 9.39: 5 ^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.	207
Σχήμα 9.40: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση GMNA και GMNIA	208
Σχήμα 9.41: Παραμόρφωση στη καπνοδόχο μετά από ανάλυση GMNIA.....	210

Σχήμα 9.42: Μέγιστες τάσεις στη καπνοδόχο μετά από ανάλυση GMNIA	210
Σχήμα 9.43: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση GMNIA για διαφορετικό αριθμό ιδομορφών λυγισμού.	211
Σχήμα 9.44: Λεπτομέρεια βάσης και σημεία ελέγχου σε κόπωση.....	215
Σχήμα 9.45: Υπολογισμός διακύμανσης τάσεων λόγω στροβιλώδους διέγερσης από το Σ.Π.1.....	215
Σχήμα 9.46: Υπολογισμός μέγιστης ροπής βάσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης από το Σ.Π.2.....	215
Σχήμα 9.47: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη ορθών τάσεων.....	216
Σχήμα 9.48: Παραμόρφωση καπνοδόχου για την συχνή τιμή της ανεμοπίεσης με βάση το Σ.Π.1	218
Σχήμα 9.49: Παραμόρφωση καπνοδόχου για την συχνή τιμή της ανεμοπίεσης με βάση το Σ.Π.2	219

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Οι υψηλότερες καπνοδόχοι στο κόσμο ^[3]	7
Πίνακας 1.2: Οι υψηλότερες καμινάδες στη Ελλάδα ^[4]	12
Πίνακας 2.1: Υπολογισμός ύψους πλουμίου με βάση τις σχέσεις Mose-Carson, Briggs και ASME.....	25
Πίνακας 3.1: Μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις εδάφους για θεμελιώσεις καπνοδόχων.....	33
Πίνακας 3.2: Μέγιστα επιτρεπόμενα φορτία πασσάλων σε θεμελιώσεις καπνοδόχων.....	33
Πίνακας 4.1: Χαρακτηρισμός των στροβιλισμών της ροής κατάντη κυκλικού κυλίνδρου σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.[5].....	43
Πίνακας 4.2: Κατηγορία εδάφους και παράμετροι εδάφους.....	55
Πίνακας 4.3: Τυπικές τιμές κατανομής πίεσης κυκλικών κυλίνδρων για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων.....	58
Πίνακας 4.4: Ισοδύναμη τραχύτητα επιφάνειας k	58
Πίνακας 4.5: Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, διατομές με αιχμηρές γωνίες και δικτυωτές κατασκευές.....	60
Πίνακας 4.6: Συντελεστής κ για κατακόρυφους κυλίνδρους με εν σειρά διάταξη.....	64
Πίνακας 4.7: Προσεγγιστικές τιμές της λογαριθμικής μείωσης της δομικής απόσβεσης της θεμελιώδους ιδιομορφής, δ_s	68
Πίνακας 4.8: Σταθερές για τον υπολογισμό των επιδράσεων στροβιλώδους διέγερσης.....	74
Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 179	
Πίνακας 5.2: Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 2.....	80
Πίνακας 5.3: Συντελεστής σπουδαιότητας γ_i	82
Πίνακας 6. 1: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας ($f_y, k, N/mm^2$)[5].....	89
Πίνακας 6. 2: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας ($f_y, k, N/mm^2$)[5].....	90
Πίνακας 7.1: Τύποι ανάλυσης κελυφών.....	99
Πίνακας 7.2: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρου ανοχής απόκλισης από το κυκλικό σχήμα $U_{r,max}$	104
Πίνακας 7.3: Συνιστώμενες τιμές για ανοχές τυχαματικής εκκεντρότητας.....	106
Πίνακας 7.4: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρου ανοχής πτύχωσης U_{max}	107
Πίνακας 7.5: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρων πλάτους ατέλειας πτύχωσης U_{n1} και U_{n2}	115
Πίνακας 8.1: Μερικοί συντελεστές δράσεων επί της καπνοδόχου.....	124
Πίνακας 8.2: Αποδεκτή εξωτερική διάβρωση σε καπνοδόχους.....	125
Πίνακας 8.3: Αποδεκτή εσωτερική διάβρωση σε καπνοδόχους.....	125
Πίνακας 8.4: Προτεινόμενα όρια εύρους εγκάρσιας προς τον άνεμο ταλάντωσης της κορυφής της καπνοδόχου.....	130
Πίνακας 8.5: Μερικοί συντελεστές ασφάλειας για την κόπωση.....	133
Πίνακας 9.1: Αρχικό και απομειωμένο πάχος κατασκευής καθ' ύψος.....	142

Πίνακας 9.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 25° C.....	143
Πίνακας 9.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 50° C.....	143
Πίνακας 9.4: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 5m.....	146
Πίνακας 9.5: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 10m.....	147
Πίνακας 9.6: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 24m.....	148
Πίνακας 9.7: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 36m.....	149
Πίνακας 9.8: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 58m.....	150
Πίνακας 9.9: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 60m.....	151
Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα υπολογισμού δυναμικού συντελεστή c_{sd} με τις διαδικασίες 1 και 2 που προτείνει το EN 1991-1-4, Παράρτημα C.	159
Πίνακας 9.11: Υπολογισμός συνολικής δύναμης ανέμου στην καπνοδόχο.	160
Πίνακας 9.12: Αποτελέσματα επαναλήψεων για τον υπολογισμό του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης με βάση τη μέθοδο 1.	167
Πίνακας 9.13: Μέγιστο εύρος ταλάντωσης στην κορυφή της καπνοδόχου βάσει των μεθόδων 1 και 2 που προτείνει το EN 1991-1-4 και του CICIND- Mode Code.....	169
Πίνακας 9.14: Δυνάμεις και πιέσεις στροβιλώδους διέγερσης F_w	170
Πίνακας 9.15: Ποσοστά συμμετοχής μάζας για τις πρώτες έξι ιδιομορφές της καπνοδόχου.....	173
Πίνακας 9.16: Αδρανειακές δυνάμεις στη κατασκευή λόγω σεισμού.....	174
Πίνακας 9.17: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 50° C.....	174
Πίνακας 9.18: Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες όπως προέκυψαν από τα Σ.Π.1 και Σ.Π.2 αλλά και την σχέση του EN1991-1-4	177
Πίνακας 9.19: Νέο αρχικό και απομειωμένο πάχος καπνοδόχου καθ' ύψος	182
Πίνακας 9.20: Κατά von Mises ισοδύναμη τάση και συντελεστές ασφαλείας ελαστική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με την μέθοδο της μεμβρανικής θεωρίας.....	186
Πίνακας 9.21: Τιμές λόγου πλαστικής αντίστασης r_{Rk} και r_{Rd} για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS1 για αναλύσεις MNA και GMNA.....	188
Πίνακας 9.22: Αποτελέσματα ελέγχων, μέσω τάσεων, για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS3	202
Πίνακας 9.23: Τιμές του λόγου πλαστικής αντίστασης r_{Rk} για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS3 για ανάλυση MNA	203
Πίνακας 9.24: Τιμές του λόγου ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} , για τις πρώτες πέντε ιδιοτιμές λυγισμού για το στατικό προσομοίωμα 1.	204
Πίνακας 9.25: Δυνάμεις και πιέσεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης λαμβάνοντας υπόψη τη εγκατάσταση αποσβεστήρα μάζας στη καπνοδόχο.....	213
Πίνακας 9.26: Ροπή και τάση σχεδιασμού για τον έλεγχο έναντι κοπώσεως.	216
Πίνακας 9.27: Μετατοπίσεις κορυφής καπνοδόχου με βάση το συνδυασμό φορτίσεων για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.....	218

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καπνοδόχοι είναι υψίκορμες κατακόρυφες κατασκευές, μέσω των οποίων τα καυσάεργα (τα οποία κατά κόρον περιέχουν ρυπογόνες ή/και μολυσματικές ενώσεις), τα οποία προέρχονται κυρίως από λέβητες βιομηχανιών, οδηγούνται σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η κατασκευή τους άρχισε από πολύ παλιά με τις αρχικές εφαρμογές να γίνονται από τους Ιταλούς, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν αγωγούς(σωλήνες) μέσα στους τοίχους, για να εξάγουν στην ατμόσφαιρα τους καπνούς από τα αρτοποιεία. Η πραγματική όμως καπνοδόχος, έκανε την εμφάνισή της τον 12^ο αιώνα. Το αρχαιότερο σωζόμενο παράδειγμα καπνοδόχων αποτελεί η Αγγλική καπνοδόχος στο Conisborough στο Γιουρκσάιρ (Yorkshire) η οποία χρονολογείται από το 1185 μ.Χ. Οι αρχικές καπνοδόχοι ήταν κατασκευασμένες από παραδοσιακά τούβλα. Οι βιομηχανικές καπνοδόχοι άρχισαν να γίνονται γνωστές μόλις τον 18^ο αιώνα, κατά την ανάπτυξη της βιομηχανίας. Αρχικά δεν ήταν αρκετά μεγάλες σε ύψος και έτσι δημιουργούνταν αυξημένα επίπεδα ρύπανσης σε κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η ανάγκη περιορισμού τόσο των επιπέδων ρύπανσης αλλά και της μεταφοράς τους σε ανώτερα στην ατμόσφαιρα, ώθησε στο να κατασκευάζονται όλο και πιο ψηλότερες οι καπνοδόχοι. Η ανάγκη αυτή προώθησε την χρήση άλλων καταλληλότερων υλικών όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα και ο χάλυβας, αφού η χρήση τούβλων σε καπνοδόχους μεγάλου ύψους ήταν απαγορευτική.

1.1. Ο ρόλος των καπνοδόχων

Οι καπνοδόχοι είναι το μέσο με το οποίο τα καυσαέρια διοχετεύονται σε ικανοποιητικό υψόμετρο, ώστε αυτά να διαλυθούν από τους στρωβιλισμούς της ατμόσφαιρας. Θα πρέπει όμως, το υψόμετρο διοχέτευσης των καυσαερίων να είναι τέτοιο, ώστε η συγκέντρωσή τους και πιθανά σωματίδια σκόνης που ενδέχεται να φέρουν να είναι σε ανεκτά επίπεδα, μετρούμενα σε συγκεντρώσεις στη στάθμη του εδάφους (ground level concentration GLG). Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί, ότι οι καπνοδόχοι είναι το ενδεδειγμένο μέσο απομάκρυνσης και μείωσης της συγκέντρωσης ρυπογόνων ουσιών (όπως SO₂, ιπτάμενη τέφρα κλπ.) που προέρχονται από διεργασίες καύσης.

1.2. Ιστορική αναδρομή καπνοδόχων

Από πολύ παλιά ο άνθρωπος συνεχώς έψαχνε ένα σύστημα για να διοχετεύει τα ανεπιθύμητα καυσαέρια του από την διεργασία της καύσης στην ατμόσφαιρα. Η πρώτη εφαρμογή ήταν η κατασκευή μικρών αγωγών. Μετά από χρόνια και λόγω αυξημένων απαιτήσεων (λόγο μεγάλων όγκων καυσαερίων), οι μικροί αγωγοί αντικαταστάθηκαν από μικρές καπνοδόχους κατασκευασμένες από τούβλα. Το μέγεθος πολλών καπνοδόχων συνεχώς αυξανόταν, ενώ καμινάδες με διάμετρο μεγαλύτερη από 500mm έτυχαν χρήσης σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

1.2.1. Υλικό κατασκευής καπνοδόχων

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα τα συνήθη υλικά κατασκευής των καπνοδόχων ήταν τα τούβλα και ο χάλυβας. Καθώς οι καπνοδόχοι κατασκευάζονται όλο και πιο ψηλότεροι, λόγω των απαιτήσεων, η κατασκευή τους από τούβλα ήταν αντιοικονομική και έτσι μεταλλικές καπνοδόχοι κατασκευάζονταν όλο και περισσότερο. Αυτές ήταν είτε αυτοϊσορροπούμενες, δηλαδή πακτωμένες στη βάση, ή καλωδιωτές αν στη ευστάθειά τους συμβάλουν και καλώδια αντιστήριξης στον κορμό. Η πρώτη καπνοδόχος από σκυρόδεμα είχε κατασκευαστεί στην Γερμανία το 1907. Αυτό ήταν και η αφορμή για την κατασκευή καπνοδόχων από οπλισμένο σκυρόδεμα στο Ηνωμένο Βασίλειο και γενικά στην Ευρώπη, με την πρώτη να κάνει την εμφάνιση της το 1910.[1]

Καπνοδόχοι από οπλισμένο σκυρόδεμα είχαν κατασκευαστεί και στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αλλά και στην Σοβιετική Ένωση (Ρωσία) το 1900. Μια δεκαετία αργότερα στην Ιαπωνία κατασκευάστηκε καπνοδόχος ύψους 165m, η οποία ήταν και η ψηλότερη καπνοδόχος του κόσμου για αρκετά χρόνια. Ακολούθως στο διάστημα 1928 με 1932 υπήρξε μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη στο τομέα καπνοδόχων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η χρήση όμως του σκυροδέματος απασχόλησε πολύ του μηχανικούς, αφού οι μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές, λόγω λειτουργίας, ήταν ικανές για να προκαλέσουν αστοχία το σκυρόδεμα. Η λύση του προβλήματος είχε δοθεί μόλις το 1950. Αργότερα άρχισε η κατασκευή μεταλλικών καπνοδόχων οι οποίες και αποτελούν την ενδεδειγμένη λύση μέχρι σήμερα.[1][2]

1.2.2. *Επικάλυψη καπνοδόχων*

Αρχικά, οι καπνοδόχοι κατασκευάζονταν χωρίς οποιαδήποτε επικάλυψη (επένδυση) στο εσωτερικό. Με την ανάπτυξη των καυστήρων και της τεχνολογίας καυσίμων, είχαν επιτευχθεί μικρότερες θερμοκρασίες αερίων. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας επιδείνωναν το φαινόμενο διάβρωσης. Αυτό οδήγησε στην κατασκευή καπνοδόχων με προστατευτική επένδυση. Αρχικά, σε αυτοίσορροπούμενες καπνοδόχους, είχαν χρησιμοποιηθεί αντιοξειδωτικές μονώσεις από πλινθοδομή ενώ σύντομα και γύρω στο 1950 αυτά είχαν αντικατασταθεί από μονωμένα τούβλα. Επακόλουθη ανάπτυξη στον τομέα είχε ως αποτέλεσμα οι επενδύσεις να αντικατασταθούν από φορείς από σκυρόδεμα. Ωστόσο, τα καυσάεργια διαπερνούσαν μέσω των επενδύσεων από τούβλα, προκαλώντας με αυτό τον τρόπο διάβρωση στο κελυφτώ φορέα από σκυρόδεμα. Αυτό είχε και ως αποτέλεσμα μέρος των καυσαερίων να εγκλωβίζεται ανάμεσα στο σκυρόδεμα και στη επένδυση.[1]

Σήμερα, οι καπνοδόχοι κατασκευάζονται σχεδόν αποκλειστικά από χάλυβα. Με τη χρήση του χάλυβα ως υλικού κατασκευής επιτυγχάνεται η μη διαπερατότητα των αερίων. Παράλληλα, οι μεταλλικές καπνοδόχοι μπορούν να είναι ψηλότερες και να επιτρέπουν μεγαλύτερες ταχύτητες διέλευσης αερίων. Μονωτικές επενδύσεις σε καπνοδόχους από χάλυβα έκαναν την εμφάνιση τους το 1960. Ωστόσο, τα προβλήματα από λυγισμό των επενδύσεων εξαλείφτηκαν μόλις το 1971, όταν και λήφθηκε υπόψη στο σχεδιασμό τους η επιρροή των θερμοκρασιακών μεταβολών. Στις μέρες μας, έρευνες γίνονται για δημιουργία επικαλύψεων από πλαστικό.[1] Αν με τη χρήση των εν λόγω τεχνολογιών μειωθεί το κόστος και αυξηθεί η αποδοτικότητά τους, ενδέχεται στο μέλλον η επικάλυψη να γίνεται αποκλειστικά με πλαστικό.[2]

1.2.3. *Κανονισμοί ρύπανσης*

Υπάρχουν πάρα πολλές βιβλιογραφικές αναφορές που αφορούν τη ρύπανση του αέρα και του νερού[1,2]. Αρχικά και πριν την καθιέρωση οποιωνδήποτε κανονισμών για την ποιότητα του αέρα οι εξατμίσεις ρυπογόνων αερίων γινότανε από μικρού ύψους καμινάδες. Η καταστροφική συνέπεια που είχαν οι εκπομπές καυσαερίων το 1952 στο Λονδίνο ήταν ικανή για να καταστείλει την κατασκευή μικρού ύψους καπνοδόχων.[1] Συγκεκριμένα, ήταν η αφορμή να αποδειχθεί ότι η ατμόσφαιρα δεν ήταν σε θέση να απορροφήσει την ανεξέλεγκτη ποιότητα ρυπογόνων αερίων, πράγμα που οδήγησε στη θέσπιση σχετικής νομοθεσίας. Πρωτοπόρες ήταν οι οργανώσεις "Clear Air Acts" στην Αμερική και Αγγλία που καθόρισαν τεχνικές προδιαγραφές για την ποιότητα αέρα στη Σοβιετική Ένωση το 1967 και οι οποίες ήταν η αφορμή για την δημιουργία φορέα προστασίας του περιβάλλοντος το 1970.

Επαρκής διασπορά των ρύπων μπορεί γενικά να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται, αν το ύψος της καπνοδόχου είναι τουλάχιστο 2,5 φορές το ύψος των περιμετρικών κτιρίων. Εξειδικευμένες θεωρητικές μαθηματικές σχέσεις που προβλέπουν την κατανομή των ρύπων, έχουν αναπτυχθεί από τους Sutton (1932), Bosanquet (1936), Hay Pasquill and Cramer (1957), Gifford (1961) και άλλους. Επίσης, πολλές ημιεμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφορά (κατανομή και τη διασπορά) του καυσαερίου μετά την

έξοδο του από την καπνοδόχο η οποία είναι άμεσα συσχετισμένη με την συγκέντρωση ρύπων μετρούμενη στο υψόμετρο εδάφους (Davidson-Bryant (1949), Bosanquet-Carey-Halton(1950), Holland (1953), Priestley (1956), Bosanquet (1957), Lucas Moorc and Spurr (1963) κ.α.)[1].

Σήμερα έχουν συνταχθεί αυστηροί κανονισμοί όσο αφορά την ποιότητα του αέρα και τη διασπορά των ρύπων που εκπέμπονται από τις καμινάδες στην ατμόσφαιρα. Οι κανονισμοί αυτοί ουσιαστικά βασίζονται στην συγκέντρωση των ενώσεων SO₂ και NO_x, οι οποίες θεωρούνται δηλητηριώδεις. Συγκεκριμένες τιμές για τις αποδεκτές τιμές εκπομπών δίνει το CICIND^[2].

1.2.4. Σχεδιασμός καπνοδόχων

Οι μέθοδοι σχεδιασμού των καμινάδων αρχικά προέρχονται αμιγώς από εμπειρικές τεχνικές σε μαθηματικές τεχνικές, βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα, σε μοντέλα υπό κλίμακα. Οι πρώτες αδυναμίες όμως στο σχεδιασμό καμινάδων αφορούσαν την απρόβλεπτη δημιουργία ρωγμών σε μη ανεκτά επίπεδα, σε καπνοδόχους από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και άλλων τάσεων. Αυτό έστρεψε την προσοχή των μηχανικών στην επινόηση εθνικών κανονιστικών κειμένων που θα περιλαμβάνουν διαδικασίες σχεδιασμού. Έτσι το 1934, ο Αμερικανικός Οργανισμός Σκυροδέματος (ACI – American Concrete Institute) δημοσίευσε προδιαγραφές για τον σχεδιασμό καμινάδων από σκυρόδεμα οι οποίες αναθεωρήθηκαν το 1954 και το 1969.[1][2]

Στις καπνοδόχους - ούσες υψίκορμες ελαφρές κατασκευές - τα φορτία ανέμου κυριαρχούν την απόκρισή τους. Οι πρώτες βασικές γνώσεις για τον άνεμο και τις δυνάμεις που προκαλεί στις κατασκευές, προέρχονται από τους Galileo (1655), Newton (1687), Smeaton (1759) και Duchemin (1842). Οι καταστροφικές συνέπειες όμως που είχαν οι επιδράσεις των φορτίων ανέμου στην γέφυρα Tay το 1879, οδήγησαν τους μηχανικούς να δώσουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην αντιμετώπιση των δράσεων ανέμου.[1]

Την ίδια στιγμή περίπου, είχαν παρατηρηθεί ταλαντώσεις στις καμινάδες λόγω της επίδρασης από την περιοδική διάχυση των δινών αλλά η συσχέτιση της περιοδικής κίνησης των καμινάδων και του σχηματισμού των δινών είχε ξεκινήσει μόλις το 1908 από τον Benard. Η σχέση μεταξύ της περιοδικής αυτής κίνησης με το σχηματισμό σταθερών δινών είχε αρχίσει να μελετάται από το von Karman το 1912. Η κατάρρευση της γέφυρας Tacoma Narrows (1940) λόγω των ταλαντώσεων από τη δράση του ανέμου και η κατάρρευση των πύργων ψύξης στο Ferrybridge (1965) είχαν ως αποτέλεσμα να στρέψουν το ερευνητικό ενδιαφέρον στην αιτία και στη ένταση των αεροδυναμικών φαινομένων.[1]

Η διασπορά των ρύπων ήταν μια σημαντική παράμετρος για την σχεδίαση των καμινάδων. Για να μελετηθεί η διασπορά των ρύπων από τα καυσάεργα το 1906 είχε αρχίσει έρευνα με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων βασισμένων στη θεωρία της τυρβώδους διάχυσης. Τον ίδιο καιρό, είχαν καταρτιστεί κανονισμοί περί ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι οποίοι έγιναν η αφορμή για την αύξηση του ύψους των καπνοδόχων, το οποίο μέχρι σήμερα μπορεί να ξεπερνά τα 400m. Με απώτερο σκοπό την ικανοποιητική και οικονομική σχεδίαση

των καμινάδων υπήρξε η ανάγκη εκτίμησης των φορτίων ανέμου και ανάπτυξης μαθηματικών μοντέλων που θα προβλέπουν την απόκριση της.

Οι Michelangelo, Galileo και άλλοι ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν τέτοια μοντέλα για να μελετήσουν και να επιλύσουν αρχιτεκτονικά και στατικά προβλήματα. Αν και ο Irminger χρησιμοποίησε μοντέλα για να μελετήσει την επίδραση του ανέμου στα κτίρια το 1893, η επιστημονική τους χρήση τους για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου έλαβε χώρα μόλις τον επόμενο αιώνα. Η πρώτη αεροσήραγγα για τη μοντελοποίηση του ανέμου έκανε την εμφάνιση της το 1933 από τον Cermak, όπου στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν, από τους Scuton (1958), Fung (1960), Davenport (1961) και άλλους, αρκετές εφαρμογές για τη μελέτη συμπεριφοράς της ανεμοπίεσης σε μοντέλο υπό κλίμακα[1]. Η εκτεταμένη αυτή μελέτη είχε προσφέρει πληροφορίες για τη φύση και την ένταση δυναμικών φορτίων λόγω της ροής του ανέμου και έτσι έγινε κατανοητή η απόκριση των κατασκευών από διάφορα φορτία.

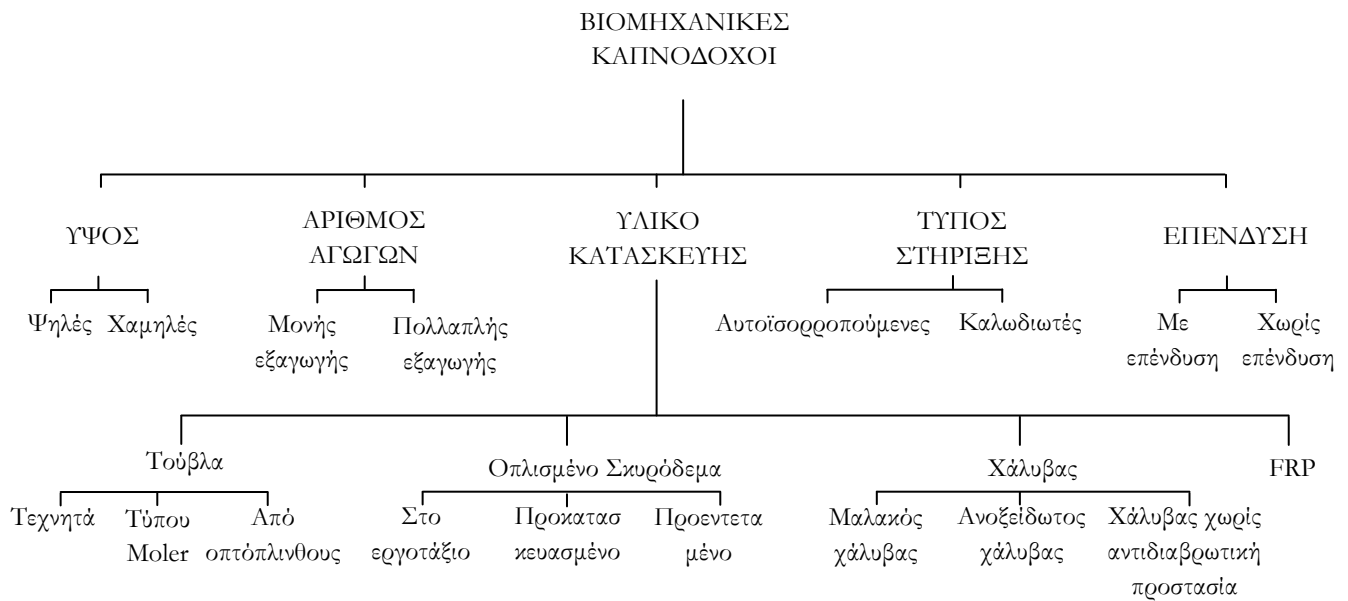
Οι καπνοδόχοι σπάνια ελέγχονταν υπό σεισμικά φορτία. Οι σεισμοί του Nöbi το 1891 και του San Francisco το 1960[1] ήταν η αφορμή, ώστε να αναπτυχθούν επιστημονικές μέθοδοι οι οποίες θα ήταν ικανές για να εκτιμήσουν την απόκριση των κατασκευών υπό σεισμικές διεγέρσεις. Αργότερα αναπτύχθηκαν επιστημονικές θεωρίες που επέτρεπαν την μελέτη απόκρισης των κατασκευών υπό σεισμικά φορτία- μέσω ισοδύναμων στατικών φορτίων. Οι καταστροφές που είχαν επέλθει από τους σεισμούς Kantō (1923), Niigata (1960) και στην Αλάσκα (1964), είχαν δείξει ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την εκτίμηση των φορτίων και ότι είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης για την εκτίμηση της απόκρισης εύκαμπτων κατασκευών. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είχε πρωταρχικό λόγο στην ανάπτυξη των μεθόδων ανάλυσης των καμινάδων υπό σεισμικά φορτία.

Σήμερα, η σχεδίαση κατασκευών όπως οι καμινάδες αποτελεί αντικείμενο πολυδιάστατης και διεπιστημονικής μελέτης, που θέτει προκλήσεις για τους ειδικούς στην ομάδα μελέτης.

1.3. Τύποι καπνοδόχων

Οι καπνοδόχοι κατηγοριοποιούνται όπως φαίνεται στο ακόλουθο **Σχήμα 1.1**. Στη συνέχεια περιγράφονται μερικές από τις κατηγοριοποιήσεις.

Ύψος: Γενικά, καπνοδόχοι με ύψος που υπερβαίνει τα 150m θεωρούνται ψηλές καπνοδόχοι. Ωστόσο, με βάση τη βιβλιογραφία περί αεροδυναμικής κτιρίων[1], καπνοδόχοι που υπερβαίνουν τα 150m σε ύψος θεωρούνται ψηλές, αρκεί η αναλογία των διαστάσεων τους να είναι τέτοια ώστε να απαιτείται μελέτη σε δυναμική απόκριση υπό φορτία ανέμου.



Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση βιομηχανικών καπνοδόχων.[1]

Αριθμός εξατμίσεων: Συχνά, μια καπνοδόχος εξυπηρετεί τις ανάγκες μεταφοράς των αερίων καύσης, στα άνω στρώματα της ατμόσφαιρας, από αρκίτους λέβητες (boiler). Σε αυτή την περίπτωση και όταν μία από τις πηγές καυσαερίων πάθει βλάβη και σταματήσει η λειτουργία της (λόγω συντήρησης) τότε η ταχύτητα εξόδου του καυσαερίου θα μειωθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί και η συνολική ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων τα οποία διέρχονται από την καπνοδόχο. Αυτό ενδέχεται να αυξήσει κατά πολύ τα επίπεδα ρύπανσης. Έτσι προκειμένου να προβλεφθεί και να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, καπνοδόχοι που εξυπηρετούν περισσότερους από ένα λέβητες θα πρέπει για κάθε ένα να φέρουν ξεχωριστούς αγωγούς εξόδου των αερίων. Αυτές είναι γνωστές και ως καπνοδόχοι πολλαπλής εξόδου αερίων (multi-flue chimney).

Τρόπος στήριξης: Συχνά η στήριξη (θεμελίωση) των καπνοδόχων γίνεται μόνο στην βάση (free-standing chimney). Σε περιπτώσεις όμως όπου δεν υπάρχει ικανοποιητικός χώρος για την κατασκευή της θεμελίωσης η καπνοδόχος μπορεί να στηρίζεται και από καλώδια αντιστήριξης στον κορμό (cable chimney).

1.4. Οι υψηλότερες καπνοδόχοι στον κόσμο

Οι καπνοδόχοι, όπως έχει αναφερθεί έχουν πρωταρχικό σκοπό την απαγωγή των αερίων από της εγκαταστάσεις μιας βιομηχανίας σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αρχικά όμως, λόγω ανεπαρκούς προόδου της τεχνολογίας και των κανονισμών για την ποιότητα του αέρα, η ενδεδειγμένη λύση για τη μείωση της συγκέντρωσης ήταν η κατασκευή καπνοδόχων με πολύ μεγάλο ύψος. Αυτή ήταν και η αιτία για την κατασκευή καπνοδόχων που φθάνουν τα 420m, όπως η καπνοδόχος του ηλεκτροπαραγωγού σταθμού στο

Καζακιστάν. Στον ακόλουθο πίνακα καταγράφονται οι μέχρι στιγμής ψηλότερες καπνοδόχοι τους κόσμου. Στη συνέχεια παρέχονται κάποιες πληροφορίες για μερικές από αυτές.

Πίνακας 1.1: Οι υψηλότερες καπνοδόχοι στο κόσμο^[3]

Καπνοδόχος	Χρονολογία κατασκευής	Χώρα	Πόλη	Ύψος κορυφής
GRES-2 Power Station	1987	Καζακιστάν	Ekibastusz	420 m*
Inco Superstack	1971	Καναδάς	Copper Cliff	385 m
Berezovskaya GRES	1985	Ρωσία	Sharypovo	370 m
Trbovlje Chimney	1976	Σλοβενία	Trbovlje	360 m
Sagardighi Thermal Power Station	2004	Ινδία	Sagardighi, Murshidabad	275 m
Drax Power Station	1973	Ηνωμένο Βασίλειο	Selby	259 m
MVM Észak-Buda Power Station	1974	Ουγγαρία	Budapest	203 m
Anaconda Smelter Stack	1919	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	Anaconda, Montana	178 m**
The Windscale Pile Chimneys	1957	Ηνωμένο Βασίλειο	Windscale, Cumbria	124 m
Chimney Edstein	2008	Κίνα	Taichung, Taiwan	180 m
Pei Tou Incinerator chimney	-	Ταϊβάν	Taipei	150 m

*Ψηλότερη καπνοδόχος στον κόσμο
 **Ψηλότερη μη καλωδιωτή καπνοδόχος από τούβλα

- **Καπνοδόχος ηλεκτροπαραγωγού σταθμού "GRES-2"**

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός GRES-2 στο Καζακιστάν έχει σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση άνθρακα. Έχει κατασκευαστεί το 1987 με δυναμικότητα παραγωγής 1.000 MWe. Κατέχει την πρώτη θέση ως ο σταθμός με τη μεγαλύτερη σε ύψος καπνοδόχο. Η καπνοδόχος έχει ύψος κορυφής 419,7m δηλαδή είναι περίπου 38m ψηλότερη από την καπνοδόχο "Inco Superstack" στον Καναδά. Στην περιοχή η καπνοδόχος είναι γνωστή και ως "Αναπτήρας" ("The Cigarette Lighter").[3]

- **Καπνοδόχος "Anaconda"**

Η καπνοδόχος στο λατομείο εξόρυξης χαλκού "Anaconda" βρίσκεται στην Μοντάνα, των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και είναι η υψηλότερη καπνοδόχος που έχει κατασκευαστεί από τούβλα με ύψος κορυφής 178m. Είναι μεταβλητής διαμέτρου καθ' ύψος, με διάμετρο βάσης ίση με 23m και διάμετρο κορυφής 18m. Μεταβλητό είναι και το πάχος της διατομής του κελύφους με 1,83m στη βάση και 0,61m στην κορυφή. Η καπνοδόχος έχει κατασκευαστεί για τις ανάγκες του πυρο-μεταλλουργείου, ώστε να διοχετεύει τα

καυσαέρια στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από τη διεργασία τήξης και πήξης στο χυτήριο. Οι εγκαταστάσεις του μεταλλουργείου είχαν καταστραφεί μετά από το κλείσιμο του το 1981. Παρόλα αυτά οι κάτοικοι της περιοχής δεν επέτρεψαν την καταστροφή της καπνοδόχου και έτσι η περιοχή πέντε χρόνια μετά μετατράπηκε σε πάρκο γνωστό ως "Anaconda Smelter Stack State Park".[3]



Εικόνα 1.1: Καπνοδόχος στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό GRES-2 - Καζακστάν (GRES-2 Power Plant). [3]



Εικόνα 1.2: Καπνοδόχος στο λατομείο εξόρυξης χαλκού "Anaconda" – Μοντάνα, ΗΠΑ. [3]

- **Καπνοδόχος "Inco Superstack"**

Η καπνοδόχος "Inco Superstack" στο Οντάριο με ύψος 380 m είναι η υψηλότερη καπνοδόχος στον Καναδά και στο δυτικό ημισφαίριο, αλλά και η δεύτερη υψηλότερη μη καλωδιωτή καπνοδόχος στον κόσμο μετά από αυτή στο Καζακιστάν. Κατασκευάστηκε το 1972 από την εταιρία Inco Limited με προϋπολογισμό 25 εκατομμύρια δολάρια. Η καπνοδόχος κατασκευάστηκε ώστε να διοχετεύει στην ατμόσφαιρα, μακριά από την πόλη, αέρια ενώσεων θείου και άλλα καυσάερα, τα οποία προέρχονταν από τις διεργασίες τήξης στο εργοστάσιο μεταλλουργίας χαλκού. Αποτελέσματα έρευνας έδειξαν ότι τα αέρια αυτά μπορούσαν να μεταφερθούν, λόγω του ύψους της καπνοδόχου, σε ακτίνα μέχρι και 240 km μακριά από την περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την κατασκευή της καπνοδόχου είχε παρατηρηθεί μεγάλου βαθμού οικολογική καταστροφή από τα αέρια απόβλητα της μονάδας. Η κατάσταση αυτή επιδεινώθηκε με τη χρήση οπτάνθρακα (coke) στις αρχές και στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, αλλά και από την υλοτομία της γύρω περιοχής για την παραγωγή πρώτης ύλης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ειδικά για τους γεωλόγους, έχει η επιρροή της όξινης βροχής στις βραχώδεις περιοχές γύρω από τη μονάδα, λόγω της οποίας έχει σχηματιστεί μαύρη στην περιοχή κρούστα πάχους περίπου 8 cm.[3]

Έτσι μετά από όλη την καταστροφή, έλαβε χώρα η κατασκευή της καπνοδόχου που απώτερο σκοπό είχε να μειώσει τα όρια ρύπανσης της περιοχής. Παράλληλα ακολούθησαν και ειδικά προγράμματα αποκατάστασης της αποφιλωμένης περιοχής, όπου το 1992 η πόλη του Inco βραβεύτηκε από τα Ηνωμένα Έθνη λόγω των περιβαλλοντικών προγραμμάτων αποκατάστασης που είχε εκπληρώσει.

Παρόλη όμως τη μείωση των ρύπων στην περιοχή, λόγω της κατασκευής της καπνοδόχου, αυξημένα επίπεδα ρύπων λόγω της όξινης βροχής είχαν παρατηρηθεί σε 7,000 λίμνες, που βρίσκονταν σε απόσταση στη γύρω περιοχή.



Εικόνα 1.3: Καπνοδόχος "Inco Superstack" στο εργοστάσιο μεταλλουργίας χαλκού "Inco Copper Cliff".- Καναδά [3]

- **Καπνοδόχος "Trbovlje "**

Η καπνοδόχος "Trbovlje" κατασκευάστηκε το 1976 στη Σλοβενία και είναι η υψηλότερη καπνοδόχος στην Ευρώπη, αφού το ύψος στην κορυφή της φτάνει τα 360m[3]. Η καπνοδόχος κατασκευάστηκε για να εξυπηρετεί τις ανάγκες σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (με καύση λιγνίτη), ο οποίος βρίσκεται στις όχθες του ποταμού Sava. Για την κατασκευή της χρειάστηκαν 210 μέρες, 11,866 m³ σκυρόδεμα και 1,079 tons σπλισμού. Το μεγάλο αυτό ύψος της καπνοδόχου ήταν αναγκαίο για να μεταφέρει σε ικανοποιητικό υψόμετρο τα καυσαέρια, μιας και ο σταθμός βρίσκεται μέσα σε στενή κοιλάδα. [3]



Εικόνα 1.4: Καπνοδόχος "Trbovlje" στην κοιλάδα Sava – Σλοβενία. [3]



Εικόνα 1.5: Καπνοδόχος στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό "Drax" – Ηνωμένο Βασίλειο. [3]

- **Καπνοδόχος του ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού " Drax "**

Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση άνθρακα "Drax" είναι ο μεγαλύτερος στο Βόρειο Γιουρκσάιρ (North Yorkshire). Έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με πρώτες ύλες, όπως βιομάζα και οπτάνθρακα (petcoke). Ο σταθμός βρίσκεται κοντά στον ποταμό Ouse κοντά στις περιοχές Selby και Goole ενώ το όνομά του προέρχεται από το κοντινό χωριό Drax . Για τις ανάγκες του σταθμού κατασκευάστηκε καπνοδόχος από οπλισμένο σκυρόδεμα διαμέτρου 9.1m και ύψους 259m, οι οποίοι διαθέτει τρεις αγωγούς εξαγωγής καυσαερίων, εξυπηρετώντας έτσι τους έξι λέβητες του σταθμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά το τέλος της κατασκευής της, ήταν η ψηλότερη καπνοδόχου στον κόσμο, ενώ σήμερα εξακολουθεί να είναι η ψηλότερη καπνοδόχος στο Ηνωμένο Βασίλειο.

1.4.1. Οι ψηλότερες καπνοδόχοι στην Ελλάδα

Στον **Πίνακα 1.2** παρουσιάζονται οι ψηλότερες καπνοδόχοι στην Ελλάδα. Όλες οι καπνοδόχοι, οι οποίες παρουσιάζονται, εξυπηρετούν τις ανάγκες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών.

Πίνακας 1.2: Οι υψηλότερες καμινάδες στη Ελλάδα^[4]

Καπνοδόχος/ ηλεκτροπαραγωγός σταθμός	Περιοχή	Χρονολογία κατασκευής	Ύψος κορυφής
Αμύνταιο	Αμύνταιο	1983-1986	210 m*
Άγιος Δημήτριος	Κοζάνη	1993-1997	174 m
Άγιος Γεώργιος	Κερατσίνι	2004	174 m
Αθερινόλακκος	Αθερινόλακκος, Κρήτη	2002-2004	125 m
Μεγαλόπολη	Μεγαλόπολη	1990-1992	120 m
Πτολεμαΐδα	Πτολεμαΐδα	1959	110 m

- **Καπνοδόχος ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού στο Αμύνταιο**

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός στο Αμύνταιο έχει ισχύ 2x300 MW. Ο σταθμός εξυπηρετείται από τη μεγαλύτερη σε ύψος καπνοδόχο που κτίστηκε ποτέ στην Ελλάδα, ύψους 210m. Ο σταθμός κτίστηκε το 1983 και η κατασκευή του διήρκεσε 3 χρόνια.[4]

- **Καπνοδόχος ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού στον Άγιο Δημήτριο**

Ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Άγιος Δημήτριος βρίσκεται στην Κοζάνη, μεταξύ της πόλης της Κοζάνης και του χωριού Ελλήσποντος. Αποτελεί το μεγαλύτερο ηλεκτροπαραγωγό σταθμό στην Ελλάδα με δυναμικότητα παραγωγής 1,585 MW . Ο σταθμός διαθέτει τρεις καπνοδόχους ύψους 174m.[4]



Εικόνα 1.6: Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός στο Αμύνταιο με την υψηλότερη καπνοδόχο στην Ελλάδα, ύψους 210m. [4]



Εικόνα 1.7: Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Αγίου Δημητρίου με τρεις καπνοδόχους ύψους 174m. [4]

1.5. Βιβλιογραφία

- [1] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [2] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Chimney>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_and_structures_in_Greece

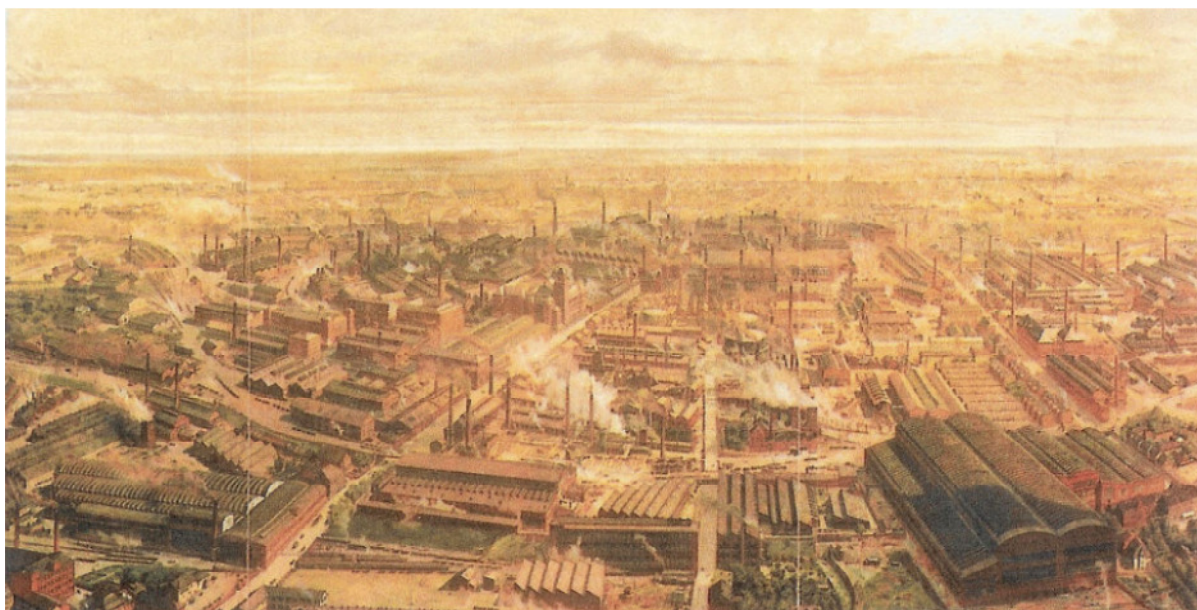
2

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

2.1. Εισαγωγή

Οι καπνοδόχοι, αποτελούν το μέσο δια του οποίου μεταφέρονται δηλητηριώδη ή και ρυπογόνα αέρια στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Τα αέρια αυτά συνήθως προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και παράγονται είτε από την καύση ορυκτών υλών (π.χ. άνθρακας) ή είτε από χημικές διεργασίες που ακολουθούνται για την κατασκευή προϊόντων ευρείας κατανάλωσης. Η διάχυση των αερίων θα πρέπει να γίνεται σε χώρους απομακρυσμένους από κατοικημένες περιοχές ή περιοχές χλωρίδας και πανίδας.

Οι πρώτες βιομηχανικές καπνοδόχοι αποτελούσαν γενικά το μέσο απομάκρυνσης (εξάτμισης) των καυσαερίων που προέρχονται από οποιαδήποτε βιομηχανική διεργασία καύσης. Η ανάπτυξη και χρήση των καπνοδόχων έλαβε χώρα αρχικά σε χώρες με ανεπτυγμένη, βαριά κυρίως βιομηχανία όπως στη Αγγλία και τη Γερμανία. Αρχικά στον τομέα της βιομηχανίας δεν είχε ληφθεί υπόψη η οποιαδήποτε προστασία του περιβάλλοντος, η ρύπανση της ατμόσφαιρας και οι επιπτώσεις σε ζωντανούς οργανισμούς από τις επικίνδυνες ουσίες που περιείχαν τα εκλυόμενα αέρια. Αποτέλεσμα ήταν η ανεξέλικτη κατασκευή τόσο βιομηχανικών εγκαταστάσεων αλλά και καπνοδόχων που τις απάρτιζαν. Πολλές είναι οι εικόνες που παρουσιάζουν το πρόβλημα αυτού του φαινομένου που δεν είναι άλλο από την κατασκευή μεγάλου αριθμού καπνοδόχων οι οποίες διοχετεύουν ρυπογόνα και καπνογόνα αέρια. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζεται στη **Εικόνα 2.1** όπου απεικονίζεται η βιομηχανική περιοχή κατεργασία χάλυβα στο Έσσεν στη Γερμανία.[3]



Εικόνα 2.1: Βιομηχανική περιοχή κατεργασίας χάλυβα στο Έσσεν, Γερμανία. Η περιοχή απαριτίζεται με πάνω από 50 καπνοδόχους[4].

Μόλις στα τελευταία πενήντα χρόνια του 20^{ου} αιώνα η κατάσταση αυτή άρχισε να προβληματίζει τόσο περιβαλλοντικούς οργανισμούς, όσο και επιστήμονες και μηχανικούς. Οι έρευνες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη μεθόδων χρήσιμες για να απομακρύνουν όσο το δυνατό μακρύτερα τα παραγόμενα αέρια από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Παράλληλα αναπτύχθηκαν μέθοδοι για έλεγχο και περιορισμό των ρύπων. Αυτό επιτεύχθηκε με επιτυχία, με την χρήση ειδικών φίλτρων που ήταν ικανά να εγκλωβίσουν τουλάχιστο τα μικρά σωματίδια, τα οποία παρασύρονταν από τα αέρια, και να μειώσουν έτσι την συγκέντρωση ρύπων. Η χρήση των φίλτρων όμως δεν ήταν ικανή να εμποδίσει και τη διάχυση χημικών επικινδυνών ενώσεων όπως SO_2 , NO_x και άλλες δηλητηριώδεις ενώσεις.[4]

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες που περιέγραφαν την διάχυση των αερίων. Οι πρώτες θεωρίες οδηγούσαν στη κατασκευή ψηλών καπνοδόχων όπου σε κάποιες περιπτώσεις το ύψος τους ξεπερνούσε τα 360m. Αυτό υποβοηθούσε την διαδικασία της διάχυσης, ενώ δρούσε καταλυτικά στην συγκέντρωση ρύπων.

Φυσικά το μεγάλο αυτό ύψος των καπνοδόχων δεν μπορούσε να αποτελέσει και τρόπο διάσπασης των ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Το μόνο που είχε επιτευχθεί ήταν η διάχυση των καυσαερίων σε μακρύτερες αποστάσεις από την πηγή. Όπως αναφέρεται από το CICIND (2005)^[4] τα τελευταία εβδομήντα χρόνια του 20^{ου} αιώνα και αφού είχε παρατηρηθεί το φαινόμενο της όξινης βροχής έρευνες ανέδειξαν την μόλυνση αρκετών λιμνών στην Βόρεια Αμερική και στη Σουηδία. Εκτεταμένες έρευνες στις λίμνες αυτές έδειξαν ψηλά επίπεδα οξειδίων. Αποτέλεσμα ήταν ο θάνατος χιλιάδων ψαριών τα οποία ευδοκίμοιούσαν στις λίμνες. Το γεγονός προβλημάτισε αρκετά τη βιομηχανική κοινωνία που προέβηκε στην απαγόρευση της κατασκευής ψηλών καπνοδόχων. Οι έρευνες τώρα είχαν επικεντρωθεί στην μείωση των ρύπων και μολύνσεων πριν αυτά διαχυθούν στην ατμόσφαιρα. Αυτό επιτεύχθηκε στα τέλη του 1970 με την ανάπτυξη της μεθόδου

αποθειοποίησης (desulphurization). Η διαδικασία αυτής της μεθόδου αποτελείται από φιλτράρισμα (scrubbing) και έκπλυση των αερίων πριν αυτά διοχετευτούν στην καπνοδόχο (μετά την έξοδο τους από τον λέβητα). Τα αποτελέσματα ήταν καταπληκτικά αφού η μείωση της συγκέντρωση οξειδίων του θείου είχε φτάσει το 98%. Αυτό αποτέλεσε και το τέλος της κατασκευής ψηλών καμινάδων.[4]

Παρόλα αυτά, σήμερα η διαδικασία ανάμειξης ρυπογόνων αερίων με την ατμόσφαιρα χρίζει ιδιαίτερης μελέτης αφού το ύψος των καμινάδων είναι τις τάξης των 100m.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τη διαδικασία διασποράς και διάχυσης των ρυπαντών στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 2.2: Αριστερά, Καπνοδόχος ύψους 360m στον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό καύσης λιγνίτη στην Σλοβενία. Δεξιά, Καπνοδόχος ύψους 343m και διαμέτρου 10m σε ηλεκτροπαραγωγό σταθμό στη Ισπανία^[4].

2.2. Γενικές αρχές διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Η διασπορά ρυπογόνων αερίων στην ατμόσφαιρα, όπως αυτά που εκπέμπονται από τις καπνοδόχους βασίζεται στη φυσική διεργασία της τυρβώδους διάχυσης.

Ο όρος διάχυσης υποδηλώνει την ανάμειξη των μορίων ενός αερίου με αυτών της ατμόσφαιρας. Είναι η παθητική μεταφορά των μορίων του αερίου από μια περιοχή ψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης ([Διασπορά] = [Μεταφορά μάζας λόγω ροής του ανέμου] + [Διάχυση]). Έτσι, τελικά επιτυγχάνεται η μείωση –στην περίπτωση των εκπομπών από τις καπνοδόχοι – της συγκέντρωσης ρύπων στην περιοχή όπου γίνεται η εκπομπή των καυσαερίων.[2]

Γενικά έχουν διατυπωθεί διάφορες πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τη διαδικασία της τυρβώδους διάχυσης. Η **Εξίσωση 2.1** αντιπροσωπεύει μια διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού που περιγράφει αυτή τη διαδικασία.

$$\frac{\partial c(x, y, z, t)}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

Όπου: $c(x, y, z, t)$ η συγκέντρωση την χρονική στιγμή t στο σημείο (x, y, z) .

K_x, K_y, K_z , οι συντελεστές διάχυσης.

Στη γενική αυτή μορφή η εξίσωση δίνει την δυνατότητα υπολογισμού και άλλων χημικών διαδικασιών όπως η απορρόφηση των ρύπων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στη διαδικασία διάχυσης στην ατμόσφαιρα σημαντικό ρόλο παίζουν, συν τοις άλλοις, και:

- Η μετεωρολογική κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή, και συγκεκριμένα η ταχύτητα του ανέμου
- Το είδος της διάχυσης που λαμβάνει χώρα. Γενικά υπάρχουν δύο διεργασίες διάχυσης των ρύπων, η τυρβώδης και η μοριακή. Στις πλείστες περιπτώσεις η διάχυση των ρύπων γίνεται με την τυρβώδη διαδικασία.
- Η δυνατότητα απορρόφησης και εναπόθεσης των ρύπων στο έδαφος,
- Δυνατότητα χημικής διάσπασης των ρύπων

Φυσικά η χρήση της **Εξίσωσης 2.1** φαντάζει δύσκολη για τον υπολογισμό της διάχυσης των ρύπων που εκπέμπονται από τις βιομηχανικές καπνοδόχους (για πρακτικούς σινοπούς τουλάχιστον). Πολλές φορές για πρακτικούς σινοπούς και λόγω της πολυπλοκότητας δεν υπολογίζεται η διάχυση των αέριων ρύπων. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της διάχυσης των ρύπων στην ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως πολύπλοκη και θεωρητικά μπορεί να υπολογιστεί από την **Εξίσωση 2.1**. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης το οποίο είναι και ευρέως αποδεκτό για την εκτίμηση της δυνατότητας διάχυσης των ρυπαντών στην ατμόσφαιρα.[4]

2.3. Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς

Το Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς (Gaussian dispersion model) των ρύπων που περιγράφεται στη συνέχεια αποτελεί την λύση της διαφορικής **Εξίσωσης 2.1**. Το μοντέλο όμως, προϋποθέτει κάποιες ειδικές συνθήκες που αφορούν τους ρύπους και το περιβάλλον όπου γίνεται η διάχυση, όπως:

- Οι εκπομπές από τις καπνοδόχους θα πρέπει να είναι μόνο σε αέρια φάση
- Η ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων θα πρέπει να είναι αμελητέα
- Δεν πρέπει να γίνονται οποιεσδήποτε φυσικές ή/και χημικές αντιδράσεις στη μάζα των υλικών που εκπέμπονται

- Οι παράμετροι της εκπομπής θα πρέπει να είναι σταθεροί καθ' όλη την χρονική περίοδο
- Δεν θα πρέπει να αλλάζουν οι μετεωρολογικές παράμετροι (μετεωρολογικές συνθήκες).
- Η διάχυση θα πρέπει να γίνεται γενικά σε καθαρή ανοικτή περιοχή, χωρίς την παρουσία ψηλών κτιρίων ή άλλων πιθανών εμποδίων.
- Το υλικό που καταφτάνει στην επιφάνεια του εδάφους δεν θα πρέπει να απορροφάται ή να αποθηκεύεται αλλά αντανακλάται.
- Η ταχύτητα του ανέμου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 m/sec.

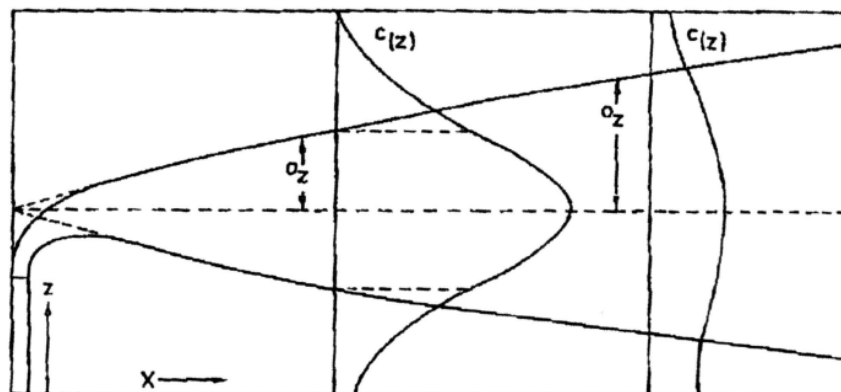
Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των ρύπων γίνεται με βάση το Γκαουσιανό μοντέλο που περιγράφει η ακόλουθη εξίσωση.

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \delta_y \cdot \delta_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\delta_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\delta_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\delta_z^2}\right] \right\} \quad (2.2)$$

Όπου:

- C [g/m³] η συγκέντρωση ρύπων στο σημείο x, y, z , σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων
- h [m] ενεργό ύψος της πηγής
- \bar{u} [m/sec] μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος h
- Q [g/sec] ρυθμός εκπομπής
- $\delta_y(x)$ [m] παράμετρος της οριζόντιας διάχυσης του πλουμίου στη y -διεύθυνση
- $\delta_z(x)$ [m] παράμετρος της κατακόρυφης διάχυσης του πλουμίου στη z -διεύθυνση

Αξίζει αν σημειωθεί ότι η **Εξίσωση 2.2** περιγράφει την διάχυση, θεωρώντας συνολική αντανάκλαση από το έδαφος ενώ, η διάχυση είναι απεριόριστη στην κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση z).



Σχήμα 2.1: Κατανομή της συγκέντρωσης σε σχέση με την παράμετρο $\delta_y(x)$ [m]

Οι παράμετροι $\delta_y(x)$ και $\delta_z(x)$ μπορούν να υπολογιστούν από θεωρητικές εκτιμήσεις σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}\delta_y &= F \cdot x^f \\ \delta_y &= G \cdot x^g\end{aligned}\quad (2.3)$$

Όπου για σταθερή κατάσταση ατμόσφαιρας οι τιμές των παραμέτρων f, F, g, G είναι σταθερές. Οι τιμές των f, F, g, G μπορούν να εξαχθούν υπολογίζοντας πειραματικά τη συγκέντρωση στην περιοχή. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται υπό ορισμένες και γνωστές μετεωρολογικές συνθήκες.

Στην περίπτωση όπου παρατηρείται πρόσθετη αντανάκλαση λόγω στρωμάτων αναστροφής (inversion layer) των αερίων στην ατμόσφαιρα και η διάχυση των αερίων κατακόρυφα είναι περιορισμένη τότε, η **Εξίσωση 2.2** μετασχηματίζεται σε:

$$\exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\delta_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\delta_z^2}\right] + \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\exp\left[-\frac{(z-h-2jr)^2}{2\delta_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h-2jr)^2}{2\delta_z^2}\right] \\ &+ \exp\left[-\frac{(z-h+2jr)^2}{2\delta_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h+2jr)^2}{2\delta_z^2}\right] \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Όπου r το ύψος του στρώματος της θερμικής αναστροφής. Γενικά η πιο πάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί αθροίζοντας μόνο τους πρώτους δύο όρους. Στην περίπτωση όμως, μεγάλων αποστάσεων μεταξύ της καπνοδόχου και του σημείου μέτρησης η **Εξίσωση 2.4** ενδέχεται να μην παρουσιάζει αποδεκτή σύγκλιση. Η συγκέντρωση σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma(\chi) \quad (2.5)$$

Επίσης για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης στο επίπεδο του εδάφους (ground level concentration GLG) με το Γκαουσιανό μοντέλο χρήσιμες είναι οι ακόλουθες πληροφορίες.

- Υπολογισμός απόστασης μέγιστης συγκέντρωσης

$$X_{\max} = \left(\frac{h}{\sqrt{2r \cdot G}} \right)^{\frac{1}{g}} \text{ και } r = \frac{f+g}{2g} \quad (2.6)$$

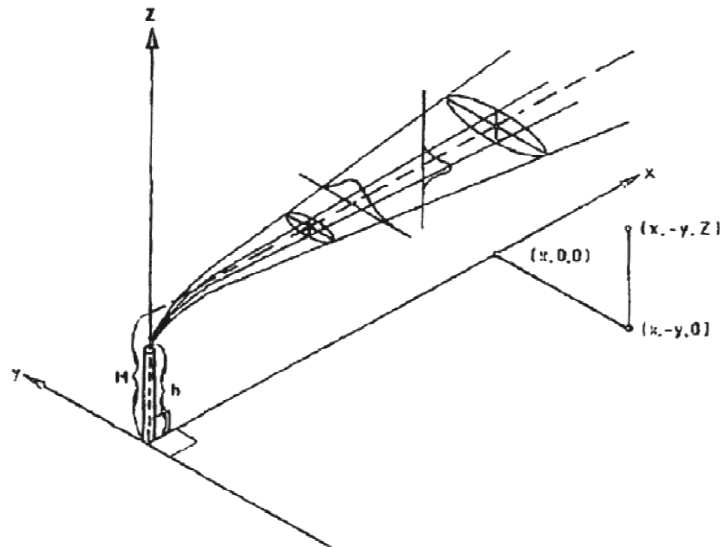
Οι εξισώσεις αυτές είναι ανεξάρτητες της απόστασης και βασίζονται μόνο στο πλούμιο ανοδικής ροής. Η μέγιστη απόσταση συγκέντρωσης επηρεάζεται από την σταθερότητα της ατμόσφαιρας και την ταχύτητα του ανέμου.

- Υπολογισμός μέγιστης συγκέντρωσης στο έδαφος

$$\frac{C_{\max}}{Q} = \frac{G^{2r-1} \cdot (m+1) \cdot Z_a^m}{\pi \cdot 2^m \cdot Fh^{m+2r} \cdot u(Z_a)} \cdot \left(\frac{2r}{e} \right)^r \quad (2.7)$$

Όπου m είναι ο συντελεστής προφίλ του ανέμου(2.4.2).

Η τιμή μέγιστης συγκέντρωσης εξαρτάται από την ροή των εκπομπών στο σημείο με την απόσταση X_{max} .



Σχήμα 2.2: Κατανομή στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με βάση το Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης

Αξίζει να αναφερθεί ότι, σήμερα ο υπολογισμός της συγκέντρωσης μπορεί να γίνει με σύγχρονες μεθόδους χρησιμοποιώντας ειδικά υλικά-ιχνηθέτες (aerosol) τα οποία διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα από ειδικές κατασκευές (jets) που είναι τοποθετημένες σε ψηλά κτίρια. Σε αυτή την περίπτωση το ύψος των κτιρίων παίζει σημαντικό ρόλο για την εγυρότητα των παραμέτρων.

2.4. Βασικά μετεωρολογικά στοιχεία που επηρεάζουν την διάχυση

2.4.1. Γενικά

Η διάχυση αερογενών υλικών στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται από τις φυσικές καταστάσεις του αέρα που αυτό με την σειρά του επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές, λαμβάνονται υπόψη στο Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης και είναι, εκτός των άλλων:

- Ταξινόμηση ευστάθειας της ατμόσφαιρας
- Ταχύτητα ανέμου
- Διεύθυνση ανέμου
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος

2.4.2. Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου μετρείται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στην περιοχή. Οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του επιπέδου συγκέντρωσης ρύπων στο έδαφος για τις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί. Για τη μέτρηση των ρύπων σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή θα πρέπει να λαμβάνονται στατιστικές καταγραφές των παραμέτρων, ώστε τελικά με επεξεργασία του να λαμβάνεται η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου στις περιοχές αυτές. Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται σε m/sec.

Η ταχύτητα του ανέμου $U(Z_a)$ μπορεί να υπολογιστεί σε συγκεκριμένο ύψος από το έδαφος με ανεμόμετρο ύψους Z_a . Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της ταχύτητας ανέμου $U(Z_a)$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ταχύτητας ανέμου $U(Z_h)$ σε οποιοδήποτε ύψος h .

Η ταχύτητα ανέμου μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση:

$$u_H = u(Z_a) \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{z_a} \right)^m \cdot \frac{1}{m+1} \quad (2.8)$$

Όπου m , ο συντελεστής που αντιστοιχεί στο προφίλ του ανέμου και εξαρτάται από την σταθερότητα της ατμόσφαιρας (§2.4.3). Ο συντελεστής υπολογίζεται μετρώντας την ταχύτητα ανέμου σε διάφορα ύψη και χρησιμοποιώντας την προηγούμενη εξίσωση.

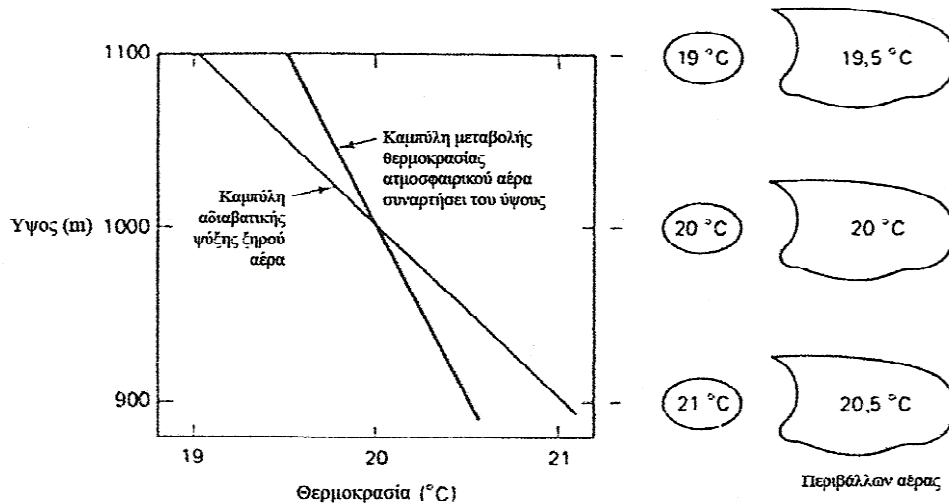
Γενικά η ταχύτητα μετράται σε διευθύνσεις ανά διαστήματα 10° (36 διαφορετικές διευθύνσεις). Για να υπολογιστούν τα επίπεδα ρύπων στο έδαφος πρέπει τα διαστήματα αυτά να μειωθούν στις $1^\circ - 2^\circ$.

2.4.3. Ταξινόμηση ευστάθειας ατμόσφαιρας –τάξη διάχυσης

Η ατμοσφαιρική σταθερότητα είναι ένας βασικός παράγοντας-χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί η ικανότητα της ατμόσφαιρας ως προς τη διασπορά, διάχυση ή "διάλυση" των αέριων ρυπαντών. Η ατμοσφαιρική σταθερότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες- χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας τουτέστιν, ταχύτητα ανέμου, η ύπαρξη ή όχι κινήσεων οφειλομένων στην τυρβώδη ροή του ρευστού (αποτέλεσμα τριβών του αέρα με την επιφάνεια της γης και τα διάφορα εμπόδια που βρίσκονται πάνω σε αυτήν) και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους.[1]

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία σε συνάρτηση με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους σε ορισμένο σημείο μελέτης- περιοχής μελέτης παριστάνεται από την καμπύλη θερμοκρασιακής κατανομής. Η μορφή αυτής της καμπύλης παίζει καθοριστικό ρόλο στον χαρακτηρισμό της ατμοσφαιρικής σταθερότητας.

Για συγκεκριμένη περιοχή υπολογίζεται ο ρυθμός αδιαβατικής ψύξης του ξηρού αέρα. Από αυτό υπολογίζεται η καμπύλη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η καμπύλη συγκρίνεται πάντα με την καμπύλη της πραγματικής μεταβολής της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, προκειμένου να χαρακτηριστεί η ατμόσφαιρα ως προς την σταθερότητα[1].



Σχήμα 2.3: Πρόβλεψη συμπεριφοράς αέριας μάζας σε σχέση με την κατανομή της θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα- χαρακτηρισμός σταθερότητας της ατμόσφαιρας.

Γενικά η κατάσταση της ατμόσφαιρας μπορεί να περιγραφεί από τρεις κύριες κατηγορίες:

- Σταθερή – μειωμένη δυνατότητα ανάμειξης στην κατακόρυφη διεύθυνση
- Ουδέτερη – μέτρια δυνατότητα ανάμειξης στην κατακόρυφη διεύθυνση
- Ασταθής – αυξημένη δυνατότητα ανάμειξης στην κατακόρυφη διεύθυνση

Ουσιαστικά η τάξη ευστάθειας περιγράφει το μέγεθος των στροβιλισμών που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα και οι οποίοι εξαρτώνται από την διαφορά θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Για μεταβολή $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως ασταθής, ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. περίοδος της νύκτας) η ατμόσφαιρα γενικά θεωρείται σταθερή. Η μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος είναι μια σταθερή κατάσταση της ατμόσφαιρας, αρκεί να μην παρουσιάζονται σημαντικές μετακινήσεις της αέριας μάζας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.

Ο υπολογισμός της τάξης ευστάθειας της ατμόσφαιρας δεν μπορεί να γίνει μόνο μετρώντας την μεταβολή της θερμοκρασίας. Για το υπολογισμό απαιτούνται και τα ακόλουθα δεδομένα:

- Βαθμός κάλυψης ατμόσφαιρας με νέφος
- Ύψος νέφους
- Χρονική στιγμή στη διάρκεια της μέρας

- Ύψος του ήλιου (γωνία σε μοίρες)
- Ταχύτητα ανέμου

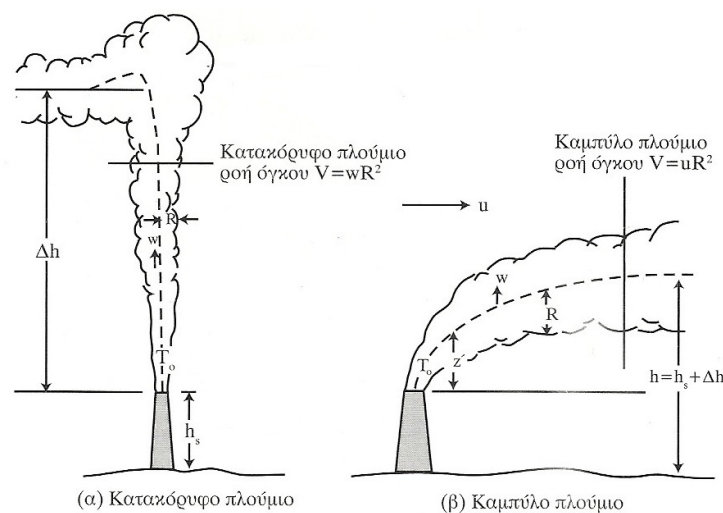
Ο υπολογισμός ευστάθειας της ατμόσφαιρας μπορεί να γίνει με βάση τις προηγούμενες τιμές και με διάφορα νομογραφήματα που προτείνει ο Turner(1970)^[2].

Το Γκαουσιανό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις διάφορες τάξεις διάχυσης οι οποίες βασίζονται στη ταξινόμηση ευστάθειας της ατμόσφαιρας.

Η απόδοση της διάχυσης μπορεί αν υπολογιστεί από την στατιστική θεωρία των Γκαουσιανών μοντέλων. Σημειώνεται ότι, για τον υπολογισμό λαμβάνει χώρα ένας σημαντικός περιορισμός – η ταχύτητα του ανέμου κατακόρυφα $u(z)$ πρέπει να είναι μηδενική. Στη εξίσωση για τον υπολογισμό των επιπέδων ρύπων στο έδαφος παρατηρείται όμως στον παρονομαστή ο όρος $u(z)$. Συνεπώς δεν μπορεί να λάβει μηδενική τιμή. Για πρακτικούς σκοπούς η ταχύτητα ανέμου κατακόρυφα δεν θεωρείται μικρότερη από 1 km/h.

2.4.4. Ανύψωση πλουμίου

Το ρυπασμένο αέριο το οποίο εκπέμπεται από τις καπνοδόχους καλείται πλούμιο (από την λατινική λέξη plume). Καθώς τα καυσαέρια εκπέμπονται από την καπνοδόχο συνεχίζουν την ανοδική κατακόρυφη τους πορεία λόγω της ορμής αλλά και της άνωσης. Τα καυσαέρια καθώς εξέρχονται από την πηγή (από το λέβητα) διοχετεύονται με προωθητές στην καπνοδόχο. Παράλληλα, επειδή προέρχονται γενικά από διεργασίες καύσης έχουν ψηλότερες θερμοκρασίες από ότι η ατμόσφαιρα. Έτσι λόγω της άνωσης (διαφοράς θερμοκρασίας - πυκνότητας) μετακινούνται ανοδικά. Αφού εξαχθούν από το στόμιο της καπνοδόχο αρχίζει η ορμή να μειώνεται και η θερμοκρασία τους να πέφτει (μέχρι να γίνει ίση με αυτή της ατμόσφαιρας). Τέλος το πλούμιο κλίνει προς την πλευρά του μέσου ανέμου. Σημειώνεται ότι, η διεύθυνση και το σχήμα του πλουμίου (Σχήμα 2.4) εξαρτάται γενικά από αρκετές παραμέτρους οι οποίες περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 2.4: Ανύψωση καυσαερίων-πλουμίου μετά την έξοδο από την καπνοδόχο[2]

Μετά την έξοδο των καυσαερίων το πλούμιο παραμένει ως ένα υψόμετρο κατακόρυφο (Δh). Το κατακόρυφο μήκος αυτό – ακριβώς πριν την καμπή- συνυπολογισμένο με το ύψος της καπνοδόχου (h) καλείται ενεργό ύψος της πηγής (H):

$$H = h + \Delta h \quad (2.9)$$

Η ανύψωση του πλουμίου γενικά είναι ένα πολύπλοκο μαθηματικό πρόβλημα για το οποίο έχουν αναπτυχθεί πάνω από 60 σχέσεις [4]. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί και εμπειρικές σχέσεις, βασισμένες σε πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο από τις πιο ευρέως αποδεκτές σχέσεις για τον υπολογισμό του ύψους του πλουμίου:

Σχέση Mose και Carson:
$$\Delta h = \frac{3.47 \cdot v_s \cdot d + 10.53 \cdot Q_h^{0.5}}{\bar{u}} \quad (\text{για σταθής ατμόσφαιρα}) \quad (2.10)$$

Σχέση Briggs:
$$\Delta h = \frac{0.538 \cdot Q_h^{1/3} \cdot x^{2/3}}{\bar{u}} \quad \text{για } x < 10 \text{ και για } Q_h > 50000 \text{ Kcal/s (20Mw)} \quad (2.11)$$

Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα από μελέτη του CICIND^[4] για τον υπολογισμό της ανόδου του πλουμίου και από τις δύο σχέσεις, για συγκεκριμένο τύπο ειπομπών. Όπως μπορεί να διαφανεί οι τιμές που δίνουν οι δύο σχέσεις διαφέρουν αρκετά. Γενικά, τα αποτελέσματα των σχέσεων εξαρτώνται από τη μέση ταχύτητα ανέμου \bar{u} και από τον ρυθμό ειπομπής Q_h . [4]

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση του Briggs, αφού ο υπολογισμός του ύψους του πλουμίου εξαρτάται από την απόσταση x από την πηγή (καπνοδόχο)- πράγμα που δεν παρατηρείται στη σχέση Mose-Carson. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι καμιά από τις προαναφερθείσες σχέσεις δεν λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση ευστάθειας της ατμόσφαιρας ή τουλάχιστον ισχύουν για συγκεκριμένη τάξη ευστάθειας. Γενικά η συνάρτηση του Briggs θεωρείται ότι προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα.

Πίνακας 2.1: Υπολογισμός ύψους πλουμίου με βάση τις σχέσεις Mose-Carson, Briggs και ASME

Δεδομένα καπνοδόχο			
Ύψος (m)	250	140	72
Διάμετρος στην κορυφή (m)	7.5	5.0	2.8
Ρυθμός θερμότητας (Kcal/sec)	150200	7513	542
Άνοδος πλουμίου Δh (m)			
Mose και Carson	215	96	29
Briggs	360	275	44
ASME	490	380	39

2.4.5. Πρόβλεψη σχήματος διάχυσης του πλουμίου

Η σύγκριση της καμπύλης μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος με την αδιαβατική, χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη της διασποράς των ατμοσφαιρικών ρυπαντών οι οποίοι εκπέμπονται από μια σημειακή πηγή (καπνοδόχο).[1]

Η μορφή της καμπύλης μεταβολής της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος, επηρεάζει τη διασπορά των ρυπαντών που εκπέμπονται από την καπνοδόχο. Στο **Σχήμα 2.5** δίδονται όλες οι περιπτώσεις καμπυλών μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα σε συνάρτηση με το ύψος και τις αντίστοιχες περιπτώσεις συμπεριφοράς των εκπομπών από μια τέτοια καπνοδόχο.

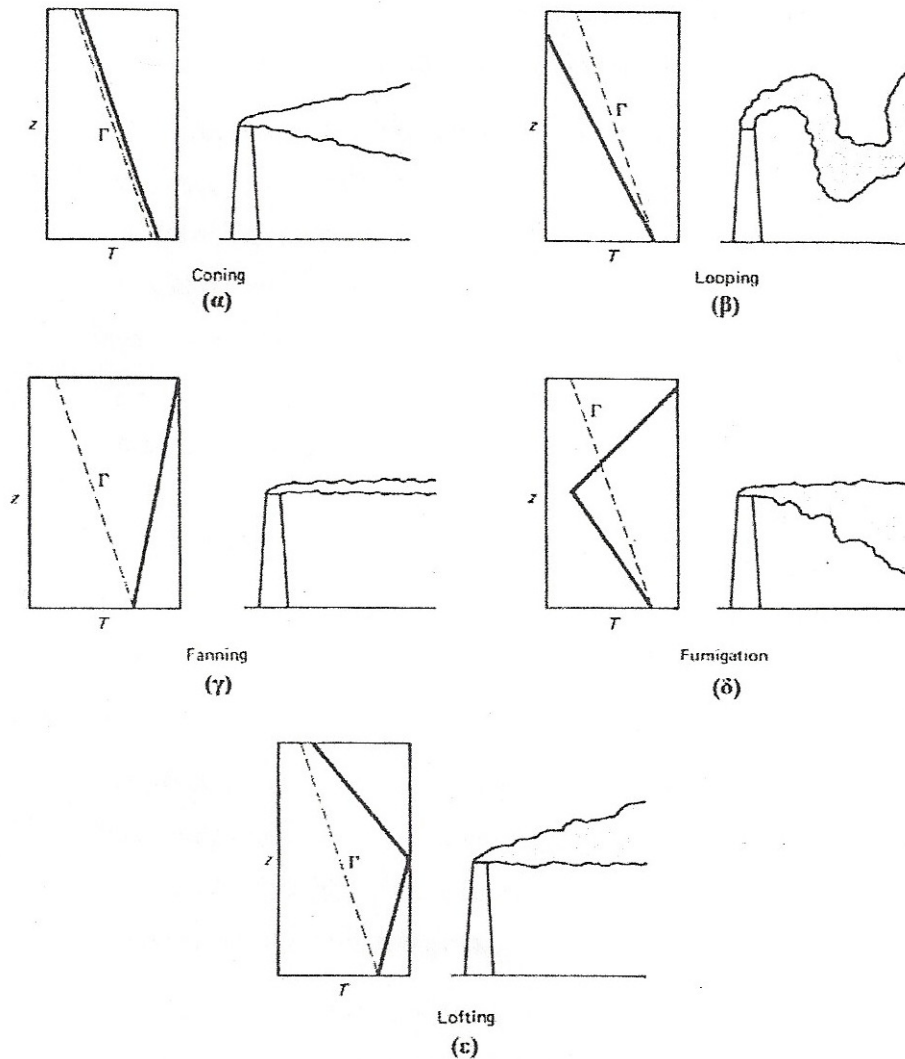
(α) Η ατμόσφαιρα είναι ουδέτερη σταθερή. Το σχήμα του αέριου νέφους των εκπομπών αναμένεται να είναι συμμετρικό (coning) διότι οι κάθετες κινήσεις του αέριου νέφους δεν ενθαρρύνονται από την ατμοσφαιρική σταθερότητα.

(β) Η ατμόσφαιρα είναι πολύ ασταθής και οι κάθετες κινήσεις του αέρα είναι γρήγορες τόσο προς μεγάλα ύψη όσο και προς μικρότερα. Η κίνηση του εκπεμπόμενου αερίου νέφους από την καπνοδόχο είναι σπειροειδής (looping).[1]

(γ) Η ατμόσφαιρα είναι σταθερή και εμποδίζει τις κάθετες κινήσεις και επομένως, και τη διασπορά του εκπεμπόμενου αέριου νέφους κατά την κάθετο. Αποτέλεσμα, είναι το αέριο νέφος να κινείται κατά το οριζόντιο και κατά την διεύθυνση του ανέμου, χωρίς ταυτόχρονη διασπορά κατά την κάθετο, σχηματίζοντας μια στενή οριζόντια λωρίδα (fanning).[1]

(δ) Συμβαίνει σε μια θερμοκρασιακή αναστροφή. Η ατμόσφαιρα είναι ασταθής κάτω από το ύψος αναστροφής. Στην περίπτωση αυτή, το ύψος της καπνοδόχου είναι μικρότερο από το ύψος της θερμοκρασιακής αναστροφής. Αυτό συμβαίνει όταν το αέριο νέφος εκπέμπεται ποσοτικά μέσα στο στρώμα της ατμόσφαιρας το οποίο βρίσκεται κάτω από το ύψος που συμβαίνει η θερμοκρασιακή αναστροφή. Η διασπορά των ρυπαντών που προέρχονται στο αέριο νέφος κατά την κάθετο εμποδίζεται στο ύψος που συμβαίνει η αναστροφή. Οι αέριοι ρυπαντές είναι ελεύθεροι να κινηθούν μόνο προς τα χαμηλότερα ύψη λόγω, του νοητού εμποδίου που θέτει στην κίνηση τους προς μεγαλύτερα ύψη η θερμοκρασιακή μεταβολή. Το αποτέλεσμα είναι να παγιδεύονται οι αέριοι ρυπαντές σε χαμηλά στρώματα του αέρα κοντά στο έδαφος, εμφανίζοντας μεγάλες συγκεντρώσεις κατά την διεύθυνση του ανέμου κοντά στο έδαφος (fumigation).[1]

(ε) Το ύψος της καπνοδόχου είναι μεγαλύτερο από αυτό στο οποίο παρατηρείται η θερμοκρασιακή αναστροφή. Η διασπορά κατά την κάθετο και προς τα πάνω δεν εμποδίζεται ενώ, η διασπορά κατά την κάθετο και προς τα κάτω εμποδίζεται από τη σταθερή ατμόσφαιρα της αναστροφής (lofting). Στην περίπτωση αυτή, δεν επηρεάζεται η περιοχή που βρίσκεται στην άμεση γειτονία με την πηγή εκπομπής στο επίπεδο του εδάφους.[1]



Σχήμα 2.5: Διαμόρφωση του σχήματος εκπεμπόμενου αέριου νέφους ανάλογα με την κατανομή της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα.

Κατά το παρελθόν, εφαρμοζόμενη λύση για την αποφυγή επεισοδίων ρύπανσης από σημειακές πηγές (καπνοδόχοι), τα οποία προκαλούνταν σε περιπτώσεις αναστροφών, ήταν η κατασκευή όλο και υψηλότερων καμινάδων. Με τον τρόπο αυτό, γινόταν προσπάθεια να εξασφαλιστεί η ποσοτική εκπομπή των ρυπαντών σε ύψος πάνω από αυτό της αναστροφής. Αυτό, όπως αναφέρθηκε, είχε ως αποτέλεσμα την ρύπανση και μόλυνση αρκετών λιμνών και υδροβιότοπων σε απομακρυσμένες από την πηγή περιοχές.

Συνεπώς οι σημερινές τακτικές αποσκοπούν στην πρόληψη της αέριας ρύπανσης με την εφαρμογή τεχνολογιών οι οποίες θα ελαχιστοποιούν τις εκπεμπόμενες ποσότητες ρυπαντών και όχι στη εξεύρεση λύσεων που να αποσκοπούν στην αύξηση των δυνατοτήτων διασποράς τους στην ατμόσφαιρα μετά την εκπομπή.

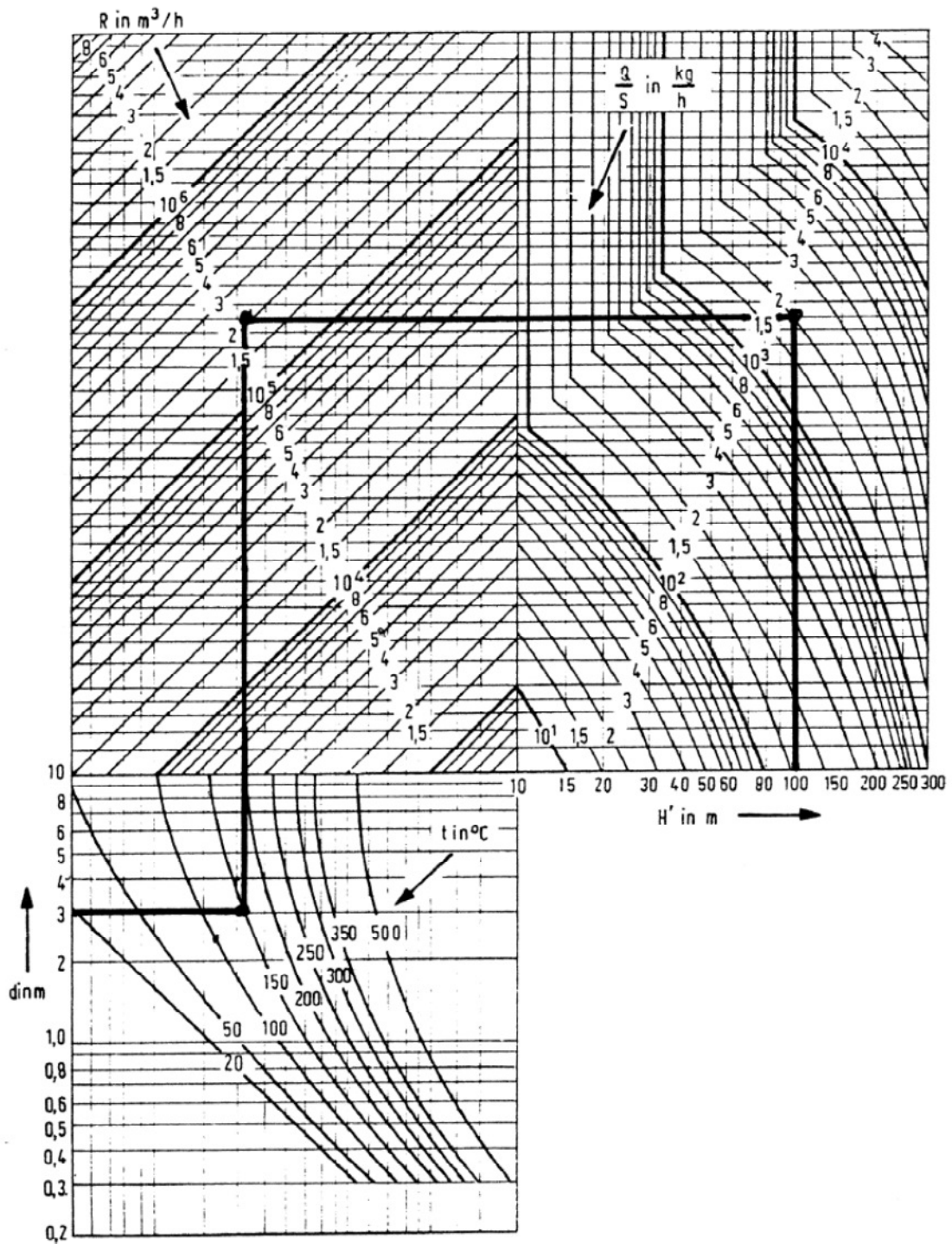
2.4.6. Παράδειγμα εφαρμογής

Όλες οι προαναφερθείσες συναρτήσεις και θεωρίες που περιγράφηκαν μπορούν να αντιπροσωπευτούν από ένα παραμετρικό νομογράφημα. Το νομογράφημα αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό του ύψους των καπνοδόχων σε αρκετές χώρες στην Ευρώπη. Με το νομογράφημα είναι δυνατό να υπολογιστεί το απαιτούμενο ύψος της καπνοδόχο σε σχέση με: την εσωτερική διάμετρο της καπνοδόχο, τον ρυθμό ροής και τη θερμοκρασία των καυσαερίων[4].

Για να μπορεί να υπολογιστεί το ύψος της καπνοδόχο, θεωρείται αρχικά η εσωτερική διάμετρος (κάτω αριστερά). Από το σημείο αυτό φέρεται οριζόντια ευθεία γραμμή μέχρι να τμήσει την καμπύλη θερμοκρασίας των αερίων. Ακολούθως φέρεται κατακόρυφη γραμμή μέχρι αυτή να τμήσει την καμπύλη ποσότητας των καυσαερίων και στην συνέχεια η γραμμή συνεχίζει ευθεία μέχρι την καμπύλη για τον αντίστοιχο λόγο Q/S. Από το σημείο αυτό με κατακόρυφη γραμμή υπολογίζεται τελικά το αντίστοιχο ύψος της καπνοδόχο. Όπου Q η ποσότητα των εκπεμπόμενων καυσαερίων και S συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από την περιεκτικότητα ρύπων στο πλούμιο. Για παράδειγμα, για SO₂ ο συντελεστής είναι 0.2, για CL 0.15 και για H₂S 0.005.

Στο νομογράφημα παρουσιάζεται ενδεικτικά ο υπολογισμός ύψους καπνοδόχο με υποτιθέμενη διάμετρο κορυφής 3m και θερμοκρασία καυσαερίων 150° C. Θεωρείται ότι η ποσότητα των καυσαερίων ανέρχεται στα 200000 m³/h (R) και θεωρείται ότι αυτά συμπεριλαμβάνουν 400kg/h SO₂ (S=0.2). Για τις τιμές αυτές το απαιτούμενο ύψος της καπνοδόχο είναι 100m (βλέπε τις γραμμές στο νομογράφημα).

Σημειώνεται ότι το ύψος που έχει υπολογισθεί ενδεχομένως να πρέπει να αναθεωρηθεί στην περίπτωση άλλων υπαρχουσών συγκεντρώσεων ρύπων στην περιοχή.



Σχήμα 2.6: Νομογράφημα για το υπολογισμό του ύψους της καπνοδόχου^[4]

2.5. Βιβλιογραφία

- [1] Περιβάλλον Ι, Εισαγωγή στην Επιστήμη και Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος – Μάριος Τσέζος, Εμμανουέλλα Ρεμουντάκη, Βοηθητικές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010.
- [2] Πηγές, Διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης – Γιώργος Μπεργελές, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006.
- [3] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [4] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.

3

ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Η θεμελίωση της καπνοδόχου στο κάτω μέρος, στις πλείστες περιπτώσεις, αποτελεί το μόνο σημείο στήριξης της. Συνεπώς η μελέτη θεμελίωσης θα πρέπει να γίνεται με κάθε προσοχή. Μια ομοιόμορφη καθίζηση της βάσης μπορεί να μην αποτελεί σημαντικό πρόβλημα αλλά, ενδεχομένως να παρουσιάσει προβλήματα σε παρελκόμενα μέρη που συνδέουν την καπνοδόχο με τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις.

Είναι πολύ σημαντικό να αποφευχθούν οποιεσδήποτε διαφορικές καθιζήσεις στη θεμελίωση της καπνοδόχου. Γενικά οι καπνοδόχοι χαρακτηρίζονται ως υψικορμες κατασκευές με το ύψος τους να είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την διάμετρό τους. Ως εκ τούτου, ενδεχόμενες διαφορικές καθιζήσεις θα επιφέρουν σχετικά μεγάλες μετακινήσεις στην κορυφή της καπνοδόχου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία πρόσθετων φορτίων στο φορέα της καπνοδόχου (κέλυφος) λόγω φαινομένων δευτέρας τάξης (P-Δ).

Τέλος κατά τον σχεδιασμό της θεμελίωσης των καπνοδόχων θα πρέπει να λαμβάνεται και ενδεχόμενη αλληλεπίδραση φορτίων στο έδαφος από γειτονικές κατασκευές. Γενικά οι καπνοδόχοι κατασκευάζονται πολύ κοντά στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που θα εξυπηρετήσουν. Λόγω της χρήσης τους, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις ενδέχεται να φέρουν τεράστια φορτία επί του εδάφους. Αυτό ενδέχεται να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους σε κοντινό πεδίο όπου λαμβάνει χώρα και η κατασκευή της καπνοδόχου.

3.2. Εδαφικές παράμετροι.

Παρά το μεγάλο ύψος τους, γενικά οι καπνοδόχοι, δεν επιφέρουν μεγάλα σχετικά φορτία στο έδαφος. Συνήθως, μια κυκλική ενιαία θεμελίωση ή θεμελίωση σχήματος "δακτυλιδιού" είναι ικανοποιητική για την ασφαλή μεταφορά των μόνιμων φορτίων στο έδαφος. Τα κινητά φορτία είναι αυτά που θεωρούνται καθοριστικά για τη σχεδίαση της θεμελίωσης. Ειδικά ο άνεμος θεωρείται το δυσμενέστερο φορτίο για τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης αφού εκτός του ότι δημιουργεί συχνά ταλαντώσεις στην καπνοδόχο, επιβαρύνει και τη θεμελίωση με φορτία εκτροπής. Για την σχεδίαση της θεμελίωσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, η αντοχή του εδάφους, επικείμενες καθιζήσεις και η ανεμοπίεση ως δυναμικό φορτίο. Η δυναμική ιδιότητα της ανεμοπίεσης παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση χαλαρών ή κοκκιδών στρωμάτων εδάφους. Η επαναλαμβανόμενη ταλάντωση λόγω ανεμοπίεσης, σε καπνοδόχους όπου εδράζονται σε τέτοιου είδους εδάφη, ενδέχεται να αποτελέσει την αιτία για μεγάλες καθιζήσεις

Γενικά για σχετικά μικρού μεγέθους θεμελιώσεις καπνοδόχων συνήθως η σχεδίαση αποσκοπεί στην μη υπέρβαση των επιτρεπόμενων τάσεων εδάφους. Για μεγαλύτερου όμως μεγέθους θεμελίωση τα σεισμικά φορτία διαδραματίζουν μεγάλο ρόλο στη σχεδίαση ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη σεισμική επικινδυνότητα.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην θεμελίωση των καπνοδόχων είναι η ενδεχόμενη ανασήκωση του θεμελίου. Φυσικά αυτό εξαρτάται από τα φορτία που δρουν στην κατασκευή και από τις παραμέτρους του εδάφους. Στην περίπτωση παρουσίας σκληρού εδάφους (βράχου) ή χαλαρής άμμου τα κινητά φορτία είναι αυτά που θα επιφέρουν μια πιθανή ανασήκωση της βάσης. Σημειώνεται ότι, ενδεχόμενη ανασήκωση του θεμελίου απαγορεύεται στις περιπτώσεις ύπαρξης υδροφόρου οριζοντα κοντά στην επιφάνεια (π.χ. περιοχές κοντά σε θάλασσα).[2]

Η παρουσία σκληρού βράχου στη θεμελίωση της καπνοδόχου επηρεάζει τόσο την απόκριση της υπό φορτία ανέμου αλλά και υπό σεισμικά φορτία. Η ακαμψία του βράχου επιδρά στην ιδοσυχνότητα της καπνοδόχου και κατ' επέκταση στην απόκριση της κατασκευής λόγω των φορτίων του ανέμου. Η ακαμψία της θεμελίωσης επηρεάζει την παραμόρφωση της κατασκευής και το μέγεθος των δρόσων φορτίων. Για το σκοπό αυτό ενδείκνυται να γίνεται μια περισσότερη εμπειριστατωμένη έρευνα διερεύνησης του εδάφους της θεμελίωσης. Σε ειδικές περιπτώσεις η έρευνα μπορεί να περιλαμβάνει και την διερεύνηση του εδάφους με γεωτρήσεις.

Πολύ σημαντική παράμετρος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η αλληλεπίδραση της θεμελίωσης της καπνοδόχου και των βιομηχανικών κτιρίων σε κοντινό πεδίο. Τα τεράστια φορτία που μεταφέρονται από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεταβάλλουν την κατανομή της πίεσης κάτω από τη θεμελίωση της καπνοδόχου. Αυτό εγκυμονεί κινδύνους για την ευστάθεια της καπνοδόχου. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο θα πρέπει η διαφορά των πιέσεων από τα μόνιμα φορτία στο έδαφος να μην υπερβαίνει το 15% [3].

Στον **Πίνακα 3.1**, δίνονται λεπτομέρειες για τις σχέσεις μεταξύ των φορτίων και των επιτρεπομένων τάσεων. Αντίστοιχα στον **Πίνακα 3.2**, δίνονται επιπλέον πληροφορίες για την σχέση των επιβαλλόμενων και των επιτρεπόμενων φορτίων στους πασσάλους για μεγάλη σχετικά καπνοδόχο. Οι **Πίνακες 3.1** και **3.2**, έχουν ληφθεί από το μη επίσημο και αδημοσίευτο Αγγλικό Πρότυπο για καπνοδόχους [4].

Πίνακας 3.1: Μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις εδάφους για θεμελιώσεις καπνοδόχων

Συνδυασμοί φορτίων για ελέγχους λειτουργικότητας	Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση
1. Μόνιμα φορτία καπνοδόχου, παρελκόμενων, θεμελίωσης, επιχωματώσεις (αν υπάρχουν) και άλλα μόνιμα επιβαλλόμενα φορτία.	0.8 x καθαρή τάση εδάφους
2. Όπως στο σημείο 1 και πρόσθετα τα φορτία του ανέμου.	0.35 x μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εδάφους
3. Φορτία ανέμου και τα ελάχιστα μόνιμα φορτία από το κέλυφος και την θεμελίωση με δυνατότητα μετακίνησης αν το έδαφος προέρχεται από επιχωμάτωση.	0.35 x μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εδάφους
Συνδυασμοί για τον έλεγχο ασφαλείας	Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση
4. Φορτία ανέμου και μόνιμα φορτία από το σύνολο της καπνοδόχου, παρελκόμενα, θεμελίωση, επιχωματώσεις (αν υπάρχουν) και άλλα μόνιμα επιβαλλόμενα φορτία.	0.55 x μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εδάφους
5. Φορτία ανέμου και τα ελάχιστα μόνιμα φορτία από το κέλυφος και την θεμελίωση με δυνατότητα μετακίνησης αν το έδαφος προέρχεται από επιχωμάτωση.	0.55 x μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εδάφους

Σημειώσεις για τον **Πίνακα 3.1**:

1. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι αυτή που αντιστοιχεί με την τάση που με τον δυσμενέστερο συνδυασμό.
2. Η καθαρή τάση είναι η συνολική τάση εκτός από το υλικό εισκαφής

Πίνακας 3.2: Μέγιστα επιτρεπόμενα φορτία πασσάλων σε θεμελιώσεις καπνοδόχων

Συνδυασμοί φορτίων για ελέγχους λειτουργικότητας	Μέγιστο θλιπτικό φορτίο πασσάλου	Μέγιστο εφελκυστηκό φορτίο πασσάλου
1. Μόνιμα φορτία καπνοδόχου, παρελκόμενων, θεμελίωσης, επιχωματώσεις (αν υπάρχουν) και άλλα μόνιμα επιβαλλόμενα φορτία	0.8 x το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο πασσάλου	
2. Όπως στο σημείο 1 και πρόσθετα τα φορτία του ανέμου	1.0 x το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο πασσάλου	0.33 x της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής πασσάλου

3. Φορτία ανέμου και τα ελάχιστα μόνιμα φορτία από το κέλυφος και την θεμελίωση με δυνατότητα μετακίνησης αν το έδαφος προέρχεται από επιχωμάτωση.	1.0 x το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο πασσάλου	0.33 x της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής πασσάλου
Συνδυασμοί για τον έλεγχο ασφαλείας	Μέγιστο θλιπτικό φορτίο πασσάλου	Μέγιστο εφελκυστικό φορτίο πασσάλου
4. Φορτία ανέμου και μόνιμα φορτία από το σύνολο της καπνοδόχου, παρελκόμενα, θεμελίωση, επιχωματώσεις (αν υπάρχουν) και άλλα μόνιμα επιβαλλόμενα φορτία	0.55 x μέγιστη αντοχή του πασσάλου μέσα στο έδαφος	0.55 x της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής πασσάλου
5. Φορτία ανέμου και τα ελάχιστα μόνιμα φορτία από το κέλυφος και την θεμελίωση με δυνατότητα μετακίνησης αν το έδαφος προέρχεται από επιχωμάτωση.	0.55 x μέγιστη αντοχή του πασσάλου μέσα στο έδαφος	0.55 x της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής πασσάλου

Σημειώσεις για τον **Πίνακα 3.2**.

- [1] Το μέγιστο φορτίο πασσάλου προσδιορίζεται από τον δυσμενέστερο συνδυασμό από όλα τα επιβαλλόμενα φορτία.

3.3. Είδη θεμελιώσεων

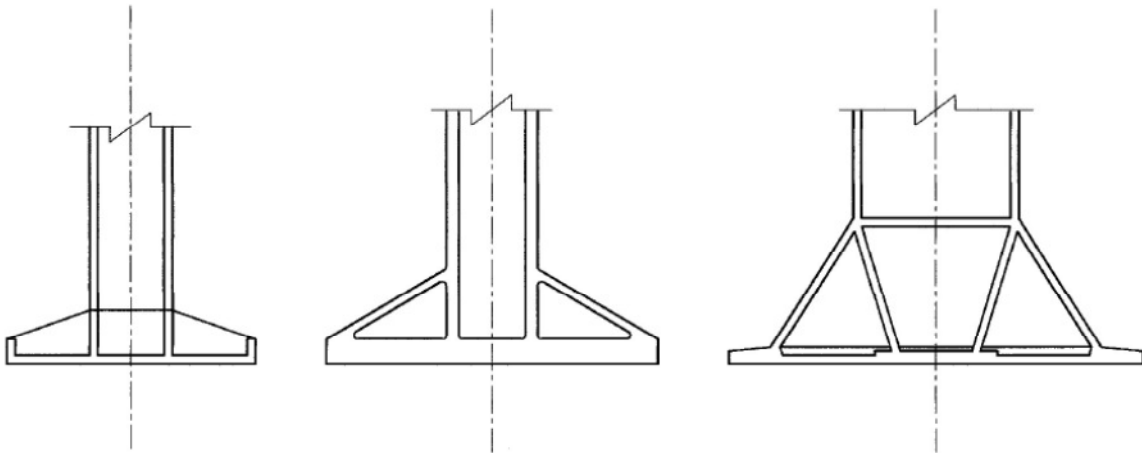
3.3.1. Επιφανειακές θεμελιώσεις

Συνήθης τακτική σε "καλής" ποιότητας έδαφος είναι η στήριξη των καπνοδόχων με επιφανειακές θεμελιώσεις. Αυτές μπορεί να είναι ενιαία είτε γενική κοιτόστρωση είτε μεμονωμένο πέδιλο σχήματος "δακτυλιδιού". Συνήθως έχουν κυκλικό σχήμα και ομοιόμορφο πάχος. Για λόγους οικονομίας όμως μπορεί το πάχος να μεταβάλλεται. Συνήθως, η εξωτερική διάμετρος της θεμελίωσης είναι της τάξης περίπου 50% μεγαλύτερη από την εξωτερική διάμετρο της βάσης της καπνοδόχου. Αυτό όμως δεν θεωρείται ως σταθερά αφού για μεταλλικές καπνοδόχοι ο λόγος αυτός μεταβάλλεται σε σχέση με της αναλογία, ύψους προς διάμετρο.

Σε μεγάλες καπνοδόχους η θεμελίωση με γενική κοιτόστρωση δεν ενδείκνυται για λόγους οικονομίας. Στις περιπτώσεις αυτές η θεμελίωση γίνεται με πέδιλο σχήματος "δακτυλιδιού". Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το έδαφος είναι υψηλής αντοχής ή σε περίπτωση που η θεμελίωση υλοποιείται και με πασσάλους, το πάχος της θεμελίωσης δεν ξεπερνά τα 2 ή 3m.

Σε μερικές περιπτώσεις, λόγω μειωμένων αντοχών του εδάφους, η σχεδίαση μεγάλων διαστάσεων θεμελίωσης είναι αναπόφευκτη. Έτσι η θεμελίωση μπορεί να ενισχυθεί με ειδικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες

(ενισχύσεις, διαμόρφωση κωνοειδούς σχήματος) με σκοπό να αυξηθεί η ακαμψία της. Τυπικά παραδείγματα αυτών των θεμελιώσεων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1: Ειδικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες σε θεμελιώσεις καπνοδόχων με μειωμένες αντοχές εδάφους

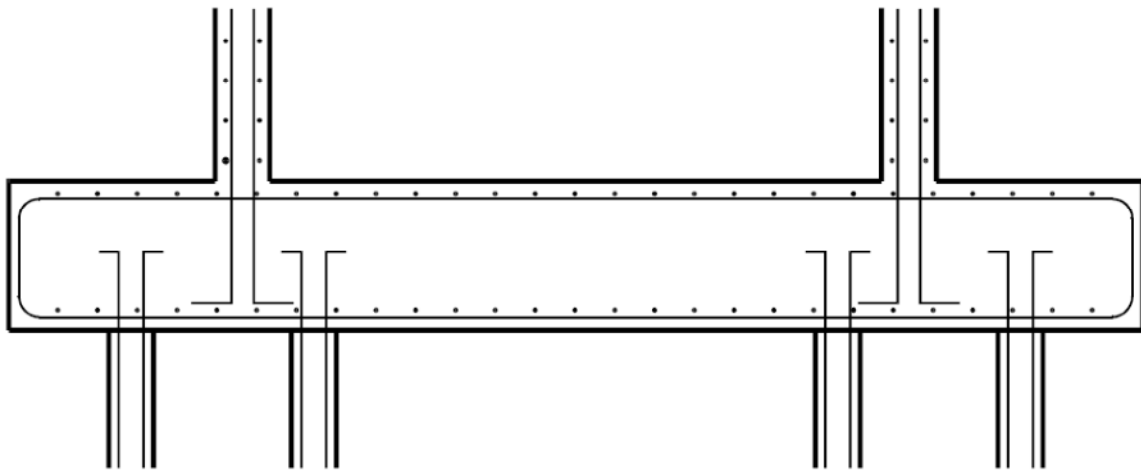
3.3.2. Πασσαλοθεμελίωση

Στην περίπτωση όπου το έδαφος έχει αρκετά μειωμένες αντοχές και η θεμελίωση δεν μπορεί να γίνει επιφανειακά τότε η ενδεδειγμένη λύση είναι αυτή της πασσαλοθεμελίωσης. Συνήθως σκόπιμη είναι η χρήση πασσάλων τριβής παρά φερόντων πασσάλων λόγω του ότι αποτρέπεται το φαινόμενο της ανασήκωσης του θεμελίου. Αυτό ενδείκνυται σε περιπτώσεις υψίκορμων μεταλλικών καπνοδόχων. Οι πάσσαλοι αυτοί κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ τα εφελκυστικά φορτία είναι αυτά που κυριεύουν της σχεδίασής τους.

Παλαιότερα, οι πάσσαλοι τοποθετούνταν κεκλιμένα ώστε να είναι σε θέση να παραλάβουν και οριζόντια φορτία. Συνήθης πρακτική είναι να τοποθετούνται όσο το δυνατό περιμετρικά και απομακρυσμένοι από το κέντρο της βάσης. Μια σύγχρονη τακτική είναι οι πάσσαλοι να τοποθετούνται κατακόρυφα για λόγους οικονομίας ενώ οποιαδήποτε οριζόντια φορτία (π.χ. ανεμοπίεση) παραλαμβάνονται από την διατμητική αντοχή της διατομής τους.

Στην περίπτωση σχεδίασης υπό σεισμικές δράσεις, τα οριζόντια φορτία μπορεί να είναι σχετικά μεγάλα ώστε να παραληφθούν από την διατμητική αντοχή των πασσάλων. Σε αυτή την περίπτωση, ενδείκνυται όπως ληφθεί υπόψη και η παθητική αντίσταση του εδάφους στην επιφάνεια των πασσάλων.

Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται μια τυπική τομή θεμελίωσης καπνοδόχου με πασσάλους.



Σχήμα 3.2: Τυπική τομή θεμελίωσης καπνοδόχου με πασσάλους

3.3.3. Θεμελίωση σε υποδομές ή με στήριξη σε μεταλλική κατασκευή

Η "θεμελίωση" των μεταλλικών καπνοδόχων μπορεί να γίνει σε κάποιες περιπτώσεις πάνω από το έδαφος. Στις περιπτώσεις αυτές οι μεταλλικοί καπνοδόχοι τοποθετούνται σε ήδη υπάρχουσες υποδομές των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που εξυπηρετούν. Με αυτή την τεχνική μειώνεται το κόστος των αγωγών που απαιτούνται για την μεταφορά των καυσαερίων από τον λέβητα. Παράλληλα το κόστος μειώνεται αφού δεν απαιτείται η κατασκευή τυπικής θεμελίωσης.

Μια άλλη τεχνική είναι η στήριξη της καπνοδόχου με πρόσθετη εξωτερική, συνήθως δικτυωτή, μεταλλική κατασκευή αντιστήριξης. Αυτή συνίσταται σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ικανοποιητικός χώρος για την κατασκευή, ικανών διαστάσεων, συμβατικής θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση αυτή η καπνοδόχο επηρεάζεται περισσότερο από τα φορτία ανέμου, αφού μια τέτοιου είδους στήριξη προσδίδει στην κατασκευή μειωμένη απόσβεση από ότι θα είχε με μια συμβατική θεμελίωση.

Συνήθως οι κατασκευές αυτές είναι ορθογωνικές σε κάτοψη αν και γενικά οι καπνοδόχοι διαθέτουν κυκλικό σχήμα. Το σχήμα αυτό ενδείκνυται ουσιαστικά για λόγους οικονομίας στην κατασκευή. Παράλληλα με αυτή τη διάταξη θα μπορεί εύκολα να τοποθετηθούν και διαγώνιοι σύνδεσμοι ακαμψίας, κάτι που θα ήταν δύσκολο με κυκλικού σχήματος κάτοψη. Η σύνδεση του μεταλλικού φορέα γίνεται με επιπρόσθετα περιμετρικά οριζόντια στοιχεία ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά των φορτίων από την το κέλυφος της καπνοδόχου στον μεταλλικό φορέα. Σημειώνεται ότι θα πρέπει η σύνδεσή αυτή να μην δημιουργεί τεράστιες συγκεντρώσεις τάσεων στο κέλυφος της καπνοδόχου.

3.4. Ανάλυση και σχεδίαση θεμελιώσεων

Η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής επηρεάζει την κατανομή της πίεσης κάτω από το πέδιλο. Η επιρροή αυτή εξαρτάται από την ακαμψία της θεμελίωσης και της ανοδομής. Γενικά η θεμελίωση θεωρείται άκαμπτη και έτσι η κατανομή της πίεσης μεταβάλλεται γραμμικά. Στη περίπτωση πολύ μεγάλων σχετικά διαστάσεων θεμελίων ή στην περίπτωση χαμηλών αντοχών εδάφους θα πρέπει να γίνεται μια πιο εξειδικευμένη ανάλυση της θεμελίωσης, με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στην ανάλυση θα πρέπει να συμπεριληφθούν και τα ωφέλημα φορτία ήτοι, φορτία ανέμου και σεισμού.

Άκαμπτη γενικά θεωρείται και η θεμελίωση με πασσάλους, αρκεί οι πάσσαλοι να είναι ίδιου μήκους. Η ανάλυση γενικά των πασσάλων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα εφελκυστικά φορτία που δρουν σε αυτούς. Στον Ευρωκώδικα 7 (Σχεδίαση θεμελιώσεων) δίδονται όλες οι αντίστοιχες διατάξεις για τη διαστασιολόγηση των πασσάλων.

Ο CICIND^[2] καθορίζει όπως ο συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνεται για ανατροπή υπό φορτία ανέμου ή σεισμού δεν πρέπει να είναι μικρότερος του 1,5. Την ίδια τιμή καθορίζει και ο Ευρωκώδικας 7. Στον έλεγχο αυτό σημειώνεται ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των πασσάλων στην αντίσταση ανατροπής, λόγω τριβής αλλά και του ίδιου βάρους τους.

Σε κάποιες περιπτώσεις οι καπνοδόχοι διαθέτουν ειδική οπή για την σύνδεση τους εκ των υστέρων, μετά την κατασκευή, με τις εγκαταστάσεις τις μονάδας που θα εξυπηρετούν (π.χ. σύνδεση με τον λέβητα). Το άνοιγμα μπορεί να είναι κοντά ή στο κάτω μέρος της καπνοδόχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανακατανομή των κατακόρυφων φορτίων στην θεμελίωση. Μεγαλύτερες εντάσεις μεταφέρονται στην θεμελίωση στην περιοχή απέναντι από το άνοιγμα. Στην περίπτωση που το άνοιγμα είναι σχετικά μεγάλο η ανακατανομή των φορτίων είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Οι κρίσιμες περιοχές για την διαστασιολόγηση της θεμελίωσης, σε κάμψη και διάτμηση, είναι οι περιοχές εξωτερικά από το κέλυφος της καπνοδόχου. Στην περίπτωση όμως μεγάλης διαμέτρου κελύφους της καπνοδόχου πιο κρίσιμες είναι οι περιοχές εσωτερικά του κελύφους. Πολλές φορές κρίσιμη διατομή, όπως είναι κατανοητό, για την σχεδίαση (υπολογισμός του οπλισμού) είναι αυτή που βρίσκεται κατάντη της πλευράς που ασκείται η ανεμοπίεση.

Γενικά όπως αναφέρθηκε ενδείκνυται όπως η θεμελίωση των καπνοδόχων να είναι κυκλικού σχήματος σε κάτοψη. Το σχήμα αυτό όμως δημιουργεί προβληματισμούς όσο αφορά την διάταξη του οπλισμού, η οποία μπορεί γίνεται είτε ακτινωτά είτε με ορθογώνιο πλέγμα οπλισμού. Φυσικά αυτό θα πρέπει να αξιολογείται αναλόγως της περίπτωσης. Στις περιπτώσεις μικρών σχετικά θεμελίων, η διατομή (πάχος) είναι ομοιόμορφη. Σε αυτή την περίπτωση το ορθογωνικό πλέγμα οπλισμού είναι πιο οικονομικά συμφέρον. Φυσικά για λόγους ενίσχυσης της αντοχής σε κάποιες διατομές ενδέχεται να προστεθεί και ακτινικά οπλισμός.[2]

Σχεδόν πάντοτε, μεγάλες θεμελιώσεις καπνοδόχων (όπως και σε περιπτώσεις πασσαλοθεμελίωσης) έχουν σχήμα "δακτυλιδιού". Σε αυτή την περίπτωση ο οπλισμός ενδείνεται να είναι ακτινικός ή κυκλικός (καμπύλος). Προφανώς το σχήμα της θεμελίωσης προσφέρεται για αυτή την διάταξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση ακτινικής διάταξης η διατομή των οπλισμών ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη από αυτών σε "κυκλική" διάταξη, ώστε να είναι σε θέση να παραλάβουν την μέγιστη ροπή.[2]

Στην περίπτωση ανάλυσης της θεμελίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι εύκολο να προσδιοριστεί η βέλτιστη διάταξη του οπλισμού. Λόγω του ότι σε αυτή την περίπτωση είναι γνωστές οι κρίσιμες περιοχές, μπορεί να γίνει μια μειχτή διάταξη οπλισμού για λόγους οικονομίας.

Γενικά ο οπλισμός για την θεμελίωση τοποθετείται, ως συνήθως, στο κάτω μέρος. Ως άνω οπλισμός τοποθετείται ο ελάχιστος που καθορίζει ο αντίστοιχος κανονισμός (Ευρωκώδικας 2: Σχεδίαση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος). Αυτός θα "λειτουργήσει" στις περιπτώσεις ανασήκωσης του πέδιλου.

Τέλος σημειώνεται ότι κατά την σχεδίαση της θεμελίωσης μεταλλικών καπνοδόχων θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την σύνδεση της θεμελίωσης με την ανωδομή. Αυτό γίνεται, όπως συνηθίζεται σε όλες σχεδόν τις μεταλλικές κατασκευές, με χρήση μεταλλικών αγκυρίων. Το κέλυφος της καπνοδόχου κοχλιώνεται μέσω μετωπικής περιμετρικής πλάκας στα αγκύρια. Τα αγκύρια αυτά θα σχεδιάζονται έναντι εξόλκευσης, αφού λόγω των δρόσων οριζόντιων φορτίων στην ανωδομή ενδέχεται να καταπονούνται από τεράστια εφελκυστικά φορτία.

3.5. Κατασκευή θεμελιώσεων

Η κατασκευή της θεμελίωσης των καπνοδόχων απαιτεί μεγάλο όγκο σκυροδέματος. Αυτό εγκυμονεί κινδύνους κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης, αφού λόγω του όγκου ενδέχεται να παρουσιαστούν μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στο σκυρόδεμα. Συνήθης τακτική για τέτοιου μεγέθους σκυροδετήσεις είναι η χρήση διαφόρων πρόσμικτων, π.χ, ιπτάμενης τέφρας, ώστε να αμβλυθεί όσο το δυνατόν το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης..

Πολύ σημαντικό για την κατασκευή των θεμελίων είναι η σωστή τοποθέτηση των αγκυρίων που θα κοχλιωθεί η ανωδομή. Σε αυτή την περίπτωση ενδείνεται όπως τοποθετηθούν δύο μετωπικές πλάκες. Η πρώτη θα τοποθετηθεί μαζί με τα αγκύρια ώστε να αποτελέσει την βάση. Με αυτή την μετωπική πλάκα είναι δυνατό τα αγκύρια να τοποθετηθούν με ακρίβεια και επιπλέον μπορεί να γίνει εύκολα η οριζοντίωση της βάσης - σύνδεσης. Είναι πολύ σημαντικό η βάση (θεμελίωση) να είναι οριζοντιωμένη πριν την τοποθέτηση-σύνδεση της ανωδομής.[1]

Στην **Εικόνα 3.1** απεικονίζεται η σκυροδέτηση θεμελίωσης καπνοδόχου 200m ύψους στην Νότια Αφρική. Η καπνοδόχος κατασκευάστηκε το 1989, θεμελιωμένη σε ενιαία κοιτόστρωση διαμέτρου 22m και πάχους 3m. Η κατασκευή της θεμελίωσης έλαβε χώρα σε σκληρό βράχο. Από τη εικόνα μπορεί να διαφανεί η διάταξη του οπλισμού υπό μορφή ορθογωνικού πλέγματος.



Εικόνα 3.1: Κατασκευή θεμελίωσης 200m καπνοδόχου στην Νότια Αφρική.

3.6. Κόστος θεμελίωσης

Το κόστος της θεμελίωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στο συνολικό κόστος της καπνοδόχου εξ' ολοκλήρου. Στις περιπτώσεις μεγάλων θεμελιώσεων- ενιαίας κοιτόστρωσης ή σχήματος δακτυλιδιού- το κόστος της θεμελίωσης αντιστοιχεί στο 20%, του συνολικού κόστους της κατασκευής της καπνοδόχου. Το ποσοστό αυτό είναι δυνατό να μειωθεί στο 10%, σε περιπτώσεις θεμελιώσεων δακτυλιοειδούς μορφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια δακτυλιοειδούς θεμελίωση με πασσάλους μπορεί να αποδειχθεί οικονομικότερη από μια θεμελίωση ενιαίας κοιτόστρωσης ίδιας διαμέτρου[2].

3.7. Βιβλιογραφία

- [1] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [2] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.

4

ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ

4.1. Εισαγωγή - Γνωστικό υπόβαθρο

4.1.1. Η σημασία των φορτίων ανέμου για τις καπνοδόχους

Ο άνεμος αποτελεί, συνήθως, το σημαντικότερο παράγοντα για την διαστασιολόγηση των μεταλλικών καπνοδόχων. Οι μεταλλικές καπνοδόχοι όντας υψίκορμες και εύκαμπτες κατασκευές διαθέτουν τιμές ιδιοσυχνοτήτων που προσεγγίζουν αυτές του ανέμου. Αυτό καθιστά τις καπνοδόχους επιρρεπείς στη δυναμική συμπεριφορά του ανέμου, πράγμα που επιφέρει στην κατασκευή ανεπιθύμητες ταλαντώσεις - τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια στη ροή του ανέμου. Συνυφασμένο με τις ταλαντώσεις αυτές, είναι το φαινόμενο της κόπωσης.

Φυσικά δεν μπορούν να απουσιάζουν και οι "στατικές" πιέσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του κελύφους- λόγω των δυνάμεων άνωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Και πάλι αυτές παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη κατανομή στην επιφάνεια του κελύφους, πολύ διαφορετική από κάθε άλλου είδους κατασκευή (σχήματος) - η οποία εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

4.1.2. Ανεμοπίεση

Απαραίτητη για την κατανόηση και τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς μια κατασκευής που υπόκειται σε ανεμοπίεση, είναι η γνώση της "δομής του ανέμου".

Η συμπεριφορά αυτή διαφέρει από τόπου εις τόπο, εξαρτώμενη από το γενικό κλίμα της περιοχής, τη φυσική γεωγραφία της τοποθεσίας, τις επιφανειακές συνθήκες του χώρου και της γειτνιαζουσας περιοχής καθώς και πολλούς άλλους παράγοντες.

Οι άνεμοι από μετεωρολογικής άποψης, είναι κινήσεις αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι μεγάλης κλίμακας κινήσεις προκαλούνται κυρίως από θερμοκρασιακές διαφορές εντός της ατμόσφαιρας, που οφείλονται στη διαφορετική ηλιακή θερμοκρασία κάθε τόπου.

Λόγω του διαφορετικού ποσού ενέργειας ανά μονάδα εδαφικής επιφάνειας, που προσιτάται από τον ήλιο και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, προκύπτει μια θερμοκρασιακή διαφορά και άρα μια διαφορά πιέσεως, η οποία σε συνδυασμό με τις δυνάμεις Coriolis και την φυγόκεντρο που συνδέονται με την περιστροφή της γης προκαλούν τις κινήσεις των αέριων μαζών.

Η κατώτερη περιοχή της ατμόσφαιρας όπου ευρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού είναι γνωστή σαν το συνοριακό στρώμα του πλανήτη (planetary layer) και η κίνηση του αέρα σε αυτό παρακωλύεται από τις δυνάμεις τριβής και εμπόδια επί της επιφάνειας του εδάφους, καθώς επίσης και από τις τάσεις Reynolds, που προκύπτουν από δυνάμεις αλληλεπιδράσεως κάθετες στη διεύθυνση κινήσεως και οφείλονται σε στροβιλισμούς.

Ο στροβιλισμός, που μπορεί να είναι μηχανικής ή θερμικής προελεύσεως, προκαλεί επίσης αιφνίδιες αυξομειώσεις της ταχύτητας του ανέμου (κοινώς γνωστών ως ανεμορριπών) πάνω σε ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων και ευρών

4.1.3. Πιέσεις ανέμου

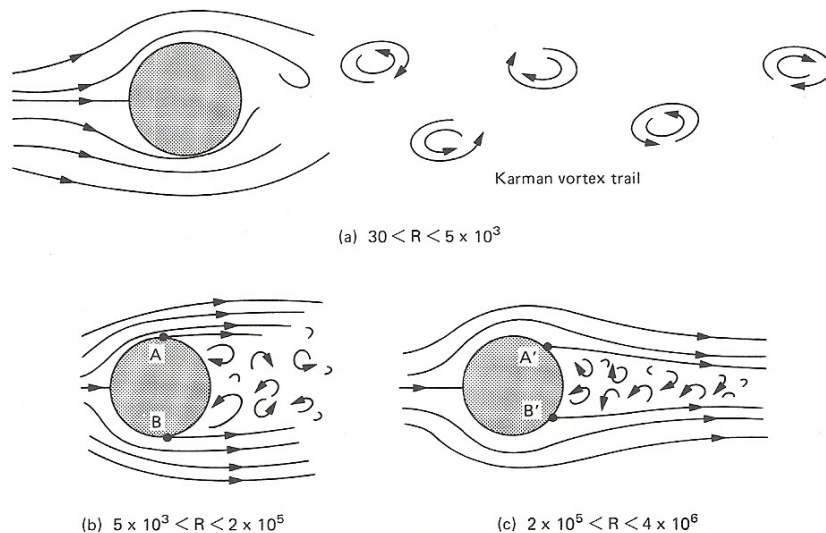
Η ροή ενός ασυμπίεστου ρευστού (υγρού ή αερίου) γύρω από ένα κυκλικό κύλινδρο (όπως είναι οι καπνοδόχοι) κάθετο στη ροή επηρεάζεται από τον αριθμό Reynolds ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.1)$$

όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds, ρ η πυκνότητα του ρευστού, V η ταχύτητα του ρευστού, D η διάμετρος του κυλίνδρου (καπνοδόχου) και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Το προφίλ της ροής γύρω από τον κύλινδρο εξαρτάται από το εύρος των τιμών του αριθμού Reynolds (**Σχήμα 4.1**). Για παράδειγμα, για τιμές του αρ. Reynolds μεγαλύτερες από 30 αλλά μικρότερες από 5000 η

ροή είναι στρωτή αλλά ασταθής. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται, κατάντη της ροής του αέρα και πίσω από την καπνοδόχο, δίνες εναλλάξ γνωστές και ως von Karman vortex trail - αυτό φαίνεται στο **Σχήμα 4.1(a)**. Όταν ο αρ. Reynolds ξεπεράσει την τιμή 5000, η ροή πίσω από την καπνοδόχο αρχίζει να γίνεται τυρβώδης, ενώ η ροή ανάντη παραμένει στρωτή. Η ροή γίνεται όλο και περισσότερο τυρβώδης όσο η τιμή του αρ. Reynolds αυξάνεται. Σημαντικό είναι και το φαινόμενο αλλαγής του σημείου μεταβολής της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Πριν ο αρ. Reynolds λάβει την κρίσιμη τιμή 2×10^5 , ο διαχωρισμός της ροής πραγματοποιείται στα σημεία A και B (**Σχήμα 4.1-b**). Στην περίπτωση αυτή, το άνοιγμα της ροής εξαρτάται από τη διάμετρο του κυλίνδρου - ενώ η διασπορά των δινών είναι περιοδική. Καθώς ο αρ. Reynolds ξεπεράσει τιμή 2×10^5 (κρίσιμη τιμή) τα σημεία διαχωρισμού της ροής ξαφνικά μετατοπίζονται από το A και B στα A' και B' αντίστοιχα όπως, φαίνεται στο **Σχήμα 4.1-c**. Αυτό προκαλεί μείωση του ανοίγματος και κατ' επέκταση μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης. Σημειώνεται ότι, σε αυτή την περίπτωση η διάχυση των δινών είναι τυχαία. Τέλος όταν ο αρ. Reynolds ξεπεράσει την τιμή 4×10^6 , η εναλλαγή των δινών γίνεται και πάλι περιοδική.[5]



Σχήμα 4. 1: Η αλλαγή της ροής γύρω από κυκλικό κύλινδρο αναλόγως της τιμής του αρ. Reynolds [5]

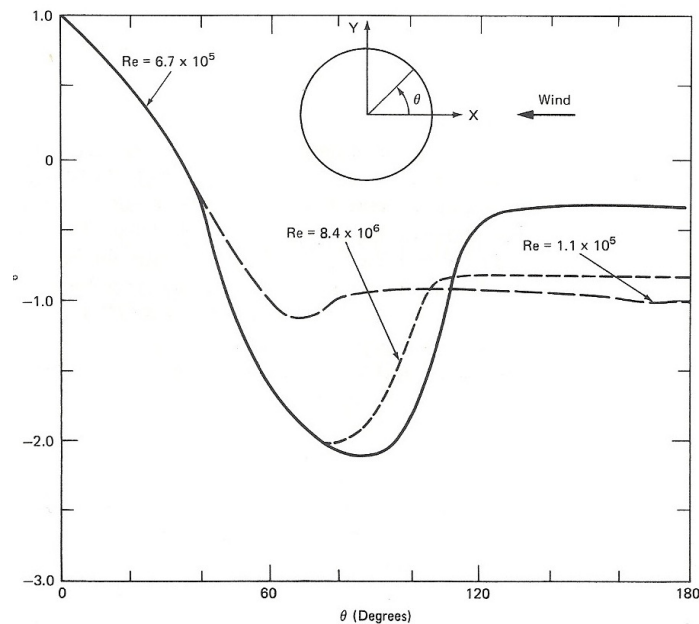
Από όσα αναφέρθηκαν γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν τρεις κατηγορίες για τον αρ. Reynolds οι οποίες χαρακτηρίζουν και τους στροβιλισμούς. Οι κατηγοριοποιήση φαίνεται στον **Πίνακα 4.1**.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηρισμός των στροβιλισμών της ροής κατάντη κυκλικού κυλίνδρου σε σχέση με τον αριθμό Reynolds.[5]

Κατηγορία ροής	Re	Χαρακτηρισμός στροβιλισμού (δινών)
Υποκρίσιμη (subcritical)	$30 - 2 \times 10^5$	Κανονική (σταθερή συχνότητα)
Υπερκρίσιμη (supercritical)	$2 \times 10^5 - 4 \times 10^6$	Τυχαία (μεταβλητή συχνότητα)
Μετά-κρίσιμη (hypercritical)	$> 4 \times 10^6$	Κανονική (σταθερή συχνότητα)

Αποτέλεσμα της μεταβλητότητας της ροής γύρω από τον κύλινδρο είναι η διαφοροποίηση της τιμής του συντελεστή κατανομής της πίεσης (c_p). Οι τιμές του συντελεστή φαίνονται στο **Σχήμα 4. 2** για τα τρία προαναφερθέντα εύρη τιμών του $\alpha\rho$. Reynolds.

Όπως μπορεί να διαφανεί από το σχήμα ο συντελεστής πίεσης λαμβάνει την τιμή 1,0 για όλες τις τιμές του $\alpha\rho$. Reynolds στην προσήνεμη περιοχή ($\theta=0^\circ$). Καθώς η γωνία αναφοράς (θ) αυξάνεται, σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου, ο συντελεστής πίεσης συνεχώς μειώνεται λαμβάνοντας την ελάχιστη τιμή στις 60° για υποκρίσιμη ροή, στις 90° για υπερκρίσιμη ροή και στις 80° για μετά-κρίσιμη ροή.[5]



Σχήμα 4. 2: Κατανομή του συντελεστή πίεσης γύρω από την επιφάνεια κυκλικού κυλίνδρου για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds [4]

Αμέσως μετά η τιμή του συντελεστή αρχίζει να αυξάνεται ενώ σταθεροποιείται για γωνίες μεγαλύτερες των 120° για συνθήκες υπερκρίσιμης ροής (ο συντελεστής σταθεροποιείται σε μικρότερες γωνίες για τις άλλες δύο κατηγορίες).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα όσα αναφέρθηκαν αντιστοιχούν σε ομοιόμορφη ροή (σταθερής ταχύτητας) σε λεία επιφάνεια κυλίνδρου χωρίς ελεύθερη ροή στροβιλισμών. Στην περίπτωση ελεύθερης ροής ή στην περίπτωση τραχείας επιφάνειας κυλίνδρου, η κρίσιμη τιμή του $\alpha\rho$. Reynolds ενδέχεται να είναι μικρότερη του 2×10^5 . Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι ο συντελεστής πίεσης δεν εξαρτάται μόνο από τον $\alpha\rho$. Reynolds αλλά από την τραχύτητα της επιφάνειας του κυλίνδρου και τα χαρακτηριστικά του στροβιλισμού της ροής (πυκνότητα στροβιλισμών, ο λόγος του μήκους των στροβιλισμών και της διαμέτρου του κυλίνδρου). Επιπλέον, στην περίπτωση των καπνοδόχων οι οποίες εκτίθενται στον άνεμο, η μεταβλητότητα της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος της καπνοδόχου μειώνει την συνοχή της διάχυσης των δινών (στροβιλισμών). Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον προσδιορισμό του συντελεστή πίεσης.[5]

4.1.4. Δυνάμεις ανέμου

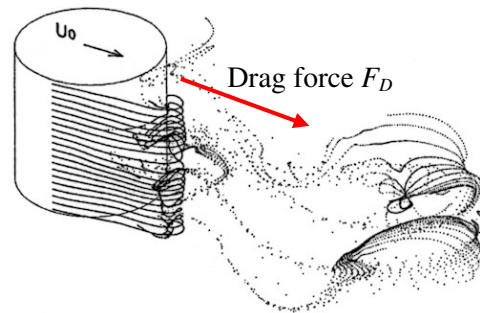
4.1.4.1. Οπισθέλκουσα δύναμη

Η οπισθέλκουσα δύναμη (drag force) εκφράζει το σύνολο των ωθητικών δυνάμεων που προκαλεί η ροή, παράλληλα στη διεύθυνση της ροής (Σχήμα 4.3). Η δύναμη αυτή αναπτύσσεται λόγω της διαφοράς της πίεσης κατάντη της πλευράς του στερεού. Η οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται σε ένα οπουδήποτε σώμα το οποίο εκτίθεται στη ροή ενός ρευστού μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

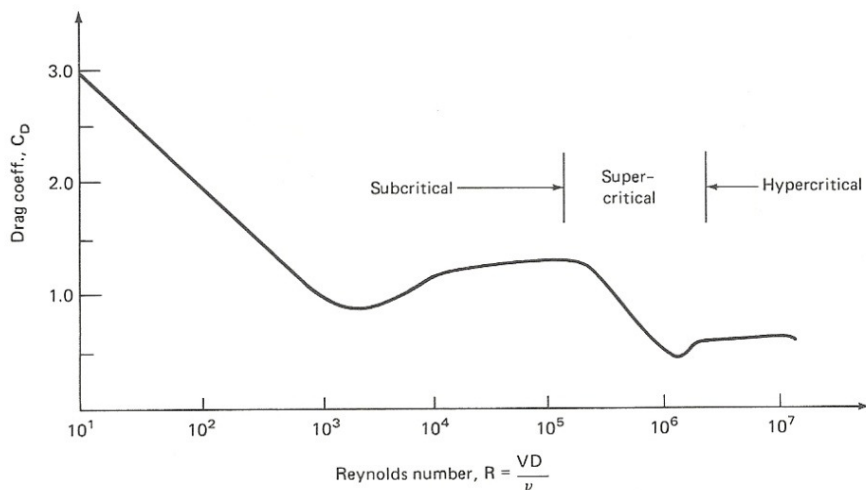
$$F_D = C_D A_o \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.2)$$

όπου A_o είναι η μετωπική επιφάνεια του στερεού και C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας (drag coefficient) – η τιμή του οποίου εξαρτάται από την γεωμετρία του σώματος και του αριθμού Reynolds.

Re=1000



Σχήμα 4. 3: Οπισθέλκουσα δύναμη F_D .



Σχήμα 4. 4: Μεταβολές του συντελεστή οπισθέλκουσας σε σχέση με τον αριθμό Reynolds για κυκλικό κώνδρο ο οποίος εκτίθεται σε ομοιόμορφη στρωτή ροή. [5]

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας για κάθετους, σε στρωτή ροή του ανέμου, κυκλικούς κώνδρους φαίνεται στο **Σχήμα 4. 4**. Από το σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί η απότομη πτώση της τιμής του συντελεστή C_D για

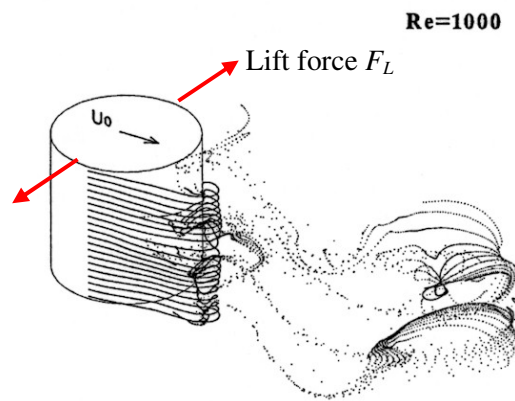
$Re = 2 \times 10^5$. Αυτό αντιστοιχεί στη περίπτωση όπου τα σημεία διαχωρισμού της ροής μετατοπίζονται (δηλαδή για την κρίσιμη τιμή του αρ.Reynolds).

4.1.4.2. Δυνάμεις άνωσης

Οι δυνάμεις άνωσης (lift force), είναι δυνάμεις που αναπτύσσονται κάθετα στην επιφάνεια του στερεού και κάθετα στην διεύθυνση της ροής (Σχήμα 4.5). Οι δυνάμεις άνωσης μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$F_D = C_L A_o \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.3)$$

όπου A_o είναι η μετωπική επιφάνεια του στερεού και C_L ο συντελεστής άνωσης (lift coefficient). Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση κυκλικών κυλίνδρων και στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής (Σχήμα 4.1-a) ενδέχεται οι τιμές των δυνάμεων άνωσης να μεταβάλλονται- λόγω εναλλαγής των στροβιλισμών. Η μεταβολή αυτή απαντάται και από ταλάντωση της κατασκευής κάθετα στη ροή.[5]



Σχήμα 4.5: Δυνάμεις άνωσης F_L .

4.1.5. Αεροδυναμική και αεροελαστική αστάθεια

Η αεροδυναμική αστάθεια (aerodynamic instability) εκφράζει τη αστάθεια της ροής του αέρα (τη μεταβολή ή τη διακύμανση) γύρω από την κατασκευή, που προκαλεί η διάχυση των δινών στο κάτω ρεύμα (κατάντη του στερεού). Η διάχυση μπορεί να είναι περιοδική ή τυχαία αναλόγως των χαρακτηριστικών της ροής όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η περιοδική διάχυση των δινών επιφέρει ταλαντώσεις, εγκάρσια στη ροή του ανέμου. Στη περίπτωση όπου η κατασκευή "ενθαρρύνει" την αεροδυναμική αστάθεια (λόγω διαστάσεων και ακαμψίας της κατασκευής), λόγω της ροής του αέρα, ενδέχεται να παρουσιάσει μεγάλα πλάτη ταλαντώσεων. Η απόκριση της κατασκευής (ιδιοσυχνότητα) επηρεάζει τη ροή του ανέμου. Η αλληλεπίδραση της απόκρισης της κατασκευής και του ανέμου ονομάζεται αεροδυναμική ή αεροελαστική αστάθεια. Συγκεκριμένα, αν η μεταβολή της ροής γύρω από την κατασκευή είναι τέτοια ώστε να αυξάνει παρά να μειώνει την παραμόρφωση της κατασκευής, λόγω ταλάντωσης, το φαινόμενο αποκαλείται αεροελαστική αστάθεια (aeroelastic instability) ή αρνητική απόσβεση (negative damping).[2,5]

Λόγω του φαινομένου, η ροή του ανέμου προκαλεί ταλαντώσεις στην κατασκευή οι οποίες κατηγοριοποιούνται αναλόγως με το τύπο τους, και αναφέρονται στις ακόλουθες παραγράφους.

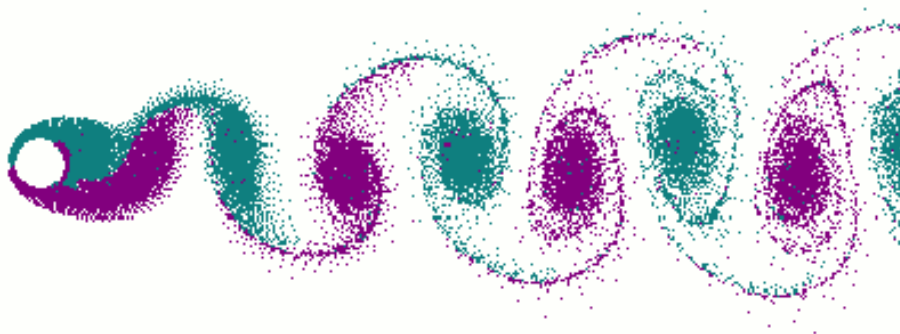
4.1.5.1. Ταλάντωση λόγω διάχυσης των δινών

Η ροή του ανέμου πίσω από ένα κυκλικό κύλινδρο, χαρακτηρίζεται από μια περιοδική διάχυση των δινών (Vortex -Shedding) - **Σχήμα 4. 6**. Αυτή η περιοδική διάχυση των δινών, δημιουργεί κάθετες, στη ροή, δυνάμεις οι οποίες προκαλούν εγκάρσιες ταλαντώσεις. Γενικά οι ταλαντώσεις αυτές παρατηρούνται σε ψηλές εύκαμπτες κυκλικές κυλινδρικές κατασκευές, όπως είναι και οι καπνοδόχοι.

Σημαντική για την απόκριση της κατασκευής είναι η συχνότητα διάχυσης των δινών. Η συχνότητα της ταλάντωσης λόγω της διάχυσης των στροβιλισμών (Vortex-shedding vibration) εξαρτάται γενικά από τον αριθμό Stouhal ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S = \frac{nD}{V} \quad (4. 4)$$

όπου n η συχνότητα διάχυσης σε Hz, D η διάμετρος του κυλίνδρου, και V η ταχύτητα του ανέμου. Παράλληλα ο αριθμός Stouhal εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Reynolds. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί



Σχήμα 4. 6: Εξάπλωση των στροβιλισμών (δινών) πίσω από ένα κυκλικό κύλινδρο, Courtesy, Cesareo de La Rosa Siqueira.

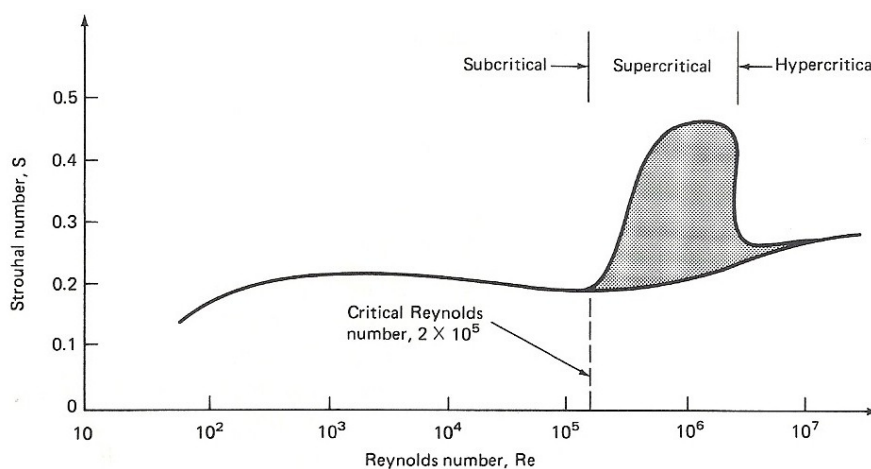
από το **Σχήμα 4. 7** η τιμή του αριθμού Stouhal για κυκλικό κύλινδρο ο οποίος εκτίθενται σε ομαλή ομοιόμορφη ροή κυμαίνεται στο 0,21, για εύρος τιμών του αριθμού Reynolds $30 - 2 \times 10^5$ –υποκρίσιμη ροή. Στη τιμή του αριθμού Reynolds, 2×10^5 , η οποία θεωρείται κρίσιμη, το σημείο διαχωρισμού της ροής μετατοπίζεται απότομα, μειώνοντας και τον συντελεστή οπισθέλκουσας [5]. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο (§4.1.3), η υποκρίσιμη ροή χαρακτηρίζεται από περιοδική διάχυση των δινών. Για αυτή την περίπτωση η συχνότητα διάχυσης για κυκλικό κύλινδρο μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$n = 0,21 \frac{V}{D} \quad (4. 5)$$

Για τιμές του αριθμού Reynolds $2 \times 10^5 - 4 \times 10^6$ – υπερκρίσιμη ροή- η διάχυση των δινών παύει να είναι περιοδική και γίνεται τυχαία. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός Stouhal βασίζεται στη δεσπόζουσα

συχνότητα, και αυξάνεται στη τιμή 0,5. Για τιμές αριθμού Reynolds μεγαλύτερες από 4×10^6 (Μετά-κρίσιμη ροή) η εξάπλωση των στροβιλισμών γίνεται και πάλι περιοδική, ενώ ο αριθμός Strouhal λαμβάνει τη τιμή 0,25.[5]

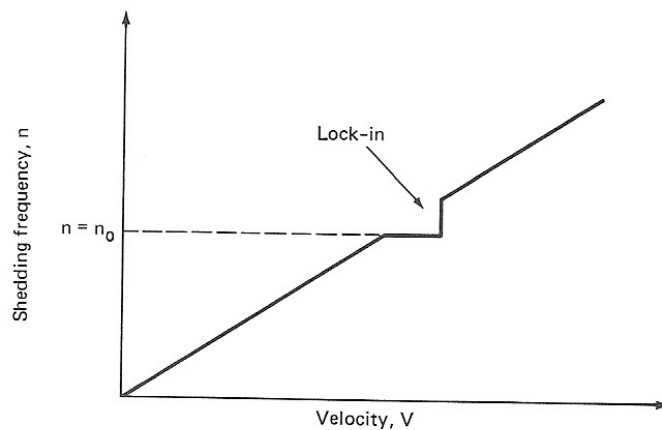
Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο συντελεστής n , στις (4.4) και (4.5), εκφράζει τον αριθμό των στροβιλισμών που εξαπλώνονται κάθε δευτερόλεπτο σε μια πλευρά του κυλίνδρου. Ο αριθμός των στροβιλισμών κάθε δευτερόλεπτο και από τις δύο πλευρές του κυλίνδρου είναι αντίστοιχα $2n$. Καθώς πραγματοποιείται η διάχυση δύο δινών (μια δίνη από κάθε πλευρά), για να συμπληρωθεί ένας κύκλος ταλάντωσης από τις κάθετες δυνάμεις που προκαλούνται από τις δίνες θα πρέπει η συχνότητα των δυνάμεων που "δημιουργούνται" να είναι ίση με n .



Σχήμα 4. 7: Μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds για κυκλικό κύλινδρο και στρωτή ροή.[2]

Η ταλάντωση τις κατασκευής λόγω της περιοδικής εξάπλωσης των στροβιλισμών γίνεται μέγιστη όταν η ταχύτητα του ανέμου λάβει τέτοια τιμή ώστε η συχνότητα της διάχυσης ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα του κυλίνδρου (της κατασκευής) – σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται και το φαινόμενο του συντονισμού. Όταν παρατηρηθεί το φαινόμενο του συντονισμού, περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (για κάποιο ποσοστό τουλάχιστον) δεν επηρεάζει την συχνότητα εξάπλωσης (των δινών). Η εξάπλωση, "ελέγχεται" σε αυτή την περίπτωση από την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, n_0 . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται lock-in, και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4. 1**. Όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να ξεπεράσει αυτό το σημείο, η συχνότητα της εξάπλωσης εξαρτάται και πάλι από τον άνεμο παρά από την κατασκευή. Συνεπώς οι μεγάλες ταλαντώσεις στην κατασκευή θα συμβούν μόνο στη περιοχή του lock-in, ενώ ταχύτητες ανέμου πάνω ή κάτω από αυτό το σημείο δεν επηρεάζουν και τόσο την απόκριση της κατασκευής.[2]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συχνότητα διάχυση η οποία εξάγεται από τη **Εξίσωση 4.5** αντιστοιχεί για κυκλικό κύλινδρο ο οποίος εκτίθεται σε ομοιόμορφη ροή με μειωμένα φαινόμενα στροβιλισμών



Σχήμα 4. 8: Το φαινόμενο Lock-in.[2]

Ο άνεμος "στη φύση" χαρακτηρίζεται από ισχυρούς στροβιλισμούς και μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας καθ' ύψος. Ως εκ τούτου οι σχέσεις 4.4 και 4.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για να υπολογιστεί η φυσική ιδιοσυχνότητα εξάπλωσης των δινών, μόνο στην περίπτωση που η μεταβολή της ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Για ψηλούς κατακόρυφους κυλίνδρους, όπως είναι οι καπνοδόχοι, και επειδή είναι εκτεθειμένες σε άνεμους με μεταβολή της μέσης ταχύτητας με το ύψος, θα πρέπει να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις για την χρήση των προαναφερθέντων εξισώσεων. Σε μια τέτοια περίπτωση και αν V η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου στην κορυφή του κυλίνδρου, η συχνότητα διάχυσης των δινών μπορεί να υπολογιστεί από τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{V}{6D} & \alpha\nu & \quad nD^2 < 0,5m^2 / s \\
 n &= \frac{1}{3D} \left(V - \frac{1,5}{D} \right) & \alpha\nu & \quad 0,5m^2 / s < nD^2 < 0,75m^2 / s \\
 n &= \frac{V}{5D} & \alpha\nu & \quad nD^2 > 0,75m^2 / s
 \end{aligned} \tag{4. 6}$$

όπου η διάμετρος D σε m και η ταχύτητα ανέμου σε m/s.[5]

4.1.5.2. Καλπάζουσα αστάθεια

Καλπάζουσα αστάθεια (across-wind galloping) καλείται η εγκάρσια προς τη ροής του ανέμου καμπτική ταλάντωση της κατασκευής. Γενικά κυκλικές κυλινδρικές κατασκευές δεν είναι ευπαθείς σε καλπάζουσα αστάθεια αλλά ο πάγος είναι ικανός να μετατρέψει την καταστήσει ασταθή.

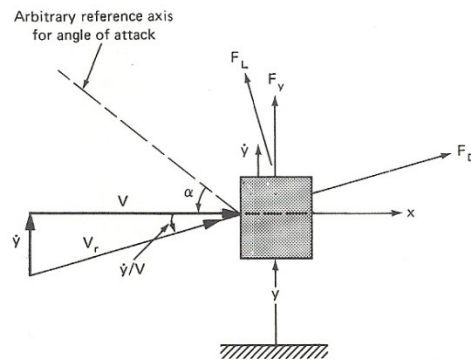
Κατά την ανάλυση της κατασκευής μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η ταλάντωση γίνεται με αργούς ρυθμούς ώστε να θεωρηθεί ψευδο-στατική. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου, θεωρείται ότι δρουν οι δυνάμεις (**Σχήμα 4.6**) άνωσης (lift) και οπισθέλκουσας (drag) οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_L = C_L B \frac{\rho V_r^2}{2} \tag{4. 7}$$

$$f_D = C_D B \frac{\rho V_r^2}{2} \quad (4.8)$$

που f_L και f_D οι δυνάμεις άνωσης και οπισθέλκουσας αντίστοιχα ανά μέτρο μήκους του κυλίνδρου, C_L και C_D οι αντίστοιχοι συντελεστές, B το πλάτος πρόπτωσης του ανέμου στον κύλινδρο, ρ η πυκνότητα του αέρα και V_r η σχετική ταχύτητα ανέμου – κυλίνδρου.

Κατά την διάρκεια της ταλάντωσης η σχετική ταχύτητα ανέμου κατασκευής μεταβάλλεται- αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει και η γωνία πρόσπτωσης " α ", η οποία αλλάζει συνεχώς. Ως εκ τούτου, λόγω της αλλαγής της γωνίας παρατηρούνται και μεταβολές στις δυνάμεις άνωσης



Σχήμα 4. 9: Εγιάρσιος καλπασμός.[2]

Συνεπώς στην περίπτωση που γίνει αύξηση των δυνάμεων άνωσης αντίθετα της κίνηση τότε η κατάσταση θεωρείται ως σταθερή. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή προκαλείται μείωση των δυνάμεων άνωσης τότε η κατάσταση θεωρείται ασταθής και παρατηρείται το φαινόμενο της καλπάζουσας αστάθειας.[5]

Καλπάζουσα αστάθεια παρατηρείται και στην περίπτωση δύο ή περισσότερων κυλίνδρων (wake galloping). Σε αυτή την περίπτωση ο κύλινδρος που επιδέχεται "πρώτος" την ανεμοπίεση προκαλεί λόγω της μεταβολής της ροής (λόγω των στροβιλισμών) ταλάντωση στον κύλινδρο που βρίσκεται κατόπι (αρκεί να βρισκείτε στο πεδίο όπου γίνεται η διάχυση των δυνάμεων από τον πρώτο κύλινδρο).

4.1.1. Υπολογισμό ανεμοπίεση με βάση τα κείμενα των Ευρωκωδίκων.

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN1991-1-4 (Ευρωκώδικας 1 μέρος 4) παρέχει αντίστοιχους τους κανόνες και μεθόδους για τον υπολογισμό των δράσεων λόγω ανέμου σε κτίρια και έργα Πολιτικού Μηχανικού.

Το πρότυπο δίνει τις αντίστοιχες σχέσεις τόσο για υπολογισμό της κατανομής της πίεσης όσο και για τον υπολογισμό μιας ισοδύναμης δύναμης ως το άθροισμα των πιέσεων που ασκούνται περιμετρικά κυκλικής κυλινδρικής κατασκευής (όπως είναι οι καπνοδόχοι). Η τελευταία θεωρείται προσεγγιστική μέθοδος για τον υπολογισμό των φορτίων. Η μέθοδος όμως μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση που η καπνοδόχος

είναι μικρότερη των 200m και ο δυναμικός συντελεστής δεν υπερβαίνει το 1.2. Και οι δύο μέθοδοι υπολογισμού των φορτίων ανέμου αναπτύσσονται σε επόμενες παραγράφους.

Επιπλέον για εύκαμπτες κατασκευές, όπως είναι οι καπνοδόχοι, ο κανονισμός (Ευρωκώδικας 1) επιβάλλει όπως αυτές μελετηθούν υπό στροβιλώδη ροή και αεροελαστική ευστάθεια. Λόγω της ευκαμψία τους, οι κατασκευές αυτές ενδέχεται να επηρεαστούν περισσότερο από την δυναμική συμπεριφορά του ανέμου. Ο Ευρωκώδικας 1 δίνει τους αντίστοιχους υπολογισμούς στο πληροφοριακό Παράρτημα Ε. Στο ίδιο Παράρτημα παρουσιάζονται και τα κριτήρια που καθορίζουν την μελέτη ή όχι της καπνοδόχου υπό αυτές στροβιλώδη ροή. Αντίστοιχα, χρήσιμες σχέσεις για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των καπνοδόχων δίνονται στο πληροφοριακό Παράρτημα F.

Στη συνέχεια περιγράφονται όλοι οι αντίστοιχοι οι υπολογισμοί στους οποίου πρέπει να προβεί ένας Μηχανικός για να εκτιμήσει την απόκριση της καπνοδόχου υπό φορτία ανέμου με βάση τα νέα κείμενα των Ευρωκωδίκων.

4.2. Εξωτερική πίεση ανέμου w_e .

Λόγω της ροής του ανέμου γύρω από την κατασκευή, υπάρχουν σημεία όπου παρουσιάζεται διαφορά πίεσης. Η διαφορά αυτή απαντάται από ελκτικές δυνάμεις στο κέλυφος της κατασκευής. Η συνολική πίεση ανέμου η οποία δρα καθέτως στην εξωτερική επιφάνεια κατασκευής (όπως οι καπνοδόχοι) δίνεται από την σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4.9)$$

όπου,

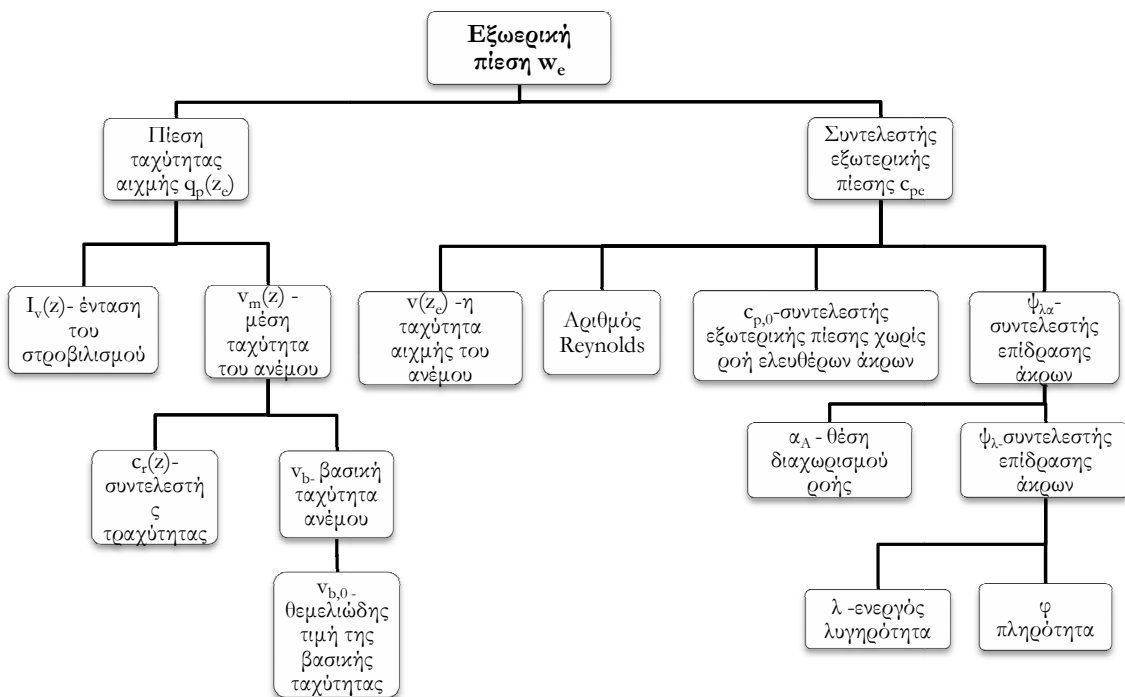
$q_p(z_e)$ η πίεση ταχύτητας αιχμής

z_e το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση

c_{pe} ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης

Σημειώνεται ότι η κατανομή της πίεσης σε κυλινδρικές επιφάνειες όπως είναι οι καπνοδόχοι επισέρεχεται μέσω του συντελεστή εξωτερικής πίεσης c_{pe} .

Οι συντελεστές που απαραίτουν την εξίσωση υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες παραγράφους. Στο **Σχήμα 4.10** απεικονίζεται η διαδικασία υπολογισμού της εξωτερικής πίεσης.



Σχήμα 4.10: Διαδικασία υπολογισμού της εξωτερικής πίεσης ανέμου.

4.2.1. Πίεση ταχύτητας αιχμής

Η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος z , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.10)$$

όπου,

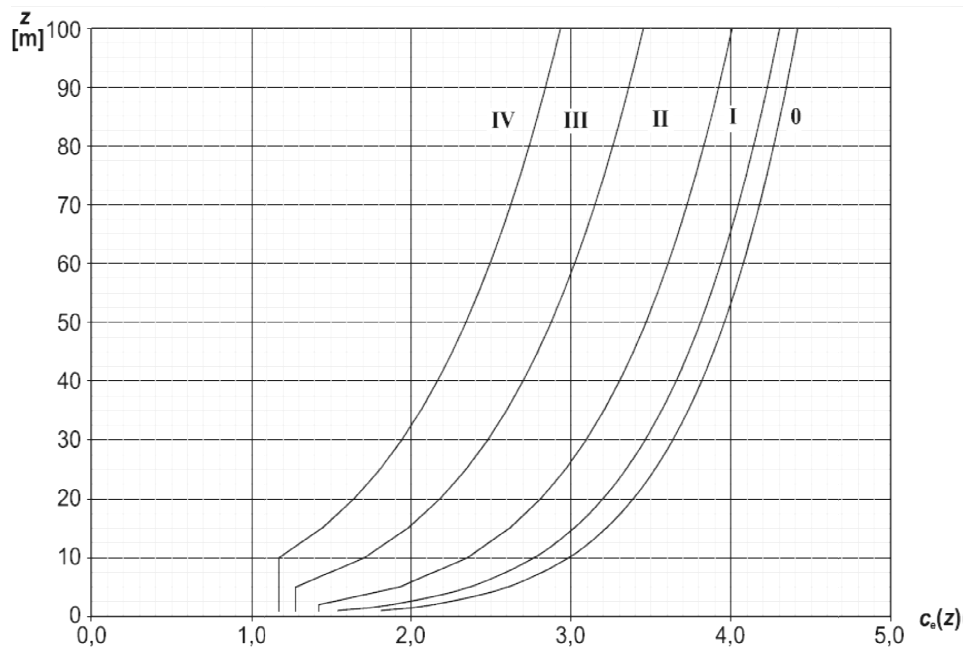
ρ η πυκνότητα του αέρα εξαρτώμενη από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας. (προτεινόμενη τιμή $\rho=1.25\text{kg/m}^3$)

$I_v(z)$ η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z

$c_e(z)$ ο συντελεστής έκθεσης ο οποίος δίνεται από τη σχέση

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.11)$$

Για επίπεδο έδαφος όπου $c_o(z)=1,0$, ο συντελεστής έκθεσης $c_e(z)$ δίνεται από το **Σχήμα 4.2** ως συνάρτηση του ύψους πάνω από το έδαφος και της κατηγορίας εδάφους, όπως προσδιορίζεται στον **Πίνακα 4.1**.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z)$ για $c_o(z)=1,0$ και $k_1=1,0$

q_b η βασική πίεση, ίση προς:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.12)$$

Όπου η βασική ταχύτητα ανέμου v_b , ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος κατηγορίας II, και είναι ίση με:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.13)$$

Στη σχέση αυτή είναι:

c_{dir} ο συντελεστής διεύθυνσης (προτεινόμενη τιμή Εθνικού Προσαρτήματος 1.0)

c_{season} ο συντελεστής εποχής (προτεινόμενη τιμή Εθνικού Προσαρτήματος 1.0)

$v_{b,0}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, ίση με την χαρακτηριστική μέση ταχύτητα του ανέμου 10 λεπτών, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του και την εποχή του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος, σε ανοικτή περιοχή με χαμηλή βλάστηση χαμηλής βλάστησης, όπως γρασίδι και με μεμονωμένα εμπόδια (έδαφος κατηγορίας II). Η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα του εδάφους ορίζεται σε 33m/s για τα νησιά και παραλία μέχρι 10km από την ακτή και σε 27m/s την υπόλοιπη χώρα.

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $v_m(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος, εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση, και προσδιορίζεται από την $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$ (4.14).

4.2.2. Μέσος άνεμος v_m

4.2.2.1. Μεταβολή καθ' ύψος

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $v_m(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος, εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση, προσδιορίζεται δε από την σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.14)$$

όπου:

$c_r(z)$ ο συντελεστής τραχύτητας

$c_o(z)$ ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (προτεινόμενη τιμή Εθνικού Προσαρτήματος 1.0)

4.2.2.2. Επιρροή της τραχύτητας και του ανάγλυφου του εδάφους c_r , c_o

Η μέση ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται σε σχέση με τη θέση της κατασκευής λόγω:

- Του ύψους πάνω από το έδαφος
- Της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου

Η μεταβολή αυτή λαμβάνεται υπόψη με τον συντελεστή τραχύτητας $c_r(z)$, όπου:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} \quad (4.15)$$

όπου:

z_0 το μήκος της τραχύτητας

k_r ο συντελεστής εδάφους εξαρτώμενος από το μήκος της τραχύτητας z_0 και υπολογίζεται με βάση τη σχέση (4.16)

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4.16)$$

όπου:

$z_{0,II} = 0,05$ m (κατηγορία εδάφους II, **Πίνακας 4.2**: Κατηγορία εδάφους και παράμετροι εδάφους)

z_{\min} είναι το ελάχιστο ύψος

z_{\max} πρέπει να λαμβάνεται 200m

z_0, z_{\max} εξαρτώνται από την κατηγορία εδάφους. Προτεινόμενες τιμές δίνονται στον **Πίνακα 4.2**, για πέντε αντιπροσωπευτικές κατηγορίες εδάφους (οι κατηγορίες εδάφους εικονογραφούνται στο Παράρτημα Α.1 του EN1991-1-4).

Πίνακας 4.2: Κατηγορία εδάφους και παράμετροι εδάφους

	Κατηγορίες εδάφους	z_0 m	z_{\min} m
0	0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
I	Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II	Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,05	2
III	Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
IV	Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1,0	1,0

Σημειώνεται ότι, όπου το ανάγλυφο του εδάφους (π.χ. λόφοι, γκρεμοί κ.λ.π) αυξάνει τις ταχύτητες ανέμου περισσότερο από 5%, οι επιδράσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας το συντελεστή

ανάγλυφου του εδάφους c_o . Στο Παράρτημα Α3 του Ευρωκώδικα 1, μέρος 4, δίνεται η σχετική διαδικασία για τον υπολογισμό.

Παράλληλα οι επιδράσεις του ανάγλυφου του εδάφους μπορούν να αγνοούνται όταν η μέση κλίση του προσήνεμου εδάφους είναι μικρότερη από 3° . Το προσήνεμο έδαφος μπορεί να θεωρείται μέχρι μια απόσταση 10 φορές του ύψους του μεμονωμένου χαρακτηριστικού ανάγλυφου

Στην περίπτωση όπου η κατασκευή έχει ύψος μεγαλύτερο από το διπλάσιο του μέσου ύψους των γειτονικών κατασκευών, τότε ενδέχεται να εκτίθεται (ανάλογα με τις ιδιότητες της κατασκευής) σε αυξημένες ταχύτητες ανέμου για κάποιες διευθύνσεις αυτού. Οι σχετικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.4 (Ευρωκώδικας 1, μέρος 4)

4.2.3. Στροβιλισμός ανέμου

Η ένταση του στροβιλισμού $I_v(z)$ ορίζεται ως η τυπική απόκλιση του στροβιλισμού διαιρούμενη με την μέση ταχύτητα ανέμου.

Η τυπική απόκλιση του στροβιλισμού σ_v μπορεί αν προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_j \quad (4.17)$$

όπου:

Ο συντελεστής k_r υπολογίζεται από την εξίσωση (4.9).

Οι προτεινόμενες σχέσεις για τον υπολογισμό του $I_v(z)$ είναι:

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad (4.18)$$

όπου:

k_I είναι ο συντελεστής στροβιλισμού. Προτεινόμενη τιμή από του Εθνικό Προσάρτημα : 1,0.

c_o είναι ο συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους, υπολογίζεται από το Παράρτημα Α.3 (EN1991-1-4)

z_o είναι το μήκος της τραχύτητας, δίνεται από τον **Πίνακα 4.2**.

4.2.4. Συντελεστής εξωτερικής πίεσης c_{pe} - κυκλικοί κύλινδροι (καπνοδόχοι)

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} και κατ' επέκταση η κατανομή της πίεσης σε κυλινδρικές διατομές όπως είναι οι καπνοδόχοι εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} \quad (4.19)$$

όπου:

b είναι η διάμετρος της καπνοδόχου

ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu=15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$\nu(z_e)$ είναι η ταχύτητα αιχμής του ανέμου η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$\nu = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \quad (4.20)$$

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (4.21)$$

όπου:

$c_{p,0}$ είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης χωρίς ροή ελευθέρων άκρων

$\psi_{\lambda\alpha}$ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων

Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{p,0}$ δίνεται στο **Σχήμα 4.11** για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds, ως συνάρτηση της γωνίας α . Οι τιμές αυτές ισχύουν για ισοδύναμη τραχύτητα k/b μικρότερη από $5 \cdot 10^{-4}$. Τυπικές τιμές του ύψους τραχύτητας δίνονται στον **Πίνακα 4.4**, ενώ τυπικές τιμές για κατανομής πίεσης για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds δίνονται στον **Πίνακα 4.3**.

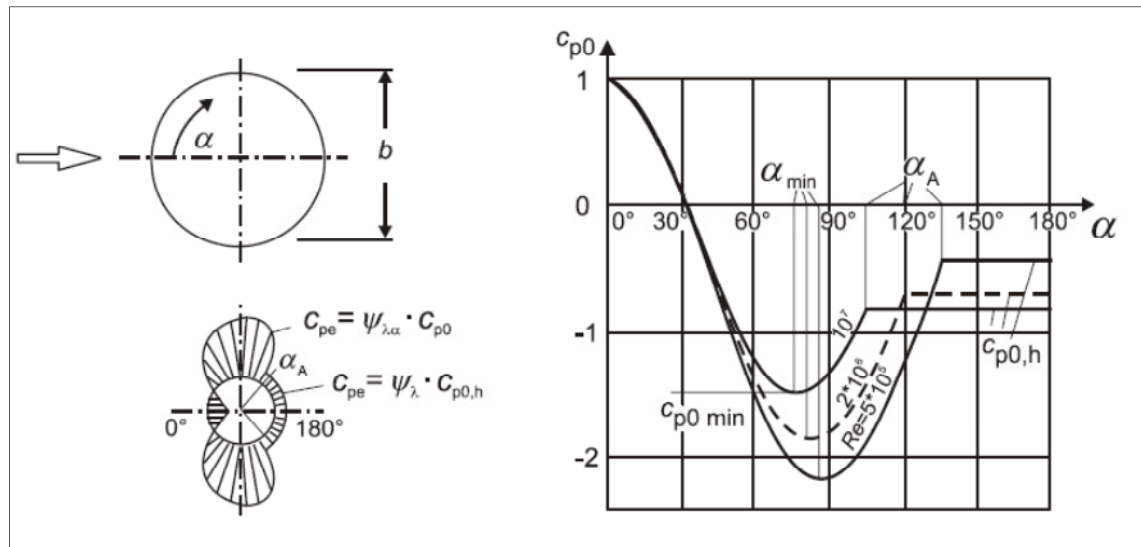
Ο συντελεστής επίδρασης άκρων $\psi_{\lambda\alpha}$ δίνεται από την εξίσωση :

$$\begin{aligned} \psi_{\lambda\alpha} &= 1 & \text{για} & \quad 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) & \text{για} & \quad \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A \quad (4.22) \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_{\lambda} & \text{για} & \quad \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned}$$

όπου:

α_A είναι η θέση διαχωρισμού ροής

ψ_{λ} είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων



Σχήμα 4. 11: Κατανομή πιέσεων για κυλίνδρους για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων

Πίνακας 4.3: Τυπικές τιμές κατανομής πίεσης κυκλικών κυλίνδρων για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων

Re	α_{\min}	$C_{p0,\min}$	α_A	$C_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2.2	135	-0.4
$2 \cdot 10^6$	80	-1.9	120	-0.7
10^7	75	-1.5	105	-0.8

Όπου

α_{\min} είναι η θέση της ελάχιστης πίεσης σε [°]

$C_{p0,\min}$ είναι η τιμή του ελάχιστου συντελεστή πίεσης

α_A είναι η θέση του διαχωρισμού ροής σε [°]

$C_{p0,h}$ είναι ο συντελεστής της βασικής πίεσης

Πίνακας 4.4: Ισοδύναμη τραχύτητα επιφάνειας k

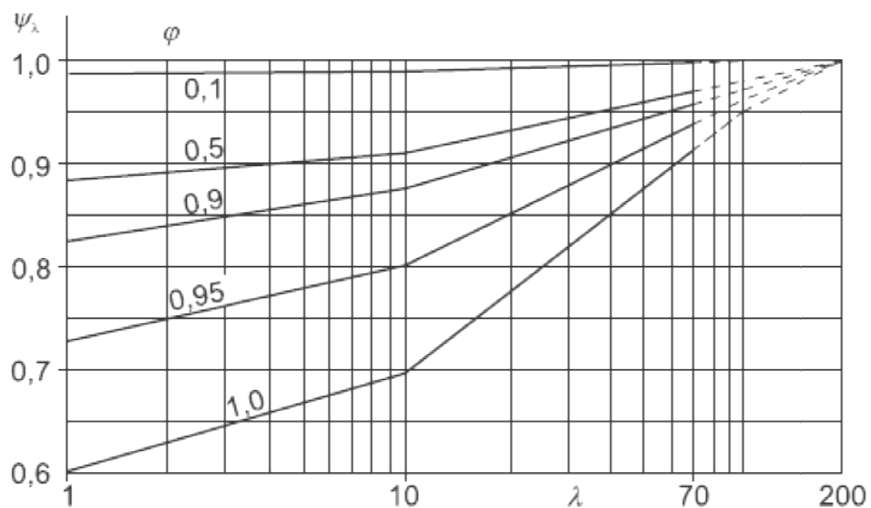
Τύπος Επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k [mm]	Τύπος επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k [mm]
Γυαλί	0,0015	Λείο σκυρόδεμα	0,2
Στιλβωμένο μέταλλο	0,002	Πλανισμένο ξύλο	0,5
Λεπτή βαφή	0,006	Τραχύ σκυρόδεμα	1,0
Βαφή με ψεκασμό	0,02	Τραχύ προιονισμένο ξύλο	2,0

Στιλπνός χάλυβας	0,05	Σκουριά	2,0
Χυτοσίδηρος	0,2	Τούβλα	3,0
Γαλβανισμένος χάλυβας	0,2		

Ο συντελεστής επίδρασης άκρων ψ_λ λαμβάνει υπόψη τη μειωμένη αντίσταση κατασκευής λόγω του αέρα γύρω από τα άκρα και υπολογίζεται συναρτήσει της ενεργούς λυγηρότητας και συντελεστή πληρότητας φ . Η ενεργός λυγηρότητα λ ορίζεται ανάλογα με τις διαστάσεις και τη θέση της κατασκευής. Οι τιμές που προσφέρει το EN1991-1-4 φαίνονται στον **Πίνακα 4.5**.

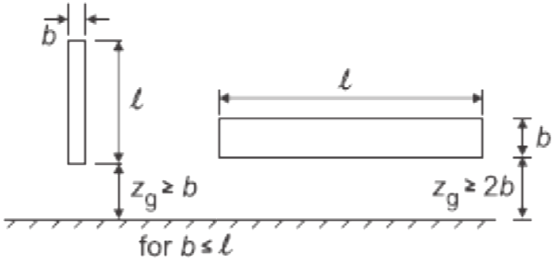
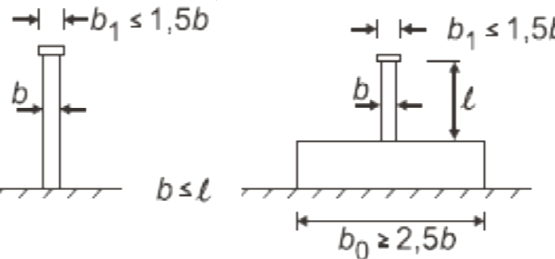
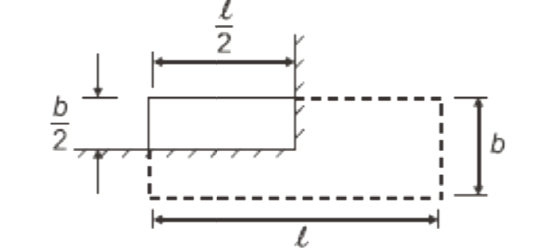
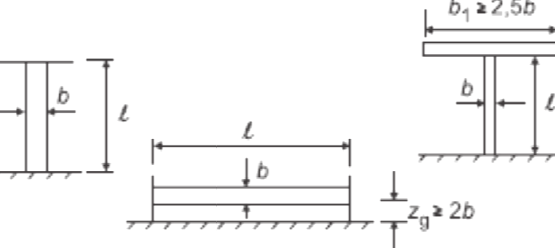
Η πληρότητα φ αντιπροσωπεύει το ποσοστό της επιφάνειας προβολής ως προς την αντίστοιχη ομοιόμορφη επιφάνεια χωρίς κενά. Για τις καπνοδόχους ο συντελεστής φ λαμβάνει την τιμή 1,0.

Τέλος αφού καθοριστούν τα λ και φ ο συντελεστής επίδρασης άκρων ψ_λ υπολογίζεται από **Σχήμα 4. 12**



Σχήμα 4. 12: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας φ και της λυγηρότητας λ

Πίνακας 4.5: Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, διατομές με αιχμηρές γωνίες και δικτυωτές κατασκευές.

No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1	 <p style="text-align: center;">for $b \leq l$</p>	<p>Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες: για $l \geq 50$ m, $\lambda = 1,4 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
2		<p>για $l < 15$ m, $\lambda = 2 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>Για κυκλικούς κυλίνδρους: για $l \geq 50$, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>για $l < 15$ m, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
3		<p>Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>
4		<p>για $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7 \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>για $l < 15$ m, $\lambda = \ell/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>Για ενδιάμεσες τιμές του ℓ, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>

4.3. Δυνάμεις ανέμου - κυκλικοί κύλινδροι (καπνοδόχοι)

Εκτός των εξωτερικών πιέσεων λόγω της ροής του ανέμου αναγόμενες στην περίμετρο της κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί και η συνολική δύναμη ανέμου. Ο υπολογισμός της συνολικής δύναμης ανέμου αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδο. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για κατασκευές (καπνοδόχοι) που δεν υπερβαίνουν τα 200m και εφόσον ο δυναμικός συντελεστής είναι μικρότερος από 1,2. Η συνολική δύναμη του ανέμου F_w η οποία επενεργεί επί της κατασκευής προσδιορίζεται με τον υπολογισμό δυνάμεων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές δύναμης.

Έτσι η δύναμη υπολογίζεται άμεσα από την σχέση:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (4.23)$$

όπου:

$c_s c_d$ είναι ο δυναμικός συντελεστής

c_f είναι ο συντελεστής δύναμης για την κατασκευή

$q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος αναφοράς z_e (**Παράγραφος 4.2.1**)

A_{ref} είναι η επιφάνεια αναφοράς της κατασκευής, μετρούμενη γενικά ως προβολή της κατασκευής σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου.

Για κυλινδρικούς καπνοδόχους η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} είναι:

$$A_{ref} = l \cdot b \quad (4.24)$$

όπου:

l είναι το ύψος της κατασκευής

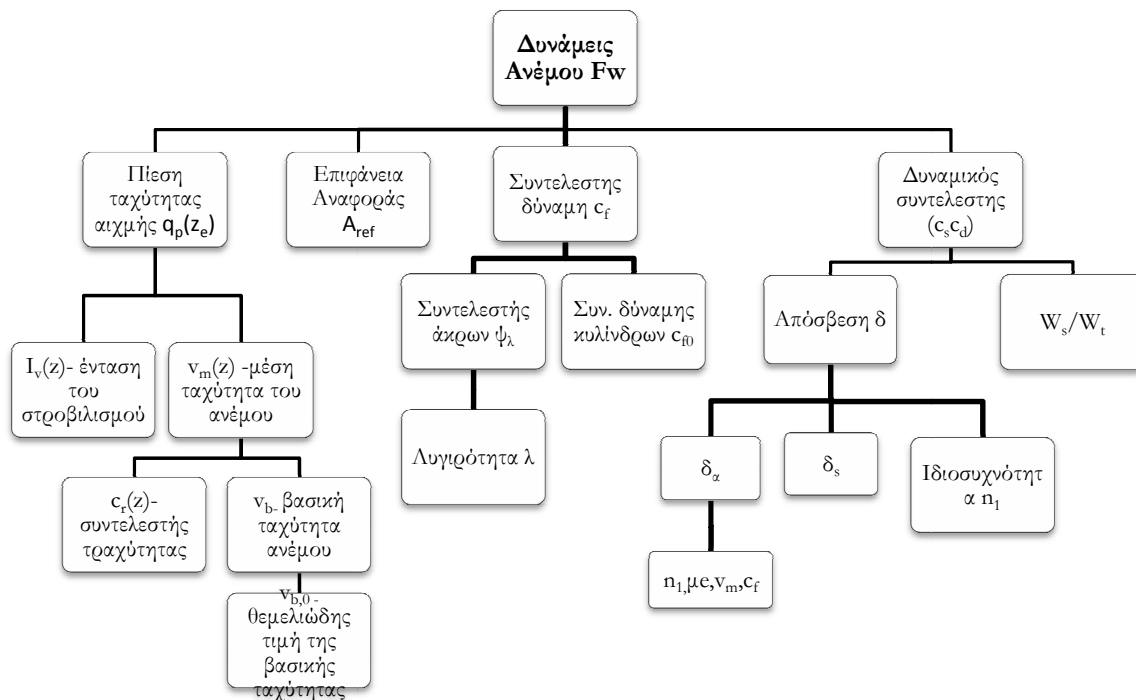
b είναι η διάμετρος της κατασκευής

Στο **Σχήμα 4.13** απεικονίζεται η διαδικασία υπολογισμού της συνολικής δύναμης ανέμου.

Ο δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$ απαρτίζεται από δύο παραμέτρους, την παράμετρο μεγέθους c_s , η οποία λαμβάνει υπόψη της τη μειωτική επίδραση στη δράση του ανέμου λόγω μη ταυτόχρονης ύπαρξης των πιέσεων αιχμής από τον άνεμο επί της επιφάνειας, και την δυναμική παράμετρο c_d , η οποία λαμβάνει υπόψη της την αυξημένη επίδραση από ταλαντώσεις λόγω στροβιλισμού.

Σημειώνεται ότι ο δυναμικός συντελεστής εξαρτάται από τον τύπο της κατασκευής (κατασκευή από σκυρόδεμα ή χάλυβα), το ύψος και το πλάτος της. Στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN1991-4 (Δράσεις Ανέμου) η τιμή του συντελεστή μπορεί να προσδιοριστεί με την βοήθεια διαγραμμάτων εφόσον αυτή είναι μικρότερη από 1,10. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει ο συντελεστής να υπολογίζεται με τη λεπτομερή διαδικασία υπολογισμού, όπως αναφέρεται στα Παραρτήματα Β και C του ίδιου Προτύπου. Για λόγους έκτασης των υπολογισμών δεν αναφέρετε στην παρούσα εργασία η αναλυτική διαδικασία. Στα **Σχήματα 4.14** και **4.15** παρουσιάζονται τα διαγράμματα υπολογισμού του δυναμικού συντελεστή για χαλύβδινες καπνοδόχους με ή χωρίς επένδυση αντίστοιχα. Γενικά για καπνοδόχους με κυκλικές διατομές, των οποίων το ύψος είναι

μικρότερο των 60m καθώς και 6,5πλάσιου της διαμέτρου, η τιμή του c_{s,c_d} μπορεί να λαμβάνεται ίση με 1,0. [1]

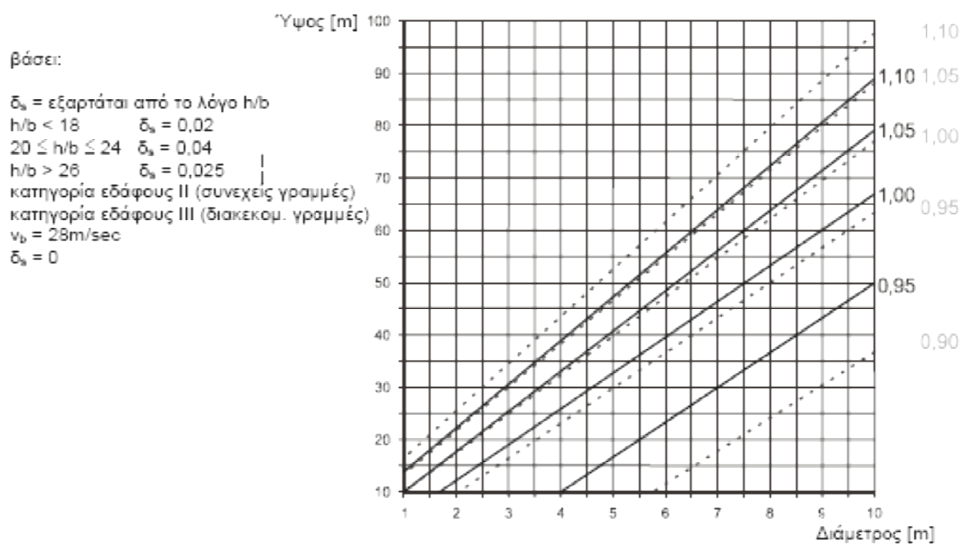


Σχήμα 4. 13: Διαδικασία υπολογισμού της συνολικής δύναμης ανέμου

Σημειώνεται ότι, για τον υπολογισμό του συντελεστή c_{s,c_d} απαιτείται υπολογισμός της λογαριθμικής μείωσης της δομικής απόσβεσης της θεμελιώδους ιδιομορφής δ_s και της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας n_1 . Στο Παράρτημα F (Δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών) του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN1991-4 δίνονται στοιχεία για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, τα οποία αναφέρονται στην **Παράγραφο 4.3**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρεται στο EN1991-1-4, οι διαδικασίες υπολογισμού που προτείνονται προϋποθέτουν ότι οι κατασκευές έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά και τυπικές ιδιομορφές ώστε οι δυναμικές τους ιδιότητες να μπορούν να χαρακτηριστούν από τις ιδιοσυχνότητες, τις ιδιομορφές, τις ισοδύναμες μάζες και τη λογαριθμική μείωση απόσβεσης. Τιμές της λογαριθμικής μείωσης της δομικής απόσβεσης της θεμελιώδους ιδιομορφής δίνονται στο ίδιο παράρτημα του κανονισμού σε σχέση με τον τρόπο κατασκευής τους αλλά και του υλικού επένδυσης. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.7**. Επιπλέον για τον υπολογισμό της συνολικής δύναμης ανέμου απαιτείται και ο συντελεστής δύναμης c_f . Για ένα κύλινδρο πεπερασμένου μήκους συντελεστής δύναμης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

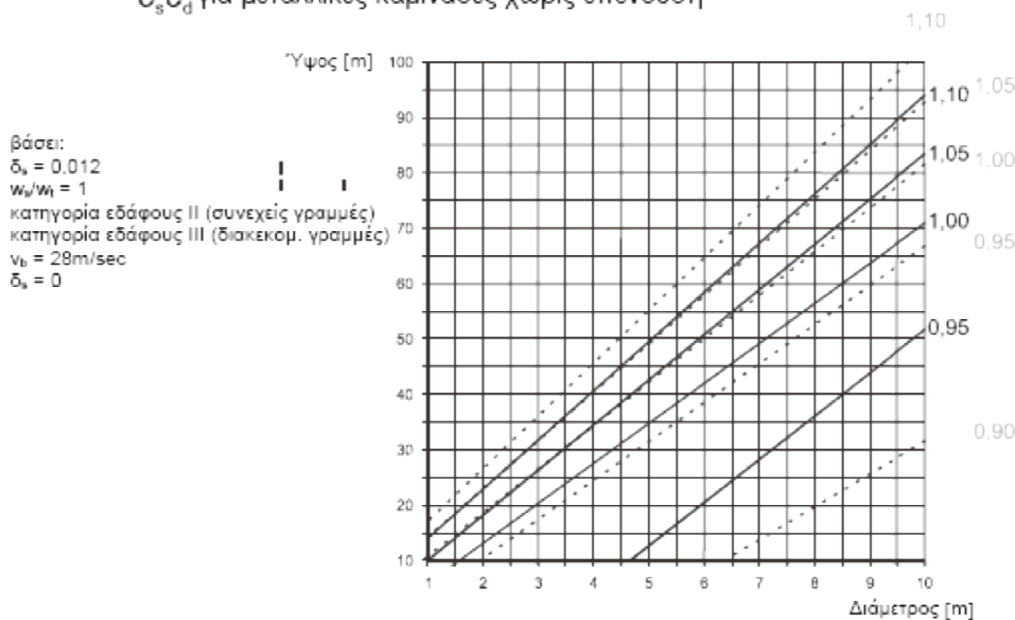
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (4. 25)$$

C_sC_d για μεταλλικές καμινάδες με επένδυση

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για τιμές που υπερβαίνουν το 1,1 η λεπτομερής διαδικασία που δίνεται στην 6.3. μπορεί να εφαρμόζεται (ελάχιστη αποδεκτή τιμή c_sc_d = 0,85)

Σχήμα 4. 14: c_sc_d για καπνοδόχους από χάλυβα με επένδυση και διάφορες τιμές του δ_s σύμφωνα με τον

Πίνακα 4.7. (συχνότητα σύμφωνα με την εξίσωση $n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz]$ (4. 27) $n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz]$ (4. 27, με ε₁=1000 και W_s/W_t=0,5)

C_sC_d για μεταλλικές καμινάδες χωρίς επένδυση

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για τιμές που υπερβαίνουν το 1,1 η λεπτομερής διαδικασία που δίνεται στην 6.3. μπορεί να εφαρμόζεται (ελάχιστη αποδεκτή τιμή c_sc_d = 0,85)

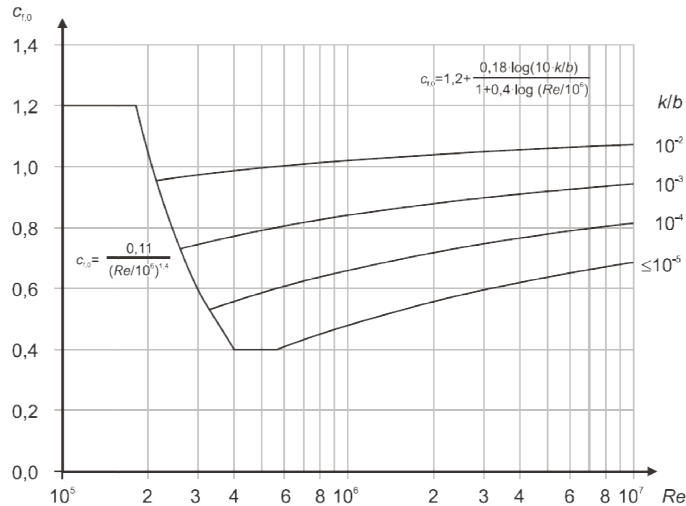
Σχήμα 4. 15: c_sc_d για καπνοδόχους από χάλυβα χωρίς επένδυση και διάφορες τιμές του δ_s σύμφωνα με τον

Πίνακα 4.7. (συχνότητα σύμφωνα με την εξίσωση $n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz]$ (4. 27) $n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [Hz]$ (4. 27, με ε₁=1000 και W_s/W_t=0,5)

όπου:

$c_{f,0}$ είναι ο συντελεστής δύναμης κυλίνδρων χωρίς ροή ελεύθερων άκρων και ο οποίος προσδιορίζεται από το **Σχήμα 4.16**.

ψ_λ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων



Σχήμα 4.16: Συντελεστής δύναμης $c_{f,0}$ για κυλινδρικούς κυλίνδρους χωρίς ροή ελεύθερων άκρων για διάφορες ισοδύναμες τραχύτητες k/b

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση κατακόρυφων κυλίνδρων εν σειρά, ο συντελεστής δύναμης $c_{f,0}$ εξαρτάται από την διεύθυνση του ανέμου σε σχέση με τον άξονα της σειράς και από το λόγο της απόστασης a και της διαμέτρου b όπως ορίζεται από τον πίνακα 4.5. Συνεπώς ο συντελεστής δύναμης c_f για κάθε κύλινδρο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot \kappa \quad (4.26)$$

όπου:

κ είναι ο συντελεστής που δίνεται από τον **Πίνακα 4.6**. (για την πλέον δυσμενή διεύθυνση του ανέμου)

Πίνακας 4.6: Συντελεστής κ για κατακόρυφους κυλίνδρους με εν σειρά διάταξη

a/b	κ	
$a/b < 3,5$	1,15	
$3,5 < a/b < 30$	$\kappa = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180}$	
$a/b > 30$	1,00	

a : απόσταση
 b : διάμετρος

4.4. Δυναμικά χαρακτηριστικά καπνοδόχων

Στις ακόλουθες παραγράφους δίνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των καπνοδόχων (EN 1991-1-4 Παράρτημα F). Αξίζει να σημειωθεί και πάλι οι ακόλουθες εξισώσεις ισχύουν μόνο όταν οι κατασκευές έχουν γραμμική συμπεριφορά και τυπικές ιδιομορφές.

4.4.1. Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα n_1

Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα n_1 , καπνοδόχων μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \text{ [Hz]} \quad (4.27)$$

$$\text{με } h_{\text{eff}} = h_1 + \frac{h_2}{3} \quad (4.28)$$

όπου:

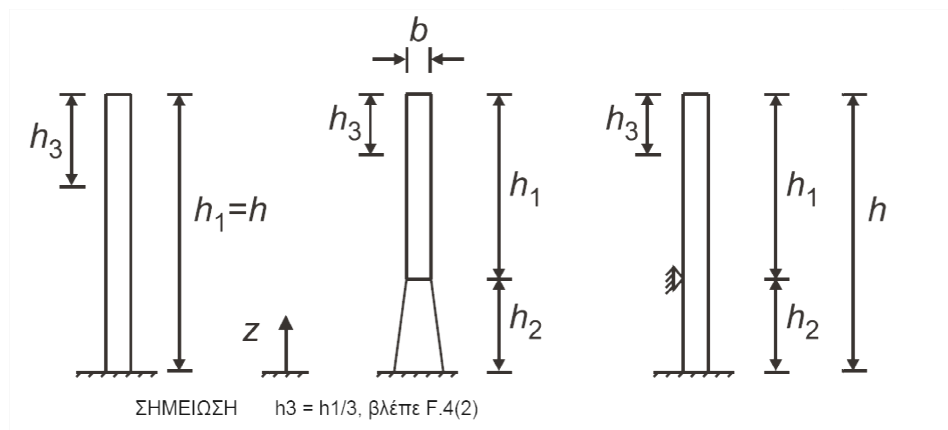
b είναι η διάμετρος της καπνοδόχου στο άνω άκρο της [m]

h_{eff} είναι το ενεργό ύψος της καπνοδόχου [m], τα h_1 και h_2 δίνονται στο **Σχήμα 4.17**

W_s είναι το βάρος των κατασκευαστικών στοιχείων που συνεισφέρουν στη δυσκαμψία της καπνοδόχου

W_t είναι το συνολικό βάρος της καπνοδόχου

ε_1 είναι ίσο με 1000 για καπνοδόχοι από χάλυβα και 700 για καπνοδόχοι από σκυρόδεμα και τοιχοποιία



Σχήμα 4.17: Γεωμετρικοί παράμετροι για καπνοδόχους

4.4.2. Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα $n_{1,0}$

Η θεμελιώδη ελλειπτική ιδιοσυχνότητα $n_{1,0}$ ενός επιμέρους κυλινδρικού κελίφους χωρίς ενισχυτικούς δακτυλίους δίνεται από την σχέση:

$$n_{1,0} = 0.492 \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot E}{\mu_s \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^4}} \quad (4.29)$$

όπου:

E είναι το μέτρο ελαστικότητας σε [N/m²]

t είναι το πάχος του κελύφους σε [m]

ν είναι ο λόγος Poisson

μ_s είναι η μάζα του κελύφους ανά μονάδα επιφάνειας σε [kg/m³]

b είναι η διάμετρος του κελύφους σε [m]

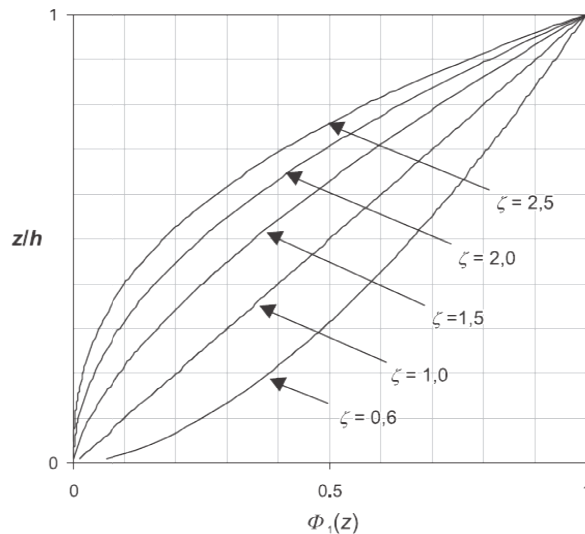
4.4.3. Η θεμελιώδης ιδιομορφή

Η θεμελιώδης καμπτική ιδιομορφή $\Phi_1(z)$ κτιρίων, πύργων και καπνοδόχων, μορφής προβόλου από το έδαφος μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta \quad (4.30)$$

όπου:

ζ=2,0 για καπνοδόχοι



Σχήμα 4. 18: Θεμελιώδης καμπτική ιδιομορφή για κτίρια, πύργους και καπνοδόχοι μορφής προβόλου

4.4.4. Ισοδύναμη μάζα

Η ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα μήκους m_e της θεμελιώδους ιδιομορφής δίνεται από την εξίσωση:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds} \quad (4.31)$$

όπου:

- m είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους
 l είναι το άνοιγμα της κατασκευής ή του στοιχείου της κατασκευής
 $i=1$ είναι ο αριθμός ιδιομορφής

Σημειώνεται ότι, για προβόλους με μεταβλητή κατανομή της μάζας, το m_e μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την τιμή του m στο ανώτερο τρίτο της κατασκευής h_3 (**Σχήμα 4.17**)

4.4.5. Λογαριθμική μείωση της απόσβεσης

Η λογαριθμική μείωση της απόσβεσης δ για θεμελιώδη καμπτική ιδιομορφή μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (4.32)$$

όπου:

- δ_s είναι η λογαριθμική μείωση της δομικής απόσβεσης της κατασκευής
 δ_a είναι η λογαριθμική μείωση της αεροδυναμικής απόσβεσης για θεμελιώδη ιδιομορφή
 δ_d είναι η λογαριθμική μείωση της απόσβεσης λόγω ειδικών διατάξεων (αποσβεστήρες, δεξαμενές κ.λ.π.).

Προσεγγιστικές τιμές της λογαριθμικής μείωσης της απόσβεσης δ_s δίνονται στον **Πίνακα 4.7**.

Η λογαριθμική μείωση της αεροδυναμικής απόσβεσης δ_a για τη θεμελιώδη καμπτική ιδιομορφή ταλαντώσεων στη διεύθυνση του ανέμου, μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot v_m(z_e)}{2 \cdot n_1 \cdot \mu_e} \quad (4.33)$$

όπου:

- c_f είναι ο συντελεστής δύναμης για δράση ανέμου στη διεύθυνση αυτού (Παράγραφο 4.2)
 μ_e είναι η ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας της κατασκευής. Στο Παράρτημα F του ίδιου προτύπου δίδεται η σχέση για τον υπολογισμό.

Πίνακας 4.7: Προσεγγιστικές τιμές της λογαριθμικής μείωσης της δομικής απόσβεσης της θεμελιώδους ιδιομορφής, δ_s

Τύπος κατασκευής		δομική απόσβεση, δ_s
κτίρια από σκυρόδεμα		0,10
κτίρια από χάλυβα		0,05
σύμμεικτες κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα		0,08
πύργοι και καμινάδες από σκυρόδεμα		0,03
ανεπένδυτες συγκολλημένες μεταλλικές καμινάδες χωρίς εξωτερική θερμική μόνωση		0,012
ανεπένδυτες συγκολλημένες μεταλλικές καμινάδες με εξωτερική θερμική μόνωση		0,020
συγκολλημένες μεταλλικές καμινάδες με μια στρώση επένδυσης και με εξωτερική θερμική μόνωση ^a	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
συγκολλημένες μεταλλικές καμινάδες με δύο ή περισσότερες στρώσεις επένδυσης και με εξωτερική θερμική μόνωση ^a	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
μεταλλικές καμινάδες με εσωτερική επένδυση οπτοπλινθοδομής		0,070
μεταλλικές καμινάδες με εσωτερική επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος		0,030
συζευγμένες καμινάδες χωρίς επένδυση		0,015
μεταλλικές καμινάδες με επιτόνους χωρίς επένδυση		0,04
χαλύβδινες γέφυρες + δικτυωτοί χαλύβδινοι πύργοι	συγκολλητές	0,02
	με κοχλίες υψηλής αντοχής	0,03
	με συνήθεις κοχλίες	0,05
σύμμεικτες γέφυρες		0,04
γέφυρες από σκυρόδεμα	προεντεταμένες χωρίς ρωγμές	0,04
	με ρωγμές	0,10
ξύλινες γέφυρες		0,06 - 0,12
γέφυρες από κράματα αλουμινίου		0,02
γέφυρες από γυαλί ή ινοπλισμένα πλαστικά		0,04 - 0,08
καλώδια	παράλληλα καλώδια	0,006
	συρματόσχοινα	0,020
ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1 Οι τιμές για ξύλο και πλαστικό είναι μόνο ενδεικτικές. Στις περιπτώσεις όπου οι αεροδυναμικές επιδράσεις είναι σημαντικές για το σχεδιασμό, πιο ακριβείς τιμές θα πρέπει να ληφθούν ζητώντας εξειδικευμένη άποψη (σε συμφωνία με την Αρμόδια Αρχή).		
ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2 Για καλωδιωτές γέφυρες, οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα F.2 θα πολλαπλασιάζονται με 0,75		
^a Για ενδιάμεσες τιμές του h/b , μπορεί να εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή		

4.5. Στροβιλώδης διέγερση και αεροελαστική ευστάθεια

4.5.1. Στροβιλώδης διέγερση

Η απόκριση υψίκορμων κατασκευών λόγω της ροής του ανέμου, όπως αναφέρθηκε, είναι πολύ σημαντική. Σε τέτοιου είδους εύκαμπτες κατασκευές η ροή του ανέμου δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επιβάλλει μόνο "στατικά" φορτία. Λόγω της στροβιλώδης διέγερσης που αναπτύσσεται ανάντη της ροής του ανέμου δημιουργούνται δίνες εναλλάξ σε απέναντι πλευρές της κατασκευής, όπως εξηγήθηκε στην **Παράγραφο 4.1.5**. Αυτό προκαλεί ένα κυμαινόμενο φορτίο κάθετο στην διεύθυνση του ανέμου. Λόγω τούτου, και όταν η συχνότητα της στροβιλώδους διέγερσης ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής (Σημείο Lock-in) ενδέχεται να προκληθούν ταλαντώσεις. Αυτή η κατάσταση συμβαίνει, όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Ε του Ευρωπαϊκού Πρότυπου EN1991-4 (Δράσεις Ανέμου), όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με μια κρίσιμη ταχύτητα ανέμου που αναφέρεται ακολούθως. Τυπικά, η κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου είναι μια συχνή ταχύτητα ανέμου με την οποία μπορεί να διαφανεί αν η κόπωση και συνεπώς ο αριθμός των κύκλων φορτίου, μπορεί να είναι σημαντική.

Η απόκριση που προκαλείται από τη στροβιλώδη διέγερση αποτελείται από μια μεγάλου εύρους απόκριση, η οποία συμβαίνει είτε όταν η κατασκευή κινείται είτε όχι, και από μια μικρού εύρους απόκριση προερχόμενη από τη δράση ανέμου που προκαλείται από την κίνηση. Όπως αναφέρει το EN1991-1-4, η πρώτη περίπτωση είναι σημαντική για κατασκευές από σκυρόδεμα και βαριές κατασκευές από χάλυβα, ενώ η δεύτερη περίπτωση αφορά ελαφριές κατασκευές από χάλυβα, όπως είναι γενικά οι μεταλλικές καπνοδόχοι.

4.5.1.1. Κριτήρια στροβιλώδους διέγερσης

Το EN1991-1-4 προτείνει δύο κριτήρια για να αποφανθεί κατά πόσο ή όχι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η στροβιλώδη διέγερση στην απόκριση της κατασκευής. Τα κριτήρια έχουν ως εξής:

1. Η επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης θα πρέπει να ερευνάται όταν ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση της κατασκευής εγκάρσια προς τον άνεμο, λαμβανόμενες και οι δύο σε επίπεδο κάθετα προς τον άνεμο, υπερβαίνει το 6.
2. Ενώ η επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης αμελείται όταν

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m \quad (4.34)$$

όπου:

$v_{crit,i}$ είναι η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για την i ιδιομορφή, όπως καθορίζεται στη **Παράγραφο 4.5.1.2**.

v_m είναι η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα δεκαλέπτου του ανέμου, όπως ορίστηκε στη **Παράγραφο 4.1.2**, στη διατομή που συμβαίνει στροβιλώδης διέγερση.

4.5.1.2. Κρίσιμη ταχύτητα ανέμου $v_{crit,i}$

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου εξαρτάται από την ταλάντωση (απόκριση) της κατασκευής. Γενικά η κατασκευή (καπνοδόχοι) μπορούν να ταλαντώνονται καμπτικά ή ελλειπτικά.

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για καμπτική ταλάντωση της ιδιομορφής i ορίζεται ως η ταχύτητα ανέμου, στην οποία η συχνότητα της στροβιλώδους διέγερσης είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ή του στοιχείου της και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} \quad (4.35)$$

όπου:

b είναι το πλάτος αναφοράς της διατομής στην οποία συμβαίνει στροβιλώδης διέγερση με συντονισμό και όπου το βέλος της ιδιομορφής είναι μέγιστο για την θεωρούμενη κατασκευή ή το τμήμα αυτής. Για κυκλικούς κυλίνδρους το πλάτος αναφοράς είναι η εξωτερική διάμετρος.

$n_{i,y}$ είναι η ιδιοσυχνότητα της θεωρούμενης καμπτικής ιδιομορφής i για ταλάντωση κάθετα στην διεύθυνση του ανέμου. Για καπνοδόχους ισχύει ότι αναφέρθηκε στην **Παράγραφο 4.3**.

St είναι ο αριθμός Strouhal.

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για ελλειπτική ταλάντωση της ιδιομορφής i κυλινδρικού κελύφους ορίζεται ως η ταχύτητα ανέμου, στην οποία το διπλάσιο της στροβιλώδους διέγερσης είναι ίσο με την ιδιοσυχνότητα της ελλειπτικής ιδιομορφής i του κυλινδρικού κελύφους και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,0}}{2 \cdot St} \quad (4.36)$$

$n_{i,0}$ είναι η ιδιοσυχνότητα ελλειπτικής ιδιομορφής i του κελύφους.

4.5.1.3. Αριθμός Strouhal St

Ο αριθμός Strouhal St είναι ένας αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τον μηχανισμό ταλάντωσης. Διαφέρει αναλόγως της διατομής. Για κυκλικές διατομές και για όλους τους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής λαμβάνει την τιμή 0,18. Για άλλες διατομές οι αντίστοιχοι αριθμοί St δίνονται στον Πίνακα Ε.1 του EN1991-1-4.

4.5.1.4. Αριθμός Scruton Sc

Η ευαισθησία σε ταλαντώσεις εξαρτάται από την απόσβεση της κατασκευής και τον λόγο της μάζας της κατασκευής ως προς τη μάζα ροής. Αυτό εκφράζεται από τον αριθμό Scruton Sc , ο οποίος δίνεται από την εξίσωση:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} \quad (4.37)$$

όπου:

δ_s είναι η απόσβεση της κατασκευής την οποία εκφράζει η λογαριθμική μείωση

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα κάτω από συνθήκες στροβιλώδους διέγερσης (προτεινόμενη τιμή 1,25kg/m³)

$m_{i,e}$ είναι η ισοδύναμη μάζα m_e ανά μονάδα μήκους για την ιδιομορφή i

4.5.1.5. Αριθμός Reynolds Re

Η δράση στροβιλώδους διέγερσης σε ένα κύκλιο κύλινδρο εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, Re , στην κρίσιμη ταχύτητα ανέμου $v_{crit,i}$. Ο αριθμός Reynolds δίνεται από την εξίσωση:

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu} \quad (4.38)$$

όπου:

b είναι η εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου

ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$v_{crit,i}$ είναι η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου (βλέπε Παρ. 4.3.1.)

4.5.1.6. Δράση στροβιλώδους διέγερσης

Η επίδραση των ταλαντώσεων που προκαλούνται από στροβιλώδη διέγερση υπολογίζεται από την επίδραση της αδρανειακής δύναμης ανά μονάδα χρόνου $F_w(s)$, η οποία δρα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου στη θέση s της κατασκευής και δίνεται από τη σχέση:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot Y_{F,max} \quad (4.39)$$

όπου:

$m(s)$ είναι η ταλαντούμενη μάζα της κατασκευής ανά μονάδα μήκους [kg/m]

$n_{i,y}$ είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής

$\Phi_{i,s}(s)$ είναι η ιδιομορφή της κατασκευής κανονικοποιημένη στη μονάδα, στο σημείο με τη μέγιστη μετατόπιση

$Y_{F,max}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση στο χρόνο του σημείου $\Phi_{i,s}(s)$ ίσο με 1, βλέπε παρ.4.5.1.7.

4.5.1.7. Υπολογισμός του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης

Γενικά το EN1991-1-4 προτείνει δύο μεθόδους για τον υπολογισμό του εύρους της εγκάρσιας ταλάντωσης εξαιτίας στροβιλώδους διέγερσης (Παράρτημα E). Η πρώτη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικιλία κατασκευών και ιδιομορφών. Περιλαμβάνει τις επιδράσεις στροβιλισμού και τραχύτητας και μπορεί να

χρησιμοποιείται για συνήθεις κλιματολογικές συνθήκες. Η δεύτερη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόκρισης για ταλαντώσεις στην πρώτη ιδιομορφή κατασκευών μορφής προβόλου με κανονική διαστάσεων εγκάρσια στον άνεμο κατά μήκος του κύριου άξονα της κατασκευής. Τυπικά καλυπτόμενες κατασκευές είναι καπνοδόχοι ή ιστοί. Δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για ομαδοποιημένους ή με εν σειρά διάταξη για συζευγμένους κυλίνδρους. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την θεώρηση διαφορετικών εντάσεων στροβιλισμού, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν λόγω μετεωρολογικών συνθηκών. Επίσης η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για περιοχές όπου είναι πιθανό να υπάρξει πολύ κρύο και συμβαίνουν συνθήκες διαστρωματικής ροής (π.χ. σε παράκτιες περιοχές της Βορείου Ευρώπης).

Το εθνικό προσάρτημα δεν καθορίζει με ποια μέθοδο θα πρέπει να γίνεται ο υπολογισμός του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης. Προτιμάται όπως περιγράφει η δεύτερη μέθοδος μιας και ενδείκνυται για κατασκευές τύπου προβόλου.

- **Μέθοδος 2, για τον υπολογισμό εγκάρσιας ταλάντωσης:**

Η μέθοδος 2 προτείνει όπως ο υπολογισμός της χαρακτηριστικής μέγιστης μετατόπισης στο σημείο με τη μεγαλύτερη μετακίνηση υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$y_{\max} = \sigma_y \cdot k_p \quad (4.40)$$

όπου:

σ_y είναι η τυπική απόκλιση της μετατόπισης

k_p είναι ο συντελεστής αιχμής

Η τυπική απόκλιση σ_y της μετατόπισης, η οποία σχετίζεται με το πλάτος b και στο σημείο με το μέγιστο βέλος ($\varphi=1$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4 \cdot \pi} - K_a \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_y}{b \cdot a_L}\right)^2\right)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot b^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (4.41)$$

όπου:

C_c είναι η αεροδυναμική σταθερά εξαρτώμενη από την μορφή της διατομής, και ένα κυκλικό κύλινδρο εξαρτώμενης επίσης από τον αριθμό Reynolds Re όπως ορίστηκε στην 6.3.3.6. Τιμές δίνονται στον **Πίνακα 4.8**.

K_a είναι η παράμετρος αεροδυναμικής απόσβεσης.

a_L είναι το κανονικοποιημένο οριακό εύρος το οποίο δίνει βέλος κατασκευών με πολύ χαμηλή απόσβεση. Τιμές δίνονται στον **Πίνακα 4.8**.

- St είναι ο αριθμός Strouhal όπως δίνεται στην **Παράγραφο 4.4.1.4**
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα κάτω από συνθήκες στροβιλώδους διέγερσης (προτεινόμενη τιμή 1,25kg/m³)
- m_e είναι η ενεργή μάζα ανά μονάδα μήκους
- h, b είναι το ύψος και το πλάτος της κατασκευής. Για κατασκευές με μεταβλητό πλάτος, χρησιμοποιείται το πλάτος στο σημείο της μέγιστης μετατόπισης.

Αξιζει να σημειωθεί ότι η προκαλούμενη από την κίνηση δράση του ανέμου λαμβάνεται υπόψη με το K_a και το a_L .

Η λύση της εξίσωσης (4.41) δίνεται στην εξίσωση:

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \quad (4.42)$$

Όπου οι σταθερές c_1 και c_2 δίνονται από:

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right) \quad c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h} \quad (4.43)$$

Η σταθερά αεροδυναμικής απόσβεσης K_a μειώνεται με αυξανόμενη ένταση στροβιλισμού. Για ένταση στροβιλισμού 0%, η σταθερά αεροδυναμικής απόσβεσης μπορεί να ληφθεί ως $K_a = K_{a,max}$, η οποία δίνεται στον **Πίνακα 4.7**.

Ο συντελεστής αιχμής k_p , όπως καθορίζει και το Εθνικό Προσάρτημα, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$k_p = \sqrt{2} \left(1 + \frac{1,2}{\tan\left(0,75 \cdot \frac{Sc}{(4 \cdot \pi \cdot K_a)}\right)} \right) \quad (4.44)$$

Ο αριθμός των κύλων φόρτισης μπορεί να λαμβάνεται από την εξίσωση (4.35) χρησιμοποιώντας συντελεστή εύρους $\epsilon_0 = 0,15$.

Πίνακας 4.8: Σταθερές για τον υπολογισμό των επιδράσεων στροβιλώδους διέγερσης

Σταθερά	Κυκλικός κύλινδρος $Re \leq 10^5$	Κυκλικός κύλινδρος $Re = 5 \cdot 10^5$	Κυκλικός κύλινδρος $Re \geq 10^6$	Τετραγωνική διατομή
C_c	0,02	0,005	0,01	0,04
$K_{a,max}$	2	0,5	1	6
a_L	0,4	0,4	0,4	0,4

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για κυκλικούς κυλίνδρους οι σταθερές C_c και $K_{a,max}$ θεωρούνται ότι μεταβάλλονται γραμμικά με το λογάριθμο του αριθμού Reynolds για $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ και για $5 \cdot 10^5 < Re < 10^6$, αντίστοιχα.

- **Αριθμός κύκλων φόρτισης**

Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N οι οποίοι προκαλούνται από ταλάντωση στροβιλώδους διέγερσης δίνεται από την εξίσωση:

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left(- \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right) \quad (4.45)$$

όπου:

n_y είναι η ιδιοσυχνότητα της εγκάρσιας προς τον άνεμο ιδιομορφής [Hz]. (Παράγραφος 4.3)

v_{crit} είναι η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου [m/s]

v_0 είναι $\sqrt{2}$ φορές η τιμή με τη μεγαλύτερη πιθανότητα στην κατανομή πιθανότητας Weibull η οποία ελήφθη υπόψη για την ταχύτητα ανέμου [m/s]

T είναι ο χρόνος ζωής σε δευτερόλεπτα, ο οποίος είναι ίσος με $3,2 \cdot 10^7$ επί τον προσδοκώμενο χρόνο ζωής σε χρόνια.

ε_0 είναι ο συντελεστής εύρους ο οποίος περιγράφει το εύρος ταχυτήτων ανέμου σε ταλαντώσεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης

Το Εθνικό Προσάρτημα καθορίζει ως ελάχιστη τιμή του αριθμού κύκλων φόρτισης $N = 1 \cdot 10^4$

Σημειώνεται ότι η τιμή v_0 μπορεί να λαμβάνεται ως το 20% της χαρακτηριστικής μέσης ταχύτητας ανέμου (**Παράγραφος 4.1.2**) και στο ύψος της διατομής που συμβαίνει η στροβιλώδης διέγερση. Επίσης ο συντελεστής ε_0 βρίσκεται μεταξύ 0,1 και 0,3, ενώ μπορεί να λαμβάνεται ως $\varepsilon_0 = 0,3$.

4.5.2. Καλπάζουσα αστάθεια

Η καλπάζουσα αστάθεια είναι η ταλάντωση μιας εύκαμπτης κατασκευής στην εγκάρσια προς τον άνεμο καμπτική ιδιομορφή. Γενικά οι κυκλικές διατομές δεν είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς. Ο πάγος όμως είναι ικανός σε κάποιες περιπτώσεις να μετατρέψει μια σταθερή διατομή σε ασταθή – όπως για παράδειγμα μπορεί να γίνει με τις καπνοδόχους.

Η ταλάντωση καλπάζουσας αστάθειας ξεκινά σε μια ειδική κρίσιμη ταχύτητα ανέμου V_{CG} και συνήθως τα εύρη των ταλάντωσης αυξάνονται ταχέως με αυξανόμενη ταχύτητα ανέμου.

4.5.2.1. Κρίσιμη ταχύτητα ανέμου

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για καλπάζουσα αστάθεια, V_{CG} δίνεται από την εξίσωση:

$$v_{CG} = \frac{2 \cdot Sc}{a_G} \cdot n_{1,y} \cdot b \quad (4.46)$$

όπου:

Sc ο αριθμός Struton (**Παράγραφος 4.5.1.3**)

$n_{1,y}$ η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής εγκάρσια στον άνεμο (**Παράγραφος 4.3**)

b το πλάτος της καπνοδόχου

a_G είναι ο συντελεστής καλπάζουσας αστάθειας. Για κυκλικές διατομές (με την παρουσία πάγου) λαμβάνει την τιμή 1,0.

Σημειώνεται ότι θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι:

$$v_{CG} > 1,25 \cdot v_m \quad (4.47)$$

όπου:

v_m είναι η μέση ταχύτητα ανέμου (Παράγραφος 4.2.2). Υπολογίζεται στο ύψος όπου αναμένεται καλπάζουσα αστάθεια, και όπου κατά πάσα πιθανότητα είναι στο σημείο μέγιστου εύρους ταλάντωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν η κρίσιμη ταχύτητα στροβιλώδους διέγερσης v_{crit} είναι κοντά στην κρίσιμη ταχύτητα καλπάζουσας αστάθειας v_{CG} :

$$0,7 < \frac{v_{CG}}{v_{crit}} < 1,5 \quad (4.48)$$

είναι πιθανό να συμβεί αλληλεπίδραση μεταξύ στροβιλώδους διέγερσης και καλπάζουσας αστάθειας. Η περίπτωση αυτή χρήζει ιδιαίτερης μελέτης.

Τέλος στο EN1991-1-4 (Παράγραφοι E.2.3 και E.3) προτείνονται και επιπλέον σχέσεις για τον υπολογισμό της καλπάζουσας αστάθειας συζευγμένων κυλίνδρων και της συσχετισμένης καλπάζουσας αστάθειας δύο ή περισσότερων ελεύθερα ιστάμενων κυλίνδρων. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας εργασίας.

4.6. Βιβλιογραφία

- [1]. Ιωάννης Χ. Ερμόπουλος. Ευρωκώδικας 1: βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών –Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005.
- [2]. Emil Simiu, Robert H. Scanlan. *Wind effects on structures : an introduction to wind engineering*. John Wiley & Sons, 1978.
- [3]. EN 1991-1-4, Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-4: Wind Action.
- [4]. EN 1991-1-4, Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-4: Wind Action National Annex – (GR), 2008.
- [5]. Henry Liu. *Wind Engineering – A Handbook for Structure Engineers*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1991.
- [6]. Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [7]. International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.

5

ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

5.1. Εισαγωγή

Γενικά οι μεταλλικές καπνοδόχοι δεν είναι εν γένη επιρρεπής σε σεισμικά φορτία [CICIND, 1999]. Δυσμενέστερα γενικά αποδεικνύονται τα φορτία ανέμου παρά τα φορτία από ενδεχόμενες σεισμικές δονήσεις. Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι στη διαστασιολόγηση παραλείπεται ο έλεγχος έναντι σεισμικών καταπονήσεων. Οι μεταλλικές καπνοδόχοι μπορεί να είναι υψικορμες κατασκευές και να δίνουν την αίσθηση ότι επηρεάζονται από τα σεισμικά φορτία, αλλά λόγω του υλικού κατασκευής, το ποσοστό της μάζας είναι σχετικά μειωμένο. Επιπλέον, οι καπνοδόχοι δεν επιβαρύνονται με σημαντικά κινητά φορτία. Ως εκ τούτου, και αφού τα σεισμικά φορτία είναι ανάλογα της σεισμικής μάζας (μόνιμα και κινητά) της κατασκευής, με τα όσα αναφέρθηκαν μπορεί εύλογα να προκύψει το συμπέρασμα ότι οι μεταλλικές καπνοδόχοι δεν επηρεάζονται και τόσο από τα σεισμικά φορτία. Φυσικά το συμπέρασμα αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται αναλόγως των διαστάσεων της καπνοδόχου. Για παράδειγμα, όσο υψικορμη είναι η καπνοδόχος, και κατ' επέκταση πιο εύκαμπτη, περισσότερο επηρεάζεται από τα φορτία ανέμου παρά του σεισμού, και αντίθετα.

Στις ακόλουθες παραγράφους αναφέρονται οι αντίστοιχοι μέθοδοι και υπολογισμοί που προτείνει το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN1998-1^[1] για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Στο μέρος έξι του ίδιου Προτύπου (EN1998-1 : Μέρος 6: Πύργοι, Ιστοί και Καμινάδες) δίνονται συγκεκριμένες διατάξεις για τις καπνοδόχους.

5.2. Σεισμικά Φορτία

Η ανάλυση υπό σεισμικά φορτία γενικά στις κατασκευές, μπορεί να γίνει είτε με ισοδύναμες στατικές μεθόδους ή με δυναμική ανάλυση. Στη πρώτη περίπτωση, το EN1998-1 δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των σεισμικών φορτίων με τη χρήση φάσματος σχεδιασμού. Σε αυτή την περίπτωση προηγείται το ελαστικό φάσμα απόκρισης, το οποίο στη συνέχεια επί της ουσίας απομειώνεται με το συντελεστή συμπεριφοράς q για να προκύψει το φάσμα σχεδιασμού. Για το σχεδιασμό του ελαστικού φάσματος απαιτούνται και άλλοι συντελεστές ήτοι, μέγιστη επιτάχυνση της περιοχής κατασκευής, συντελεστής απόσβεσης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης γίνεται χρήση καταγραφών (επιταχυνσιογραφημάτων) από τους κοντινότερους στη περιοχή επιταχυνσιογράφους. Αυτή η περίπτωση, είναι και γνωστή ως προσομοίωση με χρονοϊστορία.

5.2.1. Ελαστικό φάσμα απόκρισης– Φάσμα σχεδιασμού

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης μπορεί να σχεδιαστεί με βάση την Παράγραφο 3.2.2.2 το EN 1998-1. Η σχεδίαση του φάσματος λαμβάνει υπόψη και τα χαρακτηριστικά του εδάφους της θεμελίωσης. Το έδαφος κατηγοριοποιείται, αναλόγως των χαρακτηριστικών του, σε μια από τις πέντε κατηγορίες ήτοι, A, B, C, D, και E οι οποίες περιγράφονται στην Παράγραφο 3.1.1. Οι κατηγορίες αυτές λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο ενίσχυσης των σεισμικών κυμάτων λόγω του εδαφικού προφίλ στην περιοχή σχεδιασμού.

Το φάσμα σχεδιασμού, όπως αναφέρθηκε, είναι το αποτέλεσμα της απομείωσης του ελαστικού φάσματος απόκρισης με το συντελεστή συμπεριφοράς q (behaviour factor). Ο συντελεστής συμπεριφοράς λαμβάνει υπόψη του το ποσοστό της ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από την κατασκευή, την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής και την ανελαστική υστερητική συμπεριφορά της κατασκευής. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για κατασκευές όπου έχουν την ικανότητα να παρουσιάζουν αντοχή σε σεισμικές δράσεις στη μη-γραμμική περιοχή. Επί τούτου, επιτρέπεται ο σχεδιασμός για ανάληψη σεισμικών δυνάμεων μικρότερων από εκείνες που αντιστοιχούν σε γραμμική ελαστική απόκριση. Γενικά, για ειδικές κατασκευές όπως οι καπνοδόχοι, ενδείκνυται εκτός άλλων περιορισμών, η ανάλυση τους με τη χρήση φάσματος σχεδιασμού. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q που μπορεί να λαμβάνεται είναι 1,5 [1]. Συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς για τις καπνοδόχους δίνονται την Παράγραφο 5.3.5 του παρόντος κεφαλαίου. Τέλος θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η μέθοδος της απλοποιημένης δυναμικής ανάλυσης συνίσταται για περιπτώσεις όπου ο συντελεστής σπουδαιότητας είναι μικρότερος του 1,2 και το ύψος της κατασκευής δεν υπερβαίνει τα 80m [2].

Για τον σχεδιασμό του φάσματος σχεδιασμού το EN 1998-1 προτείνει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (5. 2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5. 3)$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5. 4)$$

όπου:

$S_d(T)$ το φάσμα σχεδιασμού

T είναι η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού συστήματος για μια ελευθερία κίνησης

a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε εδάφους κατηγορίας Α ($a_g = \gamma_I a_{gR}$)

T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος

S ο συντελεστής εδάφους

η ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης, με τιμή αναφοράς $\eta=1$ για 5% ιζώδη απόσβεση

q συντελεστής συμπεριφοράς (5.3.5)

β είναι ο συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού (συνιστώμενη τιμή $\beta=0,2$)

Οι τιμές των περιόδων T_B , T_C και T_D καθώς και αυτή του συντελεστή εδάφους S , που περιγράφουν την μορφή του ελαστικού φάσματος απόκρισης εξαρτώνται από την κατηγορία εδάφους. Παράλληλα, το EN1998-1 καθορίζει δύο τύπους φασμάτων, το Τύπο 1 και το Τύπο 2. Ο Τύπος 1 αντιστοιχεί για μέγεθος κύματος επιφάνειας $M_s < 5,5$ ενώ ο Τύπος 2 αντιστοιχεί για μέγεθος κύματος επιφάνειας $M_s \geq 5,5$. Στους **Πίνακες 5.1** και **5.2** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων T_B , T_C , T_D και S για τις πέντε κατηγορίες εδάφους και για του δύο τύπους φασμάτων αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1

Εδαφικός Τύπος	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,20	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,40	0,15	0,5	2,0

Πίνακας 5.2: Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 2

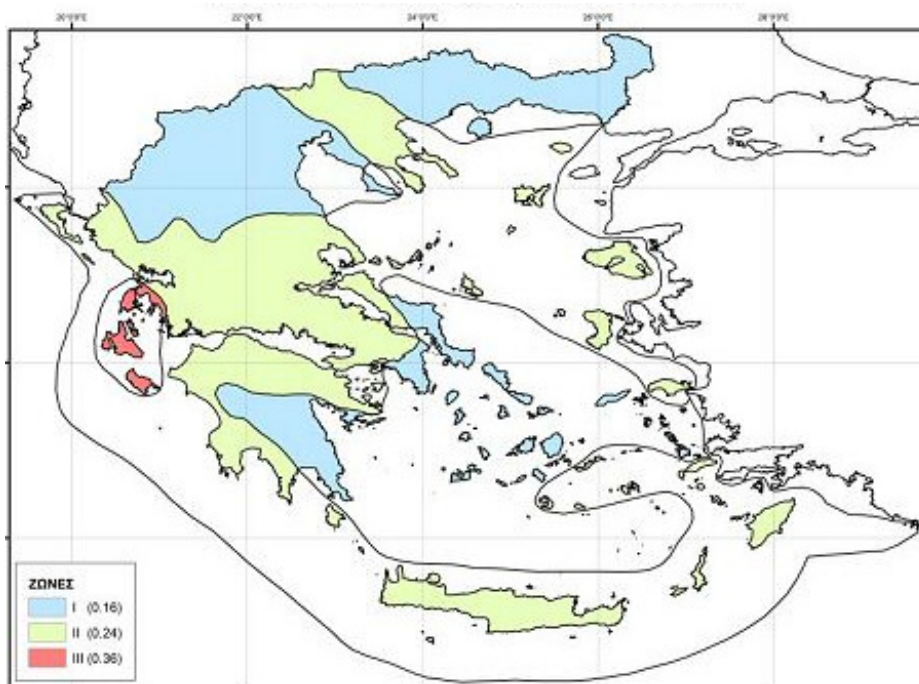
Εδαφικός Τύπος	S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Η τιμή του συντελεστή απόσβεσης η κατά το EN 1998-1 μπορεί να ληφθεί από την έκφραση:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0,55 \quad (5.5)$$

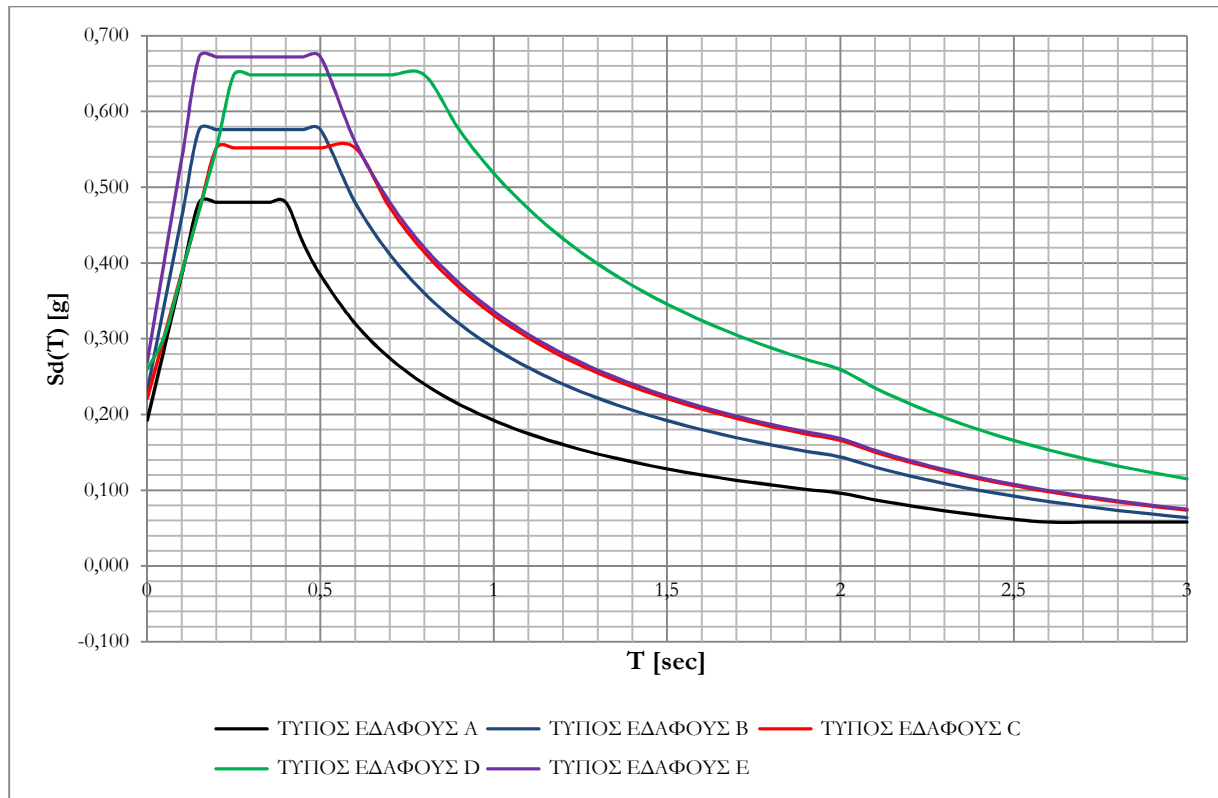
όπου ξ είναι ο λόγος ιξώδους απόσβεσης του φορέα, εκφρασμένος σαν ποσοστό επί τις εκατό. Ο CICIND προτείνει συντελεστή απόσβεσης για μεταλλικές καπνοδόχους ίσο με 2%.

Η επιτάχυνση a_{gR} λαμβάνει τιμές αναλόγως της σεισμικής επικινδυνότητας. Για την Ελλάδα ισχύουν τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας όπως φαίνονται στο **Σχήμα 5.1**.

**Σχήμα 5.1:** Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας στη Ελλάδα

Ενδεικτικά στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται τα φάσματα σχεδιασμού Τύπου 1 για ελαστική ανάλυση για τις κατηγορίες εδάφους A-E, με απόσβεση 5%, ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II και συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_i=1,2$ (EN1998-1).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός από το φάσμα σχεδιασμού, εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ελαστικό φάσμα και να γίνει μια ιδιομορφική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλο συντελεστή απόσβεσης ζ . Το EN1998-1 στο Παράρτημα Β προτείνει διάφορες τιμές του συντελεστή απόσβεσης ανάλογα με το υλικό της κατασκευής. Για κατασκευές από χάλυβα ο συντελεστής μπορεί να λάβει τιμές $0,01 \div 0,04$.



Σχήμα 5.2: Φάσματα σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση, για τις κατηγορίες εδάφους Α-Ε, απόσβεση 5%, ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ και συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_i=1,2$, κατά EN1998-1.

5.2.2. Προσομοίωση με χρονοϊστορία

Στη περίπτωση μη-γραμμικής ανάλυσης της κατασκευής δεν μπορεί να γίνει η χρήση των φασμάτων σχεδιασμού για τον υπολογισμό των φορτίων σεισμού. Σε αυτή την περίπτωση συνίσταται όπως η ανάλυση της απόκρισης της κατασκευής γίνει με την χρήση καταγραμμένων στην περιοχή μελέτης επιταχυνσιογραφημάτων. Προσομοίωση με χρονοϊστορία μπορεί να γίνει και για γραμμική ανάλυση αλλά για πρακτικούς σκοπούς αποφεύγεται. Σημειώνεται ότι η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση των επιταχυνσιογραφημάτων πρέπει να κλιμακωθεί αναλόγως της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής κατασκευής. Ο ελάχιστος αριθμός επιταχυνσιογραφημάτων που πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι τρία (3). Επίσης ο EN 1998-1 καθορίζει ότι στην περίπτωση όπου από τα αποτελέσματα θα παρθεί ο μέσος όρος των εντατικών μεγεθών για την μελέτη τότε ο ελάχιστος αριθμός επιταχυνσιογραφημάτων είναι επτά (7). Στην

περίπτωση όμως που θα ληφθούν υπόψη τα μέγιστα των αποτελεσμάτων τότε ο ελάχιστος αριθμός είναι τρία (3).

5.2.3. Σεισμικοί συνδυασμοί

Η σεισμική διέγερση μπορεί να αναχθεί σε τρεις διευθύνσεις, δύο οριζόντιες κάθετες μεταξύ τους E_x και E_y και μια κατακόρυφη E_z . Η κατακόρυφη συνιστώσα γενικά λαμβάνεται υπόψη υπό κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις που αναφέρονται στο EN1998-1. Οι μεταλλικές καπνοδόχοι δεν επηρεάζονται γενικά από κατακόρυφες δονήσεις[4]. Ως σεισμική μάζα της κατασκευής λαμβάνεται το μόνιμο φορτίο στο σύνολό του και 1/3 του συνολικού ωφέλιμου φορτίου. Οι σεισμικοί συνδυασμοί που προτείνει το EN 1998-1 είναι:

$$\begin{aligned}
 &1.0G + 0.3Q + 1.0E_x + 0.3E_y \\
 &1.0G + 0.3Q + 1.0E_x - 0.3E_y \\
 &1.0G + 0.3Q - 1.0E_x + 0.3E_y \\
 &1.0G + 0.3Q - 1.0E_x - 0.3E_y \\
 &1.0G + 0.3Q + 0.3E_x + 1.0E_y \\
 &1.0G + 0.3Q + 0.3E_x - 1.0E_y \\
 &1.0G + 0.3Q - 0.3E_x + 1.0E_y \\
 &1.0G + 0.3Q - 0.3E_x - 1.0E_y
 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Στη περίπτωση συμμετρικού φορέα, όπως στις καμινάδες μερικοί από τους συνδυασμούς μπορούν να επαλειφθούν.

5.3. Αντισεισμικός σχεδιασμός καπνοδόχων

5.3.1. Συντελεστής σπουδαιότητας

Ειδικές κατασκευές όπως οι πύργοι, ιστοί και οι καπνοδόχοι κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας, ανάλογα με τον κίνδυνο που συνεπάγεται για τον άνθρωπο και τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες που μπορεί να έχει ενδεχόμενη καταστροφή τους ή διακοπή λειτουργία τους. Σε κάθε κατηγορία σπουδαιότητας αντιστοιχεί και μια τιμή του συντελεστή σπουδαιότητας γ_i , όπως φαίνονται στον **Πίνακας 5.3**.

Πίνακας 5.3: Συντελεστής σπουδαιότητας γ_i

Κατηγορία Σπουδαιότητας	γ_i
Κατασκευές όπου η λειτουργία του είναι στρατηγικής σημασίας, οι οποίες υποστηρίζουν κάποιο σύστημα ύδρευσης (υδατόπυργοι), εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή μονάδα επικοινωνίας	1,4
Κατασκευές όπου το ύψος είναι μεγαλύτερο από την απόσταση που απέχουν από γειτνιάζοντα κτίρια, κατασκευές όπου ανεγείρονται σε περιοχή με ενδεχόμενη μελλοντική ανάπτυξη, κατασκευές όπου η κατάρρευση θα προκαλέσει καταστολή λειτουργίας των βιομηχανιών	1,2
Κατασκευές όπου το ύψος τους ξεπερνά τα 80m, και δεν σχετίζονται με τις παραπάνω κατηγορίες	1,1
Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις	1,0

Ουσιαστικά ο συντελεστής σπουδαιότητας χρησιμοποιείται για την τροποποίηση της μέγιστης αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης A , ανάλογα με την πιθανότητα υπέρβασης ή το χρόνο ζωής της κατασκευής.

5.3.2. Σεισμική μάζα

Κατά την ανάλυση της καπνοδόχου υπό σεισμικά φορτία, στη σεισμική μάζα πρέπει να συνυπολογίζονται, συν τους άλλους, μονωτικά υλικά, επενδύσεις, εξαρτήματα και άλλες μόνιμες κατασκευές. Επίσης θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι στη σεισμική μάζα λαμβάνεται υπόψη και το 30% των κινητών φορτίων.

Στην περίπτωση όπου δεν δίνονται οποιεσδήποτε πληροφορίες για το ληφθέν ωφέλιμο φορτίο στις πλατφόρμες, αυτό μπορεί να λαμβάνεται ίσο με 2kN/m^2 . Το φορτίο αυτό θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε περιπτώσεις κανονικής συντήρησης, επισκευής, βαφής ή μικροεπισκευών.

5.3.3. Ακαμψία

Στις μεταλλικές καπνοδόχους το EN 1998-1 ορίζει ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η οποιαδήποτε επιρροή των θερμοκρασιακών μεταβολών στην ακαμψία. Συνήθως αυτό λαμβάνεται ως απομείωση του μέτρου ελαστικότητας (Βλέπε κεφάλαιο 6). Η απομείωση συνίσταται για κατασκευές όπου οι θερμοκρασίες λειτουργία υπερβαίνουν τους 100°C .

5.3.4. Απόσβεση

Στο Παράρτημα Β του EN1998-1 δίνονται αντίστοιχες τιμές για τον συντελεστή απόσβεσης ζ . Για μεταλλικές καπνοδόχους ο συντελεστής μπορεί να λάβει τιμές:

$$\zeta = 0,02 \div 0,04.$$

5.3.5. Συντελεστής συμπεριφοράς

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q , όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση του φάσματος σχεδιασμού. Το EN1998-1 προτείνει την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή:

$$q = q_o \cdot k_r \geq 1,5 \quad (5.7)$$

όπου:

q_o ο βασικός συντελεστής συμπεριφοράς (basic behaviour factor). Για μεταλλικές καπνοδόχους ο συντελεστής q_o , που προτείνει το Πρότυπο λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- Για κατασκευές όπου η διατομή ικανοποιεί τις απαιτήσεις της παραγράφου 5.3.3 EN1993-1-1 για πλαστική ανάλυση, $q_o = 2,5$

- Για τις υπόλοιπες κατασκευές $q_0=1,5$

k_r είναι ο συντελεστής όπου λαμβάνει υπόψη τις ανομοιομορφίες στην κατασκευή ως εξής:

- $k_r = 0,8$ για οριζόντιες εκκεντρότητες της μάζας οι οποίες υπερβαίνουν το 5%.
- $k_r = 0,8$ στην περίπτωση όπου ανοίγματα στον κορμό προκαλούν μεταβολής της ροπής αδρανείας στην διατομή πέρα του 30%.
- $k_r = 0,7$ στην περίπτωση συγκέντρωσης της μάζας στη κορυφή (για μήκος $1/3$ μετρούμενο από την κορυφή προς τα κάτω) η οποία συμβάλλει πέρα από το 50% στις ροπές ανατροπής.
- Στην περίπτωση όπου παρατηρούνται περισσότερες ανομοιομορφίες, ο συντελεστής k_r είναι ίσος με το 90% της μικρότερης τιμής του k_r .

5.1. Βιβλιογραφία

- [1] EN 1998-1 Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.*
- [2] EN 1998-6 Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance. Part 6: Towers, Masts Chimneys.*
- [3] EN 1998-1-6 Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance. Part 6: Towers, masts and chimney.*
- [4] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction.* Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [5] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel.* CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.

6

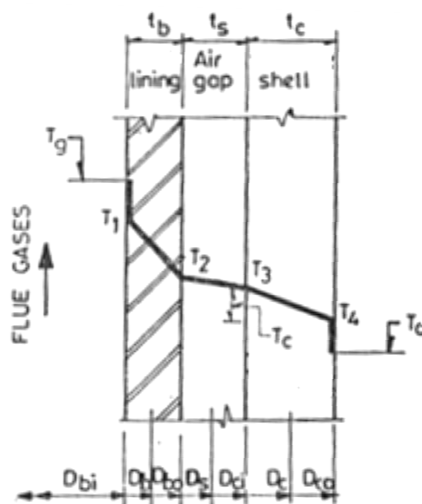
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

6.1. Εισαγωγή

Δια μέσου των καπνοδόχων μεταφέρονται τα καυσαέρια από διεργασίες καύσης στην ατμόσφαιρα. Τα καυσαέρια αφού εξαχθούν από τους λέβητες των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, διοχετεύονται στην καπνοδόχο. Συνεπώς, τα καυσαέρια διαθέτουν ψηλές θερμοκρασίες όταν εισέρχονται στην καπνοδόχο. Οι σχετικά αυξημένες αυτές θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό της καπνοδόχο ενδέχεται να επηρεάσουν τη ευστάθεια της κατασκευής. Το κέλυφος επηρεάζεται από την θερμοκρασία λειτουργίας και εντείνεται λόγω ενδεχόμενων θερμοκρασιακών μεταβολών (με κατακόρυφες και περιμετρικές τάσεις) [6]. Φυσικά στις σημερινές καπνοδόχους τα αέρια μεταφέρονται δια μέσου κατάλληλων καπναγωγών. Οι καπναγωγοί αυτοί ουσιαστικά χρησιμοποιούνται, συν τοις άλλοις, ώστε να ρυθμίσουν την ταχύτητα εξόδου των αερίων αλλά και για να προστατεύσουν το κέλυφος της κατασκευής από τη διάβρωση και την έκθεση του σε αυξημένες θερμοκρασίες. Συνήθως τακτική είναι επίσης η χρήση κατάλληλων μονωτικών υλικών ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι θερμοκρασίες που θα επιδέχεται το κέλυφος. Παρόλα αυτά είναι πρακτικά αδύνατο οι θερμοκρασίες να απομονωθούν τελείως. Έτσι και με βάση την θεωρία μεταφοράς θερμότητας το κέλυφος μπορεί να δέχεται θερμοκρασίες, που μπορεί να ξεπερνούν τους 50° C [7]. Εν τούτοις, θα πρέπει στην ανάλυση και σχεδίαση της καπνοδόχου να λαμβάνονται υπόψη και οι επιρροές της θερμοκρασίας. Οι επιρροές αυτές, αφορούν την ένταση του κελύφους με πρόσθετες τάσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, αλλά και την αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του χάλυβα ως υλικό κατασκευής λόγω των ψηλών θερμοκρασιών.

6.2. Κατανομή της Θερμοκρασίας

Τα καυσαέρια από τους λέβητες διοχετεύονται στους καπναγωγούς οι οποίοι βρίσκονται εντός του κελυφωτού φορέα της καπνοδόχου. Ο αριθμός των καπναγωγών εξαρτάται γενικά από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εξυπηρετεί η καπνοδόχος αλλά και την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων. Αρκετές φορές τοποθετείται, επιπλέον της απαίτησης, εφεδρικός αγωγός ο οποίος θα χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις περιόδων αιχμής, συντήρησης ή/και στην περίπτωση φραγής ή ζημιάς άλλων αγωγών. Σε αυτή την περίπτωση η καπνοδόχος χαρακτηρίζεται ως πολλαπλής εξαγωγής (Multiflue chimney). Υπάρχουν φυσικά και καπνοδόχοι μονής εξαγωγής (Single flue). Οι αγωγοί είναι επενδυμένοι με κατάλληλα μονωτικά υλικά, ώστε να περιορίσουν τις απώλειες θερμοκρασίας και ειδικά τη ροή της θερμοκρασίας στο κέλυφος της καπνοδόχου. Η μόνωση των καπναγωγών εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος και κυριότερος λόγος είναι η μείωση της ροής θερμοκρασίας από τους αγωγούς στο κέλυφος. Ο δεύτερος λόγος αφορά την αποφυγή απώλειας ενέργειας (θερμότητας) από τα αέρια η οποία εξυπηρετεί στην άνοδο του πλουμίου. Παρόλα αυτά, ακόμα και με την χρήση μονωτικών υλικών είναι δύσκολα και πολλές φορές αδύνατη η φραγή της θερμοκρασιακής ροής προς το κέλυφος. Η θερμοκρασία των καυσαερίων που διέρχονται εντός της καπνοδόχου έχουν θερμοκρασίες που φτάνουν και τους 450°C [5]. Η τελική θερμοότητα και κατ' επέκταση η θερμοκρασία που επικρατεί στον κέλυφος της καπνοδόχου, εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υλικών μόνωσης. Τυπική τομή μιας βιομηχανικής καπνοδόχου, μονής εξαγωγής, φαίνεται στο **Σχήμα 6.1**. Στο σχήμα απεικονίζεται και το προφίλ της μεταβολής της θερμοκρασίας από το εσωτερικό του καπναγωγού προς το κέλυφος.



Σχήμα 6.1: Προφίλ θερμοκρασίας στις καπνοδόχους [6]

Κατάλληλες σχέσεις για την εκτίμηση της θερμοκρασίας (σε περιόδους λειτουργίας της καπνοδόχου) στο κέλυφος της καπνοδόχου δίνονται στην συνέχεια. Γενικά η θερμοκρασία που επικρατεί στο κέλυφος των καπνοδόχων επηρεάζεται, συν τοις άλλοις, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου, τα χαρακτηριστικά της μόνωσης, το εσωτερικό διάκενο αέρος μεταξύ κελύφους και αγωγών των καυσαερίων

και από τη εσωτερική επένδυση του κελύφους (π.χ. βαφή). Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι μεταλλικές καπνοδόχοι, σχετικά μικρού ύψους, διαθέτουν μειωμένο ποσοστό μάζας σε σχέση με τις μπετονένιες και για αυτό η θερμοκρασία από την ηλιακή ακτινοβολία είναι ήσσονος σημασίας, και για αυτό πολλές φορές αμελείται. Σημειώνεται όμως ότι σε ψηλές μεταλλικές καπνοδόχους η ανισοκατανομή της θερμοκρασία λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει σημαντικές παραμορφώσεις στην κατασκευή, οι οποίες είναι σχετικά εμφανείς [7].

Στο Παράρτημα D του EN1991-1-5 (Θερμοκρασιακές δράσεις) δίνονται κατάλληλες σχέσεις, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της κατανομής της θερμοκρασίας. Οι σχέσεις βασίζονται στη θεωρία διάδοσης θερμότητας. Στη περίπτωση ενός απλού μέλους με διαστρωμάτωση και θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν τοπικά θερμογέφυρες ενώ η θερμική κατάσταση είναι σταθερή, η θερμοκρασία $T(x)$ σε μια απόσταση x από την εσωτερική επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$T(x) = T_{in} - \frac{R(x)}{R_{tot}} (T_{in} - T_{out}) \quad (6.1)$$

όπου:

T_{in} είναι η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος

T_{out} είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος

R_{tot} είναι η συνολική θερμική αντίσταση του στοιχείου που περιλαμβάνει την αντίσταση όλων των επιφανειών.

$R(x)$ είναι η θερμική αντίσταση της εσωτερικής επιφάνειας και του στοιχείου από την εσωτερική έως το σημείο x (βλέπε Σχήμα 6.2).

Οι τιμές θερμικής αντίστασης R_{tot} και $R(x)$ [m^2K/W] μπορούν να προσδιοριστούν από τον συντελεστή διάδοσης της θερμότητας και τους συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας που δίνονται στο EN ISO 6946 (1996) και το EN ISO 13370 (1998)[2]:

$$R_{tot} = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} + R_{out} \quad (6.2)$$

όπου:

R_{in} είναι η θερμική αντίσταση στην εσωτερική παρειά [m^2K/W]

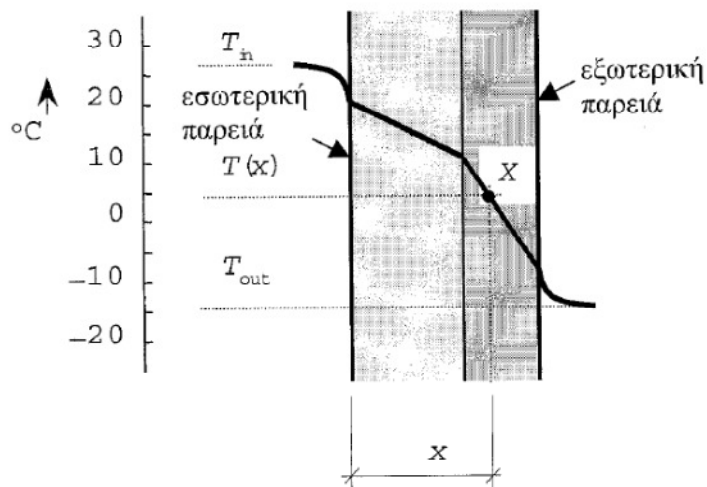
R_{out} είναι η θερμική αντίσταση στην εξωτερική παρειά [m^2K/W]

λ_i είναι η θερμική αγωγιμότητα [$W/(mK)$]

h_i σε [m] είναι το πάχος της στρώσεις i

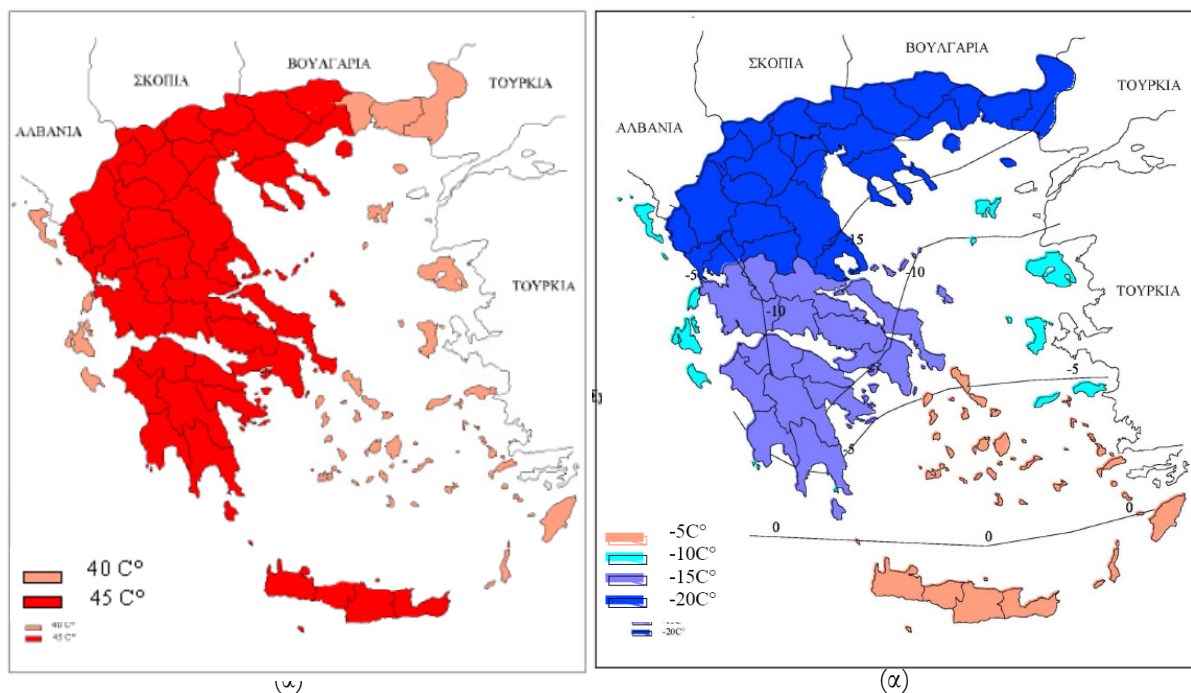
$$R(x) = R_{in} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i} \quad (6.3)$$

Όπου εξετάζονται μόνο οι στρώσεις (ή μέρος της στρώσεις) από την εσωτερική παρειά έως το σημείο x (βλέπε Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2: Κατανομή θερμοκρασίας σε στοιχείο με δύο στρώσεις [2]

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται συνήθως ως η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία υπό σκιά στη θέση του έργου. Προτεινόμενες τιμές δίνονται στους εθνικούς χάρτες ισοθερμικών καμπύλων (EN 1991-1-5 Εθνικό προσάρτημα). Για την Ελλάδα οι χάρτες ισοθερμικών καμπύλων δίνονται στα Σχήματα 6.3(α) και (β).



Σχήμα 6.3: (α) Χάρτης μέγιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σκιά T_{\max} , (β) Χάρτης ελάχιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σκιά T_{\min} [1]

6.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα κατασκευής

6.3.1. Τάση διαρροής

Λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών λειτουργίας της καπνοδόχου, το κέλυφος ενδέχεται να βρίσκεται σε σχετικά αυξημένες θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα κατασκευής μειώνονται συναρτήσει της αύξησης της θερμοκρασίας. Στον **Πίνακα 6.1** παρατίθενται χαρακτηριστικές τιμές της τάση διαρροής, συναρτήσει της θερμοκρασίας, διαφόρων τύπων χάλυβα που χρησιμοποιούνται είτε για την κατασκευή του κελύφους (Windshield) ή/και των καπναγωγών (Liner). Οι τιμές αυτές προτείνονται από το EN13084-7.

Πίνακας 6. 1: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας ($f_y, k, N/mm^2$) [5]

Type of steel		Temperature of the material up to °C																				
Short name	Material	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
EN 10025-2																						
S235JRG1	1.0036	235	235	190	175	160	140	120														
S235JRG2	1.0038	235	235	190	175	160	140	120														
S235J2G3	1.0116	235	235	190	175	160	140	120														
S275JR	1.0044	275	275	215	200	185	165	145	125	104												
S275J2G3	1.0144	275	275	215	200	185	165	145	125	104												
S355J2G3	1.0570	355	355	260	245	230	210	190														
Usable for		Windshield and liner																				
EN 10025-5																						
S235JRW	1.8960	235	235	190	175	160	140	120														
S235J2W	1.8961	235	235	190	175	160	140	120														
S355J2WP	1.8946	355	355	260	245	230	210	190														
S355J2G1W	1.8963	355	355	260	245	230	210	190	170	140	120	85										
Usable for		Windshield and liner																				
EN 10028																						
P265GH	1.0425	255	247	232	215	197	181	166	154	145	80											
16Mo3	1.5415	270	268	259	245	228	209	190	172	156	145	139										
13CrMo4-5	1.7335	290	285	275	260	243	226	209	194	180	169	159	76									
10CrMo9-10	1.7380	300	270	249	238	232	227	221	211	198	185	173	83	44								
Usable for		windshield and liner																				
EN 10088																						
X5CrNi18-10	1.4301	195	177	157	142	127	118	110	104	98	95	92	90									
X6CrNiTi18-10	1.4541	205	190	176	167	157	147	136	130	125	121	119	118									
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	215	202	185	177	167	157	145	140	135	131	129	127									
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	190	182	166	152	137	127	118	113	108	103	100	98									
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	190	182	166	152	137	127	118	113	108	103	100	98									
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	220	190	175	165	155	145	135	130	125	120	110	105									
Usable for		Windshield and liner																				
EN 10095																						
X8CrNiTi18-10	1.4878	205	190	176	167	157	147	136	130	125	121	119	118	110	77	45	30	15				
X15CrNiSi25-21	1.4841	230	190	176	167	157	147	136	130	125	121	120	112	105	77	50	37	23	16	10	6	3
X15CrNiSi20-12	1.4828	230	190	176	167	157	147	136	130	125	121	120	120	120	85	50	35	20	14	10		
Usable for		Windshield and liner																				
		liners only																				

Values given are for material up to 40 mm thickness. If cold-formed materials are used the above values shall still be applied. If there is no value the material is not applicable.

6.3.2. Μέτρο ελαστικότητας

Μειωμένες τιμές, λόγω της θερμοκρασίας του υλικού, προτείνονται από το EN13084-7 και για το μέτρο ελαστικότητας. Στον **Πίνακα 6.2** παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού.

Το CICIND (2005) προτείνει επίσης την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας:

$$E = (28 - 5,2 \cdot 10^{-2}T - 4,4 \cdot 10^{-5}T^2) \cdot 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (6.4)$$

Η θερμοκρασία T είναι σε βαθμούς κελσίου.

Πίνακας 6. 2: Χαρακτηριστικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας (10^5N/mm^2)[5]

	Type of steel		Temperature of the material up to °C																
	Short name	Material	20	150	250	350	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
EN 10025-2	S235JRG1	1.0036	2,1	2,05	2,0	1,92													
	S235JRG2	1.0038																	
	S235J2G3	1.0116																	
	S275JR	1.0044																	
	S275J2G3	1.0144																	
	S355J2G3	1.0570																	
EN 10025-5	S235JRW	1.8960	2,1	2,05	2,0	1,92													
	S235J2W	1.8961																	
	S355J2WP	1.8946																	
	S355J2G1W	1.8963																	
EN 10028	P265GH	1.0425	2,1	2,05	2,0	1,92	1,84	1,8											
	16Mo3	1.5415																	
	13CrMo4-5	1.7335																	
	10CrMo9-10	1.7380																	
EN 10088	X5CrNi18-10	1.4301	2,0 ^a	1,94 ^a	1,86 ^a	1,79 ^a	1,72 ^a	1,385	1,35	1,315									
	X6CrNiTi18-10	1.4541																	
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571																	
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404																	
	X2CrNiMo18-14-3	1.4435																	
	X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539																	
EN 10095	X8CrNiTi18-10	1.4878	2,0 ^a	1,94 ^a	1,86 ^a	1,79 ^a	1,72 ^a	1,385	1,35	1,315									
	X15CrNiSi25-21	1.4841																	
	X15CrNiSi20-12	1.4828																	

^a for calculating compression stresses

6.4. Βιβλιογραφία

- [1] Μαλακάτας Ν, Τρέζος Κ.. Εκπαιδευτικές σημειώσεις για την χρήση των Ευρωκωδικών EN 1991-1-5: Γενικές δράσεις – Θερμικές δράσεις, Αθήνα, 2009
- [2] EN 1991-1-5 Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-5: Thermal Action.
- [3] EN 1991-1-5 Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-5: Thermal Action. National Annex – (GR), 2002.
- [4] EN 13084-1 Free-standing chimneys, Part 1: General requirements
- [5] EN 13084-7 Free-standing chimneys, Part 7: Product specifications of cylindrical steel fabrications for use in single wall steel chimneys and steel liners
- [6] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [7] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.

7

ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΕΛΥΦΩΝ

7.1. Εισαγωγή – Θεωρία κελυφών

Κέλυφος στη γλώσσα του Μηχανικού θεωρείται ένα δόμημα ή δομικό στοιχείο το οποίο διαμορφώνεται από καμπύλο λεπτό έλασμα. Η επιφάνεια που διχοτομεί το πάχος του κελύφους ορίζεται ως μέση επιφάνεια. Λόγω των διαστάσεων όμως δεν μπορεί να ισχύσει η θεωρία της γραμμικότητας- γνωστή και ως θεωρία δοκών. Για τη σχεδίαση των κελυφών ισχύουν οι ακόλουθες παραδοχές[1]:

- Οι κάθετες επί της μέσης επιφάνειας ορθές τάσεις δύνανται να θεωρούνται αμελητέες.
- Σημεία, κείμενα προς της παραμορφώσεων επί της ευθείας κάθετη προς τη μέση επιφάνεια, θεωρούνται ότι ευρίσκονται επί την ευθεία γραμμή και μετά το τέλος της παραμόρφωσης. Διατηρείται η επιπεδότητα των διατομών.
- Οι κάθετοι επί το κέλυφος θα πρέπει να παραμένουν επί την μέση επιφάνεια και μετά την παραμόρφωση.
- Οι παραμορφώσεις είναι μικρές εν συγκρίσει προς το πάχος του κελύφους

Οι προαναφερθείσες παραδοχές είναι ουσιαστικής σημασίας. Ως εκ τούτου γίνεται κατανοητό ο περιορισμός των καθιερωμένων παραδοχών της θεωρίας των γραμμικών φορέων. Για παράδειγμα, σε μια ευθύγραμμη ράβδο δικτυώματος γίνεται αποδεκτό ότι οι τάσεις κατά τις δύο κάθετες επιφάνειες επί του άξονα των ράβδων διευθύνσεις είναι ίσες με μηδέν. Για τα κελύφη είναι προφανές ότι αμελητέες δύνανται να θεωρηθούν οι τάσεις

κατά μια μόνο διεύθυνση, ήτοι προς την κάθετο επί της μέσης επιφάνειας. Αυτό ορίζεται ουσιαστικά από την πρώτη παραδοχή.

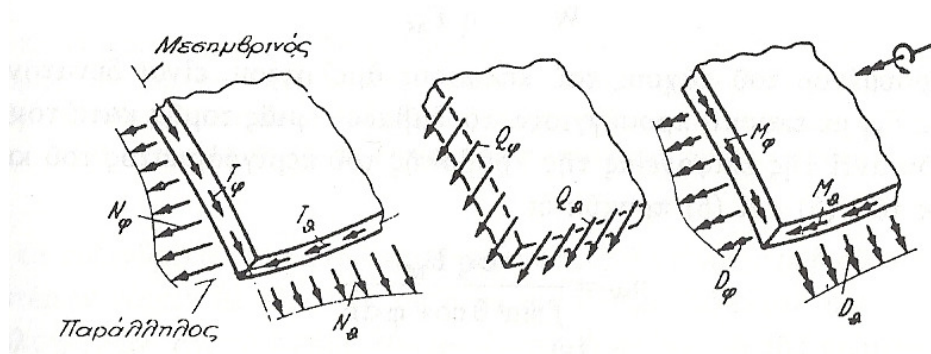
Η δεύτερη παραδοχή είναι γνωστή και ως η αρχή του Bernoulli κατά την οποία ισχύει η επιπεδότητα των διατομών.

Στην τρίτη παραδοχή γίνεται η θεώρηση ότι οι παραμορφώσεις κατά το πάχος του κελύφους λόγω επικείμενων διατμητικών δρόσων δυνάμεων θεωρούνται αμελητέες. Τοιουτοτρόπως, η εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια του κελύφους δεν μεταβάλλουν την σχετική τους θέση.

Η τέταρτη παραδοχή βασίζεται στη "κλασική" θεωρία ελαστικότητας μικρών μετατοπίσεων.

Πολύ συνηθισμένα στις κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού είναι τα κελύφη εκ περιστροφής. Είναι κελύφη, των οποίων η γεωμετρική μορφή ορίζεται από μια μέση επιφάνεια που διαμορφώνονται περιστρέφοντας μια μεσημβρινή γενέτειρα ως προς ένα άξονα κατά 360° . Για τα κελύφη εκ περιστροφής, υπό την επίδραση φορτίων, αναπτύσσονται οι πιο κάτω εσωτερικές δυνάμεις (Σχήμα 7.1)[1]:

- Κατανεμημένες ορθές δυνάμεις N_θ, N_φ
- Κατανεμημένες εφαπτόμενικές διατμητικές δυνάμεις T_θ, T_φ
- Κατανεμημένες τέμνουσες δυνάμεις Q_θ, Q_φ
- Κατανεμημένες ροπές κάμψης M_θ, M_φ
- Κατανεμημένες ροπές συστρώφης D_θ, D_φ



Σχήμα 7.1: κατανεμημένες εσωτερικές δυνάμεις σε κελύφη εκ περιστροφής. (α) Ορθές και διατμητικές δυνάμεις, (β) Τέμνουσες δυνάμεις, (γ) Ροπές κάμψης και συστρώφης.

Σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν, γίνεται κατανοητό ότι οι πιο πάνω εσωτερικές δυνάμεις δεν είναι δυνατά να υπολογιστούν μόνο με την εφαρμογή των εξισώσεων στατικής ισορροπίας. Οι άγνωστοι υπερσχύουν των εξισώσεων και έτσι το σύστημα είναι στατικά αόριστο. Συνεπώς για να μπορεί να αρθεί η αοριστία θα πρέπει

να ληφθούν υπόψη και οι παραμορφώσεις. Εν τούτοις, για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών στα κελύφη ισχύουν δύο θεωρίες ήτοι, μεμβρανική και καμπτική θεωρία.

Η μεμβρανική θεωρία εξ' ορισμού θεωρεί σκόπιμη την παράληψη των τεμνουσών δυνάμεων, ροπών κάμψης και συστρώφης. Έτσι οι άγνωστοι (εσωτερικές δυνάμεις) από δέκα μειώνονται σε τέσσερις. Παρόλα αυτά, για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών απαιτείται να καταστρωθεί και μια εξίσωση που θα λαμβάνει υπόψη τις παραμορφώσεις. Έτσι θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεμβρανική θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν οι συνοριακές συνθήκες είναι συμβιβάσιμες ως προς τις συνθήκες ισορροπίας. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μεμβρανική θεωρία δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση που δρουν συγκεντρωμένα φορτία κάθετα στη μέση επιφάνεια του κελύφους.

Η καμπτική θεωρία είναι πιο ακριβής σε σχέση με την μεμβρανική θεωρία, καθώς λαμβάνει υπόψη όλες τις εσωτερικές δυνάμεις. Με αυτό όμως γίνεται κατανοητό ότι η καμπτική θεωρία είναι μαθηματικώς λίαν πολύπλοκη ως προς την εφαρμογή της. Παρόλα αυτά, είναι αρκετά χρήσιμη και εφαρμόσιμη στις περιπτώσεις όπου είναι αδύνατη η εφαρμογή της μεμβρανικής θεωρίας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Οι δύο θεωρίες υποστηρίζονται από τους σημερινούς κανονισμούς. Λόγω όμως του ότι οι μέθοδοι είναι δύσχρηστες στην εφαρμογή τους, μέσω αναλυτικών σχέσεων, έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι που εφαρμόζονται με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η δυσκολία εφαρμογής των αναλυτικών σχέσεων προκύπτει πολλές φορές στην περίπτωση ασύμμετρων δράσεων στην κελυφωτή κατασκευή (για παράδειγμα ο άνεμος). Στην συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των μεθόδων αναλύσεων κελυφών σύμφωνα με τα νέα κείμενα των Ευρωκωδίκων.

7.2. Γενικά

Το Μέρος 1.6 του Ευρωκώδικα 3 αναφέρεται σε αξονοσυμμετρικά κελύφη και συνεργαζόμενα κυλινδρικά ή δακτυλοειδή ελάσματα, ενισχυτικά χορδών και δακτυλίους διατομής δοκού, που μορφώνουν ένα τμήμα της ολοκληρωμένης κατασκευής.

Αντικείμενο του μέρους αυτού αποτελούν οι απαιτήσεις για σχεδιασμό έναντι των οριακών καταστάσεων αστοχίας από πλαστική αστοχία ή εφελκυστική θραύση, λυγισμό, ολιγοκυκλική πλαστική καταπόνηση και κόπωση.

Οι τύποι αναλύσεων που προτείνει ο κανονισμός είναι οι εξής:

- **Καθολική Ανάλυση:** Η ανάλυση χρησιμοποιεί απλοποιημένες θεωρήσεις για ορισμένα μέρη του φορέα.
- **Ανάλυση μεμβρανικής θεωρίας:** Πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς εύκαμπτων κατασκευών υπό την επίδραση κατανεμημένων φορτίων, με την εφαρμογή μιας ομάδας μεμβρανικών

δυνάμεων, που ισορροπούν με τις εξωτερικές δυνάμεις. Η εφαρμογή της μεμβρανικής θεωρίας προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, μεταβλητή αλλά συνεχή γεωμετρία κελύφους και φορτία σταθερής κατανομής. Σημειώνεται πως η μεμβρανική θεωρία δεν ικανοποιεί απαραίτητα το συμβιβαστό των παραμορφώσεων. Εντούτοις, το προκύπτον πεδίο μεμβρανικών δυνάμεων ικανοποιεί τις απαιτήσεις των προτεουσών τάσεων (LS1).

- **Γραμμική ελαστική ανάλυση κελύφους (LA):** Η ανάλυση στηρίζεται στη βάση της καμπτικής θεωρίας κελύφους, εφαρμοζόμενη στη μέση επιφάνεια του κελύφους. Η γραμμικότητα προκύπτει από τις υποθέσεις γραμμικού ελαστικού υλικού και γραμμικής θεωρίας μικρών παραμορφώσεων. Σε αντίθεση με τη μεμβρανική θεωρία, ικανοποιείται το συμβιβαστό των παραμορφώσεων καθώς επίσης και ισορροπία. Το προκύπτον πεδίο μεμβρανικών και καμπτικών τάσεων ικανοποιεί τις απαιτήσεις των προτεουσών και δευτερευουσών τάσεων (LS2 και LS4).
- **Γραμμική ελαστική ανάλυση διακλάδωσης (LBA):** στην ανάλυση αυτή ικανοποιούνται οι συνθήκες της LA αναφορικά με τις παραδοχές ως προς το υλικό και τη γεωμετρία. Εντούτοις, αυτή η γραμμική ελαστική ανάλυση διακλάδωσης προσδιορίζει τη μικρότερη διατομή, κατά την οποία το κέλυφος λυγίζει σε μια διαφορετική μορφή παραμόρφωσης θεωρώντας ότι δεν αλλάζει η γεωμετρία, δεν μεταβάλλεται η διεύθυνση της δράσης των φορτίων και δεν υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του υλικού. Οι ατέλειες κάθε είδους αγνοούνται. Αυτή η ανάλυση παρέχει την κρίσιμη ελαστική αντίσταση λυγισμού r_{Rcr} (LS3).
- **Μη γραμμική γεωμετρική ελαστική ανάλυση (GNA):** Βασική διαφορά αυτής της ανάλυσης από την (LA) αποτελεί η υιοθέτηση μη γραμμικής θεωρίας μεγάλων παραμορφώσεων. Έτσι η ικανοποίηση των παραμορφώσεων περιλαμβάνει την αλλαγή της γεωμετρίας της κατασκευής λόγω φόρτισης. Το προκύπτον πεδίο τάσεων καλύπτει τον ορισμό των πρωτεουσών και δευτερευουσών τάσεων (LS2). Όταν σε κάποιο μέρος του κελύφους κυριαρχούν θλιπτικές η διατμητικές τάσεις, η ανάλυση GNA δίνει το ελαστικό φορτίο λυγισμού του τέλειου φορέα, περιλαμβάνοντας μεταβολές της γεωμετρίας, που μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της οριακής κατάστασης (LS3).
- **Ανάλυση μη γραμμικού υλικού(MNA):** Η ανάλυση αυτού του τύπου βασίζεται στην καμπτική θεωρία κελύφους, η οποία εφαρμόζεται στην τέλεια κατασκευή, με την υπόθεση αφενός γραμμικών μικρών παραμορφώσεων, αφετέρου δε μη γραμμικού, ελαστοπλαστικού νόμου υλικού. Το αποτέλεσμα των αναλύσεων MNA δίνει το πλαστικό φορτίο, το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως μεγεθυντικός συντελεστής φορτίου r_{Rp} επί της τιμής σχεδιασμού των φορτίων F_{Ed} . Αυτή η ανάλυση δίνει το λόγο πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rp} και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της οριακής κατάστασης LS1. Η ανάλυση MNA μπορεί να χρησιμοποιείται για να δώσει την επαύξηση της πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης ($\Delta\epsilon$) κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ανακυκλιζόμενης φόρτισης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της οριακής κατάστασης LS2.
- **Μη γεωμετρική και από άποψη υλικού, ανάλυση (GMNA):** Η ανάλυση αυτού του τύπου βασίζεται στην εφαρμογή της καμπτικής θεωρίας κελύφους, με την υπόθεση μη γραμμικών μεγάλων παραμορφώσεων και μη γραμμικού ελαστοπλαστικού νόμου υλικού. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης

GMNA δίνει, με τρόπο ανάλογο της MNA, το γεωμετρικώς μη γραμμικό πλαστικό οριακό φορτίο του τέλειου φορέα και την επαύξηση της πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων LS1 και LS2. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν σε κάποιο μέρος του κελύφους κυριαρχούν θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις, η ανάλυση GMNA δίνει το ελαστο-πλαστικό φορτίο λυγισμού του τέλειου φορέα, που μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της οριακής κατάστασης LS3.

- **Μη γραμμική γεωμετρική ελαστική ανάλυση με ατέλειες (GNIA):** Η βασική διαφορά αυτής της ανάλυσης από την GNA είναι η υιοθέτηση ενός μοντέλου στο οποίο η μέση επιφάνεια του κελύφους περιλαμβάνει παρεκκλίσεις από το ιδανικό σχήμα. Η ανάλυση αυτή εφαρμόζεται στη περίπτωση κελύφους που επικρατεί η θλίψη ή η διάτμηση. Δίνει τα ελαστικά φορτία λυγισμού του ατελούς φορέα, που μπορεί να υποβοηθήσουν στον έλεγχο της οριακής κατάστασης LS3. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι όπου αυτή η ανάλυση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του φορτίου λυγισμού (LS3), θα πρέπει να ελέγχονται οι ιδιοτιμές του συστήματος, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η αριθμητική διαδικασία δεν θα αποτύχει να εντοπίσει μια διακλάδωση της διαδρομής του φορτίου. Πρέπει να δίνεται προσοχή στο να εξασφαλίζεται ότι οι τοπικές τάσεις δεν υπερβαίνουν τιμές για τις οποίες η μη γραμμικότητα του υλικού μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά.
- **Μη γραμμικότητα γεωμετρίας και από την άποψη υλικού ανάλυσης, με ατέλειες (GMNIA):** Η βασική διαφορά αυτής της ανάλυσης από την GMNA είναι η χρήση της ατελούς κατασκευής ως γεωμετρικού μοντέλου. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κελύφους όπου επικρατεί η θλίψη ή η διάτμηση. Η ανάλυση GMNIA χρησιμοποιείται σε περίπτωση όπου στο κέλυφος κυριαρχούν θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις. Δίνει τα ελαστο-πλαστικά φορτία λυγισμού για τον "πραγματικό" φορέα, που μπορεί να χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της οριακής κατάστασης LS3. Σημειώνεται ότι, όπου χρησιμοποιείται αυτή η ανάλυση για τον προσδιορισμό του φορτίου λυγισμού, θα πρέπει οπωσδήποτε να γίνεται μια πρόσθετη ανάλυση GMNA στο κέλυφος, ώστε να εξασφαλίζεται ότι αναγνωρίζεται ο βαθμός ευαισθησίας του δομικού συστήματος έναντι ατελειών.

7.3. Βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού

7.3.1. Τιμές σχεδιασμού του γεωμετρικού αρχείου

Σύμφωνα με το EN1993-1-6, το πάχος των τοιχωμάτων που πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, λαμβάνεται απομειωμένο λόγω διάβρωσης. Επίσης η ακτίνα r αναφέρεται στη μέση επιφάνεια του κελύφους, η οποία θεωρείται και το επίπεδο αναφοράς για τα φορτία.

7.3.2. Γεωμετρικές ανοχές και ατέλειες

Οι απαιτήσεις λειτουργικότητας υπαγορεύουν τον καθορισμό των τιμών ανοχής σε παρεκκλίσεις από την γεωμετρία του φορέα σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές.

Ως γεωμετρικές ατέλειες θεωρούνται οι παρεκκλίσεις από τον κύκλο, οι εκκεντρότητες και τέλος οι τοπικές πτυχές.

Στην περίπτωση που η οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3) αποτελεί μια από τις οριακές καταστάσεις αστοχίας που θα εξεταστούν, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος των γεωμετρικών ανοχών, των σχετικών με το λυγισμό, ώστε οι ατέλειες να βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

7.3.3. Συνοριακές συνθήκες κελύφους

Η επιλογή των συνοριακών συνθηκών θα πρέπει να έχει ως στόχο την επίτευξη ενός ρεαλιστικού ή συντηρητικού μοντέλου της πραγματικής κατασκευής.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον περιορισμό όχι μόνο των κάθετων προς το τοίχωμα του κελύφους μετατοπίσεων αλλά και των μετατοπίσεων εντός του επιπέδου του τοιχώματος (μεσημβρινή και περιμετρική).

Κατά τον υπολογισμό ενός κελύφους έναντι λυγισμού LS3, ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών αναφέρεται μόνο στις επαυξητικές μετατοπίσεις κατά την εξέλιξη του λυγισμού.

Στη περίπτωση συνεχώς στηριζόμενου άκρου κελύφους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αποφυγή ή όχι της τοπικής ανύψωσης του κελύφους. Περιστροφή του άκρου του κελύφους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κελύφη μικρού μήκους και κατά τον υπολογισμό των δευτερευουσών εντάσεων σε μακρά κελύφη.

Τέλος οι συνδέσεις μεταξύ των τεμαχίων σε μια ένωση θα πρέπει να εγγυώνται πως ικανοποιούνται οι συνοριακές συνθήκες των επιμέρους τμημάτων.

7.4. Οριακές καταστάσεις αστοχίας

Γενικά τα κελύφη θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν όλες τις δράσεις και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων, ευστάθειας και σχηματισμού ρωγμών λόγω ολιγοκυκλικής πλαστικής καταπόνησης ή κόπωσης.

Η ευστάθεια των μεταλλικών κελυφωτών κατασκευών απατάται από τις οριακές καταστάσεις αστοχίας, όπως αυτές ορίζει το EN1993-1-6 και περιγράφονται στην συνέχεια.

7.4.1. Οριακές καταστάσεις αστοχίας

7.4.1.1. LS1: Πλαστική αστοχία ή εφελκυστική θραύση

Η οριακή κατάσταση πλαστικής αστοχίας χαρακτηρίζεται από την υπερβολική ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων σε τμήμα της κατασκευής. Το πλαστικό φορτίο αστοχίας προκύπτει από ένα μηχανισμό που βασίζεται στη θεωρία μικρών παραμορφώσεων.

Η οριακή κατάσταση εφελκυστικής θραύσης χαρακτηρίζεται από εφελκυστική αστοχία που οδηγεί σε αποχωρισμό των δύο τμημάτων του κελύφους.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις το μόνο που απαιτεί εξέταση είναι η ισορροπία ανάμεσα στα επιβαλλόμενα φορτία και στις μέγιστες δυνατές αναπτυσσόμενες εσωτερικές εντάσεις.

Ο έλεγχος της οριακής κατάστασης LS1 θα πρέπει να πραγματοποιείται για όλους τους συνδυασμούς των φορτίων.

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των συνισταμένων τάσεων σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης, όταν ελέγχεται η LS1:

- Μεμβρανική θεωρία
- Σχέσεις του Παραρτήματος Α
- LA
- GNA
- MNA
- GMNA

7.4.1.2. *LS2: Ολιγοκυκλική πλαστική καταπόνηση (πλαστικότητα σε ανακύκλιση)*

Η οριακή κατάσταση πλαστικότητας χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη διαρροής σε εφελκυσμό και σε θλίψη στο ίδιο σημείο, λόγω επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να εμφανιστεί τοπική αστοχία (ρωγμή) με εξάντληση της ικανότητας του υλικού για απορρόφηση ενέργειας.

Οι εντάσεις που σχετίζονται με την οριακή κατάσταση πλαστικότητας θα πρέπει να προέρχονται από όλους τους συνδυασμούς των δράσεων (μόνιμων αλλά και μεταβλητών που μπορούν να εφαρμοστούν από τρεις κύκλους, κατά τη διάρκεια ζωής του έργου) καθώς και από τις συνθήκες συμβιβαστότητας των παραμορφώσεων, παρά από την ισορροπία.

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των συνισταμένων τάσεων σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης, όταν ελέγχεται η LS2:

- Μεμβρανική θεωρία
- Σχέσεις του Παραρτήματος Α και Β
- LA
- MNA
- GMNA

7.4.1.3. LS3: Λυγισμός

Η οριακή κατάσταση λυγισμού χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη, στο σύνολο ή σε όλο το τμήμα του κελύφους, μεγάλων μετατοπίσεων κάθετα στην επιφάνεια του, λόγω αστάθειας υπό θλίψη ή διάτμηση. Οι μετατοπίσεις αυτές μπορεί να είναι καταστροφικές για την κατασκευή.

Ο προσδιορισμός του φορτίου λυγισμού εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής και πραγματοποιείται για όλους τους συνδυασμούς φορτίσεων.

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των συνισταμένων τάσεων σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης, όταν ελέγχεται η LS3:

- Μembranική θεωρία, μόνο για αξονοσυμμετρικές συνθήκες
- Σχέσεις του Παραρτήματος Α
- LA, η οποία απαιτεί την ελάχιστη προϋπόθεση για την ανάλυση τάσεων υπό γενικές συνθήκες φόρτισης
- LBA, η οποία απαιτεί για κελύφη υπό γενικές συνθήκες φόρτισης, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η κρίσιμη αντίσταση σε λυγισμό
- MNA, η οποία απαιτεί για κελύφη υπό γενικές συνθήκες φόρτισης, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η πλαστική αντίσταση αναφοράς
- GMNA, σε συνδυασμό με MNA, LBA και GMNA, χρησιμοποιώντας κατάλληλες ατέλειες και υπολογισμένους συντελεστές βαθμονόμησης.

7.4.1.4. LS4: Κόπωση

Η οριακή κατάσταση κόπωσης χαρακτηρίζεται από την τοπική ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης ως αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων κύκλων αύξησης ή μείωσης της έντασης.

Σημειώνεται πως απαιτείται να ληφθούν υπόψη όλες οι μεταβλητές δράσεις που θα εφαρμοστούν σε περισσότερους από 10000 (συνιστώμενη τιμή του N_f) κύκλους κατά την διάρκεια της ζωής του έργου.

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των συνισταμένων τάσεων σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης, όταν ελέγχεται η LS4:

- Σχέσεις του Παραρτήματος C, χρησιμοποιώντας συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων
- LA, χρησιμοποιώντας συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων
- GNA, χρησιμοποιώντας συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων

7.5. Μεθοδολογία σχεδιασμού για τις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού κελυφών

Στο EN1993-1-6 καθορίζονται διάφορες μέθοδοι για τον σχεδιασμό μεταλλικών κελυφών για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας που περιγράφτηκαν προηγουμένως. Οι μέθοδοι αυτοί αφορούν την ανάλυση του φορέα μέσω αναλυτικών σχέσεων, που παραθέτει ο κανονισμός στα Παραρτήματα Α-С, ή μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Για σκοπούς της παρούσας μελέτης πραγματοποιούνται οι έλεγχοι μέσω τάσεων και μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Έτσι στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού των τεσσάρων οριακών καταστάσεων αστοχίας μέσω καθολικής αριθμητικής ανάλυσης.

Γενικά μπορεί να χρησιμοποιείται γραμμική ελαστική ανάλυση (LA) για τον προσδιορισμό των τάσεων ή των συνισταμένων των τάσεων, προς χρήση για την εκτίμηση των LS2 και LS4. Το μεμβρανικό μέρος των τάσεων, που προσδιορίζεται με ανάλυση LA, μπορεί να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της LS3. Η LS1 μπορεί να αξιολογείται με χρήση LA, αλλά η LA δίνει μόνο μια προσεγγιστική εκτίμηση και τα αποτελέσματα της θα πρέπει να ερμηνεύονται και μέσω αναλύσεων GMNA.

Παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιείται η γραμμική ανάλυση διακλάδωσης (LBA) για τον προσδιορισμό της κρίσιμης αντίστασης λυγισμού του φορέα, προς χρήση κατά την εκτίμηση της LS3.

Η εκτίμηση της LS1 μπορεί να γίνεται μέσω προσδιορισμού της πλαστικής αντίστασης του φορέα, με ως προς το υλικό μη γραμμική ανάλυση (MNA). Με ιστορία ανακινιζόμενης φόρτισης, μπορεί να χρησιμοποιείται ανάλυση MNA για να προσδιορισθούν αυξηντικές μεταβολές πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης, προς χρήση εκτίμησης της LS2. Ως μέρος της εκτίμησης της LS3 απαιτείται επίσης η πλαστική αντίσταση αναφοράς και αυτή μπορεί να προσδιορίζεται με ανάλυση MNA.

Πίνακας 7.1: Τύποι ανάλυσης κελυφών

Τύπος ανάλυσης	Θεωρία κελύφους	Νόμος υλικού	Γεωμετρία Κελύφους
Μεμβρανική θεωρία κελυφών	μεμβρανική ισορροπία	δεν ισχύει	τέλεια
Γραμμική ελαστική ανάλυση κελυφών(LA)	γραμμική κάμψη και τάνυση	γραμμική	τέλεια
Γραμμική ελαστική ανάλυση διακλάδωσης(LBA)	γραμμική κάμψη και τάνυση	γραμμική	τέλεια
Γεωμετρική μη γραμμική ελαστική ανάλυση (GNA)	μη γραμμική	γραμμική	τέλεια
Ως προς το υλικό μη γραμμικής ανάλυσης (MNA)	γραμμική	μη γραμμική	τέλεια
Γεωμετρικώς και ως προς το υλικό μη γραμμική ανάλυση (GMNA)	μη γραμμική	μη γραμμική	τέλεια
Γεωμετρικώς μη γραμμική ανάλυση με ατέλειες (GMIA)	μη γραμμική	γραμμική	ατελής
Γεωμετρικώς και ως προς το υλικό μη γραμμική ανάλυση με ατέλειες (GMIA)	μη γραμμική	μη γραμμική	ατελής

Οι γεωμετρικές μη γραμμικές ελαστικές αναλύσεις (GNA και GNIA) περιλαμβάνουν θεωρήσεις για τις παραμορφώσεις του φορέα, αλλά καμία από τις μεθοδολογίες σχεδιασμού δεν επιτρέπει την χρήση τους χωρίς ανάλυση GMNIA. Η ανάλυση GNA μπορεί να χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το φορτίο ελαστικού λυγισμού του τέλει φορέα, ενώ αντίστοιχα η ανάλυση GNIA μπορεί να χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το φορτίο ελαστικού λυγισμού του ατελούς φορέα.

Η γεωμετρικός και ως προς το υλικό μη γραμμική πλαστική ανάλυση (GMNA και GMNIA) μπορεί να χρησιμοποιείται για να προσδιορισθούν τα φορτία κατάρρευσης του τέλει (GMNA) και του ατελούς (GMNIA) φορέα. Η ανάλυση GMNA μπορεί να χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της LS1. Το φορτίο κατάρρευσης GMNIA μπορεί να χρησιμοποιείται, με επιπλέον εξέταση του φορτίου κατάρρευσης GMNA, για την εκτίμηση της LS3. Με ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οι αυξητικές μεταβολές πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης, που λαμβάνονται από την ανάλυση GMNA, μπορούν να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της LS2.

Ο σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται σε ένα ή περισσότερους από τους τύπους ανάλυσης που δίνονται στον **Πίνακα 7.1**. Οι συνθήκες που διέπουν τη χρήση κάθε τύπου ανάλυσης αναφέρθηκαν στο σημείο 7.3.

7.5.1. Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Στη περίπτωση αυτή, οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων πρέπει να βασίζονται στους δυσμενέστερους σχετικούς συνδυασμούς φορτίων (συμπεριλαμβανομένων και των σχετικών συντελεστών γ_f και ψ).

7.5.1.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Ο υπολογισμός τάσεων βασίζεται στην ελαστική ανάλυση. Σε κάθε σημείο του κελύφους η ισοδύναμη τάση σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μέγιστη αρχική τάση που προέρχεται από την ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τους νόμους ισορροπίας των δυνάμεων.

Η αρχική τάση λαμβάνεται ως η μέγιστη τάση που προκαλεί την οριακή κατάσταση πλαστικότητας σε κάποιο σημείο ή κατά μήκος κάποιας γραμμής.

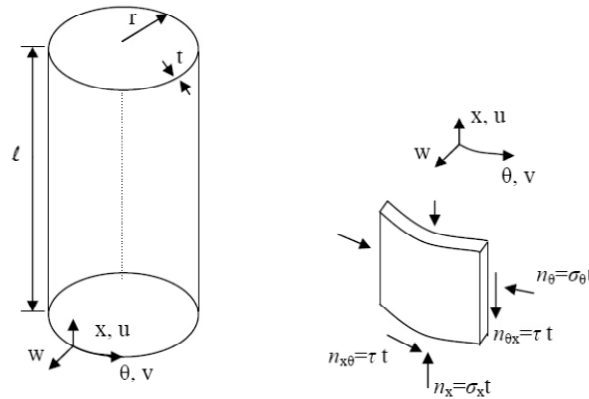
Στη περίπτωση που εφαρμόζεται η ανάλυση μεμβρανικής θεωρίας, το προκύπτον διδιάστατο πεδίο εντάσεων n_x , n_θ , $n_{x\theta}$ μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της ισοδύναμης τάσης σχεδιασμού:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \cdot \sqrt{n_x^2 + n_\theta^2 - n_x \cdot n_\theta + 3 \cdot n_{x\theta}^2} \quad (7.1)$$

Στην περίπτωση όμως που εφαρμόζεται η LA ή GNA, το διδιάστατο πεδίο τάσεων μπορεί να μετατραπεί στις εξής πλασματικές τάσεις:

$$\sigma_{x,d} = \frac{n_x}{t} \pm \frac{m_x}{\frac{t^2}{4}}, \quad \sigma_{x,d} = \frac{n_\theta}{t} \pm \frac{m_\theta}{\frac{t^2}{4}}$$

$$\tau_{x\theta,d} = \frac{n_{x\theta}}{t} \pm \frac{m_{x\theta}}{\frac{t^2}{4}}, \quad \tau_{xn,d} = \frac{q_{xn}}{t}, \quad \tau_{x\theta,d} = \frac{q_{\theta n}}{t} \quad (7.2)$$



Σχήμα 7.2: Γεωμετρία κυλίνδρου, μεμβρανικές τάσεις και συνισταμένες αυτών

Η ισοδύναμη τάση σχεδιασμού, με βάση το κριτήριο von Mises είναι:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{x\theta,d}^2 + \tau_{xn,d}^2 + \tau_{\theta n,d}^2)} \quad (7.3)$$

Συνεπώς η τιμή σχεδιασμού της αντιστάσεως κατά von Mises είναι:

$$f_{eq,Ed} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.4)$$

Στο **Σχήμα 7.2** παρουσιάζονται συνιστώσες των τάσεων που ελέγχονται.

7.5.1.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA ή GMNA

Η αντίσταση σχεδιασμού πλαστικού ορίου προσδιορίζεται ως ο συντελεστής φορτίου r_R που εφαρμόζεται στις τιμές σχεδιασμού F_{Ed} του συνδυασμού των δράσεων της σχετικής περίπτωσης φόρτισης.

Σε μια ανάλυση MNA ή GMNA που βασίζεται στη τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής f_{yd} , το κέλυφος θα πρέπει να υποβάλλεται στις τιμές σχεδιασμού των περιπτώσεων φόρτισης προοδευτικά αυξανόμενων με το συντελεστή φορτίου r_R μέχρι επίτευξη της κατάστασης πλαστικού ορίου.

Αν χρησιμοποιείται ανάλυση MNA, ως λόγος φορτίου $r_{R,MNA}$ μπορεί να λαμβάνεται η μέγιστη τιμή που επιτυγχάνεται κατά την ανάλυση, αγνοώντας την επιρροή της κράτυνσης. Αυτός ο λόγος φορτίου ορίζεται ως ο λόγος πλαστικής αντίστασης r_{RpI} και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7.8**.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ανάλυση GMNA, αν η ανάλυση προβλέπει ένα μέγιστο φορτίο ακολουθούμενο από φθίνουσα διαδρομή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή για τον προσδιορισμό του λόγου φορτίου $r_{R,GMNA}$. Όπου μια ανάλυση δεν προβλέπει κάποιο μέγιστο φορτίο αλλά παράγει μια προοδευτικά αυξανόμενη σχέση δράσης- μετατόπισης χωρίς κράτυνση υλικού, ο λόγος φορτίου $r_{R,GMNA}$ θα

πρέπει να λαμβάνεται όχι μεγαλύτερος από την τιμή στην οποία η μέγιστη ισοδύναμη πλαστική ανοιγμένη παραμόρφωση von Mises του φορέα φτάνει στη τιμή $\epsilon_{mps} = n_{mps} (f_{yd}/E)$. Όπου συνιστώμενη τιμή $n_{mps} = 50$.

Συνεπώς η χαρακτηριστική αντίσταση πλαστικού ορίου r_{Rk} θα πρέπει να λαμβάνεται είτε ως $r_{R,MNA}$ ή ως $r_{R,GMNA}$, ανάλογα με την ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε.

Η αντίσταση σχεδιασμού πλαστικού ορίου F_{Rd} είναι ίση με:

$$F_{Rd} = \frac{F_{Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{r_{Rk} \cdot F_{Ed}}{\gamma_{M0}} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \quad (7.5)$$

Όπου:

γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής αντίστασης στη πλαστιμότητα ο οποίο λαμβάνει την τιμή 1.

Γενικά θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \quad \text{ή} \quad r_{Rd} \geq 1 \quad (7.6)$$

7.5.2. Οριακή κατάσταση πλαστικότητας σε ανακύκλωση (LS2)

Για την LS2 οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων κάθε περίπτωσης φορτίου επιλέγονται ως οι χαρακτηριστικές τιμές εκείνων των μερών των ολικών δράσεων, που αναμένεται να εφαρμοσθούν και να απομακρυνθούν περισσότερες από τρεις φορές κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του δομήματος.

Σημειώνεται ότι όπου χρησιμοποιείται ως προς το υλικό μη γραμμική ανάλυση με H/Y, το μεταβλητό μέρος των δράσεων μεταξύ των ακροτάτων μέγιστων και ελάχιστων τιμών θα πρέπει να θεωρείται ότι δρα παρουσία συνυπαρχόντων μόνιμων μερών του φορτίου.

7.5.2.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Ως τιμή σχεδιασμού της διακύμανσης των τάσεων $\Delta\sigma_{eq,Ed}$ κάθε σημείο του κελύφους, λαμβάνεται ως η μέγιστη κατά von Mises διακύμανση σε οποιαδήποτε επιφάνεια που προκύπτει από την LA και GNA υπό την επίδραση των δυνάμεων F_{sd} .

Στην περίπτωση που η τάση μεταβάλλεται ταχύτατα σε απόσταση ίση με το πάχος ενός ελάσματος από μια σύνδεση τεμαχίων, η τιμή της διακύμανσης των τάσεων θα πρέπει να λαμβάνεται στο πρώτο φυσικό σημείο του κελύφους.

Η κατά von Mises ισοδύναμη διακύμανσης τάσεων αντοχής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta_{feq,Rd} = 2 \cdot f_{yd} \quad (7.7)$$

Επομένως, σε κάθε σημείο του κελύφους θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta_{feq,Rd} \quad (7.8)$$

7.5.2.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA ή GMNA

Κατά τη μη γραμμική αριθμητική ανάλυση υλικού ως δράσεις σχεδιασμού θεωρούνται οι μεταβλητές και μη.

Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να προσδιορίζεται η συνολική κατά τον von Mises ισοδύναμη πλαστική ανοιγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ κατά το πέρας της ζωής σχεδιασμού του δομήματος.

Η συνολική συσσωρευμένη κατά τον von Mises ισοδύναμη πλαστική ανηγμένη παραμόρφωση μπορεί να προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μια ανάλυση που προσομοιώνει όλους τους κύκλους φόρτισης κατά τη διάρκεια ζωής του σχεδιασμού. Για αυτό προτείνεται όπως η συνολική συσσωρευμένη κατά τον von Mises ισοδύναμη πλαστική ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ προσδιορίζεται από την:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n \Delta \varepsilon_{p,eq,Ed} \quad (7.9)$$

όπου:

n είναι ο αριθμός κύκλων φόρτισης κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του δομήματος με $3 \leq n \leq 10000$

$\Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$ είναι η μέγιστη προαύξηση της κατά von Mises ισοδύναμης πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης σε οποιοδήποτε σημείο του φορέα, που συμβαίνει μετά τον τρίτο κύκλο.

Αυτή η συσσωρευμένη επιμήκυνση θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq n_{p,eq} \cdot \frac{f_{yd}}{E}$$

Όπου $n_{p,eq} = 25$

7.5.3. Οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3)

Στην LS3 θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί δράσεων, που προκαλούν θλιπτικές ή διατμητικές μεμβρανικές τάσεις στα τοιχώματα του κελύφους.

Στην περίπτωση που ο λυγισμός (LS3) αποτελεί μια οριακή κατάσταση αστοχίας, οι γεωμετρικές ανοχές που θεωρούνται ότι επηρεάζουν σημαντικά την ασφάλεια θα πρέπει να περιορίζονται ως ακολούθως εκτός εάν δίνονται σχετικές οδηγίες στα αντίστοιχα Μέρη του EN1993.

Σύμφωνα με τους **Πίνακες 7.2 -7.4** υπάρχουν τρεις κατηγορίες ποιότητας κατασκευής σε σχέση με τις ανοχές A, B, και C. Οι παραπάνω ανοχές υιοθετούνται κατά την κατασκευή.

Η επιλογή της κατηγορίας ποιότητας πραγματοποιείται με βάση το χειρότερο μέτρο.

Οι διαφορετικών τύπων ανοχές μπορούν να εξετασθούν ανεξάρτητα, χωρίς να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση.

Γενικά, η απόκλιση από το κυκλικό σχήμα θα πρέπει να αξιολογείται ως προς την παράμετρο U_r (βλέπε **Σχήμα 7.3**), που δίνεται από την εξίσωση:

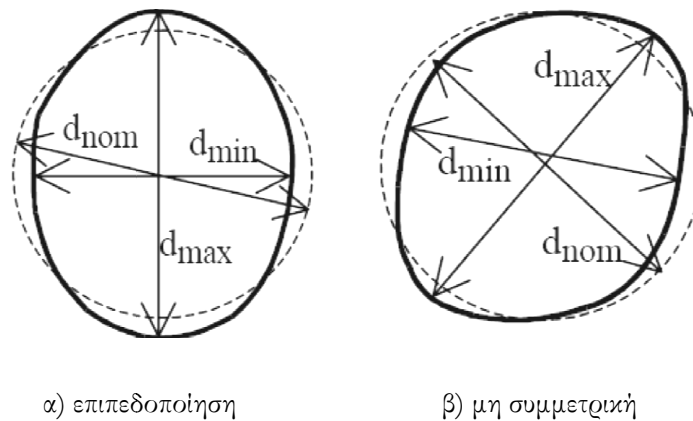
$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \quad (7.10)$$

όπου:

d_{\max} είναι η μέγιστη μετρημένη εσωτερική διάμετρος

d_{\min} είναι η ελάχιστη μετρημένη εσωτερική διάμετρος

d_{nom} είναι η ονομαστική εσωτερική διάμετρος



Σχήμα 7.3: Μέτρηση των διαμέτρων για την εκτίμηση της απόκλισης από το κυκλικό σχήμα

επίσης θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$U_r \leq U_{r,\max} \quad (7.11)$$

όπου:

$U_{r,\max}$ είναι η παράμετρος ανοχής απόκλισης από το κυκλικό σχήμα για τη σχετική κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής. Συνιστώμενες τιμές δίνονται στον **Πίνακα 7.2**.

Πίνακας 7.2: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρου ανοχής απόκλισης από το κυκλικό σχήμα $U_{r,\max}$

Κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής	Εύρος διαμέτρων Περιγραφή	$d[m] \leq 0.50m$	$0.50 m \leq d[m] \leq 1.25m$	$1.25m \leq d[m]$
		Συνιστώμενη τιμή της $U_{r,\max}$		
Κατηγορία Α	Εξαιρετική	0.014	$0.007 + 0.0093(1.25-d)$	0.007
Κατηγορία Β	Υψηλή	0.020	$0.010 + 0.0133(1.25-d)$	0.010
Κατηγορία C	Κανονική	0.030	$0.015 + 0.0200(1.25-d)$	0.015

Σε ενώσεις τοιχωμάτων κελυφών κάθετα σε θλιπτικές μεμβρανικές τάσεις, η τυχηματική εκκενρότητα θα πρέπει να αποτιμάται από την μέτρηση συνολικής εκκενρότητας e_{tot} και από την επιδιωκόμενη μετάθεση e_{int} , σύμφωνα με την:

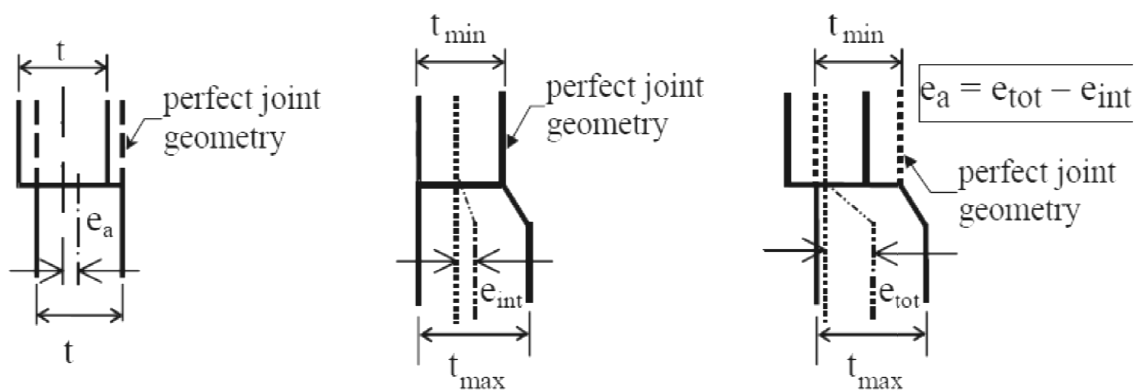
$$e_a = e_{tot} - e_{int} \quad (7.12)$$

Όπου:

e_{tot} είναι η εκκενρότητα μεταξύ των μέσων επιφανειών των συνδεδεμένων ελασμάτων (βλέπε **Σχήμα 7.4γ**)

e_{int} είναι η επιδιωκόμενη μετάθεση μεταξύ των μέσων επιφανειών των συνδεδεμένων ελασμάτων (βλέπε **Σχήμα 7.4β**)

e_a είναι η τυχηματική εκκενρότητα μεταξύ των μέσων επιφανειών των συνδεδεμένων ελασμάτων



Σχήμα 7.4: Τυχηματική εκκενρότητα και επιδιωκόμενη μετάθεση σε ένωση

Επίσης η τυχηματική εκκενρότητα e_a θα πρέπει να αξιολογείται ως προς τη παράμετρο τυχηματικής εκκενρότητας U_e που δίνεται από:

$$U_e = \frac{e_a}{t_{ave}} \quad \text{ή} \quad U_e = \frac{e_a}{t} \quad (7.13)$$

όπου:

t_{ave} είναι το μέσο πάχος των λεπτότερων και παχύτερων ελασμάτων στην ένωση

Η παράμετρος τυχηματικής εκκενρότητας U_e θα πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη:

$$U_e \leq U_{e,max} \quad (7.14)$$

όπου:

$U_{e,max}$ είναι η παράμετρος ανοχής τυχηματικής εκκενρότητας για τη σχετική κατηγορία ανοχών παραγωγής. Τιμές της παραμέτρου δίνονται στον **Πίνακα 7.3**.

Πίνακας 7.3: Συνιστώμενες τιμές για ανοχές τυχηματικής εκκεντρότητας

Κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή της $U_{e,max}$
Κατηγορία Α	Εξαιρετική	0.14
Κατηγορία Β	Υψηλή	0.20
Κατηγορία C	Κανονική	0.30

Γεωμετρικές ανοχές λαμβάνουν χώρα και στην περίπτωση ενδεχόμενων αρχικών πτυχώσεων. Γενικά χρησιμοποιείται ένα πρότυπο μήκος πτύχωσης σε κάθε θέση (βλέπε **Σχήμα 7.5**), τόσο για μεσημβρινή όσο και για περιφερειακή διεύθυνση. Γίνεται κατανοητό ότι το μεσημβρινό πρότυπο μήκος θα πρέπει να είναι ευθύγραμμο, αλλά το πρότυπο μήκος για μετρήσεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση θα πρέπει να έχει καμπυλότητα ίση με την επιδιωκόμενη ακτίνα καμπυλότητας r της μέσης επιφάνειας του κελύφους.

Το βάθος των πτυχώσεων αξιολογείται ως προς τις παραμέτρους πτυχώσεων που δίνεται από τη σχέση:

$$U_{0,i} = \frac{\Delta w_{0i}}{l_{gi}} \quad (7.15)$$

Όπου Δw_0 είναι το βάθος των αρχικών πτυχώσεων μετρούμενο με την βοήθεια ενός μήκους l_g σύμφωνα με το **Σχήμα 7.5**. Το μέτρο l_g λαμβάνεται ως εξής:

- Για όλες τις θέσεις κατά την μεσημβρινή και περιμετρική διεύθυνση (όπου είναι παρούσες μεσημβρινές θλιπτικές τάσεις):

$$l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (7.16)$$

- Στη περίπτωση ανάπτυξης περιφερειακών θλιπτικών τάσεων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ένα επιπρόσθετο περιμετρικό μήκος:

$$l_{g\theta} = 2.3 \cdot (l^2 r t)^{0.25}, \text{ αλλά } l_{g\theta} \leq r \quad (7.17)$$

Όπου l το μεσημβρινό μήκος του κελύφους

- Εγκάρσια στις ραφές, τόσο κατά τη μεσημβρινή όσο και κατά την περιφερειακή διεύθυνση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται το πρότυπο μήκος l_{gw} :

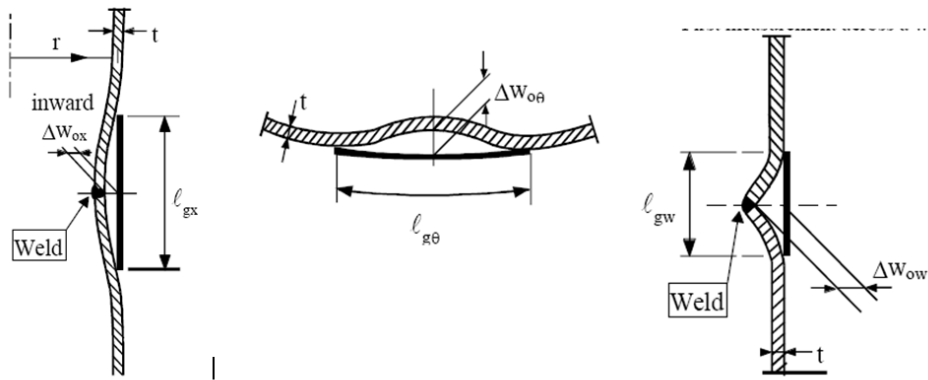
$$l_{gw} = 25t, \text{ ή } l_{gw} = 25t_{\min}, \text{ αλλά } l_{gw} \leq 500\text{mm} \quad (7.18)$$

όπου t_{\min} είναι το πάχος του λεπτότερου ελάσματος στη ραφή.

Η τιμή $U_{0,i}$ θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$U_{0,i} \leq U_{0,max} \quad (7.19)$$

Όπου U_{max} είναι η παράμετρος ανοχής πτύχωσης για τη σχετική κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής. Τιμές της παραμέτρου δίνονται στον **Πίνακα 7.4**.



Σχήμα 7.5: Μετρήσεις του βάθους ΔW_0 αρχικών πτυχώσεων

Πίνακας 7.4: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρου ανοχής πτύχωσης U_{max}

Κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή της U_{max}
Κατηγορία Α	Εξαιρετική	0.006
Κατηγορία Β	Υψηλή	0.010
Κατηγορία C	Κανονική	0.016

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το κέλυφος υποστηρίζεται συνεχώς από κάποια άλλη κατασκευή, η απόκλιση από την επιπεδότητα στο σημείο επαφής δεν πρέπει να περιέχει τοπική κλίση στην περιμετρική διεύθυνση μεγαλύτερη από 0.1%.

Εάν οι πραγματικές ατέλειες δεν ικανοποιούν τους παραπάνω ελέγχους, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα, όπως η ευθυγράμμιση, η οποία όμως μπορεί να προκαλέσει επιπρόσθετες παραμένουσες τάσεις.

Τέλος θα πρέπει να εξετάζεται κατά πόσο το μέτρο που αποφασίστηκε αξιοποιεί κατάλληλα την αντοχή σε λυγισμό.

7.5.3.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Οι τιμές σχεδιασμού των τάσεων $\sigma_{χEd}$, $\sigma_{\theta Ed}$, και $\tau_{\chi\theta Ed}$ προκύπτουν από γραμμική ανάλυση κελύφους ή από τη μεμβρανική θεωρία, εφ' όσον επικρατούν καθαρά άξονοσυμμετρικές συνθήκες φορτίσεως και υποστηρίξεως.

Στην περίπτωση που δεν παρέχονται σαφείς οδηγίες, οι παραπάνω μεμβρανικές τάσεις θα πρέπει να λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή που προκύπτει από την ανάλυση, ενώ για περιπτώσεις βασικής φορτίσεως λαμβάνονται τιμές από τα Παραρτήματα Α και C του EN1993-1-6.

Η αντοχή έναντι λυγισμού αναπαρίσταται από τις εξής τάσεις λυγισμού:

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}}, \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}, \quad \tau_{x\theta,Rd} = \frac{\tau_{x\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (7.20)$$

όπου:

γ_{M1} είναι ο επιμέρους συντελεστής για αντοχή και λαμβάνει την τιμή 1.1.

Οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής με τους μειωτικούς συντελεστές λυγισμού χ :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} \cdot f_{yk}, \quad \tau_{x\theta,Rk} = \frac{\chi_{\tau} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (7.21)$$

Οι μειωτικοί συντελεστές λυγισμού χ_x , χ_{θ} και χ_{τ} προσδιορίζονται ως συναρτήση της ανοιγμένης λυγηρότητας του κελύφους $\bar{\lambda}$ από:

$$\begin{aligned} \chi &= 1 && \text{όταν} && \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \\ \chi &= 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta} && \text{όταν} && \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \\ \chi &= \frac{a}{\bar{\lambda}^2} && \text{όταν} && \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \end{aligned} \quad (7.22)$$

όπου:

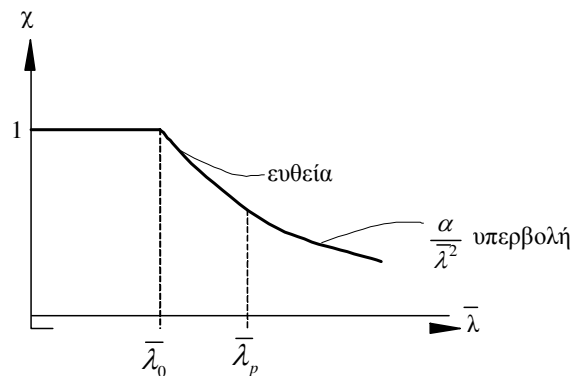
α είναι ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής ατελειών

β είναι ο συντελεστής πλαστικού εύρους (0.6)

η είναι ο εκθέτης αλληλεπίδρασης

$\bar{\lambda}_0$ είναι η οριακή ανηγμένη λυγηρότητα πλήρους πλαστικοποίησης

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων δίνονται στο Παράρτημα D του EN1993-1-6.



Σχήμα 7.6: Καμπύλη κύρωσης κελυφών

Η τιμή του πλαστικού ορίου ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_p$ προσδιορίζεται από:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} \quad (7.23)$$

Ενώ οι παράμετροι ανηγμένης λυγρότητας του κελύφους για διαφορετικές συνιστώσες των τάσεων προσδιορίζονται από:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}, \quad \bar{\lambda}_x = \sqrt{(f_{yk} / \sqrt{3}) / \tau_{x\theta,Rcr}} \quad (7.24)$$

Οι ελαστικές κρίσιμες τάσεις λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ και $\tau_{x\theta,Rcr}$ λαμβάνονται μέσω σχετικών σχέσεων του Παραρτήματος D (EN1993-1-6).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι ελαστικές κρίσιμες τάσεις λυγισμού μπορούν να εξαχθούν από αριθμητική ανάλυση LBA του κελύφους, υπό τους σχετικούς για το λυγισμό συνδυασμούς δράσεων. Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται σε αυτή την ανάλυση περιγράφονται στην **Παράγραφο 7.4.3.2**.

Η οριακή κατάσταση λυγισμού εκφράζεται μέσω του περιορισμού των τιμών των μεμβρανικών τάσεων.

Έτσι απαιτείται η πραγματοποίηση ενός ή περισσότερων από τους παρακάτω ελέγχους ανάλογα με τον τύπο φόρτισης:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}, \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}, \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (7.25)$$

Στην περίπτωση συνύπαρξης περισσότερων από μια από τις τρεις σχετικές με το λυγισμό συνιστώσες μεμβρανικών τάσεων, υπό τις υπόψη δράσεις, θα πρέπει να εκτελείται ο παρακάτω έλεγχος αλληλεπίδρασης για τη συνδυασμένη κατάσταση μεμβρανικών τάσεων:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (7.26)$$

Όπου $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ και $\tau_{x\theta,Ed}$ είναι οι σχετικές ομάδες αλληλεπίδρασης των σημαντικών τιμών των θλιπτικών και διατμητικών μεμβρανικών τάσεων στο κέλυφος και οι τιμές των παραμέτρων αλληλεπίδρασης για λυγισμό k_x , k_θ , k_τ και k_i δίνονται στο Παράρτημα D του EN1993-1-6 ως:

$$\begin{aligned} k_x &= 1.25 + 0.75 \chi_x \\ k_\theta &= 1.25 + 0.75 \chi_\theta \\ k_\tau &= 1.75 + 0.75 \chi_\tau \\ k_i &= (\chi_x \cdot \chi_\theta)^2 \end{aligned} \quad (7.27)$$

Όπου οι $\sigma_{x,Ed}$ ή $\sigma_{\theta,Ed}$ είναι εφελυστικές οι τιμές τους στην προηγούμενη σχέση θα πρέπει να λαμβάνονται ως μηδέν.

Στην περίπτωση που δεν δίνονται σαφείς οδηγίες για τον προσδιορισμό και διαχωρισμό της ομάδας των συνιστωσών μεμβρανικών τάσεων, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές του, οποιαδήποτε και εάν βρίσκονται. Εάν όμως, οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε μια συνοριακή ζώνη κοντά στα άκρα μήκους:

$$l_R = 0.1 \cdot L \leq l_{Rl} = 0.16 \cdot r \cdot \sqrt{r/t} \quad (7.28)$$

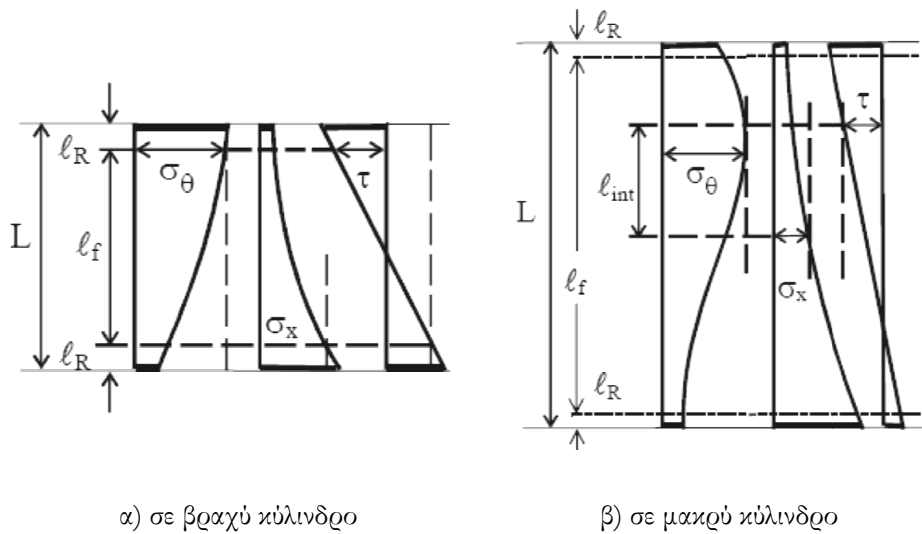
τότε στον έλεγχο αλληλεπίδρασης αντί αυτών θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές μέσα στο υπολειπόμενο τμήμα μήκους $l_f = L - 2 \cdot l_R$.

Τέλος, για κύλινδρο μεγάλου μήκους, η τριάδα των τάσεων που εισάγεται στον έλεγχο αλληλεπίδρασης μπορεί να περιοριστεί σε ένα μήκος:

$$l_{int} = 1.3 \cdot r \cdot \sqrt{r/t} \quad (7.29)$$

οπουδήποτε μέσα στο μήκος $l_f = L - 2 \cdot l_R$.

Σημειώνεται πως γενικά αμελείται η επιρροή της κάμψης στην αντοχή έναντι λυγισμού εκτός από την περίπτωση καμπτικών τάσεων λόγω τοπικών φορτίων ή θερμικών δράσεων.



Σχήμα 7.7: Παραδείγματα ομάδων αλληλεπίδρασης των σχετικών συνιστωσών μεμβρανικών τάσεων

7.5.3.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιώντας τις αναλύσεις MNA και LBA

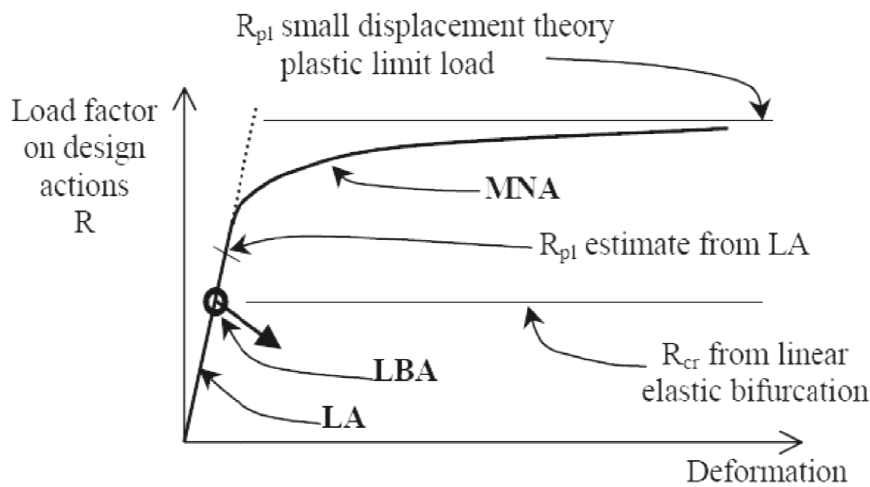
Οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων είναι όπως αναφέρθηκε στην αρχή.

Η αντίσταση σχεδιασμού σε λυγισμό $F_R = r_{Rd} \cdot F_{Ed}$ λαμβάνεται από την πλαστική αντίσταση αναφοράς $F_{Rpl} = r_{Rdpl} \cdot F_{Ed}$ και την ελαστική κρίσιμη αντίσταση σε λυγισμό $F_{cr} = r_{Rk} \cdot F_{Ed}$. Στη συνέχεια θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο επιμέρους συντελεστής γ_{M1} για να ληφθεί η αντίσταση σχεδιασμού.

Ο λόγος της πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} (βλέπε **Σχήμα 7.8**) θα πρέπει να λαμβάνεται προς το υλικό μη γραμμικής ανάλυσης (MNA), ως προς το πλαστικό οριακό φορτίο του εφαρμοζόμενου συνδιασμού δράσεων. Αυτός ο λόγος r_{Rpl} μπορεί να ληφθεί ως η μέγιστη τιμή που υπολογίζεται από την ανάλυση, αγνοώντας την επιρροή της κράτυσης.

Σημειώνεται ότι, όπου δεν είναι δυνατό να διεξαχθεί ως προς το υλικό μη γραμμική ανάλυση (MNA), ο λόγος πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} μπορεί να εκτιμηθεί συντηρητικά από γραμμική ανάλυση κελυφών (LA), που διεξάγεται χρησιμοποιώντας τις τιμές σχεδιασμού του εφαρμοζόμενου συνδυασμού δράσεων, με την παρακάτω διαδικασία. Οι υπολογισμένες συνισταμένες μεμβρανικών τάσεων $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ και $n_{x\theta,Ed}$ σε κάθε σημείο του κελύφους θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της πλαστικής αντίστασης αναφοράς από τη σχέση:

$$r_{Rpl} = \frac{t \cdot f_{yk}}{\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} - n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2 + n_{x\theta,Ed}^2}} \quad (7.30)$$



Σχήμα 7.8: Ορισμός του λόγου πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} και του λόγου κρίσιμης αντίστασης σε λυγισμό r_{Rcr} , που προκύπτουν από καθολικές αναλύσεις MNA και LBA.

Η υπολογισθείσα με τον τρόπο αυτό μικρότερη τιμή του λόγου πλαστικής αντίστασης θα πρέπει να λαμβάνεται ως εκτίμηση του λόγου πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} .

Ο λόγος κρίσιμης ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} προσδιορίζεται από ανάλυση ιδιοτιμών (LBA), εφαρμοσμένη στην υπολογισμένη γραμμική ελαστική κατάσταση τάσεων του γεωμετρικώς τέλει κελύφους (LA) υπό τιμές σχεδιασμού του συνδυασμού φορτίων. Η μικρότερη ιδιοτιμή (συντελεστής φορτίου διακλάδωσης) λαμβάνεται ως ο λόγος τις ελάχιστης τιμής της κρίσιμης ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} (βλέπε **Σχήμα 7.9**)

Η ολική ανηγμένη λυγιρότητα $\bar{\lambda}_{ov}$ ολόκληρου του κελύφους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{F_{Rpl}}{F_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}} \quad (7.31)$$

Ο ολικός μειωτικός συντελεστής λυγισμού χ_{ov} θα πρέπει να υπολογίζεται συναρτήσει της ανηγμένης λυγιρότητας του κελύφους ως $\chi_{ov} = f(\bar{\lambda}_{ov}, \bar{\lambda}_{ov,0}, a_{ov}, \beta_{ov}, \eta_{ov})$ όπως περιγράφηκε στη §7.4.3.1. Όπου a_{ov} είναι ο ολικός ελαστικός μειωτικός συντελεστής ατελειών, β_{ov} ο συντελεστής πλαστικού εύρους, η_{ov} ο εκθέτης αλληλεπίδρασης και $\bar{\lambda}_{ov,0}$ η οριακή ανηγμένη λυγιρότητα πλήρους πλαστικοποίησης.

Έτσι ο λόγος χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rk} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$r_{Rk} = \chi_{ov} r_{Rpl} \quad (7.32)$$

όπου:

r_{Rpl} είναι ο λόγος πλαστικής αντίστασης αναφοράς

Ο λόγος αντίστασης σχεδιασμού σε λυγισμό r_{Rd} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$r_{Rk} = r_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (7.33)$$

Όπου γ_{M1} είναι ο επιμέρους συντελεστής αντίστασης σε λυγισμό, ο οποίος λαμβάνει την τιμή 1.1.

Τέλος θα πρέπει να ελέγχεται ότι ικανοποιείται η συνθήκη:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \quad \text{ή} \quad r_{Rd} \geq 1 \quad (7.34)$$

7.5.3.3. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιώντας την ανάλυση GMNIA

Και σε αυτή την ανάλυση οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων είναι όπως αναφέρθηκε στην αρχή.

Η αντίσταση σχεδιασμού σε λυγισμό προσδιορίζεται από τον συντελεστή φορτίου r_R που εφαρμόζεται στις τιμές σχεδιασμού F_{Ed} του συνδιασμού των δράσεων της σχετικής περίπτωσης

Ο χαρακτηριστικός, όμως, λόγος αντίστασης λυγισμού r_{Rk} προσδιορίζεται από το λόγο ατελούς ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού $r_{R,GMNIA}$, προσαρμοσμένο με τον συντελεστή βαθμονόμησης k_{GMNIA} . Ο λόγος αντίστασης σε λυγισμό r_{Rd} προσδιορίζεται με την χρήση του επιμέρους συντελεστή γ_{M1} .

Για τον προσδιορισμό του λόγου ατελούς ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού $r_{R,GMNIA}$, πραγματοποιείται ανάλυση GMNIA του γεωμετρικώς ατελούς κελύφους υπό τον εφαρμοσμένο συνδυασμό δράσεων, συνοδευομένης από μια ανάλυση ιδιοτιμών προς ανίχνευσης πιθανών διακλαδώσεων της διαδρομής του φορτίου.

Θα πρέπει, όμως, πρώτα να εκπονεύεται μια ανάλυση LBA στον τέλειο φορέα, για τον προσδιορισμό του λόγου κρίσιμης ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} του τέλειο φορέα. Στη συνέχεια θα εκπονεύεται ανάλυση MNA στον τέλειο φορέα, για τον προσδιορισμό του λόγου τέλειας πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} .

Αυτοί οι δύο λόγοι αντίστασης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ολικής ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_{on}$ ολόκληρου του κελύφους, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Στη συνέχεια εκπονείται ανάλυση GMNA στον τέλειο φορέα, για τον προσδιορισμό του λόγου τέλειας ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού $r_{R,GMNA}$. Αυτός ο λόγος αντίστασης θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να επαληθευτεί ότι η επίδραση των επιλεχθέντων γεωμετρικών ατελιών έχουν επαρκή υποβαθμιστική επιρροή, ώστε να δημιουργηθεί εμπιστοσύνη ότι λαμβάνεται η μικρότερη αντίσταση. Η ανάλυση GMNA πραγματοποιείται υπό τον εφαρμοζόμενο συνδιασμό δράσεων συνοδευόμενη από ανάλυση ιδιοτιμών προς ανίχνευση πιθανών διακλαδώσεων στη διαδρομή των φορτίων.

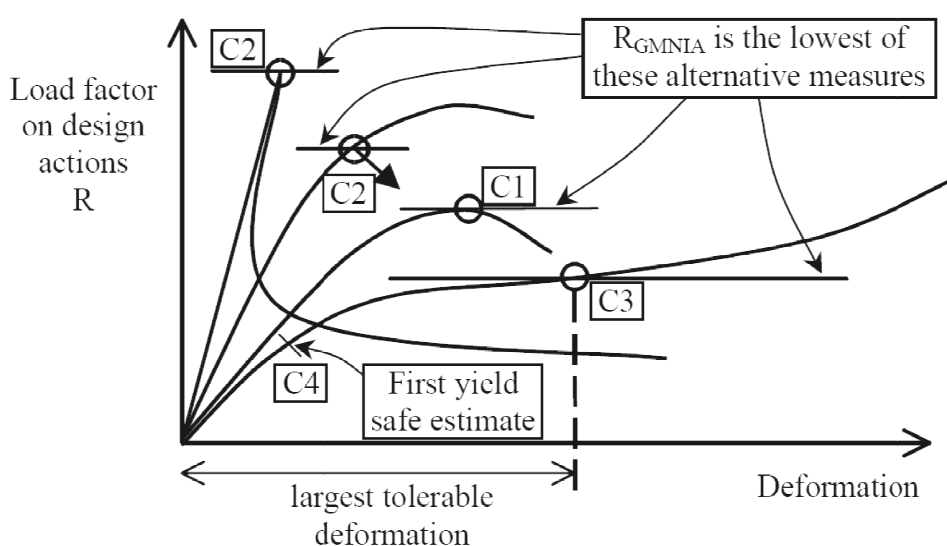
Ο λόγος της ατελούς ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού $r_{R,GMNA}$ βρίσκεται ως ο μικρότερος συντελεστής φόρτισης r_R που λαμβάνεται από τα ακόλουθα τρία κριτήρια C1, C2 και C3 (βλέπε **Σχήμα 7.9**):

Κριτήριο C1: ο μέγιστος συντελεστής φόρτισης της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης,

Κριτήριο C2: ο συντελεστής φόρτισης διακλάδωσης, όπου αυτή συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διαδρομής φόρτισης, πριν επιτευχθεί το οριακό σημείο της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης.

Κριτήριο C3: η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση, όπου αυτή λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της διαδρομής φόρτισης, πριν επιτευχθεί ένα φορτίο διακλάδωσης ή οριακό φορτίο.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση θα πρέπει να αξιολογείται σχετικά με τις συνθήκες του μεμονωμένου δομήματος. Αν δεν υπάρχει διαθέσιμη άλλη τιμή, η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται όταν η μέγιστη τοπική στρόφη της επιφάνειας του κελύφους (κλίση της επιφάνειας σε σχέση με την αρχική γεωμετρία) φθάνει την τιμή β . Συνίσταται η τιμή $\beta=0.1$ ακτίνια.



Σχήμα 7.9: Ορισμός της αντίστασης λυγισμού από καθολική ανάλυση GMNA.

Μια συντηρητική εκτίμηση του λόγου ατελούς ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού $r_{R,GMNIA}$ μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση GNIA του γεωμετρικώς ατελούς κελύφους υπό εφαρμοζόμενο συνδυασμό δράσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται το ακόλουθο κριτήριο προσδιορισμού του μικρότερου συντελεστή φόρτισης r_k :

Κριτήριο C4: ο συντελεστής φόρτισης, στον οποίο η ισοδύναμη τάση στο πλέον εντεινόμενο σημείο της επιφάνειας του κελύφους φτάνει την τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$ (βλέπε **Σχήμα 7.9**).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διατύπωση της ανάλυσης GMNIA (ή GMIA), θα πρέπει να καλύπτονται καταλλήλως οι επιρροές των ατελειών που δεν μπορούν να αποφευχθούν στην πράξη, συμπεριλαμβανομένων των:

- Γεωμετρικών ατελειών, όπως: αποκλίσεις από το ονομαστικό γεωμετρικό σχήμα της μέσης επιφάνειας, ανωμαλίες στις και κοντά στις ραφές, αποκλίσεις από το ονομαστικό πάχος, μη ευθυγράμμιση στηρίξεων.
- Ατέλειες υλικού, όπως: παραμένουσες τάσεις προκαλούμενες από έλαση, πίεση, συγκόλληση, ευθυγράμμιση, κλπ, ανομοιογένειες και ανισοτροπίες.

Στις παραπάνω κατηγορίες ατελειών δεν συγκαταλέγονται άλλες πιθανές αρνητικές επιδράσεις στην κρίσιμη αντοχή σε λυγισμό, όπως ευλυγισία των συνδέσεων κ.τ.λ. Η ύπαρξη ατελειών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη GMNIA ανάλυση με την εισαγωγή κατάλληλων πρόσθετων μεγεθών στο αναλυτικό πρότυπο.

Έτσι αν δεν υπάρχει κάποια καλύτερη μέθοδος, οι ατέλειες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως οι μέσες τιμές των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών με τη μορφή παρεκκλίσεων από το αρχικό σχήμα, κάθετα στην επιφάνεια του τέλειου κελύφους

Η μορφή της μέσης επιφάνειας του ισοδύναμου γεωμετρικώς ατελούς κελύφους προκύπτει με την υπέρθεση των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών στο τέλειο σχήμα. Το πρότυπο των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών θα πρέπει να επιλέγεται ώστε να έχει τη δυσμενέστερη επιρροή στη συμπεριφορά έναντι λυγισμού. Ως παράδειγμα αναφέρεται η κρίσιμη μορφή λυγισμού, η οποία αποδίδει η κρίσιμη αντοχή λυγισμού $r_{cr,GNIA}$ του κελύφους. Εάν δεν είναι δυνατό να αναγνωριστεί αμέσως το δυσμενέστερο πρότυπο, πραγματοποιείται μια επαναλαμβανόμενη ανάλυση για διαφορετικά πρότυπα ατελειών.

Τα παραπάνω πρότυπα ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών θα πρέπει να προσδιορίζονται στις συνοριακές συνθήκες και στις λεπτομέρειες κατασκευής κατά ένα δυσμενέστερο τρόπο.

Αυτό μπορεί να αποφευχθεί στην περίπτωση που θεωρηθούν τα πρότυπα απίθανα για τον επακόλουθο τρόπο κατασκευής και ανέγερσης. Ωστόσο, απαιτείται διερεύνηση για την ανάγκη τροποποίησης της υιοθετούμενης μορφής ώστε να περιλαμβάνει πραγματικές λεπτομέρειες.

Πίνακας 7.5: Συνιστώμενες τιμές της παραμέτρων πλάτους ατέλειας πτύχωσης U_{n1} και U_{n2}

Κατηγορία ποιότητας ανοχών παραγωγής	Περιγραφή	Συνιστώμενη τιμή του U_{n1}	Συνιστώμενη τιμή του U_{n2}
Κατηγορία Α	Εξαιρετική	0.010	0.010
Κατηγορία Β	Υψηλή	0.016	0.016
Κατηγορία C	Κανονική	0.025	0.025

Παράλληλα, το πρόσημο των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε οι μεγάλες αποκλίσεις του σχήματος να είναι δυσμενώς προσανατολισμένες κατά τη διεύθυνση του κέντρου καμπυλότητας του κελύφους.

Το δε εύρος καθορίζεται από την κατηγορία ποιότητας κατασκευής σε σχέση με τις ανοχές. Έτσι η μέγιστη απόκλιση της ισοδύναμης ατέλειας από το τέλειο σχήμα $\Delta w_{0,eff}$ λαμβάνεται ως η μέγιστη από τα $\Delta w_{0,eff1}$ και $\Delta w_{0,eff2}$, με:

$$\begin{aligned} \Delta w_{0,eff1} &= l_g \cdot U_{n1} \\ \Delta w_{0,eff2} &= n_i \cdot t \cdot U_{n2} \end{aligned} \quad (7.35)$$

Όπου:

l_g είναι όλα τα σχετικά πρότυπα μήκη

t είναι το τοπικό πάχος τοιχώματος του κελύφους

n_i είναι ένας πολλαπλασιαστής ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο επίπεδο ανοχής. Συνιστώμενη τιμή $n_i=25$

U_{n1} , U_{n2} είναι οι παράμετροι του πλάτους της ατέλειας πτύχωσης για τη σχετική κατηγορία ποιότητα ανοχών παραγωγής.

Τιμές των παραμέτρων πτύχωσης U_{n1} και U_{n2} δίνονται στον **Πίνακα 7.5**.

Στην περίπτωση που είναι πιθανές οι επιρροές του φορτίου, θα πρέπει είτε να ενσωματωθούν στην ανάλυση είτε να ελεγχθεί εάν είναι αμελητέα η επιρροή τους.

Οι μέθοδοι ελέγχου αξιοπιστίας της αριθμητικώς υπολογιζόμενης κρίσιμης GMNIA αντοχής έναντι λυγισμού είναι οι εξής:

- Με το ίδιο πρόγραμμα υπολογίζονται οι τιμές του $r_{R,GMNIA,check}$ άλλων περιπτώσεων λυγισμού κελυφών, των οποίων οι τιμές του χαρακτηριστικού λόγου αντίστασης λυγισμού $r_{Rk,known,check}$ είναι γνωστές. Οι περιπτώσεις ελέγχου θα πρέπει να χρησιμοποιούν παρόμοιες παραδοχές ατελειών και είναι όμοιες στις παραμέτρους που καθορίζουν το λυγισμό (όπως ανηγμένη λυγηρότητα κελύφους, μεταλυγισμική συμπεριφορά, ευαισθησία έναντι ατελειών, γεωμετρική μη γραμμικότητα και συμπεριφορά υλικού)

- Μέσω σύγκρισης των υπολογισμένων τιμών ($r_{Rk,known,check}$) με αποτελέσματα δοκιμών ($r_{R,test,known,check}$). Οι περιπτώσεις ελέγχου θα πρέπει να ικανοποιούν τις ίδιες συνθήκες ομοιότητας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Έτσι με βάση τα αποτελέσματα των ελέγχων αξιοπιστίας, ο συντελεστής βαθμονόμησης k_{GMNIA} θα πρέπει να αποτιμάται ανάλογα, με:

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad \text{ή} \quad k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,test,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad (7.36)$$

όπου:

$r_{Rk,known,check}$ είναι η γνωστή χαρακτηριστική τιμή

$r_{Rk,test,known,check}$ είναι το γνωστό αποτέλεσμα δοκιμής

$r_{R,GMNIA,check}$ είναι το υπολογιστικό αποτέλεσμα της περίπτωσης λυγισμού ελέγχου ή, ανάλογα, της περίπτωσης λυγισμού δοκιμής

Όπου χρησιμοποιούνται αποτελέσματα δοκιμών η υπολογισθείσα τιμή του k_{GMNIA} δεν πρέπει να υπερβαίνει την μονάδα. Επίσης, ο λόγος της χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού θα πρέπει να λαμβάνεται από τη σχέση:

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} \cdot r_{R,GMNIA} \quad (7.37)$$

όπου:

$r_{R,GMNIA}$ είναι ο υπολογισμένος λόγος ατελούς ελαστο-πλαστικής αντίστασης λυγισμού

k_{GMNIA} είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης

Ο λόγος αντίστασης σχεδιασμού σε λυγισμό r_{Rd} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$r_{Rk} = r_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (7.38)$$

Όπου γ_{M1} είναι ο επιμέρους συντελεστής αντίστασης σε λυγισμό, ο οποίος λαμβάνει την τιμή 1.1.

Τέλος, θα πρέπει να ελέγχεται ότι ικανοποιείται η συνθήκη:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \cdot F_{Ed} \quad \text{ή} \quad r_{Rd} \geq 1 \quad (7.39)$$

7.5.4. Οριακή κατάσταση κόπωσης (LS4)

Οι τιμές σχεδιασμού των δράσεων, για κάθε περίπτωση φορτίσεως, θα πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να αποτελούν τα μεταβλητά μέρη ολικών δράσεων που αντιπροσωπεύουν το αναμενόμενο φάσμα δράσεων κατά ολόκληρη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του δομήματος. Τα σχετικά φάσματα δράσεων λαμβάνονται από το EN1993.

7.5.4.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Η μέθοδος προσδιορισμού της κόπωσης, όπως παρουσιάζεται στη EN1993-1-9, μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση κελύφους, εκτός των προβλεπόμενων στο παρόν. Ο συντελεστής $\gamma_{Mf}=1.1$.

Ο υπολογισμός των τάσεων πραγματοποιείται μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης της κατασκευής με εφαρμογή των τιμών σχεδιασμού των δράσεων που προκαλούν κόπωση. Οι τελευταίες θα πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε σημείο ως η μέγιστη διακύμανση των τάσεων $\Delta\sigma$ που δρα σε κάθε επιφάνεια του κελύφους.

Στην περίπτωση που ο υπολογισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με το EN1993-1-9, θα πρέπει να εκτιμώνται είτε ονομαστικές είτε γεωμετρικές διακυμάνσεις τάσεων. Οι τελευταίες θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη μόνο τη συνολική γεωμετρία σύνδεσης, αποκλείοντας τοπικές τάσεις λόγω της γεωμετρίας της συγκόλλησης και των εσωτερικών επιρροών της. Οι γεωμετρικές διακυμάνσεις τάσεων μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας συντελεστές γεωμετρικής συγκέντρωσης τάσεων.

Οι τάσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κόπωσης κατασκευαστικών λεπτομερειών με γραμμικό γεωμετρικό προσανατολισμό, θα πρέπει να αναλύονται σε συνιστώσες κάθετες και παράλληλες προς τους άξονες της λεπτομέρειας.

Η αντοχή έναντι κόπωσης συνήθων λεπτομερειών κατασκευής δίνεται στο Παράρτημα C του EN1993-3-2 σε κατηγορίες ανάλογα με τη διακύμανση τάσεων $\Delta\sigma_E$ και την ποιότητα συγκόλλησης. Στην περίπτωση αυτή επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν οι ονομαστικές διακυμάνσεις των τάσεων και όχι οι γεωμετρικές.

Η αντοχή σε κόπωση των διαφόρων κατηγοριών λεπτομερειών λαμβάνεται από το EN1993-1-9.

Οι παραπάνω τιμές σχεδιασμού της αντοχής μπορούν να εφαρμοστούν σε δομικούς χάλυβες για θερμοκρασίες μέχρι και 150° C.

Ο έλεγχος βασίζεται στο ότι, σε κάθε σημείο της κατασκευής η διακύμανση τάσεως σχεδιασμού θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}} \quad (7.40)$$

όπου:

γ_{Ff} είναι ο επιμέρους συντελεστής της φόρτισης λόγω κόπωσης

γ_{Mf} είναι ο επιμέρους συντελεστής της αντοχής σε κόπωση

$\Delta\sigma_E$ είναι το ισοδύναμο εύρος διακύμανσης τάσεων σταθερού πλάτους του φάσματος τάσεων σχεδιασμού

$\Delta\sigma_R$ είναι το εύρος διακύμανσης τάσεων για αντοχή σε κόπωση για τη σχετική κατηγορία λεπτομέρειας και τον αριθμό κύκλων φάσματος τάσεων

7.5.4.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση LA ή GNA

Ο υπολογισμός της κόπωσης στη βάση μιας ελαστικής ανάλυσης ακολουθεί τις ίδιες αρχές με τον υπολογισμό των τάσεων που περιγράφηκε στην Παράγραφο 7.4.4.1. Ωστόσο οι διακυμάνσεις των τάσεων υπολογίζονται από μια καμπτική ανάλυση κελύφους, λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές ασυνέχειες των συνδέσεων των κατασκευαστικών λεπτομερειών.

Στη περίπτωση που εφαρμόζεται μια τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των εγκοπών, λόγω της τοπικής γεωμετρίας της συγκόλλησης.

7.6. Βιβλιογραφία

- [1] Κελύφη, Στοιχεία Στατική Επιλύσεως – Αθανάσιου Β. Νικολαΐση, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 2006.
- [2] EN 1993-1-6 Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures.

8

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ

Σε προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν και επεξηγήθηκαν διεξοδικά οι παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια αλλά και την απόκριση των καπνοδόχων ήτοι, δράσεις φορτίων ανέμου, σεισμού αλλά και θερμοκρασιακών μεταβολών. Όλες αυτές οι παράμετροι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, μέσω κατάλληλων υπολογισμών, στην ανάλυση και διαστασιολόγηση τέτοιων κατασκευών. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται όλες οι απαιτήσεις καθώς και κανονιστικές διατάξεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό έναντι ασφαλείας αλλά και λειτουργικότητας κατασκευών όπως οι καπνοδόχοι. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ως παράδειγμα εφαρμογής η ανάλυση και διαστασιολόγηση, των καπνοδόχων των νησιών Λήμνου, Σάμου και Σύρου.

Η ανά χείρας μελέτη επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μελέτη διαδικασίας ανάλυσης και διαστασιολόγησης μεταλλικών καπνοδόχων με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωπαϊκών Κανονισμών (Ευρωκώδικες). Για το σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη όλα τα αντίστοιχα μέρη των κανονισμών καθώς και όλα τα αντίστοιχα Ελληνικά Προσαρτήματα, όπως συνοψίζονται ακολούθως:

1. Eurocode 1: Action on Structures – General Action – Part 1-4: Wind action
2. Eurocode 1: Action on Structures – Part 1-4: Wind action - National Annex GR
3. Eurocode 1: Action on Structures – General Action – Part 1-5: Thermal action
4. Eurocode 1: Action on Structures – Part 1-5: Thermal action - National Annex GR
5. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 3.2: Towers, masts and chimneys - Chimneys

6. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: Strength and Stability of Shell Structures
7. Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance structures – Part 6: Towers, masts and chimneys
8. EN 13084-1: Free-standing industrial chimneys -Part 1: General requirements

8.1. Γενικά

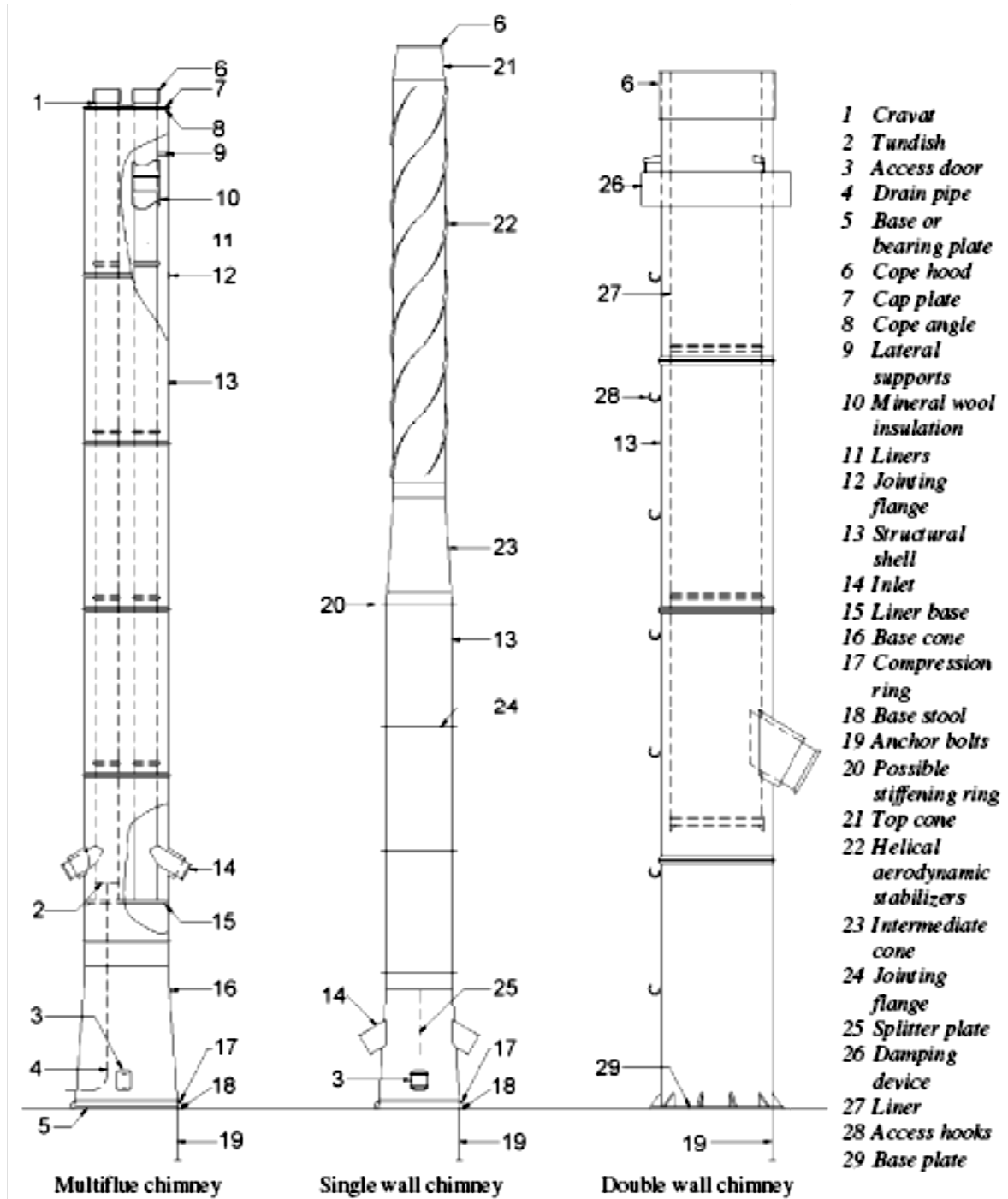
Γενικά οι καπνοδόχοι διαφέρουν είτε από τον τρόπο κατασκευής ή από τις συνθήκες στήριξής τους. Για τον λόγο αυτό στο Μέρος 3.2 του Ευρωκώδικα 3 οι καπνοδόχοι κατηγοριοποιούνται με βάση τις συνθήκες στήριξης αλλά και του τρόπου κατασκευής του κελύφους. Στην πρώτη περίπτωση οι καπνοδόχοι διαχωρίζονται σε αυτοίσορροπούμενες (self-supported chimney), αν η κατασκευή στηρίζεται μόνο στη βάση ή σε καλωδιωτές (guyed chimney), αν η ευστάθεια τους επιτυγχάνεται μέσω καλωδίων αντιστήριξης καθ ύψος της κατασκευής. Παράλληλα, οι καπνοδόχοι διαχωρίζονται σε: μονού κελύφους (single-wall), διπλού κελύφους (double-wall) και πολλαπλής εξόδου καυσαερίων (multi-flue chimney), ανάλογα με την κατασκευή και λειτουργία τους. Στο **Σχήμα 8.1** παρουσιάζονται σχηματικά οι παραπάνω κατηγορίες καπνοδόχων καθώς και η ορολογία όλων των μερών και παρελκόμενων τους.

Στο ίδιο κείμενο δίδονται οι γενικές απαιτήσεις, οδηγίες και όλες οι αντίστοιχες παραπομπές σε άλλα κείμενα που αφορούν την ανάλυση και διαστασιολόγησης των καπνοδόχων.

8.2. Βάσεις σχεδιασμού

Το Μέρος 3.2 του EN1993 υιοθετεί τρεις κατηγορίες αξιοπιστίας ανάλογα με τις πιθανές κοινοοικονομικές επιπτώσεις που θα επιφέρει μια αναπάντεχη κατάρρευση τους:

- **Κατηγορία 3- Υψηλής αξιοπιστίας:** για καπνοδόχους που αναγείρονται σε στρατηγικής σημασίας τοποθεσίες- σε πυρηνικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς ή σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Οι συνέπειες ενδεχόμενης κατάρρευσης είναι πολύ σημαντικές.
- **Κατηγορία 2- Κανονικής αξιοπιστίας:** όλες οι καπνοδόχοι βιομηχανικών περιοχών ή σε άλλες τοποθεσίες που δεν εμπίπτουν στις κατηγορίες 1 και 3.
- **Κατηγορία 1- Χαμηλής αξιοπιστίας:** καπνοδόχοι που αναγείρονται στην ύπαιθρο και που ενδεχόμενη κατάρρευσή τους δεν θα προκαλέσει ατύχημα. Επίσης καπνοδόχοι ύψους μικρότερου από 16m, σε μη κατοικημένες περιοχές.



Σχήμα 8.1: Κατηγοριοποίηση καπνοδόχων και περιγραφή παρελκόμενων

8.2.1. Δράσεις και επιρροή του περιβάλλοντος

8.2.1.1. Μόνιμες δράσεις

Κατά τον υπολογισμό των μόνιμων φορτίων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το ίδιο βάρος του κελύφους αμελώντας τυχόν μειώσεις του πάχους λόγω διάβρωσης αλλά και το ίδιο βάρος άλλων παρελκόμενων στοιχείων όπως: καπναγωγοί, θερμομόνωση κ.α.

8.2.1.2. Μεταβλητές δράσεις

8.2.1.2.1. Ωφέλημα φορτία

Εάν δεν καθορίζονται άλλες τιμές από τον κύριο του έργου ή από την αρμόδια αρχή θα πρέπει να επιβάλλονται τα ακόλουθα φορτία:

Επιβαλλόμενα φορτία σε πλατφόρμες: 2.0 kN/m^2

Οριζόντια φορτία σε κιγκλιδώματα: 0.5 kN/m^2

8.2.1.2.2. Φορτία ανέμου

Τα φορτία ανέμου υπολογίζονται με βάση το EN1991-4, όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 4**.

Σημειώνεται ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φορτία που δρουν στην εξωτερική επιφάνεια της καπνοδόχου και στα βοηθητικά στοιχεία (για παράδειγμα οι σιάλες). Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η οπισθέλκουσα δύναμη λόγω στροβιλισμού καθώς και οι δυνάμεις λόγω της περιοδικής διάχυσης των δινών του ανέμου που ενδέχεται να δημιουργήσουν εγκάρσιες προς την ροή του ανέμου ταλαντώσεις στην καπνοδόχο.

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οποιεσδήποτε άλλες δράσεις, για παράδειγμα οι δράσεις λόγω καλασμού, εάν το σχετικό κριτήριο υπερβαίνεται (βλέπε EN1991-1-4, παρ.5.2.1).

Στην περίπτωση που η καπνοδόχος ενδέχεται να υπόκειται σε υπερβολικές δονήσεις λόγω της ροής του ανέμου θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την μείωση τους κατά τη φάση της σχεδίασης, ή με την χρήση αποσβεστήρων στην κατασκευή. Σχετικές διατάξεις για το τελευταίο δίνονται στο Παράρτημα Β του EN1993-3.2.

8.2.1.2.3. Εσωτερικές πιέσεις

Στην περίπτωση αυξημένης υποπίεσης ή υπερπίεσης τα φορτία ανέμου θα πρέπει να εξετάζονται ως τυχηματικά. Οι εξωτερικές πιέσεις υπολογίζονται όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 4**.

8.2.1.2.4. Θερμικές δράσεις

Η θερμική δράση μπορεί να αποτελείται από μια θερμοκρασία ομοιόμορφα κατανομημένη πάνω στη κατασκευή και από μια μεταβλητή θερμοκρασία λόγω μετεωρολογικών ή λειτουργικών επιρροών συμπεριλαμβανομένης και εκείνης που προέρχεται από την ατελή ροή του αερίου. Οι θερμικές δράσεις υπολογίζονται από το EN1991-1-5 όπως περιγράφηκαν στο **Κεφάλαιο 5**. Πιθανές θερμοκρασίες προερχόμενες από τη ροή των αερίων κατά την λειτουργία υπολογίζονται με βάση τα EN13084-1 και EN13084-6.

8.2.1.2.5. Φορτία χιονιού

Το Εθνικό Προσάρτημα δίνει τα σχετικά πάχη χιονιού (πάγου) στη περίπτωση που η καπνοδόχος είναι πιθανόν να επηρεάζεται από φορτία χιονιού.

8.2.1.2.6. Σεισμικές δράσεις

Οι σεισμικές δράσεις υπολογίζονται από τα EN1998-3 και EN13084-1, όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 6**.

8.2.1.2.7. Πυρκαγιά

Απαιτείται προσδιορισμός του κινδύνου πυρκαγιάς σε καπνοδόχο. Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής της μείωσης της αντοχής της κατασκευής λόγω δράσης της φωτιάς ή θέρμανσης άλλων στοιχείων της κατασκευής κοντά στην καπνοδόχο.

Εάν υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς, θεωρείται απαραίτητος ο ανεφοδιασμός της καπνοδόχου με εσωτερική επένδυση, όπως καθορίζουν τα EN13084-6 και EN13084-7

8.2.1.2.8. Χημικές δράσεις

Προσδιορίζονται με βάση το EN13084-1.

8.2.2. Έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας και κόπωσης, θα πρέπει να τεθούν κάποια όρια λειτουργικότητας.

Η αντοχή και η ευστάθεια των καπνοδόχων υπολογίζεται για ένα συνδυασμό δράσεων όπου η επίδραση του ανέμου είναι η επικρατούσα.

Στον **Πίνακα 8.1** δίνονται οι μερικοί συντελεστές γ_G και γ_Q για μόνιμες και παροδικές φορτίσεις αντίστοιχα. Γενικά για τυχηματικές δράσεις, οι μερικοί συντελεστές για τις μεταβλητές δράσεις θα πρέπει να λαμβάνονται ίσοι με 1. Όταν πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση απόκρισης, οι μερικοί συντελεστές θα πρέπει να λαμβάνονται ίσοι με 1.

Πίνακας 8.1: Μερικοί συντελεστές δράσεων επί της καπνοδόχου

Είδος δράσεων	Κατηγορία αξιοπιστίας	Μόνιμες δράσεις	Μεταβλητές δράσεις
Δυσμενής	3	1.2	1.6
	2	1.1	1.4
	1	1.0	1.2
Ευμενείς	Όλες οι κατηγορίες	1.0	1.0

8.2.3. Γεωμετρία

Κατά τον προσδιορισμό της αντοχής και της ακαμψίας της κατασκευής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απομείωση του πάχους του κελύφους λόγω διάβρωσης και η επιρροή της θερμοκρασίας.

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όπου απαιτούνται οι ατέλειες που σχετίζονται με τις ανοχές λόγω ανέγερσης.

8.3. Υλικά

8.3.1. Χάλυβες κατασκευής

Οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων κατασκευής S235, S275, S355, S420, S460 θα πρέπει να λαμβάνονται από το EN1993-1-1. Επίσης κατά τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά του χάλυβα σε θερμοκρασίες 0° C και 400° C.

Η τάση διαρροής f_{yT} σε θερμοκρασία T ° C δίνεται από τη σχέση:

$$f_{yT} = f_y \cdot \left(1 + \frac{T}{767 \cdot \log\left(\frac{T}{1750}\right)} \right) \quad \text{για } 200 < T < 400 \quad (8.1)$$

Σχετικά με τους ανοξειδωτους χάλυβες (weathering steel), οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζονται όμοια με τους χάλυβες S235, S275, S355. Για αυτούς οι μηχανικές ιδιότητες που σχετίζονται με την αντοχή λαμβάνονται από το EN1993-1-4 για θερμοκρασίες έως 400° C, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες από το EN10088.

8.4. Αντοχή σε διάρκεια – Διάβρωση

Σε κατασκευές όπως οι καπνοδόχοι ο φέρον οργανισμός αποτελεί και το ίδιο το κέλυφος της κατασκευής. Ως εκ τούτου, και λόγω της άμεσης έκθεσής του στο περιβάλλον (άνεμο, βροχή κ.τ.π) είναι πιθανόν να υποστεί εξωτερική διάβρωση. Κατ' επέκταση το κέλυφος δύναται να υποστεί μείωση του πάχους του για όλη τη διάρκεια ζωής του. Πέραν τούτου, αλλά και λόγω της χρήσης και λειτουργίας της καπνοδόχου ενδέχεται να

παρατηρείται διάβρωση και στο εσωτερικό μέρος του κελύφους. Συνεπώς η διάβρωση της καπνοδόχου λαμβάνει χώρα τόσο από την εσωτερική όσο και από την εξωτερική πλευρά του κελύφους. Ως συνολική διάβρωση λαμβάνεται το άθροισμα και των δύο.

Πίνακας 8.2: Αποδεικτική εξωτερική διάβρωση σε καπνοδόχους

Έκθεση	Χρόνος έκθεσης	
	Πρώτα 10 χρόνια	Κάθε επιπρόσθετη περίοδο 10 χρόνων
Βαμμένος χάλυβας (χωρίς να υπάρχει εκ των προτέρων πρόγραμμα για να ξαναβαφεί)	0	1 mm
Βαμμένος χάλυβας (με εκ των προτέρων πρόγραμμα για να ξαναβαφεί)	0	0 mm
Βαμμένος χάλυβας προστατευόμενος με μόνωση και αδιάβροχη επένδυση	0	1 mm
Απροστάτευτος χάλυβας	1.5 mm	1 mm
Απροστάτευτος χάλυβας έναντι αποσάθρωσης (weathering steel)	0.5 mm	0.3 mm
Απροστάτευτος ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel)	0	0
Απροστάτευτη εσωτερική επιφάνεια κελύφους και απροστάτευτη επιφάνεια των καπναγωγών σε πολλαπλής εξαγωγής καπνοδόχους	0.2mm	0.1mm

Πίνακας 8.3: Αποδεικτική εσωτερική διάβρωση σε καπνοδόχους

Χημικό φορτίο	Χρόνος έκθεσης	
	Πρώτα 10 χρόνια	Κάθε επιπρόσθετη περίοδο 10 χρόνων
Χαμηλό	1.0mm	1.0mm
Μέτριο	2.5mm	1.5mm
Υψηλό	Εφαρμογή άλλης λύσης	Εφαρμογή άλλης λύσης
Πολύ υψηλό	Εφαρμογής άλλης λύσης	Εφαρμογή άλλης λύσης

Στον **Πίνακα 8.2** παρουσιάζονται οι τιμές που προτείνει το EN1993-3.2 για την ενδεχόμενη εξωτερική διάβρωση (C_{ext}) που ενδέχεται να υποστεί το κέλυφος ανά διαστήματα 10 χρόνων σε σχέση με το υλικό επικάλυψής του.

Στην περίπτωση που η καπνοδόχος εκτίθεται σε πολύ οξειδωτικό διαβρωτικό περιβάλλον όπως εξατμίσεις καυσαερίων από άλλες καπνοδόχους ή/και είναι πλησίον της ακτογραμμής, οι τιμές της εξωτερικής διάβρωσης ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες από τις προτεινόμενες και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Αντίστοιχες τιμές για την εσωτερική διάβρωση (C_{int}) δίδονται στο EN 13084-7, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8.3**.

8.5. Ανάλυση κατασκευής

8.5.1. Προσομοίωση γεωμετρίας καπνοδόχου

Κατά τον προσδιορισμό της αντοχής της καπνοδόχου αμελούνται οποιεσδήποτε δράσεις μεταξύ εσωτερικής επένδυσης και κελύφους. Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί της εσωτερικής επένδυσης ή του καπναγωγού που επηρεάζουν δυσμενώς την ασφάλεια του κελύφους, καθώς και επιβεβλημένες παραμορφώσεις. Κατά τον υπολογισμό της ακαμψίας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της θερμοκρασίας καθώς επίσης και το διαβρωμένο πάχος του χάλυβα.

8.5.2. Υπολογισμός συνισταμένων τάσεων και εντάσεων

Ο υπολογισμός των συνισταμένων τάσεων και εντάσεων κελυφών γίνεται με βάση το EN1993-1-6, όπως παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 7**. Η εφαρμογή της γραμμικής ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για την περίπτωση των κελυφών. Τα στρογγυλά κυλινδρικά κατακόρυφα κελύφη διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ως:

- Εύκαμπτα
- Ενισχυμένα με δακτυλίους ακαμψίας

Στην πρώτη περίπτωση, εφ' όσον ισχύει η συνθήκη:

$$l/r_m \geq 0.14 \cdot r_m / t + 10 \quad (8.2)$$

όπου:

- l είναι το ολικό ύψος της κατασκευής
- r_m είναι η ακτίνα του κελύφους (στη μέση επιφάνεια)
- t είναι το απομειωμένο λόγω διάβρωσης πάχος κελύφους

Οι μεμβρανικές εντάσεις λόγω των εξωτερικών δράσεων μπορούν να υπολογιστούν με βάση τη μεμβρανική θεωρία, εξετάζοντας τον κύλινδρο ως μια δοκό. Η επίδραση την καμπτικής ροπής μπορεί να αγνοηθεί, όχι όμως οι περιμετρικές καμπτικές ροπές, λόγω ανομοιόμορφης κατανομής της πίεσης του ανέμου, οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$m_y = 0.5 \cdot r_m^2 \cdot w_e \quad (8.3)$$

όπου

- w_e είναι η πίεση του ανέμου που ενεργεί στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής

οι ροπές αυτές μπορούν να αγνοηθούν στην περίπτωση που ισχύει η συνθήκη:

$$r_m / t \leq 160 \quad (8.4)$$

Και στη δεύτερη περίπτωση των ενισχυμένων κυλίνδρων μπορεί να εφαρμοστεί η μεμβρανική θεωρία. Τα δε αποτελέσματα της κάμψης μπορούν να αγνοηθούν εφ' όσον οι δακτύλιοι ακαμψίας για τη μεταφορά της ανεμοπίεσης σχεδιάζονται για τις περιμετρικές καμπτικές ροπές. Επίσης, μπορούν να αγνοηθούν στην περίπτωση που οι δακτύλιοι, στις υποενότητες κυλίνδρων και κώνων, σχεδιάζονται για τις ισοδύναμες δυνάμεις που προκύπτουν από την παρέκκλιση των μεσημβρινών δυνάμεων.

8.5.3. Ατέλειες

Επειδή η θεωρία συχνά απέχει από την πράξη, κατά τη μελέτη των καπνοδόχων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τυχόν ύπαρξη ατελειών.

Έτσι, ατέλειες στις αυτοστηριζόμενες καπνοδόχους λαμβάνονται υπόψη με την υπόθεση κάποιας πλευρικής παρέκκλισης από την κατακόρυφο στην κορυφή τους, σύμφωνα με την σχέση:

$$\Delta = \frac{h}{500} \cdot \sqrt{1 + \frac{50}{h}} \text{ [m]} \quad (8.5)$$

h το ύψος της καπνοδόχου σε [m]

Σημειώνεται ότι, τοπικές ατέλειες του κελύφους δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη συνολική καθολική ανάλυση, εφ' όσον οι γεωμετρικές ανοχές βρίσκονται υπό έλεγχο.

Επίσης μπορούν να αγνοηθούν οι ατέλειες μελών της καπνοδόχου, σε ορισμένες περιπτώσεις αξονικών θλιβόμενων μελών (αναφορά γίνεται στο EN1993-1-1, παρ. 5.3).

8.5.4. Καθολική ανάλυση

Η καθολική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία πρώτης και δεύτερης τάξης όταν το φέρον κέλυφος υπολογίζεται ως δοκός και ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$\frac{N_b}{N_{crit}} \leq 0.10 \quad (8.6)$$

όπου:

N_b είναι η τιμή σχεδιασμού του συνολικού κατακόρυφου φορτίου, στη βάση του κελύφους

N_{crit} είναι η κρίσιμη ελαστική τιμή του αξονικού φορτίου που προκαλεί αστοχία, στη βάση του κελύφους.

Κατά την εφαρμογή της θεωρία δεύτερας τάξης σε κέλυφος που υπολογίζεται ως δοκός, οι καμπτικές ροπές δεύτερας τάξης M'_b για τη δοκό υπολογίζονται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$M'_b = M_b \cdot \left(1 + \frac{\eta^2}{8}\right) \quad (8.7)$$

με
$$\eta = h \cdot \sqrt{\frac{N_{sd}}{EI}} \quad (8.8)$$

όπου:

h είναι το ολικό ύψος του κελύφους

EI είναι η καμπτική ακαμψία στη βάση του κελύφους

Τέλος, η απλοποιημένη μέθοδος εφαρμόζεται όταν ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\eta \leq 0.8 \quad \text{και}$$

$$\frac{N_{top}}{N_b} \leq 0.1 \quad (8.9)$$

όπου:

N_{top} είναι η τιμή σχεδιασμού του ολικού κατακόρυφου φορτίου στην κορυφή του κελύφους.

8.6. Οριακή κατάσταση αστοχίας

8.6.1. Γενικά

Κατά τη μελέτη της καπνοδόχου στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ο μερικός συντελεστής γ_M λαμβάνει διάφορες τιμές ανάλογα με την υπολογιζόμενη αντοχή. Έτσι για την περίπτωση υπολογισμού αντοχής, συσχετισμένης με την τάση διαρροής φερόντων στοιχείων ή μελών, ο μερικός συντελεστής γ_M παίρνει την τιμή $\gamma_{M0}=1.00$ όταν δεν παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού ή καθολικού λυγισμού και $\gamma_{M1}=1.10$ σε αντίθετη περίπτωση. Κατά τον υπολογισμό της αντοχής που σχετίζεται με τη τάση θραύσης f_u φερόντων τοιχιών ή μελών, ο συντελεστής παίρνει τιμή $\gamma_{M2}=1.25$.

Τέλος ο σχεδιασμός της καπνοδόχου περιλαμβάνει μια σειρά από ελέγχους οι οποίοι αναφέρονται σε οριακές καταστάσεις αστοχίας:

- Πλαστική κατάρρευση και ελαστική ρήξη των ελαστικών στοιχείων
- Τοπικός λυγισμός
- Κόπωση
- Αστοχία συνδέσεων
- Ολική αστάθεια
- Στατική ισορροπία

8.6.2. Κέλυφος

Ο έλεγχος της αντοχής του κελύφους γίνεται σύμφωνα με το EN1993-1-6, όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 7**. Η ύπαρξη ανοιγμάτων στο κέλυφος της καπνοδόχου είναι εμφανές ότι μειώνει την αντοχή η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί με ενισχύσεις κατάλληλου μεγέθους, λαμβάνοντας υπόψη τη τοπική

ευστάθεια του κελύφους και την κόπωση. Τα ελάσματα που απαιτούνται ως ενισχυτικά αμφότερα της οπής, θα πρέπει να επεκτείνονται προς τα πάνω και προς τα κάτω ίσο με 1/2 φορές το μήκος τους.

Στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται κατά μήκος ελάσματα ενισχύσεως θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις περιμετρικές ροπές που αναπτύσσονται στην περιοχή των σημαντικών ανοιγμάτων. Τα διαμήκη ελάσματα θα πρέπει να έχουν επαρκές μήκος ώστε να είναι ικανά να κατανέμουν τις εντάσεις στην κύρια περιοχή του κελύφους, καθώς επίσης και κυκλικά ενισχυτικά ελάσματα στα άκρα για την απορρόφηση των περιμετρικών καμπτικών εντάσεων. Οι δακτύλιοι ενίσχυσης ελέγχονται με βάση το Παράρτημα C του EN1993-1-6.

8.7. Συνδέσεις

8.7.1. Γενικά

Μια καπνοδόχος αποτελείται από διάφορα στοιχεία ή μέλη, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους. Οι συνδέσεις αυτές μπορεί να είναι κοχλιωτές, όπως: ηλώσεις και κοχλιώσεις ή συγκολλήσεις. Καθ' ένας από αυτούς τους τρόπους θα πρέπει να σχεδιάζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας. Η σχεδίαση των συνδέσεων γίνεται με βάση το EN1993-1-8.

Για τις συνδέσεις ισχύουν οι ακόλουθοι μερικοί συντελεστές γ_M :

- Αντοχή κοχλίωσης $\gamma_{Mb}=1.25$
- Αντοχή ήλωσης $\gamma_{Mf}=1.25$
- Αντοχή σύνδεσης με μπουλόνια $\gamma_{Mp}=1.25$
- Αντοχή συγκόλλησης $\gamma_{Mw}=1.25$

Σημειώνεται ότι οι συνδέσεις θα πρέπει να ελέγχονται έναντι κόπωσης λόγω περιδινήσεων.

8.7.2. Κοχλιωτές συνδέσεις

Η κατηγοριοποίηση των κοχλιών, καθώς επίσης και ο προσδιορισμός της θέσεως των οπών πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN1993-1-1.

Σχετικά με τις κοχλιωτές συνδέσεις σε φλάντζα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ένταση που παραλαμβάνουν οι κοχλίες θα πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την εκκεντρότητα του φορτίου που επιβάλλεται από το κέλυφος. Η σύνδεση της φλάντζας με το κέλυφος θα πρέπει να πραγματοποιείται μόνο με συνεχή συγκόλληση.

Επίσης, η φλάντζα θα πρέπει να έχει τη μορφή επίπεδου δακτυλίου με ανοχή 0.5mm στα 100mm πλάτους και η ολική ανοχή κατά την περιφέρεια δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 1mm. Στην περίπτωση που οι φλάντζες τοποθετούνται ταυτόχρονα πριν την κοχλίωση, οποιοδήποτε κενό μεταξύ τους, το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 1.5mm, θα πρέπει να πληρωθεί μετά την ολοκλήρωση της κοχλίωσης.

Οι χρησιμοποιούμενοι κοχλίες θα πρέπει να έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από $d=12\text{mm}$, η δε μέγιστη απόσταση των κέντρων τους δεν πρέπει να υπερβαίνει το $10d$ (όπου d είναι η διάμετρος του κοχλίου).

Για τη σύνδεση της καπνοδόχου με τη θεμελίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συμβατική μέθοδος, όπως η κοχλίωση με αγκύρια, με την προϋπόθεση ότι μπορεί να φέρει με ασφάλεια τις αναπτυσσόμενες διατμητικές δυνάμεις και ροπές.

Τέλος, ειδικές διατάξεις όσο αφορά τις συγκολλήσεις δίνονται στο EN1993-1-8, EN1993-1-9 και EN13084-1.

8.8. Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

8.8.1. Γενικά

Ο έλεγχος λειτουργικότητας αποβλέπει στον περιορισμό των παραμορφώσεων, εκτροπών ή ταλαντώσεων που μπορεί να επηρεάσουν την εμφάνιση της καπνοδόχου και να προκαλέσουν βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία. Επίσης μεγάλες παραμορφώσεις ενδέχεται να επηρεάσουν την λειτουργικότητα, χρηστικότητα και ωφελιμότητα της κατασκευής.

8.8.2. Εκτροπές

Στην περίπτωση αυτοστηριζόμενης καπνοδόχου, η οριακή τιμή της ψευδοστατικής εκτροπής (δ_{\max}) κατά τη διεύθυνση του ανέμου, στην κορυφή της καπνοδόχου, λόγω συχνής τιμής του φορτίου του ανέμου θα πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$\delta_{\max} = \frac{h}{50} \quad (8.10)$$

όπου h το ύψος της καπνοδόχου

Στην περίπτωση ταλαντώσεων εγκάρσια στη ροή του ανέμου, τα οριακά εύρη προσδιορίζονται σύμφωνα με τον **Πίνακα 8.4**.

Πίνακας 8.4: Προτεινόμενα όρια εύρους εγκάρσιας προς τον άνεμο ταλάντωσης της κορυφής της καπνοδόχου

Κατηγορία αξιοπιστίας	Προτεινόμενα όρια εύρους εγκάρσιας προς τον άνεμο ταλάντωσης της κορυφής της καπνοδόχου	
3	0.05	Φορές την εξωτερική διάμετρο
2	0.10	Φορές την εξωτερική διάμετρο
1	0.15	Φορές την εξωτερική διάμετρο

8.9. Έλεγχος σε κόπωση

8.9.1. Γενικά

Κόπωση μπορεί να προκληθεί στην κατασκευή λόγω διακυμάνσεων της έντασης, κατά μήκος και εγκάρσια στη διεύθυνση της ροής του ανέμου. Γίνεται κατανοητό ότι μια τέτοια κατάσταση επηρεάζει τόσο την ασφάλεια όσο και λειτουργικότητα της καπνοδόχου.

Το EN1993-3-2 επιβάλλει όπως η καπνοδόχος ελεγχθεί έναντι ασφαλείας και λειτουργικότητας σε περιπτώσεις που αυτή ταλαντώνεται λόγω της ροής του ανέμου. Ο έλεγχος δυσμέμειας λόγω κόπωσης γίνεται με βάση το Παράρτημα E του EN1991-1-4. Από τον έλεγχο κόπωσης λόγω υψηλών κύκλων ταλάντωσης, συντονισμού και στην περίπτωση στροβιλώδους διέγερσης εξαιρούνται καπνοδόχοι μικρότεροι των 5m. Σημειώνεται ότι σε καπνοδόχους που κατασκευάζονται από ειδικούς χάλυβες, με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, θα πρέπει να προσδιορίζεται η επιρροή των θερμοκρασιών λειτουργίας.

Στην περίπτωση στροβιλώδους διέγερσης, με κρίσιμη ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη των 20m/sec, το μήκος συσχετισμού που λαμβάνεται υπόψη δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 16m.

8.9.2. Κόπωση λόγω στροβιλώδους διέγερσης

Σύμφωνα με το Παράρτημα E του EN1991-1-4, ο προσδιορισμός της έντασης της κόπωσης της καπνοδόχου λόγω εγκάρσιων ως προς τη ροή του ανέμου περιδινήσεις πραγματοποιώντας μέσω του μέγιστου εύρους της δόνησης και του αριθμού των κύκλων έντασης N.

Η ταλάντωση την καπνοδόχου λόγω στροβιλώδους διέγερσης πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της αδρανειακής δύναμης $F_w(s)$ ανά μέτρο μήκους, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 (Παρ. 4.5.1.6).

8.9.3. Αντοχή σε κόπωση λόγω υψηλών κύκλων ταλάντωσης

Η αντοχή σε κόπωση των συγκολλητών κατασκευαστικών λεπτομερειών του κελύφους της καπνοδόχου υπολογίζονται με βάση το Παράρτημα C του EN1993-1-9.

Επισημάνεται στην περίπτωση που γίνεται αποδεκτό κάποιο ποσοστό διάβρωσης, θα πρέπει να γίνεται κατάταξη των λεπτομερειών σε μια κατηγορία χαμηλότερη από την κανονική.

8.9.4. Αντοχή σε κόπωση λόγω χαμηλών κύκλων

Κόπωση χαμηλών κύκλων μπορεί να προκληθεί από επάλληλες μεταβολές της θερμοκρασίας ή/και από διαφορικές θερμοκρασίες.

Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Είτε με τον περιορισμό των διακυμάνσεων της τάσης λόγω επαναλαμβανόμενης υπερέντασης, σύμφωνα με τη συνθήκη:

$$\max \Delta \sigma \leq \frac{1.5 \cdot f_y}{\gamma_{Mf}} \quad (8.11)$$

όπου:

f_y είναι η τάση διαρροής, προσαρμοσμένη σε υψηλές θερμοκρασίες

γ_{Mf} είναι ο μερικός συντελεστής που μπορεί να πάρει την τιμή 1.0

- Είτε χρησιμοποιώντας την καμπύλη S – N βασισμένη στις παραμορφώσεις $\Delta \epsilon$ – N και προσδιορισμένη σε υψηλές θερμοκρασίες.

8.9.5. Έλεγχος δυσμέλειας της κόπωσης

Σύμφωνα με την ενότητα 9 του EN1993-1, ο έλεγχος έναντι κόπωσης λόγω στροβιλώδους ροής του ανέμου πραγματοποιείται με βάση τη συνθήκη:

$$\gamma_{FF} \cdot \lambda \cdot \Delta \sigma_s \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (8.12)$$

όπου:

γ_{FF} είναι ο μερικός συντελεστής για φόρτιση κόπωσης (**Πίνακας 8.5**)

$\Delta \sigma_s$ είναι η διακύμανση της τάσης που συνδέεται με N κύκλους

$\Delta \sigma_c$ είναι η τιμή της αντοχής σε κόπωση για $N_c=2 \cdot 10^6$ κύκλους, για κατηγορία κόπωσης της εξεταζόμενης λεπτομέρειας

γ_{Mf} είναι ο μερικός συντελεστής της αντοχής σε κόπωση (**Πίνακας 8.5**)

λ συντελεστής ισοδυναμίας που μετατρέπει την τάση $\Delta \sigma_s$ σε $N_c=2 \cdot 10^6$ κύκλους και δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8.13)$$

όπου m, η κλίση της καμπύλης S – N.

Σημειώνεται ότι οι συντελεστές του **Πίνακα 8.5** μπορούν να πάρουν ελάχιστη τιμή $\gamma_{FF}=1.0$ για όλες τις κατηγορίες και $\gamma_{Mf}=1.0$ εφ' όσον η κατασκευή υπόκειται σε επιθεώρηση ασφάλειας και έχει αποδειχθεί ότι το σύστημα είναι επαρκές ώστε η αστοχία ενός στοιχείου να μην συνεπάγεται ολική κατάρρευση.

Πίνακας 8.5: Μερικοί συντελεστές ασφάλειας για την κόπωση

Μερικός συντελεστής	Κατηγορία αξιοπιστίας	Συντελεστής
	3	1.4
γ_{FF}	2	1.2
	1	1.1
γ_{MF}	Όλες οι κατηγορίες	1.15

Σημείωση: 1. Οι παραπάνω συντελεστές προϋποθέτουν μη παρακολούθηση ή ρήξη των συγκολλήσεων. Επίσης, υποτίθεται ότι πραγματοποιείται τακτική επιθεώρηση και συντήρηση σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κυρίου του έργου

2. Οι παραπάνω συντελεστές προϋποθέτουν ότι οι – N καμπύλες και η κατηγοριοποίηση της λεπτομέρειας που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες του σχεδιασμού, αντιπροσωπεύουν το 5% των τιμών της πιθανότητας υπέρβασης (χαρακτηριστική)

8.10. Μέτρα κατά των ταλαντώσεων που προκαλούνται από τη στροβιλώδη διέγερση

Όπως αναφέρθηκε στην **Παράγραφο 8.8.2**, το εύρος της εγκάρσιας προς την ροή του ανέμου ταλάντωση λόγω της στροβιλώδους διέγερσης σε καπνοδόχους πρέπει να περιορίζεται στις τιμές που προτείνει ο **Πίνακας 8.4**. Το εύρος της ταλάντωσης μπορεί να ελαττωθεί με την χρήση αεροδυναμικών συσκευών (ελικοειδές αεροτομές, περύγια, προεξοχές στην επιφάνεια του κελύφους ή καλώδια) ή μέσω συσκευών απόσβεσης που τοποθετούνται στην κατασκευή.[3] Στο Παράρτημα Β του EN1993-3-2 δίνονται πληροφορίες όσο αφορά τις αεροδυναμικές συσκευές και συσκευές απόσβεσης

8.10.1. Αεροδυναμικές συσκευές

Για την μείωση των δυνάμεων που προκαλούνται λόγω στροβιλώδους διέγερσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές αεροδυναμικές συσκευές. Οι συσκευές αυτές ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

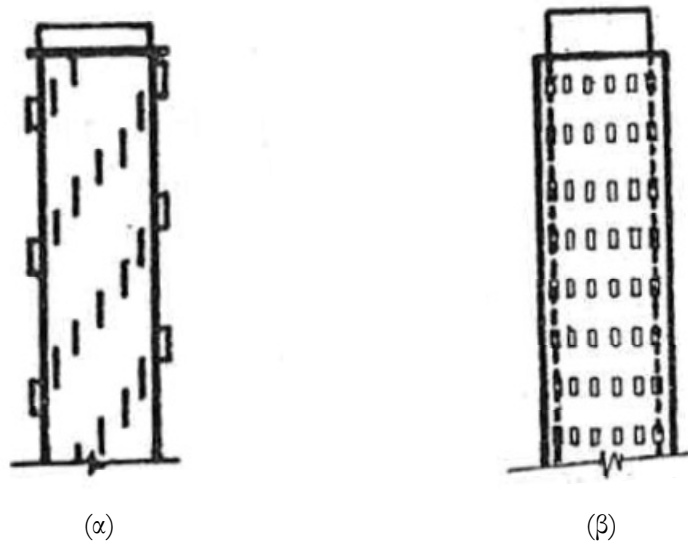
- προεξοχές στην επιφάνεια του κελύφους (strakes): προεξοχές με ορθογωνικά ελάσματα, ελικοειδής αεροτομές, σύρματα κ.α.
- Αεροδυναμικές συσκευές shrouds: διάτρητες κυλινδρικές συσκευές, κατακόρυφοι ράβδοι, λωρίδες από μεταλλικά ελάσματα κ.α
- Αεροδυναμικές συσκευές nearwake stabilisers: μεταλλικά πετάσματα.

Εκτεταμένη περιγραφή καθώς και πειραματική διερεύνηση της αποδοτικότητας των διαφόρων αεροδυναμικών συσκευών παρατίθενται από τον Zdravkovich (1980)^[6]. Ο μηχανισμός μείωσης του εύρους ταλάντωση εναπόκειται στην αλλοίωση της κυλινδρικής επιφάνειας πράγμα που δημιουργεί τυρβώδη ροή

κατάντη της πλευράς πρόπτωσης της ροής του ανέμου. Ως εκ τούτου η επιρροή της περιοδικής διάχυσης των δινών μειώνεται αφού η διάχυση των δινών πραγματοποιείται σε μακρύτερη απόσταση από τη καπνοδόχο.

Τα περύγια αποτελούνται συνήθως από ορθογωνικού σχήματος ελάσματα τοποθετημένα ανά απόσταση σε σπειροειδή διάταξη στο εξωτερικό του κελύφους της καπνοδόχου (**Σχήμα 8.2 (α)**). Ενδείκνυται να έχουν διαστάσεις $5D$ κατά το κατακόρυφο και πλάτος $0.1 \pm 0.12D$ (προεξοχή από το κέλυφος). Συνήθως τοποθετούνται στο άνω $1/3$ του ύψους της καπνοδόχου όπου η δύναμη λόγω της διάχυσης των δυνών είναι μεγαλύτερη.

Οι διάτρητες συσκευές shrouds αποτελούνται από ένα κύλινδρο μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτή της καπνοδόχου ο οποίος αποτελείται από ορθογωνικές ή κυκλικές οπές. Η συσκευή τοποθετείται στο πάνω μέρος της καπνοδόχου (**Σχήμα 8.2 (β)**). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι διάτρητες συσκευές shrouds με ορθογωνικές οπές έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τις αντίστοιχες με κυκλικές οπές [7][6]. Επίσης οι συσκευές αυτές είναι τέτοιας διαμέτρου ώστε να υπάρχει διάκενο ανάμεσα στη συσκευή και στο κέλυφος της καπνοδόχου. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι μια απόσταση μεταξύ της συσκευής και του κελύφους της καπνοδόχου ίση με $0.12D$ και λόγο ανοιγμάτων προς την επιφάνεια της συσκευής ίσο με $20 - 40\%$ επιφέρουν την μέγιστη μείωση της στροβιλώδους διέγερσης. [3].



Σχήμα 8.2: (α) Καπνοδόχος με ελάσματα σε σπειροειδή διάταξη (strakes) (β) Καπνοδόχος με αεροδυναμική συσκευή shrouds

Για την μείωση των εγκάρσιων ταλαντώσεων συνήθως τακτική είναι η χρήση αεροτομών σπειροειδούς μορφής (**Σχήμα 8.3**). Τα ελάσματα αυτά τοποθετούνται και πάλι στο άνω $1/3$ της καπνοδόχου, όπου παρουσιάζουν και την μεγαλύτερη αποδοτικότητα[5]. Τα ελάσματα έχουν πλάτος $0.030D \div 0.12D$. Για να επιτευχθεί μείωση του εύρους της εγκάρσιας ταλάντωσης της καπνοδόχου θα πρέπει να τοποθετηθούν τουλάχιστον 3 ελικοειδή ελάσματα[5]. Η αποδοτικότητά τους είναι μέγιστη για κλίση των ελασμάτων ίση με 40° [5] ή ίση με $4D - 5D$. [6]. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση της συσκευής περιορίζεται σε καπνοδόχους όπου ο

αριθμός Scruton είναι μικρότερος του 8, ενώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση καπνοδόχων εν σειρά διάταξη.[6]



Σχήμα 8.3: Καπνοδόχος με σπειροειδή αεροτομή για μείωση του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης.

Μεταλλικές καπνοδόχοι με σπειροειδή αεροτομή μπορούν να σχεδιάζονται με βάση τις επόμενες διατάξεις αρκεί ο αριθμός Strcuton να είναι μεγαλύτερος από 8 (Παράρτημα Ε του EN1991-1-4). Για τις απόλειπες αεροδυναμικές συσκευές θα πρέπει να προηγούνται πειραματικές διατάξεις σε αεροσύραγγες, αν δεν υπάρχουν περαιτέρω στοιχεία για την αποδοτικότητα τους

Στην περίπτωση που τοποθετηθούν ελικοειδή ελάσματα στο άνω μέρος της κατασκευής τότε η βασική τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή c_{lat} πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή a , ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$a = \left(1 - \frac{P_s}{h}\right)^3$$

όπου:

P_s είναι το μήκος του κελύφους που φέρει σπειροειδή ελάσματα

h είναι το συνολικό ύψος της καπνοδόχου

Η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο υπό κάποιους γεωμετρικούς περιορισμούς της ελικοειδούς διάταξης όπως αναφέρονται κάτωθι:

- Τουλάχιστον τρία σπειροειδή ελάσματα
- Το μήκος της σπειροειδούς διάταξης πρέπει να είναι $h_s = 4.5D \div 5.0D$
- Το πλάτος της σπειροειδούς διάταξης πρέπει να είναι $t = 0.10D \div 0.12D$
- Η σπειροειδούς διάταξη θα πρέπει να εκτίνεται πέραν του $0.3h$. Συνήθως έχει μήκος ίσο με $0.3h \div 0.5h$. Ωστόσο είναι αποδεκτό το κορυφαίο μέρος (μέχρι $1b$) της καπνοδόχου να μην διαθέτει ελικοειδή διάταξης αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του συντελεστή a .

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που ο υπολογισμός του εύρους ταλάντωσης γίνεται με την μέθοδο 1 που προτείνει το EN1991-1-4.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης των καπνοδόχων από τη χρήση των αεροδυναμικών συσκευών που αναφέρθηκαν συνοδεύεται και από μια ανεπιθύμητη αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης (λόγω της μηχανισμού δημιουργίας τυρβώδους πίσω από την καπνοδόχο). Η αύξηση αυτή κυμαίνεται περίπου στο 20-40%[6][5]. Συνεπώς, λόγω της επικείμενης αύξησης της οπισθέλκουσας δύναμης η καπνοδόχος εντείνεται περεταίρω και ειδικά στη βάση. Ως εκ τούτου, η απομείωση των ταλαντώσεων της καπνοδόχου μέσω αεροδυναμικών συσκευών, έχει ως αντίκτυπο την αύξηση του πάχους του κελύφους της κατασκευής (ειδικά πλησίον της βάσης). Παράλληλα γίνεται κατανοητό ότι σε μια τέτοια περίπτωση απαιτείται και αύξηση της αντοχής της θεμελίωσης της καπνοδόχου (διάμετρος θεμελίωσης, αγκύρια, τοπικές ενισχύσεις κ.α.). Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί ότι μερικές αεροδυναμικές συσκευές όπως η σπειροειδή αεροτομή παρουσιάζουν δυσκολίες στην κατασκευή τους. Συνεπώς με όλα τα πιο πάνω καθιστούν την χρήση αεροδυναμικών συσκευών για τη απομείωση των ταλαντώσεων, που προκαλούνται από τη διάχυση των δινών, πολλές φορές οικονομικά μη συμφέρων και για αυτό προτιμάται η εφαρμογή αποσβεστήρων[8].

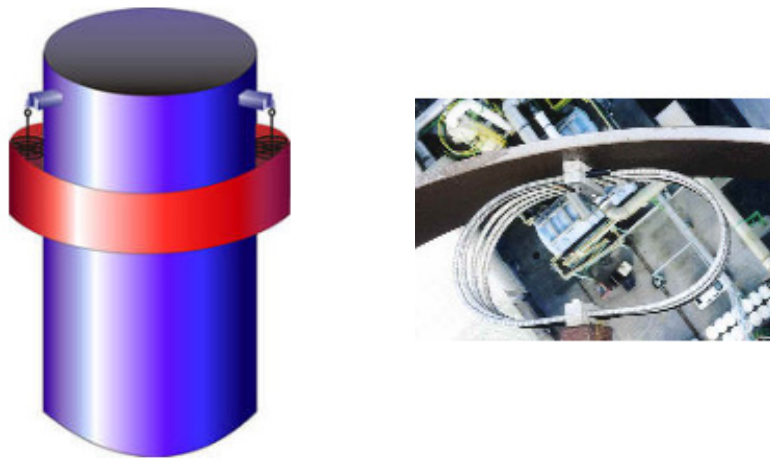
8.10.2. Αποσβεστήρες

Απόσβεση είναι ικανότητα της κατασκευής να απορροφά ενέργεια μετά από την επίδραση μια δύναμης. Οι μεταλλικές καπνοδόχοι λόγω του ότι είναι υψίκορμες και εύκαμπτες διαθέτουν μικρή απόσβεση και κατ'επέκταση η ικανότητα τους να απορροφήσουν ενέργεια, σε ενδεχόμενη ταλάντωση, είναι μειωμένη. Για τον λόγο αυτό τοποθετούνται μηχανικοί αποσβεστήρες.

Συνήθως για την αύξηση της απόσβεσης σε καπνοδόχους χρησιμοποιούνται αποσβεστήρες μάζας TMD's (Tuned Mass Dampers). Οι αποσβεστήρες αυτοί ενεργοποιούνται συνήθως για τιμές ιδιοσυχνοτήτων πλησίον με αυτής της κατασκευής. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αποσβεστήρων TMD's οι οποίοι περιγράφονται ακολούθως.

Ο αποσβεστήρας TMD's "τύπος 1" αποτελείται από ένα κυλινδρικό μεταλλικό δακτύλιο (ο οποίος αποτελεί και τη μάζα του αποσβεστήρα) ο οποίος κρεμάται από το κέλυφος της καπνοδόχου με καλώδια (**Σχήμα 8.4 (α)**). Ο δακτύλιος είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από αυτή του κελύφους της κατασκευής και συνδέεται εσωτερικά με το κέλυφος διαμέσου ειδικά διαμορφωμένου σχήματος ελατήρια (**Σχήμα 8.4 (β)**). Η ταλάντωση του μεταλλικού δακτυλίου ως απλό εκκρεμές και η ύπαρξη των ελατηρίων δημιουργούν δυνάμεις αντίθετες προς την ταλάντωση της καπνοδόχου, δημιουργώντας έτσι το μηχανισμό απόσβεσης. Αυτού του τύπου αποσβεστήρας αποτελείται από μόνο μηχανικά μέρη και δεν επηρεάζεται από υψηλές θερμοκρασίες.

Ο αποσβεστήρας TMD's "τύπος 2" είναι γνωστός και ως "roller box". Είναι κλειστού τύπου αποσβεστήρας με την μάζα του να ταλαντώνεται μέσα στο κυλινδρικό δοχείο του αποσβεστήρα (**Σχήμα 8.5**). Είναι γενικά κατάλληλος για μικρού τύπου καμινάδες και για μικρές επιταχύνσεις.



Σχήμα 8.4: (α) Αποσβεστήρας TMD's "τύπος 1" (β) ελατήριο σύνδεσης του μεταλλικού δακτύλιου με το κέλυφος της καπνοδόχου.

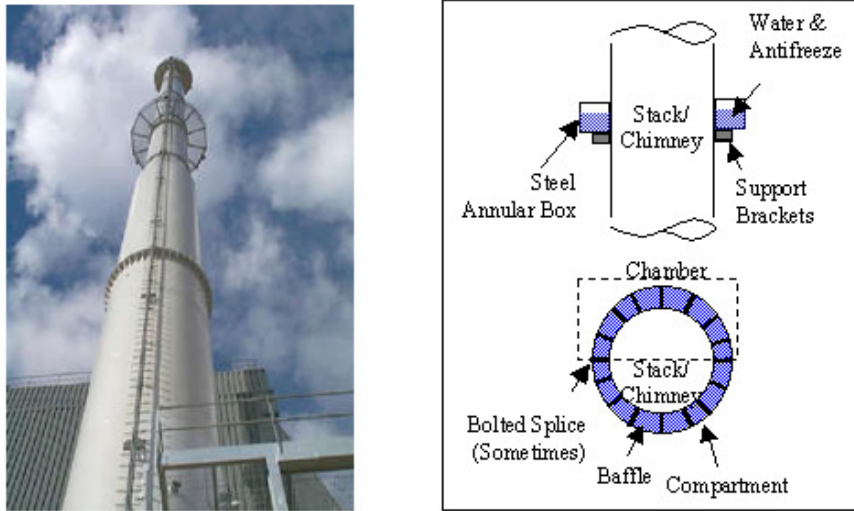
Παρουσιάζει το προτέρημα ότι είναι κλειστός και ότι δεν επηρεάζεται από υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης είναι οικονομικότερος από το αποσβεστήρα TMD's τύπου 1. Μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι απαιτεί κατάλληλη κατασκευή πρόσβασης για σκοπούς επιθεώρησης.



Σχήμα 8.5: Αποσβεστήρας TMD's "τύπος 2"

Για την αύξηση της απόσβεσης των καπνοδόχων μπορεί να χρησιμοποιηθούν και αποσβεστήρες TLD (Tuned Liquid Damper) οι οποίοι επιτυγχάνουν απόσβεση στην κατασκευή χρησιμοποιώντας ως ταλαντευμένη μάζα, υγρό. Το υγρό ευρίσκεται σε ένα δακτυλιοειδής μορφής δοχείο το οποίο τοποθετείται στην κορυφή της καπνοδόχου (**Σχήμα 8.6**). Το δοχείο είναι χωρισμένο στο εσωτερικό με διαφράγματα τα οποία σε συνάρτηση με την κίνηση του υγρού επιφέρουν την επιθυμητή δύναμη απόσβεσης. Τα διαφράγματα χρησιμοποιούνται ώστε το δοχείο να χωριστεί σε θαλάμους (baffle). Κάθε αποσβεστήρας θα πρέπει να αποτελείται από 2 τουλάχιστο θαλάμους. Αναλόγως του μεγέθους του χωρίζεται και σε κατάλληλο αριθμό

θαλάμων. Το δοχείο του αποσβεστήρα μπορεί να κατασκευαστεί σε διακριτά μέρη, και να συναρμολογηθεί με κοχλιωτές συνδέσεις.



Σχήμα 8.5: Αποσβεστήρας TLD



Σχήμα 8.6: (α) Αποσβεστήρας TLD's τοποθετημένος στο κέντρο ομάδας καπνοδόχων (β) Αποσβεστήρας TLD's τοποθετημένος στη άνω πλατφόρμα της καπνοδόχου

Ο αποσβεστήρας TLD μπορεί να τοποθετηθεί στην είδη υπάρχουσα πλατφόρμα στο άνω μέρος της καπνοδόχου ή και ακόμη στην περίπτωση ομάδας καπνοδόχων μπορεί να τοποθετηθεί στο κέντρο σε ειδική πλατφόρμα, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος απόσβεσης (Σχήμα 8.7).

Με της αύξηση της απόσβεσης δια μέσου των αποσβεστήρων μειώνεται η διάχυση των δινών κατάντη της επιφάνειας πρόπτωσης της ροής του ανέμου. Η επιρροή της αύξησης της απόσβεσης, στη μείωση της

εγκάρσιας ταλάντωσης, με τη χρήση αποσβεστήρων που περιγράφτηκαν μπορεί να διαφανεί άμεσα από την εξίσωση υπολογισμού του αριθμού Strucon:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$$

Έτσι από την εξίσωση είναι φανερό ότι ο αριθμός Strucon είναι ανάλογος της απόσβεσης της καπνοδόχου. Παράλληλα με βάση την μέθοδο 2, για τον υπολογισμό του μέγιστου εύρους ταλάντωσης, μπορεί να διαφανεί ότι ο αριθμός Sc είναι αντιστρόφως ανάλογος του μέγιστου εύρους ταλάντωσης. Εν τούτοις, με τα όσα περιγράφτηκαν είναι κατανοητό ότι με την προσθήκη κατάλληλου αποσβεστήρα μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση του εύρους ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης.

8.11. Βιβλιογραφία

- [1] EN 1993-3-2 Eurocode 3. Design of steel structures - Part 3.2: Towers, masts and chimney - Chimneys.
- [2] EN 1993-1-6 Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1.9: Fatigue.
- [3] EN 1991-1-4, Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-4: Wind Action.
- [4] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [5] Ishizaki H, Hara H, Shimada T. *The efficiency of helical strakes for suppression of vortex-excited oscillation of steel stacks*, Journal of Structural Engineering, 1984 Vol.6, October.
- [6] Zdravkovich, M.M. *Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7 (1981) 145.
- [7] Zdravkovich, M.M. *Effect of shrouds geometry on the pressure distributed around a circular cylinder*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (1972) 20 (4) 451-455.
- [8] <http://www.mecaenterprises.com/index.html>

9

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης και διαστασιολόγησης μεταλλικής καπνοδόχου σύμφωνα με τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων. Το παράδειγμα, αφορά την μελέτη ανάλυσης και διαστασιολόγησης της καπνοδόχου που θα ανεγερθεί στα πλαίσια κατασκευής αυτόνομου σταθμού παραγωγής (ΑΣΠ) της Δ.Ε.Η. στη Σύρο. Για την ανάλυση χρησιμοποιείται το λογισμικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ADINA, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής μη γραμμικών αναλύσεων. Αρχικά παρουσιάζονται οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη για τη μοντελοποίηση, δηλαδή γεωμετρία, συνθήκες στήριξης και υπολογισμοί φορτίσεων. Ακολουθεί η μεθοδολογία προσομοίωσης στο συγκεκριμένο λογισμικό και στο τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για τη μοντελοποίηση πραγματοποιούνται δύο στατικά προσομοιώματα, ένα ραβδωτό μοντέλο και ένα χωρικό μοντέλο πεπερασμένων κελυφωτών στοιχείων. Επίσης, σημειώνεται ότι αναπτύσσονται όλοι οι διαθέσιμοι μέθοδοι ελέγχου αστοχίας (μέσω τάσεων, αριθμητική ανάλυση), συνδυάζοντας γραμμικότητα και μη, υλικού και γεωμετρίας. Στο τέλος κάθε ανάλυσης παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις μεθόδους καθώς και συγκριτικά σχόλια.

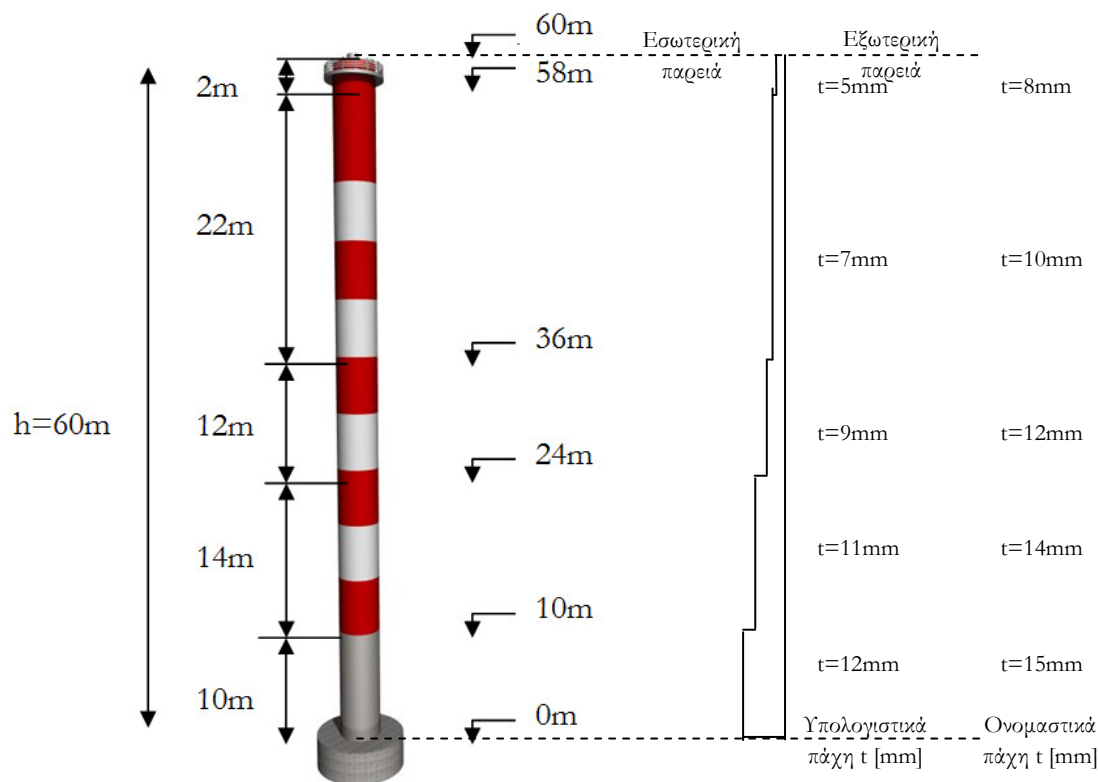
9.1. Περιγραφή καπνοδόχου

Η καπνοδόχος που θα ανεγερθεί στον ΑΣΠ Σύρου είναι τύπου πολλαπλών καπναγωγών, διπλού κελύφους ("mutineer double skin type"), εξωτερικής διαμέτρου 3.735m και ύψους 60m. Αποτελείται από χάλυβα CORTEN S355-A. Διαθέτει τρεις εσωτερικούς καπναγωγούς (αυλούς) με εσωτερική διάμετρο 1000 mm, 1273 mm και 1130 mm οι οποίοι μεταφέρουν τα καυσάερια μιας μονάδας CEGIELSKI, δύο μονάδων GMT-FIAT ισχύος 5.85 MW και δύο μονάδων GMT-FIAT ισχύος 3.5 MW, αντίστοιχα.

Οι καπναγωγοί είναι πλήρων συνεχών συγκολλήσεων ώστε να επιτυγχάνεται η στεγανότητά τους. Κάθε καπναγωγός είναι μονωμένος με ορυκτοβάμβακα 100kg/m³ και πάχους 100mm. Η προστασία της μόνωσης γίνεται με φύλλο αλουμινίου πάχους 1mm το οποίο συγκρατείται με δακτυλίδια ανά 1m.

Η καπνοδόχος απαρτίζεται από 5 μεμονωμένα τεμάχια κυλινδρικού κελύφους διαφορετικού ύψους και πάχους αλλά σταθερής εξωτερικής διαμέτρου. Οι αντίστοιχες διαστάσεις φαίνονται στο **Σχήμα 9.1**.

Η καπνοδόχος θα συναρμολογηθεί στο εργοτάξιο με την χρήση κατάλληλων κοχλιωτών συνδέσεων.



Σχήμα 9.1: Διαστάσεις καπνοδόχου

9.2. Προσομοίωση γεωμετρίας

Η καπνοδόχος αποτελείται από κατακόρυφο μεταλλικό κυλινδρικό κελυφωτό φορέα ύψους 60m. Το πάχος του κελύφους της καπνοδόχου μειώνεται καθ' ύψος. Διαφορετικά πάχη χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας, όπως φαίνεται στο

Σχήμα 9.1. Η καπνοδόχος αποτελείται από πέντε μεμονωμένα κυλινδρικά μέρη, κάθε ένα σταθερού πάχους, τα οποία θα συναρμολογηθούν μεταξύ τους μέσω κοχλιωτών συνδέσεων. Θεωρείται ότι οι συνδέσεις θα λάβουν μελέτη ικανοτικού σχεδιασμού ώστε να αποφευχθεί η αστοχία τους πριν την αστοχία του κελύφους. Στη θέση των ενώσεων ορίζεται διαφραγματική λειτουργία. Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 8**, θα πρέπει στον κελυφωτό φορέα της κατασκευής, να ληφθεί υπόψη απομείωση της διατομής τους λόγω διάβρωσης. Για την συγκεκριμένη καπνοδόχο γίνεται η υπόθεση ότι θα γίνεται συχνή συντήρηση με βαφή (σε 1mm/χρόνο). Ως εκ τούτου, στην ανάλυση λαμβάνεται συνολική απομείωση διατομής 3mm. Στον **Πίνακα 9.1** παρουσιάζεται το πάχος της διατομής καθ' ύψος πριν και μετά την απομείωση λόγω διάβρωσης. Για το σκοπό της μοντελοποίησης γίνεται η παραδοχή ότι η διάμετρος μοντέλου παραμένει σταθερή (3.735mm) και μεταβάλλεται μόνο το πάχος.

Πίνακας 9.1: Αρχικό και απομειωμένο πάχος κατασκευής καθ' ύψος

Τεμάχιο	Μήκος (m)	Συνολικό μήκος (m)	Αρχικό πάχος(mm)	Απομειωμένο πάχος (mm)	Εσωτερική Διάμετρος μοντέλου (mm)
1	10.00	10.00	15	12	3723
2	14.00	24.00	14	11	3724
3	12.00	36.00	12	9	3726
4	22.00	58.00	10	7	3728
5	2.00	60.00	8	5	3730

9.2.1. Συνθήκες στήριξης

Η κατασκευή θεμελιώνεται με φρεατοπάσσαλο κυκλικής κάτοψης. Δεν θα εξοπλιστεί με καλώδια αντιστήριξης. Ως εκ τούτου, στη βάση του φορέα θεωρούνται συνθήκες στήριξης πλήρους πάκτωσης για τις μεταφορικές μετατοπίσεις. Θεωρείται όμως ελευθερία στρωφών κατά τις διευθύνσεις X και Y.

9.2.2. Υλικό κατασκευής

Ως υλικό θεωρείται ότι θα χρησιμοποιηθεί χάλυβας CORTEN S355. Στους **Πίνακες 9.2.** και **9.3.** παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε θερμοκρασίες 25° C και 50° C, αντίστοιχα. Θεωρείται

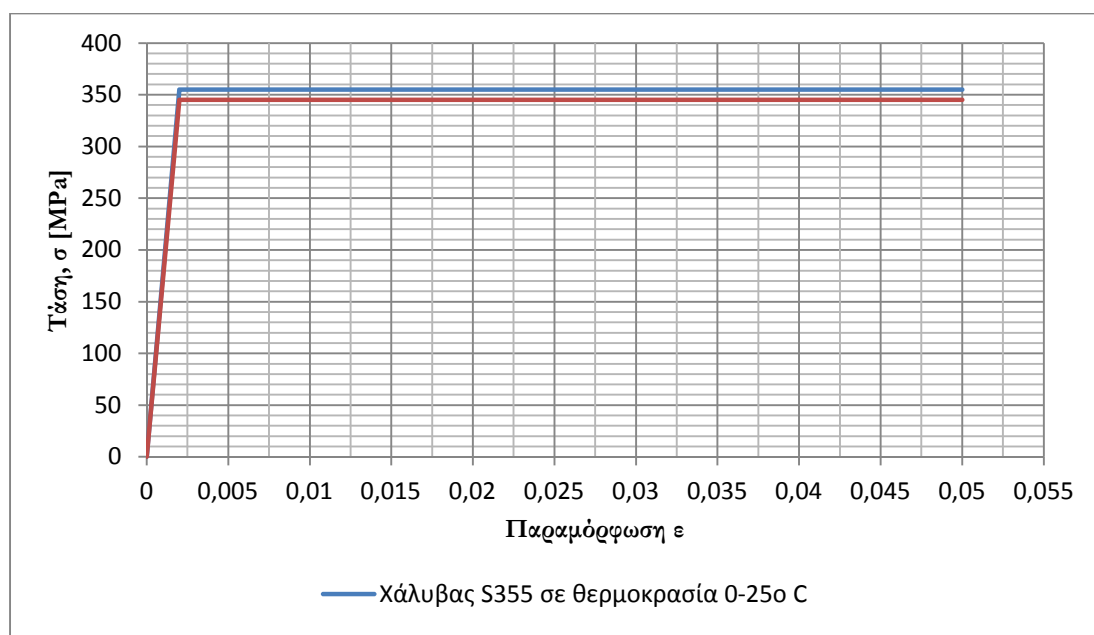
ότι κατά την διάρκεια λειτουργίας της καπνοδόχους ο κελυφωτός φορέας θα είναι εκτεθειμένος σε θερμοκρασίες μέχρι και 50° C. Συνεπώς για το σκοπό της ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη τα απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα για θερμοκρασία 50° C.

Πίνακας 9.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 25° C

Μηχανικά χαρακτηριστικά	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες μέτρησης
Μέτρο Ελαστικότητας	E	199.00	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.33	-
Πυκνότητα	ρ	7850.00	Kg/m ³
Όριο Διαρροής	f_y	355.00	MPa
Όριο Θραύσης	f_u	470	MPa

Πίνακας 9.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 50° C

Μηχανικά χαρακτηριστικά	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες μέτρησης
Μέτρο Ελαστικότητας	E	170.00	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.33	-
Πυκνότητα	ρ	7850.00	Kg/m ³
Όριο Διαρροής	f_y	345.00	MPa
Όριο Θραύσης	f_u	-	MPa



Σχήμα 9.2: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης υλικού

Η καπνοδόχος θα τύχει αναλύσεων θεωρώντας γραμμικότητα και μη γραμμικότητα υλικού. Στην πρώτη περίπτωση το υλικό θα έχει τις ιδιότητες που παρουσιάζονται στους πίνακες που προηγήθηκαν. Στη περίπτωση μη γραμμικότητας υλικού θεωρείται ότι η συμπεριφορά του υλικού θα περιγραφεί από ένα δι-γραμμικό μοντέλο τάσεων παραμορφώσεων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9.2**.

9.3. Υπολογισμός Φορτίων

9.3.1. Μόνιμα φορτία

Ως μόνιμα φορτία στη καπνοδόχο θεωρείται το ίδιο βάρος του κελυφωτού φορέα (χωρίς την επίδραση της διάβρωσης) καθώς και το βάρος των μη φερόντων στοιχείων ήτοι, επενδύσεις, μονώσεις, καπναγωγοί κ.α. Για τους σκοπούς του παραδείγματος λαμβάνεται υπόψη μόνο το ίδιο βάρος του κελυφωτού φορέα. Αυτό μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$W_s = 2 \cdot G \cdot \pi \cdot r \cdot \sum_{i=1}^5 t_i \cdot l_i$$

όπου:

- G το ίδιο βάρος του χάλυβα κατασκευής
- r η εξωτερική ακτίνα της καπνοδόχου
- t_i, l_i το πάχος και το μήκος, αντίστοιχα, του i τμήματος

Επομένως:

$$W_s = 2G \cdot \pi \cdot r(15mm \cdot 10 + 14mm \cdot 14m + 12mm \cdot 12m + 10mm \cdot 22m + 8mm \cdot 2m) = 668.724kN$$

Για τους σκοπούς του παραδείγματος δεν λαμβάνεται υπόψη οποιοδήποτε πρόσθετο βάρος επένδυσης ή το βάρος των Liners, συνεπώς:

$$W_a = 0kN$$

Άρα το συνολικό βάρος της καπνοδόχου είναι:

$$W_t = W_s + W_a = 668.724kN$$

Ο λόγος βάρους φέρουσας κατασκευής προς το συνολικό βάρος είναι:

$$\frac{W_s}{W_t} = 1$$

9.3.2. Φορτία ανέμου

9.3.2.1. Υπολογισμός πίεσης ανέμου

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4 (παρ. 4.2) η συνολική πίεση ανέμου η οποία δρα κάθετα στην εξωτερική επιφάνεια κατασκευής, όπως οι καπνοδόχοι, μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών της προηγούμενης εξίσωσης γίνονται με βάση τις διατάξεις του EN1991-1-4 και περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύουν οι παραδοχές που περιγράφονται στην συνέχεια.

Η καπνοδόχος σχεδιάζεται για ταχύτητα ανέμου 200km/h (=55.6 m/s) αντί των 33 km/h που προτείνει το EN1991-1-4 για νησιά. Συνεπώς η βασική ταχύτητας ανέμου είναι:

$$v_b = 55.6 \text{ m/s} \cdot 1 \cdot 1 = 55.6 \text{ m/s}$$

Η περιοχή ανέγερση της καπνοδόχου θεωρείται κατηγορίας III. Όπως μπορεί να διαφανεθεί από τους **Πίνακες 9.4-9.9** οι τιμές του αριθμού Re είναι της τάξης $\times 10^7$. Συνεπώς από τον **Πίνακα 4.3** προσδιορίζονται οι ακόλουθες τιμές:

- α_{\min} η θέση της ελάχιστης πίεσης = 75°
- $\alpha_{p0,\min}$ η τιμή του ελάχιστου συντελεστή πίεσης = 1.5
- α_A η θέση του διαχωρισμού της ροής = 105°
- $\alpha_{p0,h}$ ο συντελεστής της βασικής πίεσης

Για το κέλυφος της καπνοδόχου θεωρείται ισοδύναμη τραχύτητα $k=0.05$ (Στιλνός χάλυβας, από τον **Πίνακα 4.4**). Επομένως αφού:

$$\frac{k}{b} = 1.339 \cdot 10^{-5} < 5 \cdot 10^{-4}$$

οι τιμές του συντελεστή $c_{p,0}$ μπορούν να ληφθούν από το **Σχήμα 4.11**.

Για να υπολογιστεί η τελική πίεση ανέμου, θα πρέπει οι εξωτερικές πιέσεις να πολλαπλασιαστούν με τον δυναμικό συντελεστή ώστε να συμπεριληφθεί με αυτό τον τρόπο η δυναμική συμπεριφορά του ανέμου. Ο υπολογισμός του δυναμικού συντελεστή παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Όλοι οι υπολογισμοί για την εύρεση της εξωτερικής πίεσης ανέμου στην καπνοδόχο σε διακριτά σημεία καθ' ύψος παρουσιάζονται στους **Πίνακες 9.4-9.9**.

Πίνακας 9.4: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 5m

Υψος αναφοράς 5m

$z=$	5	Υψόμετρο αναφοράς
$c_{rz}=$	0,61	Συντελεστής τραχύτητας
$c_{oz}=$	1,00	Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης
$kI=$	1,00	Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους
$c_0=$	1,00	Συντελεστής στροβιλισμού

Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m ²	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{p0}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m ²
0	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	2,475
10	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	2,104
20	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	0,990
31	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-0,742
55	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-1,237
60	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-3,093
75	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-3,712
80	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-3,678
90	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-3,077
100	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-2,672
105	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-1,445
180	33,692	0,355	2,475	62,925	1,567E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-1,445

Πίνακας 9.5: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 10m

<i>Υψος αναφοράς 10m</i>												
$z=$	10	<i>Υψόμετρο αναφοράς</i>										
$c_{tz}=$	0,76	<i>Συντελεστής τραχύτητας</i>										
$c_{0z}=$	1,00	<i>Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης</i>										
$kI=$	1,00	<i>Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους</i>										
$c_0=$	1,00	<i>Συντελεστής στροβιλισμού</i>										
Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m ²	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m ²
0	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	3,302
10	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	2,807
20	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	1,321
31	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-0,991
55	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-1,651
60	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-4,128
75	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-4,953
80	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-4,908
90	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-4,106
100	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-3,566
105	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-1,929
180	41,993	0,285	3,302	72,689	1,810E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-1,929

Πίνακας 9.6: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 24m

Υψος αναφοράς 24m												
$z=$	24	Υψόμετρο αναφοράς										
$c_{tz}=$	0,94	Συντελεστής τραχύτητας										
$c_{0z}=$	1,00	Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης										
$kI=$	1,00	Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους										
$c_0=$	1,00	Συντελεστής στροβιλισμού										
Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m ²	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{p0}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m ²
0	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	4,471
10	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	3,800
20	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	1,788
31	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-1,341
55	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-2,235
60	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-5,588
75	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-6,706
80	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-6,644
90	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-5,558
100	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-4,828
105	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-2,611
180	52,478	0,228	4,471	84,576	2,106E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-2,611

Πίνακας 9.7: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 36m

Υψος αναφοράς 36m		
$z=$	36	Υψόμετρο αναφοράς
$c_{tz}=$	1,03	Συντελεστής τραχύτητας
$c_{0z}=$	1,00	Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης
$kI=$	1,00	Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους
$c_0=$	1,00	Συντελεστής στροβιλισμού

Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m^2	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{p0}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m^2
0	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	5,058
10	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	4,300
20	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	2,023
31	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-1,517
55	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-2,529
60	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-6,323
75	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-7,587
80	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-7,518
90	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-6,289
100	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-5,462
105	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-2,954
180	57,333	0,209	5,058	89,963	2,240E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-2,954

Πίνακας 9.8: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 58m

Υψος αναφοράς 58m												
$z=$	58	Υψόμετρο αναφοράς										
$c_{rz}=$	1,13	Συντελεστής τραχύτητας										
$c_{oz}=$	1,00	Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης										
$kI=$	1,00	Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους										
$c_0=$	1,00	Συντελεστής στροβιλισμού										
Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m^2	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{p0}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m^2
0	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	5,787
10	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	4,919
20	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	2,315
31	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-1,736
55	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-2,894
60	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-7,234
75	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-8,681
80	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-8,601
90	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-7,195
100	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-6,249
105	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-3,380
180	63,045	0,190	5,787	96,227	2,396E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-3,380

Πίνακας 9.9: Υπολογισμός ανεμοπίεσης, υψόμετρο αναφοράς 60m**Υψος αναφοράς 60m**

$z=$	60	Υψόμετρο αναφοράς
$c_{rz}=$	1,14	Συντελεστής τραχύτητας
$c_{oz}=$	1,00	Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης
$kI=$	1,00	Συντελεστής αναγλύφου του εδάφους
$c_0=$	1,00	Συντελεστής στροβιλισμού

Γωνία αναφοράς (°)	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m^2	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	α_{min} (°)	α_A (°)	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{p0}]	ψ_λ	Συντελεστής επίδρασης άκρων ψλα	Συντελεστής εξωτερικής πίεσης [c_{pe}]	Πίεσης αιχμής [w] kN/m^2
0	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	1,000	0,730	1,000	1,000	5,841
10	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	0,850	0,730	1,000	0,850	4,965
20	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	0,400	0,730	1,000	0,400	2,336
31	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	0,000	0,730	1,000	0,000	0,000
40	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-0,300	0,730	1,000	-0,300	-1,752
55	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-0,500	0,730	1,000	-0,500	-2,920
60	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-1,250	0,730	1,000	-1,250	-7,301
75	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-1,500	0,730	1,000	-1,500	-8,761
80	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-1,500	0,730	0,991	-1,486	-8,680
90	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-1,350	0,730	0,921	-1,243	-7,261
100	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-1,350	0,730	0,800	-1,080	-6,307
105	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-3,411
180	63,451	0,189	5,841	96,670	2,407E+07	75	105	-0,800	0,730	0,730	-0,584	-3,411

9.3.2.2. Υπολογισμός δύναμης ανέμου

Το EN1991-4 δίνει την δυνατότητα υπολογισμού συνολικής δύναμης ανέμου (δύναμη ανά μέτρο μήκους) αντί της κατανομής της ανεμοπίεσης στην περιφέρεια της καπνοδόχου. Η μέθοδος αυτή είναι προσεγγιστική και συνήθως ενδείκνυται στη περίπτωση ανάλυσης μέσω στατικού προσομοιώματος με ραβδωτά στοιχεία. Η συνολική δύναμη ανέμου, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, δίνεται από τη σχέση:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A$$

Οι συντελεστές c_f και $q_p(z_e)$ υπολογίζονται από τις σχέσεις που διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός του δυναμικού συντελεστή $c_s c_d$. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με βάση τις λεπτομερείς διαδικασίες (Παραρτήματα Β και C του EN1991-1-4) ή με την προσεγγιστική μέθοδο υπό τις προϋποθέσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Για τον υπολογισμό του συντελεστή απαιτείται ο προσδιορισμός του κατασκευαστικού λογαριθμικού απόσβεσης δ_s .

Το θεμελιώδες κατασκευαστικό λογαριθμικό ποσοστό μείωσης της απόσβεσης δίνεται από τον **Πίνακα 4.7**. Για συγκολλημένες μεταλλικές καπνοδόχους με μια στρώση επένδυσης και με εξωτερική θερμική μόνωση ισχύει:

$$\delta_s = 0.020 \quad \text{για } h/b < 18\text{m}$$

Επειδή όμως ο δυναμικός συντελεστής εκτιμώμενος από το **Σχήμα 4.14** λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1.1, θα πρέπει να υπολογιστεί με βάση τη αναλυτική μέθοδο. Στα **Παραρτήματα Β και C** του EN 1991-1-4 προτείνονται αντίστοιχα δύο αναλυτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό του δυναμικού συντελεστή. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης και για σκοπούς σύγκρισης, ο δυναμικός συντελεστής υπολογίζεται και με τις δύο μεθόδους.

Ο δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)}$$

z_e είναι το ύψος αναφοράς

k_p είναι ο συντελεστής αιχμής ορισμένος ως ο λόγος της μέγιστης τιμής του κυμαινόμενου μέρους της απόκλισης προς τη τυπική του απόκλιση

I_v είναι η ένταση στροβιλισμού

B^2 είναι ο συντελεστής βασικής απόκλισης, που λαμβάνει υπόψη την έλλειψη πλήρους συσχέτισης των πιέσεων στην επιφάνεια της κατασκευής

R^2 είναι ο συντελεστής απόκλισης συντονισμού που λαμβάνει υπόψη στροβιλισμό με συντονισμό με την ιδιομορφή ταλάντωσης.

- Διαδικασία 1 για τον προσδιορισμό του συνδυασμένου δυναμικού συντελεστή $c_{s,d}$

Ο συντελεστής βασικής απόκρισης υπολογίζεται από την σχέση:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_e)} \right)^{0.63}}$$

όπου:

$b = 3.735\text{m}$ είναι το πλάτος της κατασκευής. Για κυκλικές κατασκευές αντιστοιχεί στην διάμετρο.

$h = 60\text{m}$ είναι το ύψος της κατασκευής

$L(z_e)$ είναι το μήκος στροβιλισμού 1 σε ύψος αναφοράς z_e .

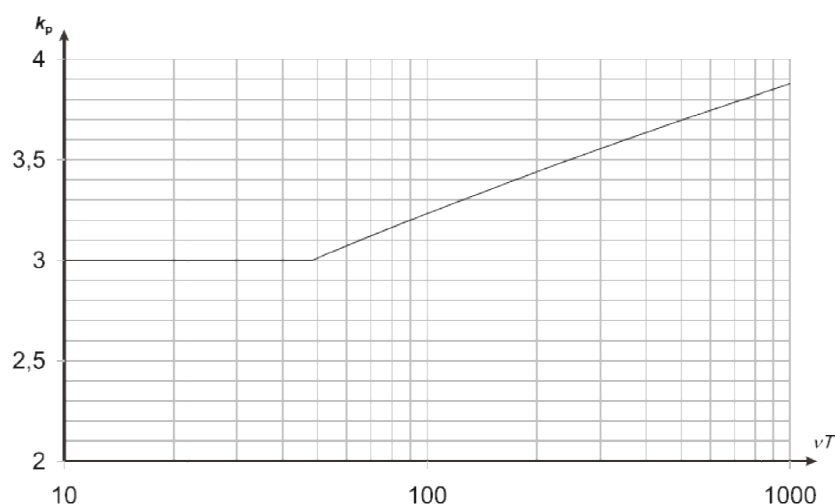
Το μήκος στροβιλισμού $L(z_e)$ αντιπροσωπεύει το μέγεθος της μέσης ανεμορριπής για φυσικούς ανέμους. Για ύψη z μικρότερα των 200 m το μήκος στροβιλισμού μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t} \right)^a \quad \text{για } z > z_{\min}$$

$$L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{για } z < z_{\min}$$

Με ύψος αναφοράς $z_t = 200\text{m}$, μήκος αναφοράς $L_t = 300\text{m}$, και $a = 0.67 + 0.05 \ln(z_0)$, όπου το μήκος τραχύτητας z_0 σε m.

Το EN1991-4 δίνει την δυνατότητα να το B^2 να λαμβάνεται συντηρητικά ίσο με μονάδας.



Σχήμα 9.3: Συντελεστής αιχμής k_p

Ο συντελεστής αιχμής k_p ορισμένος ως ο λόγος της μέγιστης τιμής του κυμαινόμενου μέρους της απόκρισης προς τη τυπική του απόκλιση, λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$k_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \\ 3 \end{array} \right.$$

και φαίνεται στο **Σχήμα 9.3**,

όπου:

T είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο υπολογίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου, $T_a=600$ δευτερόλεπτα

v είναι η συχνότητα που δίνεται από την εξίσωση:

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad v > 0.08 \text{ Hz}$$

Όπου $n_{1,x}$ η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

Ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού R^2 , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_e, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$

όπου:

δ είναι η λογαριθμική μείωση της απόσβεσης

S_L είναι η αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$S_L(z, n) = \frac{6.8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10.2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}}$$

Όπου $f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)}$ είναι η αδιάστατη συχνότητα υπολογιζόμενη από την $n=n_{1,x}$, η ιδιοσυχνότητα της

κατασκευής σε Hz, από τη μέση ταχύτητα $v_m(z)$ και το μήκος στροβιλισμού $L(z)$.

R_h, R_b είναι οι αεροδυναμικές συναρτήσεις επαγωγής για μια ιδιομορφή και υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad R_h = 1 \text{ για } \eta_h = 0$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) \quad R_b = 1 \text{ για } \eta_b = 0$$

με:

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot h}{L(z_e)} \cdot f_L(z_e, n_{1,x}) \quad \text{και} \quad \eta_b = \frac{4.6 \cdot b}{L(z_e)} \cdot f_L(z_e, n_{1,x})$$

Στη συνέχεια ακολουθεί ο αριθμητικός υπολογισμός του δυναμικού συντελεστή για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

Για κατηγορία εδάφους III ισχύει:

$$z_0=0.3\text{m και } z_{\min}=5\text{m}$$

Για την καπνοδόχο ισχύει:

$$b=3.735\text{m, διάμετρος.}$$

$$h=60\text{m, ύψος.}$$

Οπότε το μήκος στροβιλισμού προκύπτει:

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t} \right)^a = 300 \cdot \left(\frac{36}{200} \right)^{0.61} = 105.435\text{m}$$

όπου:

$$a=0.67+0.05 \ln(0.3)=0.61$$

$$z_t = 200\text{m, } L_t=300\text{m και } z=0.6 \cdot h=36\text{m}$$

Ο συντελεστής τραχύτητας καθώς και η μέση ταχύτητα ανέμου λαμβάνονται από προηγούμενους υπολογισμούς, για υψόμετρο αναφοράς 36m.:

$$c_r(z) = 0.921$$

$$v_m(z) = 51.213\text{m/s}$$

Ο συντελεστής βασικής απόκρισης είναι:

$$B^2 = \frac{1}{1+0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_e)} \right)^{0.63}} = \frac{1}{1+0.9 \cdot \left(\frac{3.735\text{m}+60\text{m}}{105.435\text{m}} \right)^{0.63}} = 0.604$$

Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής υπολογίζεται **και** προκύπτει:

$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{\text{eff}}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} [\text{Hz}] \quad (\text{F.3})$$

$$\mu\epsilon \quad h_{\text{eff}} = h_1 + \frac{h_2}{3} \quad (\text{F.4})$$

όπου:

b είναι η διάμετρος της καπνοδόχου στο άνω άκρο της [m]

h_{eff} είναι το ενεργό ύψος της καπνοδόχου [m], τα h_1 και h_2 δίνονται στο Σχήμα F.1 του EN1991-1-4

W_s είναι το βάρος των κατασκευαστικών στοιχείων που συνεισφέρουν στη δυσκαμψία της καπνοδόχου

W_t είναι το συνολικό βάρος της καπνοδόχου

ε_1 είναι ίσο με 1000 για καπνοδόχους από χάλυβα και 700 για καπνοδόχους από σκυρόδεμα και τοιχοποιία

Τα συγκεκριμένο παράδειγμα ανήκει στην πρώτη περίπτωση, όπου $h_2=0$. Επομένως:

$$h_{eff} = h_1 = h = 60m$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει:

$$n_1 = \frac{1000 \cdot 3.735}{60^2} \cdot \sqrt{1} = 1.038 [Hz]$$

Συνεπώς η αδιάστατη συχνότητα προκύπτει:

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} = \frac{1.038 Hz \cdot 105.435 m}{51.213 m/s} = 2.137$$

Και η αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας:

$$S_L(z, n) = \frac{6.8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10.2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}} = \frac{6.8 \cdot 2.137}{(1 + 10.2 \cdot 2.137)^{5/3}} = 0.079$$

Επιπλέον:

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot h}{L(z_e)} \cdot f_L(z_e, n_{1,x}) = \frac{4.6 \cdot 60m}{105.435m} \cdot 2.137 = 5.594$$

$$\eta_b = \frac{4.6 \cdot b}{L(z_e)} \cdot f_L(z_e, n_{1,x}) = \frac{4.6 \cdot 3.735m}{105.435} \cdot 2.137 = 0.348$$

Οι αεροδυναμικές συναρτήσεις επαγωγής για μια ιδιομορφή δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{5.594} - \frac{1}{2 \cdot 5.594^2} (1 - e^{-2 \cdot 5.594}) = 0.163$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{0.348} - \frac{1}{2 \cdot 0.348^2} (1 - e^{-2 \cdot 0.348}) = 0.803$$

Η λογαριθμική μείωση της αεροδυναμικής απόσβεσης για τη θεμελιώδη ιδιομορφή είναι:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$$

όπου το $\delta_s=0.02$ προέκυψε από προηγούμενους υπολογισμούς.

Η λογαριθμική μείωση της αεροδυναμικής απόσβεσης δ_a για τη θεμελιώδη καμπτική ιδιομορφή ταλαντώσεων στη διεύθυνση του ανέμου, μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot v_m(z_e)}{2 \cdot n_1 \cdot \mu_e} \quad (4.49)$$

όπου:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

$\psi_\lambda=0.73$ από προηγούμενους υπολογισμούς και

$$cf_0 = 1.2 + \frac{0.18 \cdot \log(10 \cdot k / b)}{1 + 0.4 \cdot \log(\text{Re} / 10^6)} = 1.2 + \frac{0.18 \cdot \log(10 \cdot 0.05 \text{mm} / 3.735 \text{m})}{1 + 0.4 \cdot \log(2.00 \times 10^7 / 10^6)} = 0.741$$

άρα

$$c_f = 0.741 \cdot 0.73 = 0.541$$

μ_e είναι η ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας της κατασκευής. Προσεγγιστικά υπολογίζεται ως:

$$\mu_e = \frac{W_s}{h} = \frac{668.724 \text{kN}}{60 \text{m}} = 11.145 \text{kN} / \text{m}$$

Επομένως:

$$\delta_a = \frac{0.546 \cdot 0.0125 \text{kN} / \text{m}^3 \cdot 57.333 \text{m} / \text{s}}{2 \cdot 1.038 \text{Hz} \cdot 11.145 \text{kN} / \text{m}} = 0.063$$

Συνεπώς:

$$\delta = 0.02 + 0.063 + 0 = 0.083$$

οπότε ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού προκύπτει:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_e, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0.083} \cdot 0.079 \cdot 0.163 \cdot 0.803 = 0.619$$

Έτσι η συχνότητα προκύπτει:

$$v = 1.038 \text{Hz} \sqrt{\frac{0.619}{0.604 + 0.619}} = 0.739 \text{Hz} > 0,08$$

άρα ο συντελεστής αιχμής είναι:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(0.739 \text{Hz} \cdot 600 \text{s})} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0.739 \text{Hz} \cdot 600 \text{s})}} = 3.663 > 3.0$$

Η ένταση στροβιλισμού (από προηγούμενους υπολογισμούς) για $h=36\text{m}$, είναι:

$$I_v = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} = 0.209$$

Εν τούτοις ο δυναμικός συντελεστής προκύπτει:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} = \frac{1 + 2 \cdot 3.668 \cdot 0.209 \cdot \sqrt{0.604 + 0.674}}{1 + 7 \cdot 0.209} = 1.094$$

- Διαδικασία 2 για τον προσδιορισμό του συνδυασμένου δυναμικού συντελεστή $c_s c_d$

Ο συντελεστής βασικής απόκρισης υπολογίζεται από την σχέση:

$$B^2 = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \sqrt{\left(\frac{b}{L(z_e)}\right)^2 + \left(\frac{h}{L(z_e)}\right)^2 + \left(\frac{b}{L(z_e)} \cdot \frac{h}{L(z_e)}\right)^2}}$$

για

$b=3.735\text{m}$, $h=60\text{m}$ και $L(z_e)=105.435\text{m}$ (όπως έχουν οριστεί προηγουμένως).

$$B^2 = 0.539$$

Ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού R^2 , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_e, n_{1,x}) \cdot K_s(n_{1,x})$$

όπου:

δ , S_L και F_L όπως έχουν προσδιοριστεί στη προηγούμενη διαδικασία.

K_s είναι ο μειωτικός συντελεστής μεγέθους και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K_s(n) = \frac{1}{1 + \sqrt{(G_y \cdot \varphi_y)^2 + (G_z \cdot \varphi_z)^2 + \left(\frac{2}{\pi} \cdot G_y \cdot \varphi_y \cdot G_z \cdot \varphi_z\right)^2}}$$

$$\varphi_y = \frac{c_y \cdot b \cdot n}{v_m(z_e)} \qquad \varphi_z = \frac{c_z \cdot h \cdot n}{v_m(z_e)}$$

Σημειώνεται ότι οι σταθερές G_y και G_z εξαρτώνται από τη μεταβολή της ιδιομορφής κατά μήκος του οριζώντιου άξονα y και του κατακόρυφου άξονα z , αντίστοιχα. Οι σταθερές c_y και c_z είναι και οι δύο είναι ίσες με 11.5.

Στη σημείωση 2 του **Πίνακα C.1** (EN1991-1-4) αναφέρεται ότι για καπνοδόχους με ομοιόμορφη μεταβολή οριζόντιας ιδιομορφής και παραβολική μεταβολή κατακόρυφης ιδιομορφής ισχύουν:

$$G_y=1/2 \text{ και } G_z=5/18$$

Συνεπώς,

$$\varphi_y = 0.778, \varphi_z = 12.492 \text{ και}$$

$$K_s(n) = 0.22$$

Άρα:

$$R^2 = 0.837$$

Ο συντελεστής αιχμής υπολογίζεται όπως στη διαδικασία 1, και είναι ίσος με:

$$k_p = 3.688$$

Έτσι, ο δυναμικός συντελεστής προκύπτει:

$$c_s c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_e)} = \frac{1+2 \cdot 3.688 \cdot 0.209 \cdot \sqrt{0.539+0.837}}{1+7 \cdot 0.209} = 1.140$$

Συνεπώς αφού ο δυναμικός συντελεστής υπολογισμένος και από τις δύο διαδικασίες είναι μικρότερος του 1.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού της συνολικής δύναμη ανέμου. Για σκοπούς του παραδείγματος συντηρητικά λαμβάνεται υπόψη η μεγαλύτερη τιμή του δυναμικού συντελεστή, δηλαδή:

$$c_s c_d = 1.14$$

Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα υπολογισμού δυναμικού συντελεστή $c_s c_d$ με τις διαδικασίες 1 και 2 που προτείνει το EN 1991-1-4, Παράρτημα C.

Διαδικασία (EN 1991-1-4, Παράρτημα Β και C)	Δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$
1	1.094
2	1.140

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού συντελεστή δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Φυσικά, η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων περιορίζεται στο 4%, συνεπώς και οι δύο διαδικασίες μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες.

Άρα, η αρχική εξίσωση που δίνει τη δύναμη ανέμου γίνεται:

$$F_w = 1.14 \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Η δύναμη ανέμου, όπως ειπώθηκε αρχικά, υπολογίζεται ανά διαστήματα 5m. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 9.11**.

Πίνακας 9.11: Υπολογισμός συνολικής δύναμης ανέμου στην καπνοδόχο.

Ύψος αναφοράς (m)	c_{rz}	c_{0z}	kI	c_0	Μέση ταχύτητα ανέμου [v_m]	Στροβιλισμός ανέμου [I_{vz}]	Πίεση ταχύτητας αιχμής [$q_{p(z)}$] kN/m^2	Ταχύτητα αιχμής [v_{ze}] m/s	Αριθμός Re	ψ_λ	c_{n0}	c_f	$c_s c_d$	q_{ref} (kN/m^2)	c_e	Fw (kN/m^2)	Fw (kN/m)
5,00	0,61	1,00	1,00	1,00	33,69	0,36	2,47	62,93	1,57E+07	0,72	0,73	0,52	1,14	1,93	1,28	1,48	5,53
10,00	0,76	1,00	1,00	1,00	41,99	0,29	3,30	72,69	1,81E+07	0,72	0,74	0,53	1,14	1,93	1,71	2,00	7,45
15,00	0,84	1,00	1,00	1,00	46,85	0,26	3,83	78,24	1,95E+07	0,72	0,74	0,53	1,14	1,93	1,98	2,32	8,68
20,00	0,90	1,00	1,00	1,00	50,29	0,24	4,22	82,13	2,05E+07	0,72	0,74	0,53	1,14	1,93	2,18	2,57	9,60
25,00	0,95	1,00	1,00	1,00	52,97	0,23	4,53	85,12	2,12E+07	0,72	0,74	0,54	1,14	1,93	2,34	2,77	10,34
30,00	0,99	1,00	1,00	1,00	55,15	0,22	4,79	87,55	2,18E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,48	2,93	10,95
35,00	1,03	1,00	1,00	1,00	57,00	0,21	5,02	89,59	2,23E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,60	3,08	11,49
40,00	1,05	1,00	1,00	1,00	58,60	0,20	5,22	91,35	2,27E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,70	3,20	11,96
45,00	1,08	1,00	1,00	1,00	60,01	0,20	5,39	92,90	2,31E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,79	3,32	12,39
50,00	1,10	1,00	1,00	1,00	61,27	0,20	5,56	94,29	2,35E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,88	3,42	12,77
55,00	1,12	1,00	1,00	1,00	62,41	0,19	5,70	95,53	2,38E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	2,95	3,51	13,12
60,00	1,14	1,00	1,00	1,00	63,45	0,19	5,84	96,67	2,41E+07	0,72	0,75	0,54	1,14	1,93	3,02	3,60	13,45

9.3.2.3. Στροβιλώδης διέγερση και αεροελαστική αστάθεια

Με βάση τις απαιτήσεις του EN1993-3-2 η καπνοδόχος θα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο επηρεάζεται από την επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης και αν μπορούν να υπάρξουν προβλήματα αεροελαστικής αστάθειας. Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάστηκαν τα δύο κριτήρια προτείνει το EN1991-1-4 (Παράρτημα Ε). Τα κριτήρια έχουν ως εξής:

3. Η επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης θα πρέπει να ερευνάνται όταν ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση της κατασκευής εγκάρσια προς τον άνεμο, λαμβανόμενες και οι δύο σε επίπεδο κάθετα προς τον άνεμο, υπερβαίνει το 6.
4. Ενώ η επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης αμελείται όταν:

$$v_{crit,i} > 1,25 \cdot v_m$$

όπου:

$v_{crit,i}$ είναι η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για την i ιδιομορφή, όπως καθορίζεται σε ακόλουθη παράγραφο

v_m είναι η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα δεκαλέπτου του ανέμου, όπως ορίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο (4.1.2), στη διατομή που συμβαίνει στροβιλώδης διέγερση.

Αν γίνει η υπόθεση ότι $y/b < 0.1$ τότε η διατομή όπου θεωρείται ότι δρα η δύναμη λόγω στροβιλώδους διέγερσης είναι:

$$L_j = b \cdot 6 = 22.41m$$

άρα:

$$z_{v_m} = 60m - 21.4m / 2 \cong 48m$$

έτσι,

$$v_m(48) = 60.778m/s$$

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση της κατασκευής εγκάρσια προς τον άνεμο είναι:

$$\frac{h}{b} = \frac{60m}{3.735} = 16.06 > 6$$

Άρα με βάση την πρώτη σημείωση για την καπνοδόχο θα πρέπει να ερευνηθεί η επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης.

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για καμπτική ταλάντωση της ιδιομορφής i ορίζεται ως η ταχύτητα ανέμου, στην οποία η συχνότητα της στροβιλώδους διέγερσης είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ή του στοιχείου της και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}$$

όπου:

b είναι το πλάτος αναφοράς της διατομής

$n_{i,y}$ είναι η ιδιοσυχνότητα της θεωρούμενης καμπτικής ιδιομορφής i για ταλάντωση κάθετα στην διεύθυνση του ανέμου.

St είναι ο αριθμός Strouhal.

Η ιδιοσυχνότητα $n_{i,y}$ της θεωρούμενης καμπτικής ιδιομορφής έχει υπολογιστεί προηγουμένως και είναι:

$$n_1 = \frac{1000 \cdot 3.735}{60^2} \cdot \sqrt{1} = 1.038 [\text{Hz}]$$

Από Πίνακα E.1 του EN1991-1-4 ο αριθμός Strouhal για κυκλική διατομή είναι

$$St = 0.18$$

Άρα αφού:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} = \frac{3.735 \text{m} \cdot 1.038 \text{Hz}}{0.18} = 21.539 \text{m/s}$$

$$\frac{v_{crit,i}}{v_m} = \frac{21.539 \text{m/s}}{60.778 \text{m/s}} = 0.354 < 1.25$$

κατά συνέπεια χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος για καμπτικές ταλαντώσεις από στροβιλώδη διέγερση

Η κρίσιμη ταχύτητα ανέμου για ελλειπτική ταλάντωση της ιδιομορφής i κυλινδρικού κελύφους ορίζεται ως η ταχύτητα ανέμου, στην οποία το διπλάσιο της στροβιλώδους διέγερσης είναι ίσο με την ιδιοσυχνότητα της ελλειπτικής ιδιομορφής i του κυλινδρικού κελύφους και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,0}}{2 \cdot St} \quad (4.50)$$

$n_{i,0}$ είναι η ιδιοσυχνότητα ελλειπτικής ιδιομορφής i του κελύφους.

Η θεμελιώδης ελλειπτική ιδιοσυχνότητα $n_{1,0}$ ενός επιμέρους κυλινδρικού κελύφους χωρίς ενισχυτικούς δακτυλίους, δίνεται από την σχέση:

$$n_{1,0} = 0.492 \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot E}{\mu_s \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^4}}$$

όπου:

E είναι το μέτρο ελαστικότητας σε $[\text{N/m}^2]$

t είναι το πάχος του κελύφους σε $[\text{m}]$

ν είναι ο λόγος Poisson

μ_s είναι η μάζα του κελύφους ανά μονάδα επιφάνειας σε $[\text{kg/m}^3]$

b είναι η διάμετρος του κελύφους σε $[\text{m}]$

Ε θεωρείται το απομειωμένο λόγω θερμοκρασιών λειτουργίας, ενώ γίνεται η θεώρηση μέσου πάχους κελύφους ίσο με $t=9.1\text{mm}$ (απομειωμένο λόγω διάβρωσης).

$$\mu_s = \frac{668.724\text{kN} \cdot 100}{60\text{m} \cdot \pi \cdot 3.735} = 94.99 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Συνεπώς:

$$n_{1,0} = 0.492 \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot E}{\mu_s \cdot (1-\nu^2) \cdot b^4}} = 0.492 \cdot \sqrt{\frac{(9.1\text{mm})^3 \cdot 1.4 \times 10^{11} \text{N/m}^2}{94.99\text{kg/m}^2 \cdot (1-0.3^2) \cdot (3.735\text{m})^4}} = 1.432\text{Hz}$$

Επομένως:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,0}}{2 \cdot St} = \frac{3.735\text{m} \cdot 1.432\text{Hz}}{2 \cdot 0.18} = 14.899\text{m/s}$$

Έτσι,

$$\frac{v_{crit,i}}{v_m} = \frac{14.899\text{m/s}}{60.778\text{m/s}} = 0.245 < 1.25$$

Κατά συνέπεια χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος για ελλειπτικές ταλαντώσεις από στροβιλώδη διέγερση Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, τα κριτήρια στην προκειμένη περίπτωση δεν πληρούνται. Ως εκ τούτου απαιτείται η καπνοδόχος να ελεγχθεί έναντι στροβιλώδους διέγερσης και αεροελαστικής αστάθειας.

Η επίδραση των ταλαντώσεων που προκαλούνται από στροβιλώδη διέγερση υπολογίζεται από την επίδραση της αδρανειακής δύναμης ανά μονάδα χρόνου $F_w(s)$, η οποία δρα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου στη θέση s της κατασκευής και δίνεται από τη σχέση:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot Y_{F,\max}$$

όπου:

$m(s)$ είναι η ταλαντούμενη μάζα της κατασκευής ανά μονάδα μήκους [kg/m]

$n_{i,y}$ είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής

$\Phi_{i,s}(s)$ είναι η ιδιομορφή της κατασκευής κανονικοποιημένη στη μονάδα, στο σημείο με τη μέγιστη μετατόπιση

$Y_{F,\max}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση στο χρόνο του σημείου με $\Phi_{i,s}(s)$ ίσο με 1.

Για τον υπολογισμό του εύρους της εγκάρσιας ταλάντωσης προτείνονται από το EN1991-1-4 (Παράρτημα E) δύο μέθοδοι. Το εθνικό προσάρτημα δεν καθορίζει ποια από τις δύο μεθόδους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Στο ίδιο παράρτημα (παρ. E.1.5.3) δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με την χρήση των μεθόδων. Το EN1991-1-4 σημειώνει ότι οι δύο μέθοδοι δεν μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε σύγκριση. Στη παρούσα μελέτη ο υπολογισμός του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης γίνεται και με τις δύο μεθόδους, με σκοπό να διαφανεί οποιαδήποτε πιθανή απόκλιση τους.

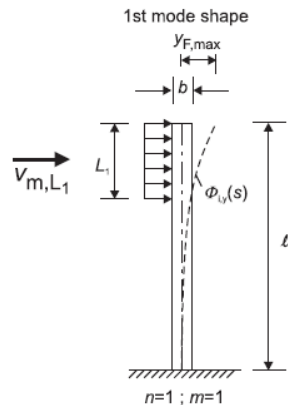
- **Μέθοδος 1 για τον υπολογισμό του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης**

Έστω ότι θεωρείται:

$\frac{y_F}{b} < 0.1$, όπου y_F είναι το εύρος ταλάντωσης. Το ενεργό μήκος συσχέτισης προκύπτει από τον **Πίνακα E.4**

(EN 1991-1-4):

$$\frac{L_j}{b} = 6 \Rightarrow L_j = 6 \cdot b = 6 \cdot 3.735 = 22.40m$$



Σχήμα 9.4: Παράδειγμα εφαρμογής του μήκους συσχέτισης για την πρώτη ιδιομορφή.

Η τιμή της μέσης ταχύτητας του ανέμου στη στάθμη $z=60 - 22.41/2=48.8m$ είναι:

$$v_{mL,j} = 60.98m/s$$

Ο λόγος της κρίσιμης ταχύτητας ανέμου είναι:

$$\frac{v_{crit,j}}{v_{mL,j}} = \frac{21.593}{60.98} = 0.354 < 0.83$$

Ο συντελεστής αεροδυναμικής διέγερσης, σύμφωνα με τον Πίνακα E.3, είναι:

$$c_{lat} = c_{lat,o}$$

Όπου $c_{lat,o}$ είναι η βασική τιμή του c_{lat} , όπως προκύπτει από το Σχήμα E.2 για κυκλικούς κυλίνδρους, συναρτήσει του αριθμού Reynolds Re οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re(v_{crit,j}) = \frac{b \cdot v_{(z_e)crit,j}}{v} = \frac{3.735m \cdot 60.98m/s}{15 \cdot 10^6} = 5.377 \cdot 10^6$$

Επομένως για $Re=5.377 \times 10^6$ προκύπτει $c_{lat,o}=0.2$. Δηλαδή:

$$c_{lat} = c_{lat,o} = 0.2$$

Το μέγιστο εύρος ταλάντωσης $\max y_F$, στη κρίσιμη ταχύτητα του ανέμου $v_{crit,i}$, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat}$$

όπου:

St είναι ο αριθμός Strouhal

Sc είναι ο αριθμός Struton

K_w είναι ο συντελεστής ενεργούς μήκους συσχέτισης

K είναι ο συντελεστής ιδιομορφής

Για το παράδειγμα ισχύουν:

$$St = 0.18 \text{ από Πίνακα E.1}$$

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$$

όπου,

m_{i,e}: η ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα μήκους, που προσδιορίζεται από την σχέση:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds}$$

όπου,

Φ₁(z): η πρώτη ιδιομορφή

Γίνεται η θεώρηση ότι είναι σταθερή η κατανομή της μάζας καθ' ύψος:

$$m_{i,e} = \frac{W_t}{g \cdot L} = \frac{668.742 \text{ kN}}{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 60 \text{ m}} = 1.137 \frac{\text{kN} \cdot s^2}{m^2}$$

Επομένως ο αριθμός Struton είναι:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} = 2.607$$

Οι συντελεστές K και K_w προκύπτουν από τον Πίνακα E.5:

$$K = 0.13$$

$$K_w = 3 \cdot \frac{Lj/b}{\lambda} \left[1 - \frac{Lj/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{Lj/b}{\lambda} \right)^2 \right] \text{ όπου } \lambda = L/b$$

$$K_w = 3 \cdot \frac{Lj/b}{\lambda} \left[1 - \frac{Lj/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{Lj/b}{\lambda} \right)^2 \right] = 0.754$$

Επομένως:

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K \cdot K_W \cdot c_{lat} = \frac{1}{0.18^2} \cdot \frac{1}{1.831} \cdot 0.13 \cdot 0.754 \cdot 0.2 = 0.33$$

Δηλαδή η υπόθεση που έγινε αρχικά ότι $\frac{y_F}{b} < 0.1$ δεν ισχύει. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για $\frac{y_F}{b} = 0.33$. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση. Τα αποτελέσματα των επαναλήψεων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9.12**.

Όπως μπορεί να φανεί από τον **Πίνακα 9.12** υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τιμή του:

$$\frac{y_F}{b} = 0.269$$

Συνεπώς η μέγιστη τιμή της εγκάρσιας ταλάντωσης προκύπτει:

$$y_{Fj} = 0.269 \cdot b = 0.269 \cdot 3.735m = 1.006m$$

- **Μέθοδος 2 για τον υπολογισμό του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης**

Σε αυτή την περίπτωση το εύρος εγκάρσιας ταλάντωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$y_{\max} = \sigma_y \cdot k_p$$

όπου:

k_p είναι ο συντελεστής αιχμής

σ_y είναι η τυπική απόκλιση της μετατόπισης που υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4 \cdot \pi} - Ka \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_y}{b \cdot a_L}\right)^2\right)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot b^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{b}{h}}$$

όπου:

C_c είναι η αεροδυναμική σταθερά εξαρτώμενη από τη μορφή της διατομής και για κυκλικό κύλινδρο εξαρτώμενη επίσης από τον αριθμό Reynolds Re στη κρίσιμη ταχύτητα ανέμου $Re(v_{crit,j}) = 5.377 \cdot 10^6$ (από προηγούμενους υπολογισμούς) από τον Πίνακα E.6 και για $Re \geq 10^6$, $C_c=0.01$.

Ka είναι η παράμετρος αεροδυναμικής απόσβεσης και υπολογίζεται από τον Πίνακα E.6 (EN1991-1-4) Για $Re \geq 10^6$ $Ka=1$.

a_L είναι το κανονικοποιημένο οριακό εύρος το οποίο δίνει βέλος κατασκευών με πολύ χαμηλή απόσβεση. Για $Re \geq 10^6$ $a_L=0.4$.

St είναι ο αριθμός Strouhal, $St=0.18$ (Πίνακας E.1)

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα κάτω από συνθήκες στροβιλώδους διέγερσης. Προτεινόμενη τιμή $\rho=1.25\text{kg/m}^3$.

Πίνακας 9. 12: Αποτελέσματα επαναλήψεων για τον υπολογισμό του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης με βάση τη μέθοδο 1.

Επανάληψη	y_F/b	L_j (m)	z (m)	v_{mL_j} (m/s)	v_{criti} (m/s)	v_{mL_j}/v_{criti}	Re	c_{lat}	me (kN·s ² /m ²)	Sc	St	K	Kw	y_F/b
-	<0,1	22,400	48,800	60,980	21,59	0,354	5,38E+06	0,20	1,137	2,61	0,18	0,13	0,754	0,232
1	0,232	28,329	45,836	60,226	21,59	0,359	5,38E+06	0,20	1,137	2,61	0,18	0,13	0,853	0,263
2	0,263	29,695	45,152	60,046	21,59	0,360	5,38E+06	0,20	1,137	2,61	0,18	0,13	0,871	0,268
3	0,268	29,946	45,027	60,013	21,59	0,360	5,38E+06	0,20	1,137	2,61	0,18	0,13	0,874	0,269
4	0,269	29,990	45,005	60,006	21,59	0,360	5,38E+06	0,20	1,137	2,61	0,18	0,13	0,875	0,269

m είναι η ενεργή μάζα ανά μονάδα μήκους

$$m_e = \frac{W_t}{L} = \frac{502.924kN}{60m} = 8.382 \frac{kN}{m}$$

h,b είναι το ύψος και το πλάτος της κατασκευής.

Η λύση της προηγούμενης εξίσωσης είναι:

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}$$

όπου οι σταθερές c_1 και c_2 δίνονται από:

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S_c}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right) = 0.063 \quad c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h} = 1.456 \times 10^{-5}$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει:

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} = 0.252$$

άρα:

$$\sigma_y = 1.874m$$

ο συντελεστής αιχμής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_p = \sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{1.2}{\tan\left(0.75 \cdot \frac{S_c}{(4 \cdot \pi \cdot K_a)}\right)}\right)$$

Ωστόσο, η προτεινόμενη σχέση παρουσιάζει προβλήματα τα οποία επιβεβαιώνονται από τους Zdravkovich M.M. και Kawecki J. (2007)^[6]. Για το λόγο αυτό ο συντελεστής αιχμής υπολογίζεται από τη σχέση 7.4.14 που προτείνουν οι Dyrbye και Hansen (1996)^[2]:

$$k_p = \sqrt{2} \cdot \left(1 + 1.2 \cdot \tan^{-1}\left(0.75 \cdot \left(\frac{S_c}{S_a}\right)^4\right)\right)$$

όπου:

$$S_a = \frac{2 \cdot \delta_a \cdot m_e}{\rho \cdot b^2} = 8.578$$

($\delta_a=0.086$, από προηγούμενους υπολογισμούς)

άρα:

$$k_p = 1.418$$

και

$$y_{\max} = 1.874m \cdot 1.418 = 2.671m$$

Τιμές του συντελεστή αιχμής k_p συναρτήσει του λόγου αεροδυναμικής απόσβεσης δίνονται στο **Σχήμα 9.4**. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι ο CICIND^[1] προτείνει τις ακόλουθες τιμές του συντελεστή αιχμής k_p :

$$k_p = 1.5 \text{ όταν } \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} > 0.04$$

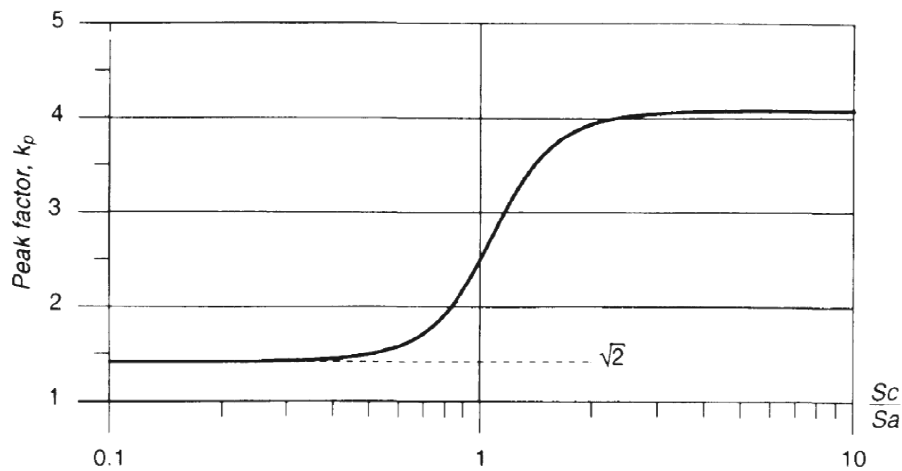
$$k_p = 4 \text{ όταν } \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} < 0.04$$

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα $\sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}} = 0.51 > 0.04$ άρα

$$k_p = 1.5$$

και

$$y_{\max} = 1.874m \cdot 1.5 = 2.811m$$



Σχήμα 9.5: Τιμές του συντελεστή αιχμής k_p συναρτήσει του λόγου αεροδυναμικής απόσβεσης

Στη συνέχεια παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του εύρους ταλάντωσης στην κορυφή της καπνοδόχου και από τις τρεις μεθόδους.

Πίνακας 9. 13: Μέγιστο εύρος ταλάντωσης στην κορυφή της καπνοδόχου βάσει των μεθόδων 1 και 2 που προτείνει το EN 1991-1-4 και του CICIND- Mode Code

	EN 1991-1-4, Μέθοδος 1	EN 1991-1-4, Μέθοδος 2	CICIND
y_{Fmax}	1.006m	2.671m	2.811m

Όπως μπορεί να διαφανεί από τα αποτελέσματα αλλά και σύμφωνα με τους Zdravkovich M.M. και Kawecki J. (2007)^[6] η μέθοδος 1 που προτείνει το EN1991-1-4 υποεκτιμά κατά πολύ το μέγιστο εύρος ταλάντωσης (Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι της τάξης του 62%). Από τους ίδιους προτείνεται ο υπολογισμός του εύρους ταλάντωσης σύμφωνα με την μέθοδο 2. Συνεπώς:

$$y_{\max} = 2.671m$$

Η θεμελιώδης ιδιομορφή $\Phi_1(z)$ καπνοδόχου στηριζόμενη στο έδαφος εκτιμάται από την εξίσωση:

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta$$

Όπου για μεταλλικούς καπνοδόχους ισχύει $\zeta=2$ σύμφωνα με την Παράγραφο F.3.(EN1991-1-4)

Όπως αναφέρθηκε η δράση της στροβιλώδους διέγερσης εκφράζεται μέσω της δύναμης αδρανείας ανά μονάδα μήκους, $F_{i,j}$, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου στο σημείο j της κατασκευής, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,\max}$$

Όπου $m(s)$ η ταλαντούμενη μάζα.

Για τον υπολογισμό των παραπάνω δυνάμεων θεωρείται ότι η μάζα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη καθ' ύψος. Επομένως:

$$m(s) = \frac{W_t}{g \cdot h} = \frac{668.724kN}{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 60m} = 1.137 \frac{kN \cdot s^2}{m^2}$$

Πίνακας 9.14: Δυνάμεις και πιέσεις στροβιλώδους διέγερσης F_w

$z(m)$	$\Phi_1(z)$	m_e ($kN \cdot s^2/m^2$)	$max y_F$	$n_{i,y}$ (Hz)	$F_{i,j}$ (kN/m)	L_{arc} (m)	$F_{i,j}$ (kN/m^2)
2,5	0,002	1,137	2,671	1,038	0,22	2,440	0,09
10,0	0,028	1,137	2,671	1,038	3,59	2,440	1,47
24,0	0,160	1,137	2,671	1,038	20,67	2,440	8,47
36,0	0,360	1,137	2,671	1,038	46,50	2,440	19,06
47,0	0,614	1,137	2,671	1,038	79,27	2,440	32,49
58,0	0,934	1,137	2,671	1,038	120,71	2,440	49,47
60,0	1,000	1,137	2,671	1,038	129,18	2,440	52,94

Στον **Πίνακα 9.14** παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της αδρανειακής δύναμης F_w , ανά μονάδα μήκους της κατασκευής, στις θέσης όπου γίνεται αλλαγή του πάχους του κελύφους της καπνοδόχου (αυτό υποβοηθά την διαδικασία επιβολής των φορτίων στο λογισμικό ADINA όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα). Παράλληλα η δύναμη ανάγεται στην επιφάνεια του κελύφους ως ομοιόμορφη κατανεμημένη πίεση η οποία δρα στην περιοχή όπου εμφανίζονται εγκάρσια στην ροή του ανέμου αρνητικές πιέσεις. Το μήκος υπολογίζεται ως:

$$\mu^\circ = 105^\circ - 30^\circ = 75^\circ$$

(30° : θέση μηδενικής πίεσης, 105° : θέση διαχωρισμού της ροής για $Re=x10^7$)

Έτσι το μήκος τόξου προκύπτει:

$$L_{arc} = \frac{\pi \cdot d}{180^\circ} \mu^\circ = \frac{\pi \cdot \frac{3.735m}{2}}{180^\circ} 75^\circ = 2.44m$$

9.3.3. Σεισμικές δράσεις

Στη ενότητα αυτή υπολογίζονται οι σεισμικές δράσεις όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5**. Στη συνέχεια υπολογίζεται το φάσμα σχεδιασμού από το οποίο θα υπολογιστούν οι σεισμικές δράσεις για γραμμική ελαστική ανάλυση.

Οι οριζόντιες συνιστώσες σχεδιασμού καθορίζονται από το φάσμα σχεδιασμού, του οποίου οι τεταγμένες για κάθε ιδιοπερίοδο T [sec] υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad (5. 8)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (5. 9)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5. 10)$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C T_D}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases} \quad (5. 11)$$

όπου:

$S_d(T)$ είναι το φάσμα σχεδιασμού

T είναι η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού συστήματος μιας ελευθερίας κίνησης

a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε εδάφους κατηγορίας Α ($a_g = \gamma_1 a_{gR}$)

T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος

S είναι ο συντελεστής εδάφους

η είναι ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης, με τιμή αναφοράς $\eta=1$ για 5% ιξώδη απόσβεση

q είναι συντελεστής συμπεριφοράς (5.3.5)

β είναι ο συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού (συνιστώμενη τιμή $\beta=0,2$)

Σύμφωνα με το νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδος, η Σύρος βρίσκεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I $\alpha=0.16$, άρα η μέγιστη επιτάχυνση εδάφους είναι $A=0.16g$.

Η κατασκευή της καπνοδόχου θεωρείται υψίστης σπουδαιότητας, συνεπώς ο συντελεστής σπουδαιότητας λαμβάνει την τιμή $\gamma_I=1.4$.

Ο βασικός συντελεστής συμπεριφοράς q_0 θεωρείται ίσος με 1.5. Δεν υπάρχουν οποιεσδήποτε εκκεντρότητες στο κέλυφος. Συνεπώς ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι:

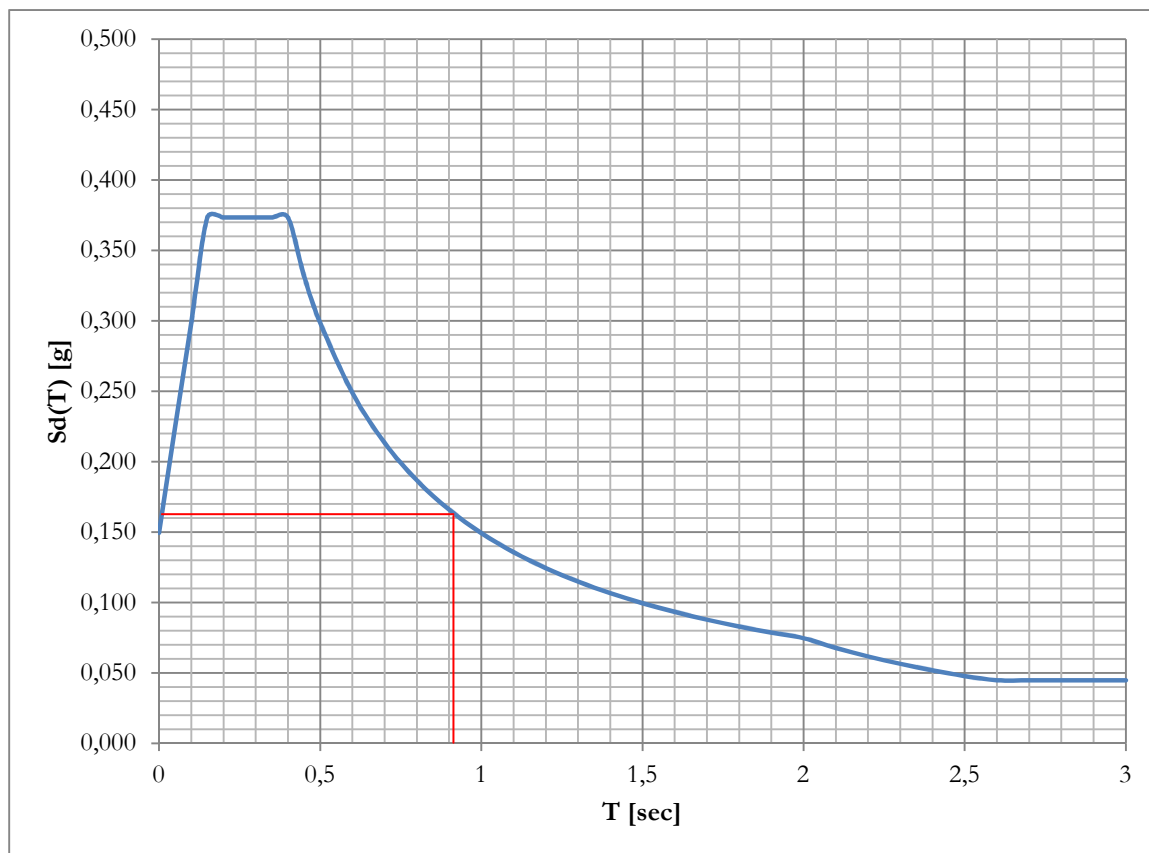
$$q = q_0 \cdot k_r \geq 1,5$$

$$q = 1.5 \cdot 1.0 = 1.5$$

Επίσης θεωρείται κατηγορία εδάφους A, άρα ισχύουν:

Εδαφικός Τύπος	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0

Στο **Σχήμα 9.5** παρουσιάζεται το φάσμα σχεδιασμού, τύπου 1.



Σχήμα 9.6: Φάσματα σχεδιασμού για ελαστική ανάλυση, για τις κατηγορίες εδάφους A, απόσβεση 5%, ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I και συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I=1.4$, κατά EN1998-1.

Για λόγους συμμετρίας της κατασκευής θα πραγματοποιηθεί μόνο ο ακόλουθος σεισμικός συνδυασμός:

$$1.0G + 0.3Q + 1.0E_x + 0.3E_y$$

Για σκοπούς απλοποίησης η ανάλυση υπό σεισμικά φορτία θα πραγματοποιηθεί, στις περιπτώσεις γραμμικής ανάλυσης, με ισοδύναμη στατική μέθοδο. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται οι συντελεστές συμμετοχής των μαζών ώστε εκ των υστέρων να υπολογιστεί η αδρανειακή δύναμη λόγω της σεισμικής διέγερσης. Στο **Πίνακα 9.15** παρουσιάζονται τα ποσοστά συμμετοχής των πρώτων 6 ιδιομορφών (για το στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους).

Πίνακας 9.15: Ποσοστά συμμετοχής μάζας για τις πρώτες έξι ιδιομορφές της καπνοδόχου

Ιδιομορφή	Συντελεστής συμμετοχής μάζας, διεύθυνση X	Συντελεστής συμμετοχής μάζας, διεύθυνση Y	Συντελεστής συμμετοχής μάζας, διεύθυνση Z
1	4,71E+05	-2,18E+05	5,22E-02
2	2,18E+05	4,71E+05	2,10E-02
3	2,85E+05	-1,67E+05	3,36E-01
4	-1,67E+05	-2,85E+05	1,19E-01
5	1,97E-01	1,58E-01	1,76E-01
6	-1,51E-01	3,26E-01	3,44E-01

Όπως φαίνεται οι πρώτες δύο ιδιομορφές είναι ίσες και λαμβάνουν υπόψη το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας και στις διευθύνσεις X και Y. Έτσι λαμβάνεται ως "δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα" αυτή της πρώτης ιδιομορφής με συχνότητα ίση με:

$$F = 1.087 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{F} = 0.920 \text{ sec}$$

Συνεπώς από το φάσμα σχεδιασμού υπολογίζεται η επιτάχυνση στην κατασκευή ίση με:

$$Sd(T = 0.920) = 0.16g$$

Έτσι για κάθε διαφορετικού πάχους διατομή της κατασκευής υπολογίζεται η αδρανειακή δύναμη που υποτίθεται ότι δρα στην κατασκευή, ανά μονάδα μήκους από τη σχέση:

$$F_{Ed_i} = 2 \cdot G \cdot \pi \cdot r \cdot t_i \cdot Sd(T = 0.920)$$

όπου:

G είναι το βάρος του υλικού σε kg/m³

r είναι η ακτίνα

t_i είναι το πάχος του κελύφους

οι αντίστοιχοι υπολογισμοί δύνονται στον **Πίνακα 9.16**.

Σημειώνεται ότι η αδρανειακή αυτή δύναμη θα ασκηθεί και στις δύο διευθύνσεις X και Y με τα ποσοστά όπως ορίζονται από τον σεισμικό συνδυασμό. Στο στατικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κελύφους η

αδρανειακή δύναμη ανάγεται σε πίεση για αποφυγή των φαινομένων συγκεντρώσεων τάσεων στα στοιχεία κελύφους.

Πίνακας 9.16: Αδρανειακές δυνάμεις στη κατασκευή λόγω σεισμού.

Ομάδα στοιχείων	Μήκος (m)	Πάχος (mm)	Αδρανειακή Δύναμη kN/m	Αδρανειακή Δύναμη kN/m ² (Διεύθυνση X)*	Αδρανειακή Δύναμη kN/m ³ (Διεύθυνση Y)*
1	10	15	2,21	1,13	0,91
2	14	14	2,06	1,05	0,85
3	12	9	1,33	0,68	0,54
4	22	7	1,03	0,53	0,42
5	2	5	0,74	0,38	0,30

*Το πλάτος της επιφάνειας όπου ανάχθηκε η δύναμη αντιστοιχεί στο πλάτος όπου έχουν εφαρμοστεί τα φορτία ανέμου. ($L_x=1.956\text{m}$, $L_y=2.44\text{m}$).

Στη περίπτωση μη- γραμμικής ανάλυσης δεν είναι δυνατή η χρήση της ισοδύναμης στατικής ή της φασματικής μεθόδου για τον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται η χρήση επιταχυνσιογραφήματων καταγραμμένων από τις πιο κοντινές περιοχές. Σημειώνεται ότι τα επιταχυνσιογραφήματα θα πρέπει να αναχθούν στη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού που είναι στην συγκεκριμένη περίπτωση 0.16g.

9.3.4. Θερμοκρασιακές δράσεις

Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 8** η επιρροή των θερμοκρασιακών μεταβολών λαμβάνει χώρα με την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του δομικού χάλυβα. Για σκοπούς του παραδείγματος θεωρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να λαμβάνει το κέλυφος είναι 50° C. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα S355 σε αυτή την θερμοκρασία φαίνονται στον **Πίνακα 9.17**.

Πίνακας 9.17: Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα CORTEN S355 σε θερμοκρασία 50° C

Μηχανικά χαρακτηριστικά	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες μέτρησης
Μέτρο Ελαστικότητας	E	170.00	GPa
Λόγος Poisson	ν	0,33	-
Πυκνότητα	ρ	7850.00	Kg/m ³
Όριο Διαρροής	f_y	345.00	MPa
Όριο Θραύσης	f_u	470	MPa

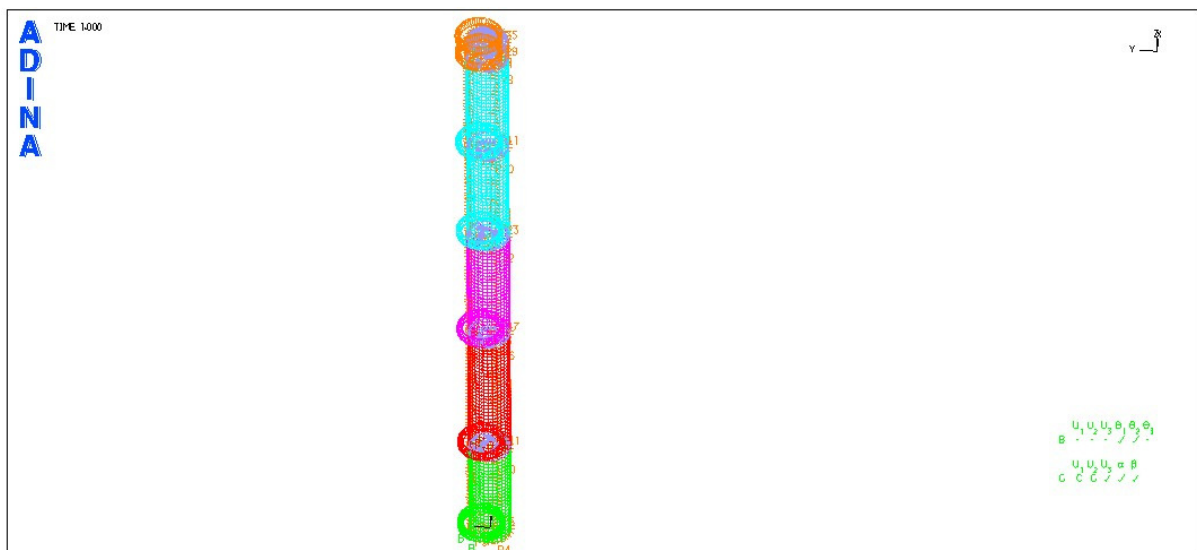
Γενικά ομοιόμορφη περιμετρικά μεταβολή της θερμοκρασίας στο κέλυφος δεν ενδέχεται να επιφέρει οποιαδήποτε **επιπλέον** εντατικά μεγέθη, αφού η κατασκευή, ως πρόβολος, μπορεί ελεύθερα να διαστέλλεται

και να συστέλλεται. Επιρροή ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5 ενδέχεται να εντείνει το φορέα, αλλά για τους σκοπούς απλοποίησης στη παρούσα μελέτη αμελείται.

9.4. Προσομοίωση και ανάλυση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Η μεταλλική καπνοδόχος προσημειώθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκειμένου να γίνει ο έλεγχος οριακών καταστάσεων αστοχίας με αριθμητική ανάλυση. Για σκοπούς της εργασίας αναπτύσσονται δύο στατικά προσομοιώματα ήτοι, ένα με την χρήση πεπερασμένων κελυφωτών στοιχείων (Σ.Π.1) και ένα με τη χρήση ραβδωτών στοιχείων (Σ.Π.2). Οι διαστάσεις της γεωμετρίας θεωρήθηκαν προκαταρκτικά αυτές που ορίστηκαν στην **Παράγραφο 9.2**. Επίσης επιβλήθηκαν σε αυτά τα φορτία όπως υπολογίστηκαν στην **Παράγραφο 9.3**, αναλόγως του προσομοιώματος.

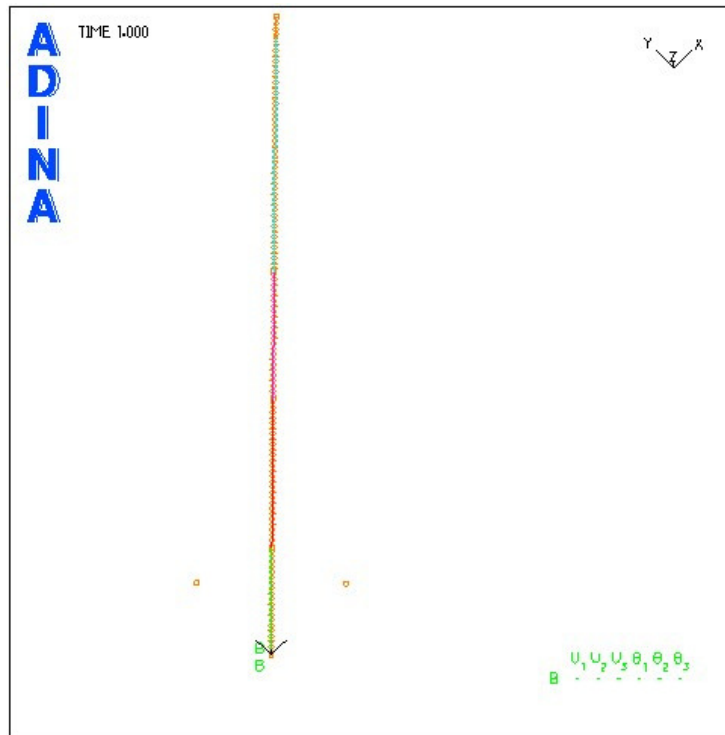
Στο στατικό προσομοίωμα με τα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, διερευνήθηκε μια προκαταρκτική ανάλυση για την επίδραση των διαστάσεων του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στα αποτελέσματα. Μετά από δοκιμές επιλέχθηκε πλέγμα εννεακομβικών πεπερασμένων στοιχείων διαστάσεων 70cm x 70cm. Θεωρήθηκαν συνθήκες άρθρωσης στη βάση με ελευθερία στρωφών στις διευθύνσεις X και Y. Επίσης έχουν ορισθεί στατικά διαφράγματα στις θέσεις αλλαγής του πάχους του κελυφωτού φορέα ώστε να προσομοιωθούν με αυτό τον τρόπο οι άκαμπτες στο επίπεδο τους μετωπικές πλάκες, που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των μερών.



Σχήμα 9.7: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους

Το στατικό προσομοίωμα με ραβδωτά στοιχεία υποδιαιρέθηκε σε ίσα τμήματα των 0.20m. Θεωρήθηκαν συνθήκες πλήρους πάκτωσης στην βάση.

Τα στατικά προσομοιώματα, όπως προσομοιώθηκαν στο λογισμικό ADINA, φαίνονται στα **Σχήματα 9.7** και **9.8**. Τα διαφορετικά χρώματα ορίζουν τα διαφορετικά πάχη των στοιχείων.



Σχήμα 9.8: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων ραβδωτών στοιχείων

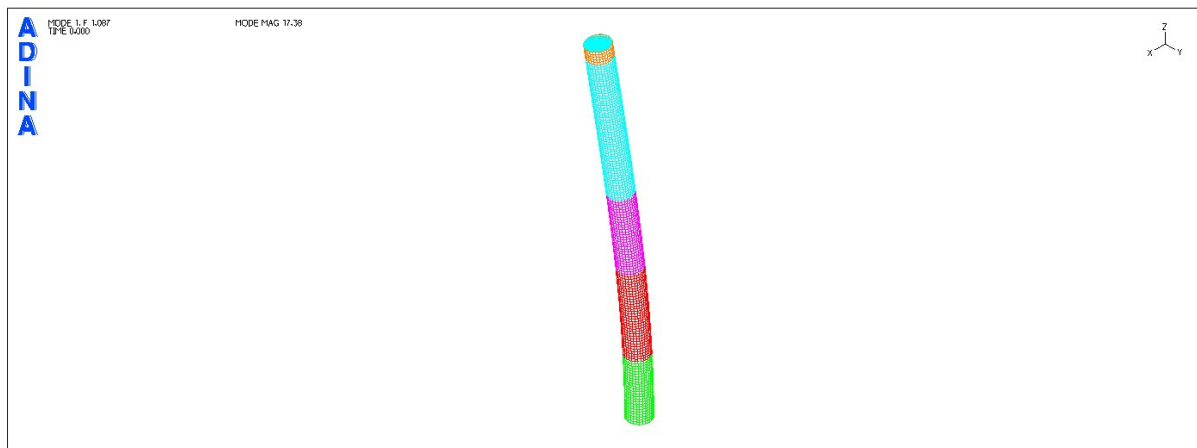
9.4.1. Υπολογισμός ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων

Αρχικά διενεργήθηκε και στα δύο στατικά προσομοιώματα ιδιομορφική ανάλυση με σκοπό να προσδιοριστούν οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες. Στα **Σχήματα 9.9-9.18** παρουσιάζονται οι πέντε πρώτες ιδιομορφές. Αντίστοιχα στον **Πίνακα 9.18** δίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων. Η ιδιοσυχνότητα της καπνοδόχου υπολογίστηκε και με τη σχέση F3 που προτείνει το EN1991-1-4.

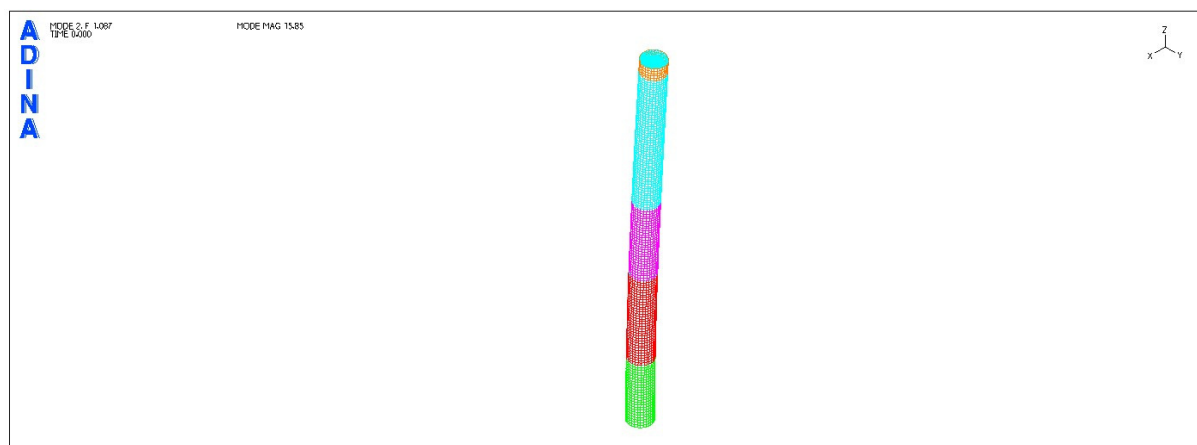
Όπως μπορεί να φανεί και από τα σχήματα αλλά και από τις τιμές, οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές που υπολογίστηκαν με βάση τα δύο στατικά προσομοιώματα ταυτίζονται. Πολύ καλή είναι και η προσέγγιση της πρώτης ιδιομορφής που υπολογίστηκε από τη σχέση του EN1991-1-4. Η πέμπτη ιδιομορφή όπου στο Σ.Π. πεπερασμένων στοιχείων κελύφους είναι ελλειπτική και διαφέρει σε μέτρο από την αντίστοιχη "πέμπτη" ιδιομορφή του Σ.Π. με ραβδωτά στοιχεία. Ελλειπτικές ιδιομορφές, όπως είναι κατανοητό, δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν χρησιμοποιώντας Σ.Π.2 λόγω των ραβδωτών στοιχείων. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η προσομοίωση των μετωπικών πλακών ως διαφράγματα στη θέση συναρμολόγησης του φορέα της καπνοδόχου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής. Χωρίς τα διαφράγματα οι ιδιομορφές που προκύπτουν στο Σ.Π.1 είναι όλες ελλειπτικές.

Πίνακας 9.18: Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες όπως προέκυψαν από τα Σ.Π.1 και Σ.Π.2 αλλά και την σχέση του EN1991-1-4

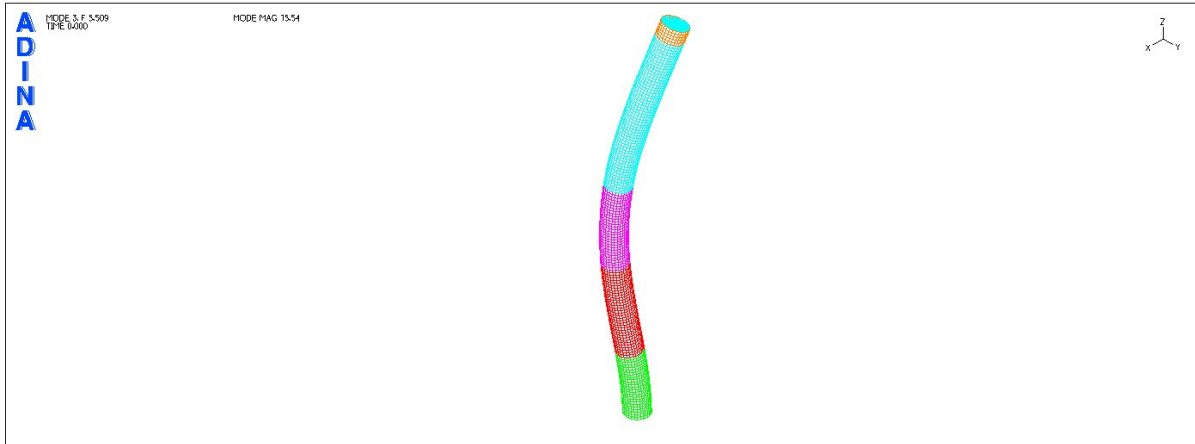
Ιδιομορφή	Σ.Π. πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, ιδιοσυχνότητα σε [Hz]	Σ.Π. πεπερασμένων ραβδωτών στοιχείων κελύφους, ιδιοσυχνότητα σε [Hz]	EN1991-1-4, ιδιοσυχνότητα σε [Hz]
1 ^η ιδιομορφή - καμπτική	1.087	1.089	1.038
2 ^η ιδιομορφή - καμπτική	1.087	1.089	----
3 ^η ιδιομορφή - καμπτική	5.509	5.690	----
4 ^η ιδιομορφή - καμπτική	5.509	5.690	----
5 ^η ιδιομορφή - ελλειπτική	9.516	12.560	----



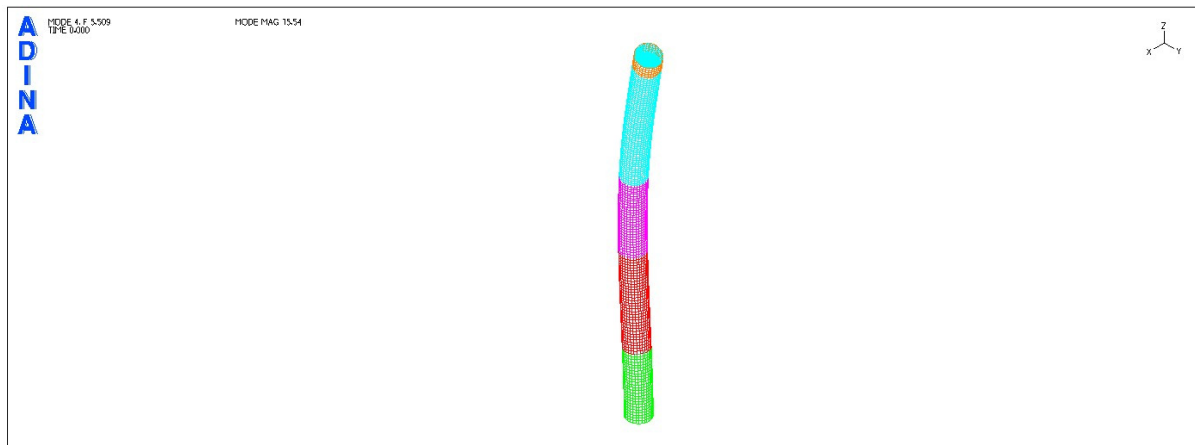
Σχήμα 9.9: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 1^η ιδιομορφή



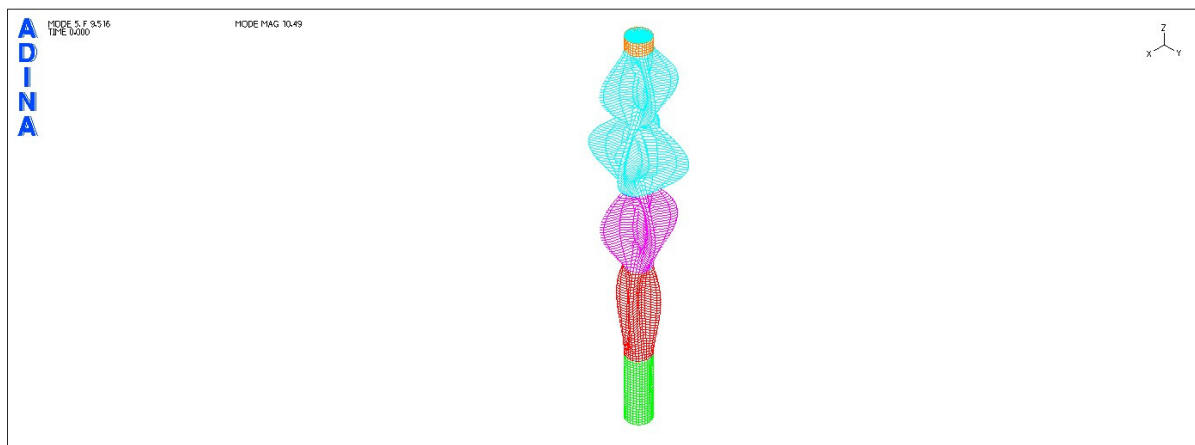
Σχήμα 9.10: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 2^η ιδιομορφή



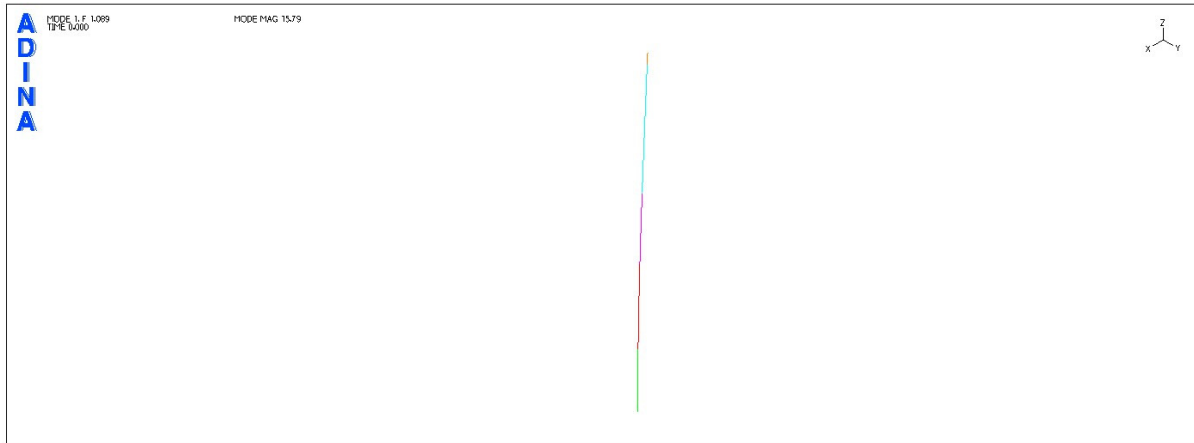
Σχήμα 9.11: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 3^η ιδιομορφή



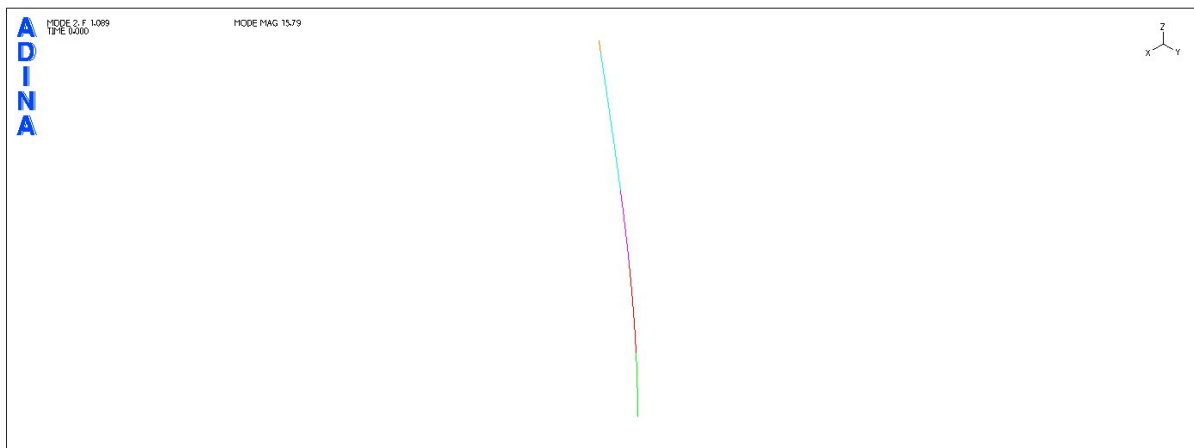
Σχήμα 9.12: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 4^η ιδιομορφή



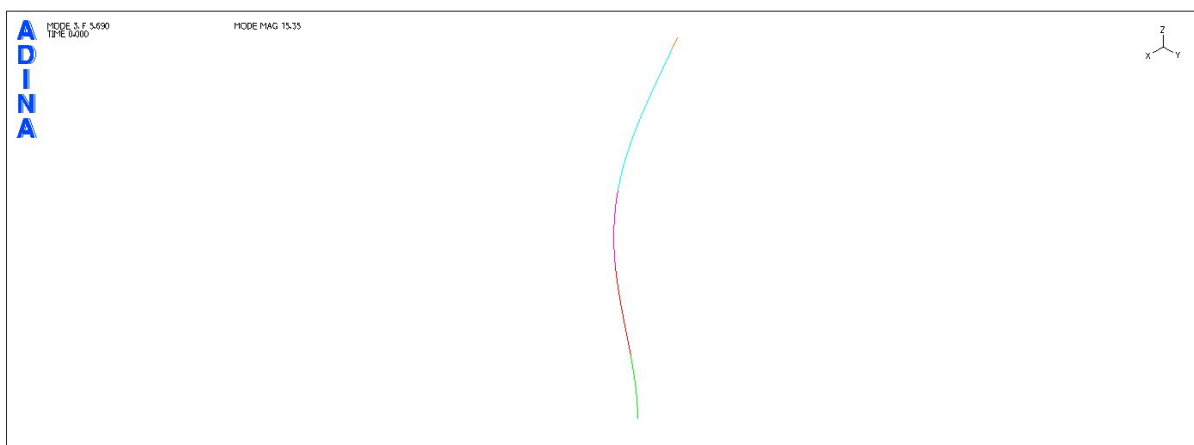
Σχήμα 9.13: Στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, 5^η ιδιομορφή



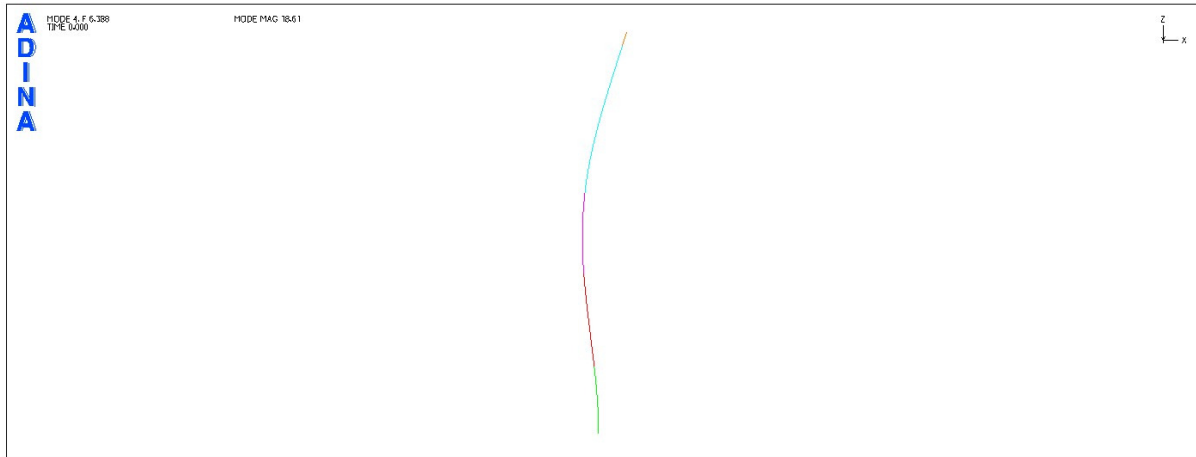
Σχήμα 9.14: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 1^η ιδιομορφή



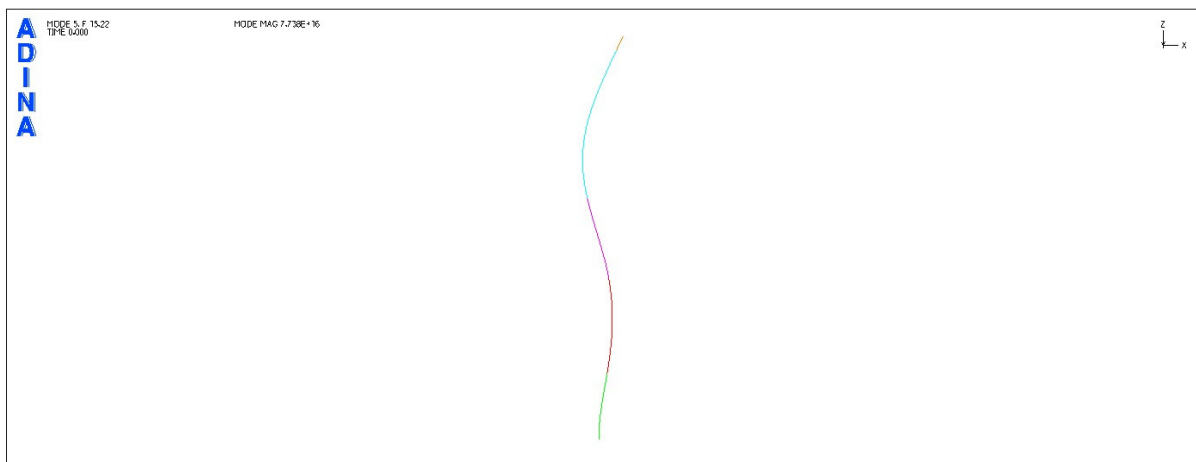
Σχήμα 9.15: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 2^η ιδιομορφή



Σχήμα 9.16: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 3^η ιδιομορφή



Σχήμα 9.17: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 4^η ιδιομορφή



Σχήμα 9.18: Στατικό προσομοίωμα ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, 5^η ιδιομορφή

9.4.2. Έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

Ο έλεγχος για την οριακή κατάσταση αστοχίας γίνεται με βάση τις τέσσερις οριακές καταστάσεις αστοχίας που προτείνει το EN1993-1-6 (Αντοχή και ευστάθεια κελυφών). Για τις αντίστοιχες οριακές καταστάσεις αστοχίας πραγματοποιούνται όλες οι προτεινόμενες μέθοδοι ελέγχου. Αρχικά όμως και για σκοπούς απλοποίησης των υπολογισμών αλλά και των αναλύσεων, πραγματοποιείται μια προκαταρκτική ελαστική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός φορτίσεων. Στα Σ.Π. θεωρούνται οι δράσεις όπως υπολογίστηκαν στην Παράγραφο 9.3, οι οποίες είναι: τα μόνιμα φορτία, τα φορτία ανέμου και του σεισμού. Ως εκ τούτου, οι συνδυασμοί φορτίσεων για την οριακή κατάσταση αστοχίας, σύμφωνα με το EN1990 είναι:

- Για καταστάσεις διαρκείας ή παροδικές – κύρια φόρτιση ο άνεμος

$$1.35G + 1.5W$$

- Σεισμικός συνδυασμός

$$1.00G + 1.00E_x + 0.30E_y$$

όπου:

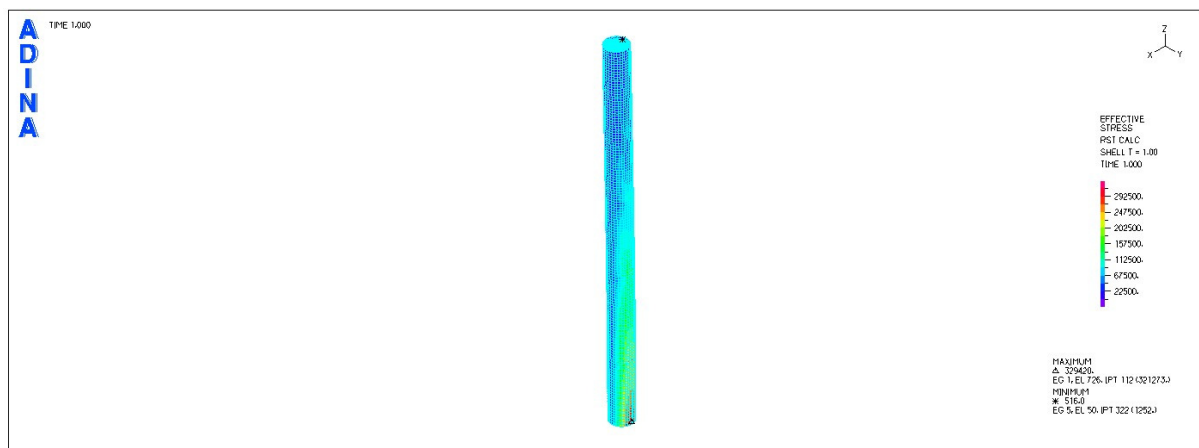
G είναι τα μόνιμα φορτία της κατασκευής

W είναι τα φορτία ανέμου

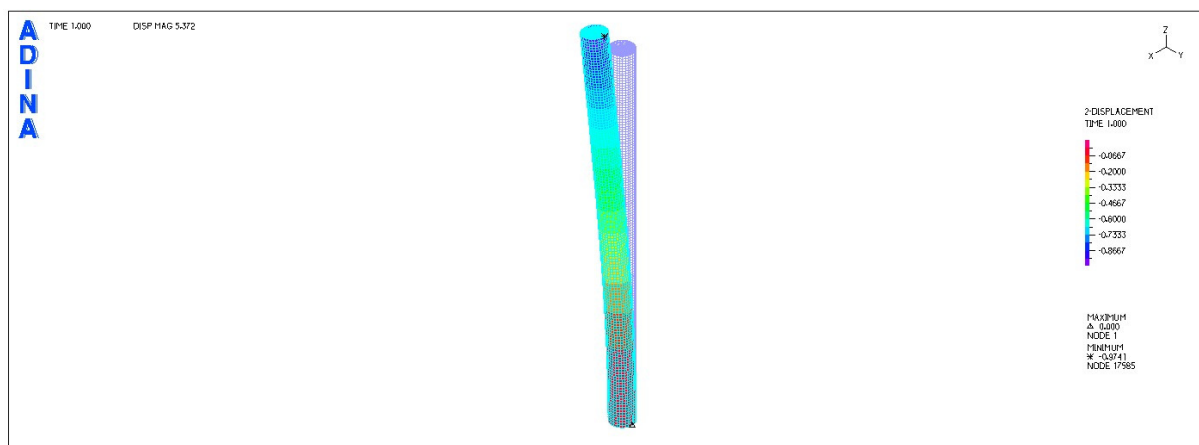
E_x είναι η σεισμική δύναμη στην X διεύθυνση

E_y είναι η σεισμική δύναμη στην Y διεύθυνση

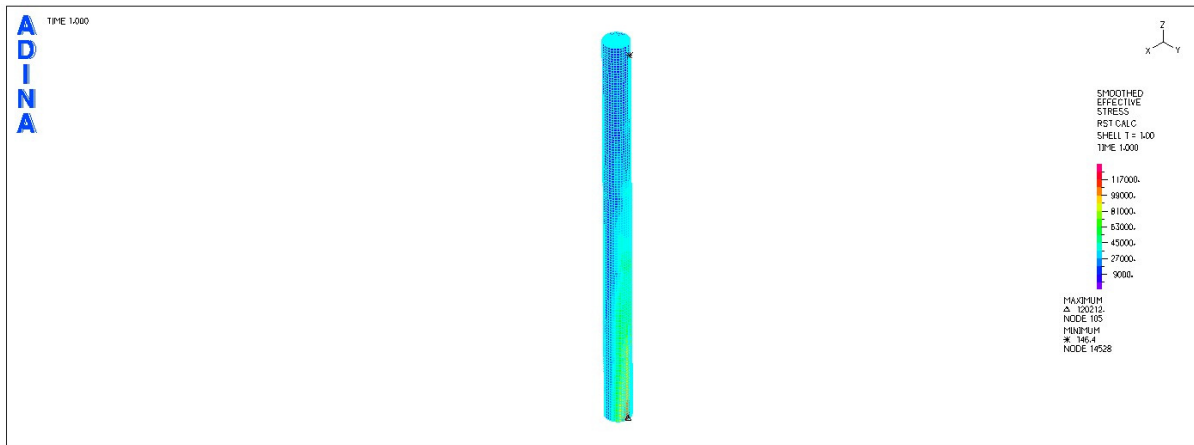
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από τους δύο συνδυασμούς φορτίσεων. Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι δυσμενέστερος είναι ο συνδυασμός με κύρια φόρτιση τον άνεμο. Όπως γίνεται κατανοητό, η κατασκευή λόγω της μικρής σχετικά μάζας που διαθέτει είναι περισσότερο επιρρεπής στα φορτία ανέμου παρά σε ενδεχόμενες σεισμικές διεγέρσεις.



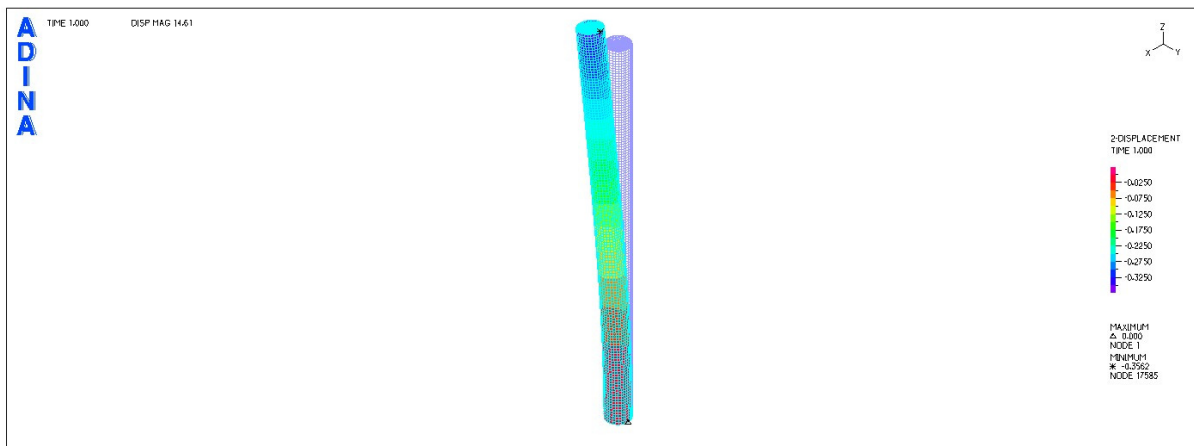
Σχήμα 9.19: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον πρώτο συνδυασμό φορτίσεων. Τάση κατά von Mises = 329.420 MPa



Σχήμα 9.20: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον πρώτο συνδυασμό φορτίσεων. Μέγιστη μετατόπιση 0.97cm



Σχήμα 9.21: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον δεύτερο συνδυασμό φορτίσεων (τυχηματικό). Τάση κατά von Mises = 120.212 MPa



Σχήμα 9.22: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τον δεύτερο συνδυασμό φορτίσεων (τυχηματικό).. Μέγιστη μετατόπιση 0.36cm

Πίνακας 9.19: Νέο αρχικό και απομειωμένο πάχος καπνοδόχου καθ' ύψος

Τεμάχιο	Μήκος (m)	Συνολικό μήκος (m)	Αρχικό πάχος(mm)	Απομειωμένο πάχος (mm)	Εσωτερική Διάμετρος μοντέλου (mm)
1	10.00	10.00	20	17	3,723
2	14.00	24.00	18	15	3,724
3	12.00	36.00	12	9	3726
4	22.00	58.00	10	7	3728
5	2.00	60.00	8	5	3730

Συνεπώς όλες οι επακόλουθες αναλύσεις πραγματοποιούνται, για σκοπούς απλοποίησης, με βάση τον συνδυασμό φορτίσεων με κύρια φόρτιση τον άνεμο. Επίσης λόγω του ότι από τις προκαταρκτικές αναλύσεις που προηγήθηκαν φαίνεται ότι η αναπτυσσόμενη κατά von Mises τάση βρίσκεται στο όριο της τάσης διαρροής σχεδιασμού F_{yd} του χάλυβα S355, προτίθενται όπως αυξηθούν τα πάχη των κελυφών πλησίον της βάσης. Τα νέα πάχη της καπνοδόχου που θα ληφθούν στις αναλύσεις φαίνονται στον **Πίνακα 9.19**.

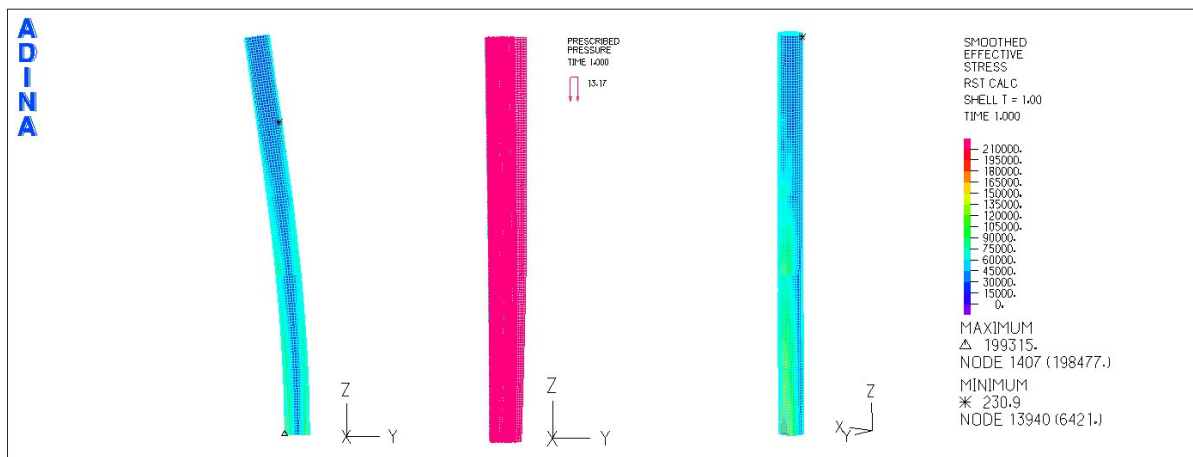
9.4.2.1. Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Η ανάλυση γίνεται σύμφωνα με τον πρώτο σεισμικό συνδυασμό. Τα φορτία που επιβάλλονται στα προσομοιώματα προσαυξάνονται με τους συντελεστές $\gamma_Q=1.35$ και $\gamma_G=1.50$.

9.4.2.1.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Στην περίπτωση αυτή γίνεται ο έλεγχος της κατά von Mises με τη μέγιστη τάση και με την τάση διαρροής του υλικού f_{yd} .

Η κατά von Mises μέγιστη τάση λαμβάνεται κατευθείαν από το λογισμικό για το Σ.Π.1 (**Σχήμα 9.23**) ενώ για το Σ.Π.2 υπολογίζεται μέσω των εντατικών μεγεθών M , Q , N και των σχέσεων που προτείνει το EN1993-1-6.



Σχήμα 9.23: Αποτελέσματα ανάλυσης LS1 στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους.

Από το ραβδωτό μοντέλο λαμβάνονται τα διαγράμματα των αξονικών, τεμνουσών και ροπών δυνάμεων. Οι σχέσεις αυτές βασίζονται στην μεμβρανική θεωρία και για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{l}{r_m} \geq 0.14 \cdot \frac{r_m}{t} + 10$$

όπου:

l είναι το μήκος της καπνοδόχου

r_m είναι η διάμετρος

t είναι το πάχος του κελύφους (διαβρωμένο)

έστω ότι ελέγχεται στη βάση,

$$\frac{l}{r_m} \geq 0.14 \cdot \frac{r_m}{t} + 10$$

$$\frac{60}{1.868} \geq 0.14 \cdot \frac{1.868}{0.017} + 10$$

$$32.129 \geq 25.384$$

Άρα η συνθήκη ισχύει. Στο **Σχήμα 9.24** φαίνονται τα διαγράμματα αξονικών, τεμνουσών και ροπών δυνάμεων. Με βάση τα εντατικά μεγέθη υπολογίζονται οι συνισταμένες των τάσεων σχεδιασμού στη βάση:

- Λόγω ομοιόμορφου αξονικού φορτίου:

$$n_x = \sigma_x \cdot t = \frac{N_{sd}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t} \cdot t = \frac{N_{sd}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{808.8 \text{ kN}}{2 \cdot \pi \cdot 1.868 \text{ m}} = 68.91 \text{ kN / m}$$

- Αξονικό φορτίο λόγω κάμψης:

$$m_x = \sigma_x \cdot t = \frac{M_{\pm sd}}{\pi \cdot r^2} \cdot t = 2871 \text{ kN / m}$$

- Φορτίο λόγω πλευρικής εξωτερικής πίεσης:

$$n_\theta = \gamma_f \cdot w_e \cdot r = 1.4 \cdot 2.47 \cdot 1.868 = 6.458 \text{ kN / m}$$

- Φορτίο λόγω τέμνουσας:

$$n_{x\theta} = \frac{V_{sd}}{\pi \cdot r} = \frac{928.9}{\pi \cdot 1.868} = 158.328 \text{ kN / m}$$

- Περιμετρική ροπή κάμψης:

$$m_\theta = 0$$

Ομοίως $m_x = 0$ και $m_{x\theta} = 0$ λόγω μεμβρικής θεωρίας.

Σύμφωνα με το EN1993-1-6 όταν εφαρμόζεται γραμμική ανάλυση (ή γεωμετρικά μη γραμμική ανάλυση) οι συνισταμένες των n_θ , n_x , $n_{x\theta}$ μπορούν να εκφραστούν μέσω των **εξείς** πλασματικών συνιστωσών τάσεων:

$$\sigma_{x,d} = \frac{n_x}{t} \pm \frac{m_x}{t^2}, \quad \sigma_{\theta,d} = \frac{n_\theta}{t} \pm \frac{m_\theta}{t^2}, \quad \tau_{x\theta,d} = \frac{n_{x\theta}}{t} \pm \frac{m_{x\theta}}{t^2}$$

Και η ισοδύναμη τάση σχεδιασμού προκύπτει με εφαρμογή του κριτηρίου von Mises:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{x\theta,d}^2 + \tau_{xn,d}^2 + \tau_{\theta n,d}^2)}$$

Όπου: (+) είναι η θλίψη και (-) ο εφελκυσμός.

Συνεπώς:

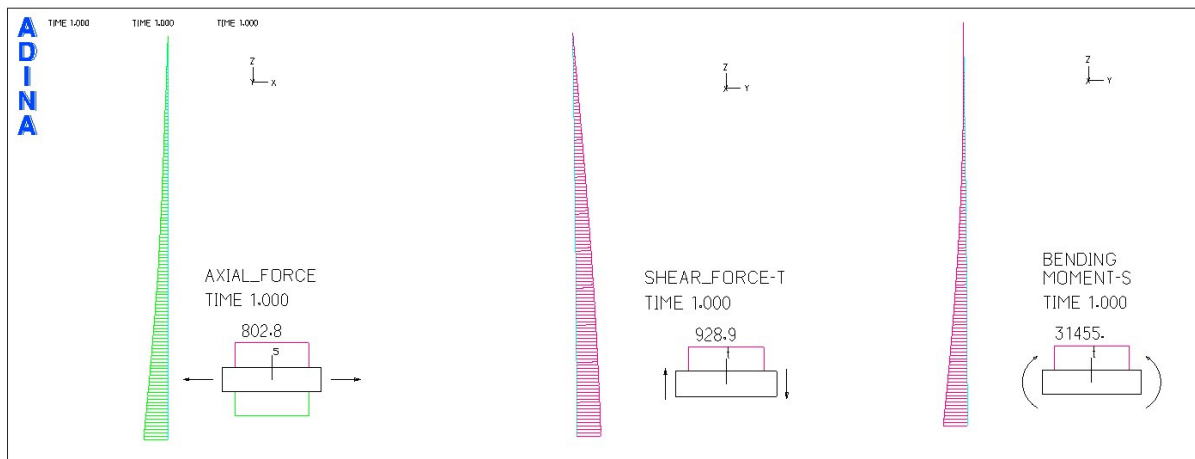
$$\sigma_{x,d} = \frac{n_x}{t} \pm \frac{m_x}{\frac{t^2}{4}} = 172.931 MPa$$

$$\sigma_{\theta,d} = \frac{n_{\theta}}{t} \pm \frac{m_{\theta}}{\frac{t^2}{4}} = 0.38 MPa$$

$$\tau_{x\theta,d} = \frac{n_{x\theta}}{t} \pm \frac{m_{x\theta}}{\frac{t^2}{4}} = 9.13 MPa$$

και

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{\theta,d} + 3 \cdot (\tau_{x\theta,d}^2 + \tau_{xn,d}^2 + \tau_{\theta n,d}^2)} = 173.493 MPa$$



Σχήμα 9.24: Διαγράμματα και μέγιστες τιμές εντατικών μεγεθών για τις χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων στο στατικό προσομοίωμα 2 για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS1

Στον **Πίνακα 9.20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κατά von Mises ισοδύναμων τάσεων καθώς και οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν. Όπως μπορεί να φανεί από τα αποτελέσματα η εφαρμογή της μεμβρανικής θεωρίας (μέσω των αναλυτικών σχέσεων που προτείνει το EN1993-1-6) υποεκτιμά την μέγιστη κατά von Mises τάση, δίνοντας έτσι μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας. Αυτό φαίνεται να συμβαίνει γιατί, εξ' ορισμού, η μεμβρανική θεωρία αγνοεί οποιαδήποτε καμπτικά φαινόμενα (που μπορεί να εμφανίζονται στη βάση λόγω των συνθηκών στήριξης) που συμβάλλουν στην ένταση του φορέα.

Τέλος, όπως μπορεί να διαφανεί από το **Σχήμα 9.23**, η μέγιστη τάση παρουσιάζεται στην περιοχή θλίψης της καπνοδόχου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη περιοχή της θλίψης η καπνοδόχος επιβαρύνεται και από τα φορτία λόγω ίδιου βάρους.

Πίνακας 9.20: Κατά von Mises ισοδύναμη τάση και συντελεστές ασφαλείας ελαστική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με την μέθοδο της μεμβρανικής θεωρίας.

	Αριθμητική ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	Μεμβρανική θεωρία
Κατά von Mises ισοδύναμη τάση [MPa]	199.315	173.493
Συντελεστής ασφαλείας r_{Rk}	1.731	1.989
Συντελεστής ασφαλείας r_{Rd}	1.731	1.989

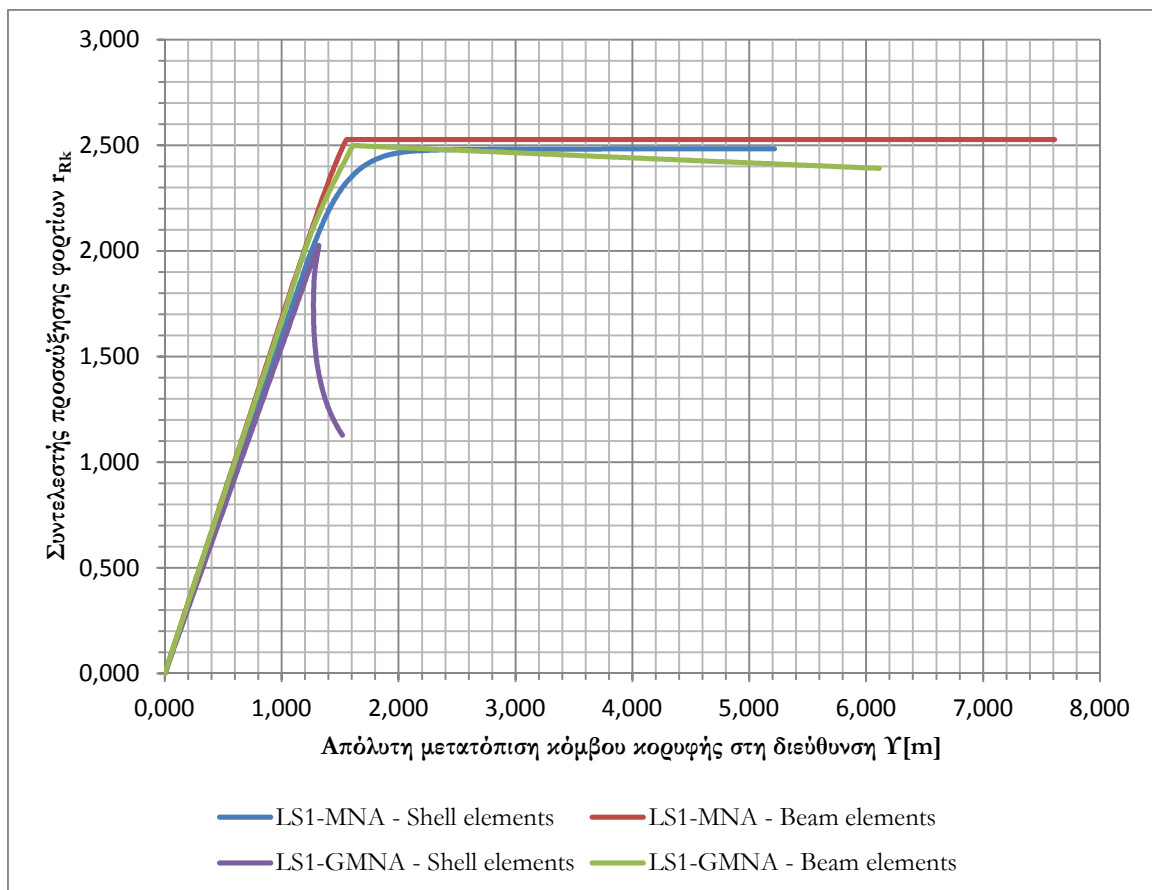
9.4.2.1.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA και GMNA

Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος γίνεται μέσω του λόγου πλαστικής αντίστασης r_{Rpl} όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 7**. Επιβάλλονται και στα δύο στατικά προσομοιώματα, Σ.Π.1 και Σ.Π.2 τα φορτία, όπως προέκυψαν από τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίσεων (δράσεις σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές γ_Q και γ_G). Με την βοήθεια του λογισμικού Adina πραγματοποιείται ανάλυση Collapse για μη γραμμικότητα υλικού (MNA) και ακολούθως για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNA). Η ανάλυση Collapse γίνεται μέσω του συντελεστή προσαύξησης των φορτίων " λ " (Lambda). Καθώς πραγματοποιείται η ανάλυση, η τιμή του συντελεστή αυξάνεται σταδιακά μέχρι το σημείο αστοχίας. Η ανάλυση Collapse συνεχίζει και μετά το σημείο αστοχίας (διακλάδωσης). Αξίζει να σημειωθεί ότι για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση Collapse, το λογισμικό απαιτεί όπως αρχικά δοθεί μια μικρή εκτροπή σε κάποιο σημείο του φορέα. Η εκτροπή, όπως γίνεται κατανοητό, δίδεται στην διεύθυνση και φορά όπου αναμένεται ότι θα παραμορφωθεί η κατασκευή υπό την επίδραση των συγκεκριμένων φορτίων (η φορά είναι γνωστή από προκαταρκτικές γραμμικές αναλύσεις).

Μετά το τέλος της ανάλυσης εξάγεται ο δρόμος ισορροπίας για συγκεκριμένο κόμβο του προσομοιώματος (διάγραμμα συντελεστή προσαύξησης του φορτίου - παραμόρφωση). Για την καπνοδόχο επιλέγεται ένας κόμβος στη κορυφή όπου παρουσιάζεται και η μέγιστη μετατόπιση. Στο **Σχήμα 9.25** παρουσιάζονται οι τέσσερις δρόμοι ισορροπίας οι οποίοι αντιστοιχούν στις αναλύσεις των δύο στατικών προσομοιωμάτων (με κελυφωτά και ραβδωτά στοιχεία) για τις αναλύσεις, MNA και GMNA.

Είναι εμφανές ότι και για τις τέσσερις αναλύσεις οι δρόμοι ισορροπία είναι γραμμικοί και σχεδόν ταυτίζονται για μετατόπιση μέχρι και 1.20m. Ακολουθεί το σημείο διακλάδωσης και απότομη αλλαγή της κλίσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο Σ.Π.2 ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει απότομη αλλαγή

κλίσης, με εμφανές το σημείο διακλάδωσης. Αντίθετα, στην περίπτωση ανάλυσης GMNA στο Σ.Π.1 ο δρόμος ισορροπίας γίνεται σταδιακά μη γραμμικός. Η διαφορά αυτή βασίζεται στη διαφορετικότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα προσομοιώματα. Στο Σ.Π.1 η διαρροή του υλικού πραγματοποιείται σε αρκετά διακριτά σημεία της περιφέρειας του φορέα, λόγω του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Εν' αντιθέσει, στο Σ.Π.2 ο έλεγχος της διαρροής του υλικού γίνεται σε λιγότερα διακριτά σημεία και έτσι παρατηρείται "απότομη" διαρροή του υλικού. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι και από τα δύο στατικά προσομοιώματα για ανάλυση MNA, προκύπτει σχεδόν η ίδια τιμή για το λόγο πλαστικής αντίστασης r_{Rk} .



Σχήμα 9.25: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για αναλύσεις MNA και GMNA και για τα δύο στατικά προσομοιώματα.

Για ανάλυση GMNA οι δρόμοι ισορροπίας που εξάγονται από τα δύο στατικά προσομοιώματα διαφέρουν. Στο Σ.Π.1 ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει πριν από κάθε άλλη ανάλυση σημείο διακλάδωσης, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί απότομη πτώση. Η απότομη αυτή πορεία του δρόμου ισορροπίας οφείλεται στην ψαθυρή αστοχία της καπνοδόχου, λόγω τοπικού λυγισμού στη βάση. Λόγω του μεγάλου σχετικά ύψους, ενδεχόμενη σημαντική εκτροπή της καπνοδόχου από την κατακόρυφο, η οποία λαμβάνεται μέσω της μη γραμμικότητας γεωμετρίας, επιβαρύνει τη ζώνη θλίψης στη βάση με το ίδιο βάρος της κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενθαρρύνει τον τοπικό λυγισμό. Αντίθετα στο Σ.Π.2, ο δρόμος ισορροπίας από ανάλυση GMNA φαίνεται να ταυτίζεται μέχρι το σημείο διακλάδωσης, με τον αντίστοιχο δρόμο ισορροπίας

που εξάγεται από ανάλυση MNA. Μετά το σημείο διακλάδωσης για ανάλυση GMNA, ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει μικρή πτώση. Στο Σ.Π.2, λόγω των ραβδωτών στοιχείων που χρησιμοποιούνται, δεν είναι δυνατό να εκδηλωθούν φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Η πτώση στο δρόμο ισορροπίας πραγματοποιείται λόγω της επίδρασης καμπτικού λυγισμού.

Στον **Πίνακα 9.21** παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών πλαστικής αντίστασης r_{Rk} ο οποίος ορίζεται ως η μέγιστη τιμή που λαμβάνεται από το δρόμο ισορροπίας για κάθε μια από τις αναλύσεις που περιγράφηκαν. Ως Σ.Π.1 και Σ.Π.2 θεωρούνται τα στατικά προσομοιώματα με κελυφωτά πεπερασμένα και ραβδωτά στοιχεία αντίστοιχα. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής r_{Rk} λαμβάνει σχεδόν την ίδια τιμή για όλες τις αναλύσεις εξαιρεμένης της ανάλυσης GMNA στο Σ.Π.1, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο συντελεστής r_{Rd} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M0}}$$

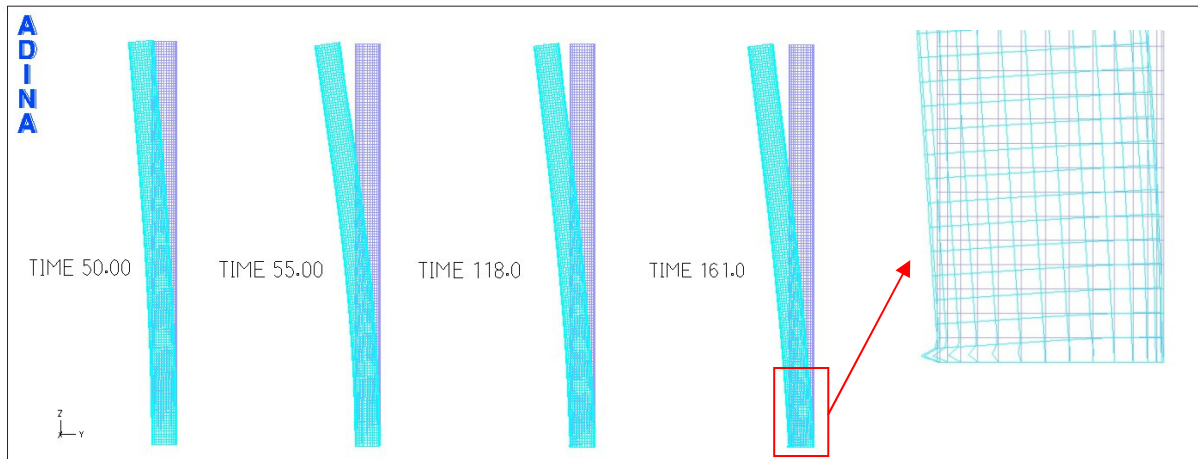
όπου $\gamma_{M0}=1.00$.

Πίνακας 9.21: Τιμές λόγου πλαστικής αντίστασης r_{Rk} και r_{Rd} για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS1 για αναλύσεις MNA και GMNA.

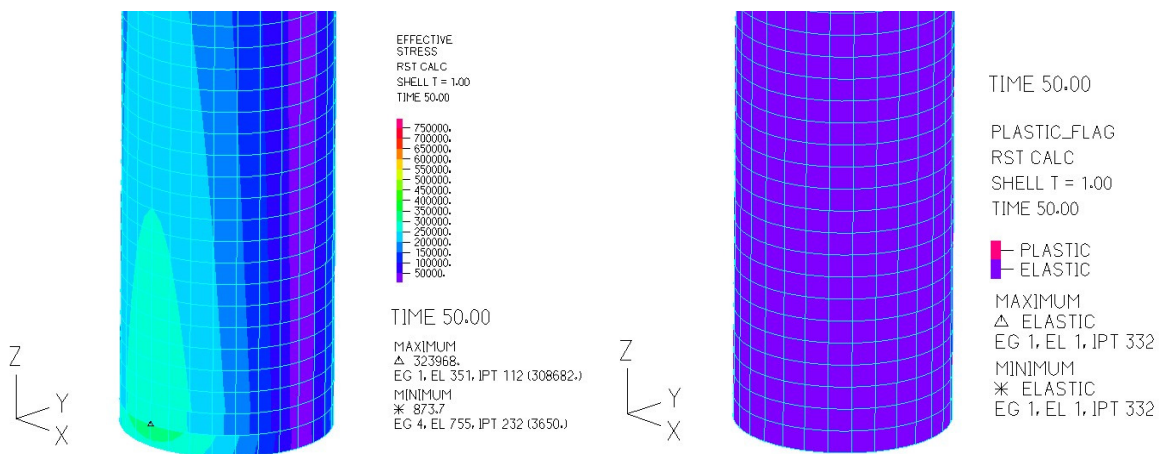
	MNA		GMNA	
	Σ.Π.1	Σ.Π.2	Σ.Π.1	Σ.Π.2
r_{Rk}	2,483	2,527	2,025	2,498
r_{Rd}	2,483	2,527	2,025	2,498

Με βάση το EN1993-1-6, η καπνοδόχος θεωρείται ασφαλής έναντι ασφαλείας για την πλαστική οριακή κατάσταση, αν ισχύει η συνθήκη: $r_{Rd} \geq 1$. Συνεπώς, με βάση τα αποτελέσματα, η καπνοδόχος θεωρείται ότι πληροί τους περιορισμούς για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS1 με ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας 2.025.

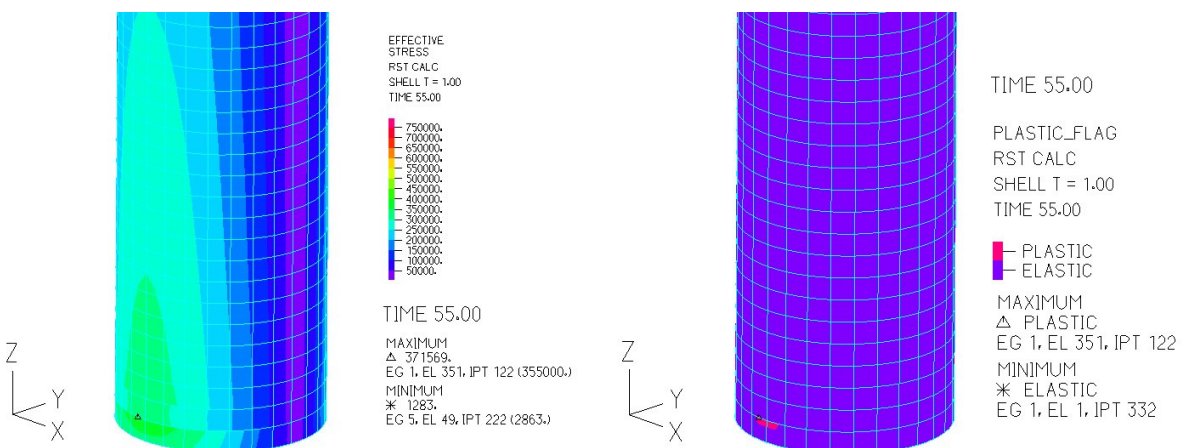
Στο **Σχήμα 9.26** παρουσιάζεται εποπτικά η εξέλιξη των παραμορφώσεων στην καπνοδόχο με ανάλυση GMNA (σε διακριτά σημεία του δρόμου ισορροπίας) ενώ στα **Σχήματα 9.27-9.30** παρουσιάζεται η εντατική κατάσταση της βάσης κατά την μεταβολή των φορτίων. Από τα σχήματα είναι εύκολο να διαφανεί ότι η αστοχία της καπνοδόχου προέρχεται από τοπικό λυγισμό και διαρροή του υλικού στη βάση.



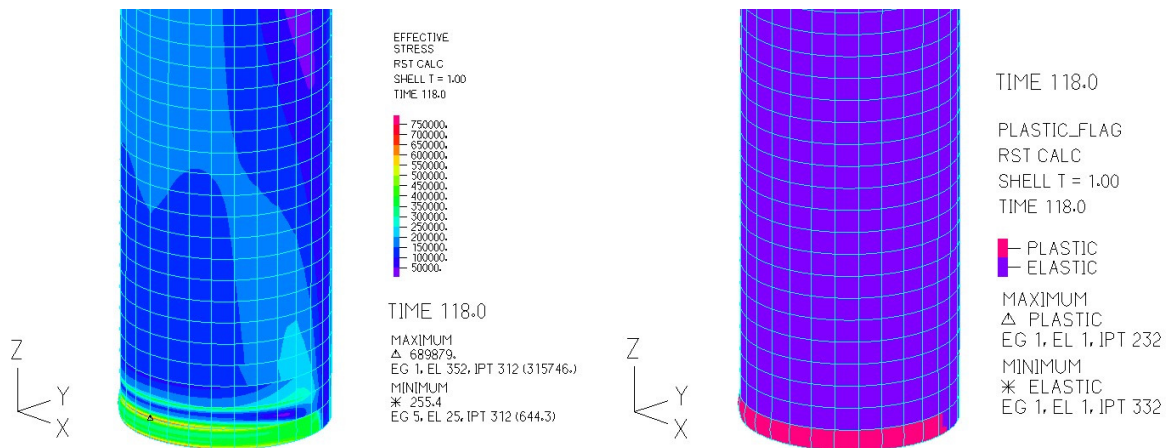
Σχήμα 9.26: Εξέλιξη παραμορφώσεων της καπνοδόχου με ανάλυση GMNA σε διακριτά σημεία (του δρόμου ισορροπίας)



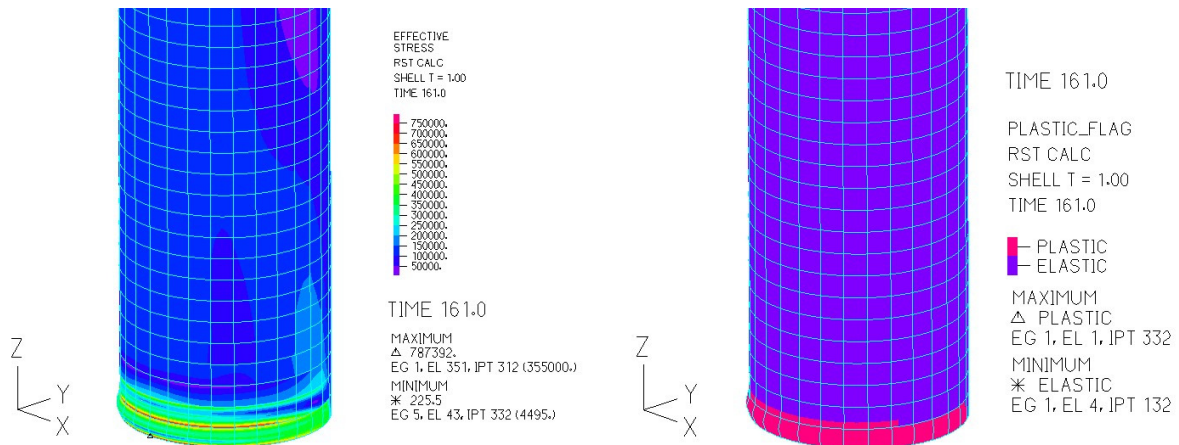
Σχήμα 9.27: Ισοτασικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=0.913$ - πριν την διαρροή του χάλυβα



Σχήμα 9.28: Ισοτασικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.048$ - μετά την διαρροή του χάλυβα



Σχήμα 9.29: Ισοτασικές καμπύλες και παραμορφώσεις από ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.941$ - πριν ανάπτυξη τοπικού λυγισμού



Σχήμα 9.30: Ισοτασικές καμπύλες και παραμορφώσεις για ανάλυση GMNA για συντελεστή προσαύξησης φορτίου $r_{Rk}=1.128$ - μετά την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού (στο τέλος της ανάλυσης)

9.4.2.2. Οριακή κατάσταση πλαστικότητας σε ανακύλιση (LS2)

Στην ανάλυση LS2 λαμβάνονται υπόψη οι χαρακτηριστικές τιμές ($\gamma_R=1.00$ και $\gamma_G=1.00$) των δράσεων που ενδέχεται να εφαρμοσθούν και να απομακρυνθούν από την κατασκευή περισσότερες από τρεις φορές. Στην προκειμένη περίπτωση θα ληφθεί υπόψη η δράση λόγω της ροής του ανέμου (πρώτος συνδυασμός φορτίσεων).

9.4.2.2.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Στο στατικό προσομοίωμα 1 (ραβδωτό μοντέλο) πραγματοποιείται ανάλυση LA και υπολογίζονται οι τιμές των M,Q,N. Όπως και στην LS1 οι τιμές των αντίστοιχων τάσεων υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις του Παραρτήματος Α του EN1993-1-6.

Έτσι από την ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα εντατικά μεγέθη:

$$N=594.7 \text{ kN}, \quad M=20983 \text{ kNm}, \quad V=619.6 \text{ kN}$$

Τα διαγράμματα καθώς και οι μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών για τις χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων φαίνονται στο **Σχήμα 9.31**.

Συνεπώς οι προκύπτουσες τάσεις είναι:

$$\sigma_{x,d} = 115.626 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\theta,d} = 0.38 \text{ MPa}, \quad \tau_{x\theta,d} = 6.212 \text{ MPa}$$

Ως μεταβολή κάθε συνιστώσας τάσεων λαμβάνεται συντηρητικά η διπλάσια τιμή, συνεπώς

$$\Delta\sigma_{x,d} = 231.271 \text{ MPa}, \quad \Delta\sigma_{\theta,d} = 0.76 \text{ MPa}, \quad \Delta\tau_{x\theta,d} = 12.425 \text{ MPa}$$

Έτσι με βάση τις μεταβολές των τάσεων υπολογίζεται η τιμή σχεδιασμού της μεταβολής της ισοδύναμης τάσης von Misses σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,d}^2 + \sigma\Delta_{\theta,d}^2 - \Delta\sigma_{x,d} \cdot \Delta\sigma_{\theta,d} + 3 \cdot \Delta\tau_{x\theta,d}^2} = 231.893 \text{ MPa}$$

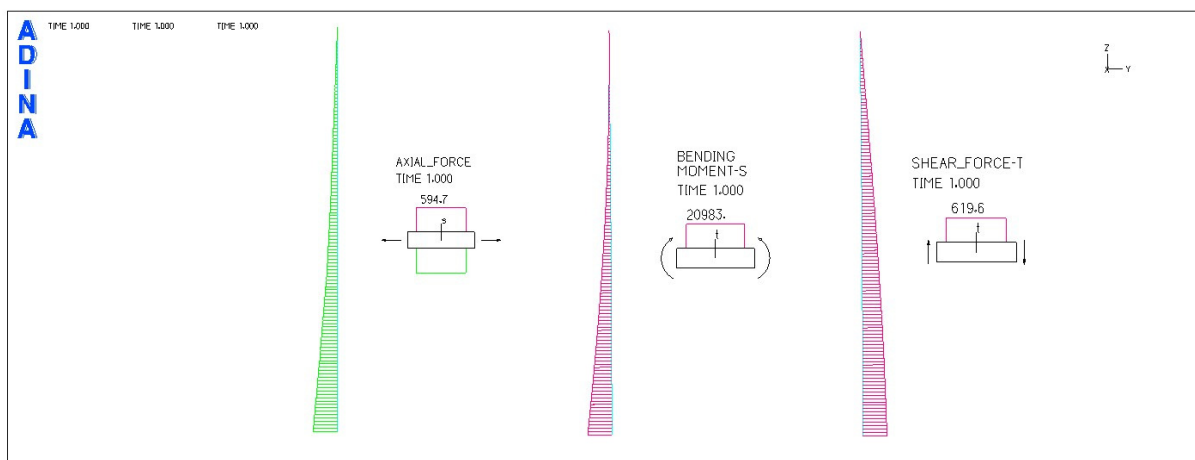
Επιπλέον η αντίσταση σε ισοδύναμο εύρος διακύμανσης τάσεων κατά von Misses προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\sigma_{eq,Rd} = 2 \cdot f_{yd} = 2 \cdot 345 \text{ MPa} = 690 \text{ MPa}$$

Συνεπώς αφού:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = 231.893 \text{ MPa} \leq \Delta\sigma_{eq,Rd} = 690 \text{ MPa}$$

Η καπνοδόχος είναι ασφαλής έναντι πλαστικότητας σε ανακύκλιση.



Σχήμα 9.31: Διαγράμματα και μέγιστες τιμές εντατικών μεγεθών για τις χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων στο στατικό προσομοίωμα 2 για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS2

9.4.2.2.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση MNA και GMNA

Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπολογιστεί η συνολική συσσωρευμένη κατά von Mises ισοδύναμη πλαστική ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ κατά το πέρας ζωής σχεδιασμού της καπνοδόχου. Σύμφωνα με το EN1993-1-6 η συνολική συσσωρευμένη κατά von Mises ισοδύναμη πλαστική ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{p,eq,Ed}$ προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n \Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$$

όπου για την καπνοδόχο θεωρείται συντηρητικά αριθμός κύκλων φόρτισης ίσος με 10000.

Για τον υπολογισμό της $\Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$ θα πρέπει να επιβληθούν στην κατασκευή τέσσερις κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης. Η $\Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$ λαμβάνεται ως η μέγιστη προσαύξηση της κατά von Mises ισοδύναμης πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης μετά τον τρίτο κύκλο. Λόγω του ότι τα φορτία λειτουργίας δεν είναι σε θέση να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση, ο έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας LS2 μέσω αριθμητικών αναλύσεων δεν υφίσταται.

9.4.2.3. Οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3)

Η ανάλυση γίνεται σύμφωνα με τον πρώτο σεισμικό συνδυασμό. Τα φορτία που επιβάλλονται στα προσομοιώματα προσαυξάνονται με τους συντελεστές γ_Q και γ_G .

9.4.2.3.1. Σχεδιασμός μέσω τάσεων

Σύμφωνα με την Παράγραφο D.1.2.2. του EN1993-1-6, κώνδυροι που δεν ικανοποιούν την παρακάτω σχέση θα πρέπει να ελέγχονται έναντι μεσημβρινής θλίψης του κελύφους:

$$\frac{r}{t_{cor}} \leq 0.04 \cdot \frac{E}{f_{yk}}$$

Στη εξεταζόμενη καπνοδόχο ισχύει:

$$\frac{r}{t_{cor}} = \frac{3735mm}{17mm} = 109.853 \geq 0.04 \cdot \frac{170000MPa}{345MPa} = 19.710$$

Συνεπώς απαιτείται έλεγχος έναντι αξονικής θλίψης.

Οι οριακές συνθήκες στήριξης της καπνοδόχου στη κορυφή και στη βάση είναι αντίστοιχα BC2f και BC1f (σύμφωνα με το Σχήμα 8.1. του EN1993-1-6). Συνεπώς μπορούν να εφαρμοστούν οι προτεινόμενες σχέσεις στην παράγραφο D1.2.1.

Το μήκος του κελύφους χαρακτηρίζεται από την παράμετρο ω :

$$\omega = \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} = \frac{\sqrt{r \cdot t}}{l}$$

Η δε κρίσιμη μεμβρανική καμπτική τάση προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{xRc} = 0.605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}$$

όπου ο συντελεστής C_x εξαρτάται από τον λόγο $1/\omega$. Επομένως για την εξεταζόμενη καπνοδόχο ισχύει:

$$\omega = \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} = \frac{\sqrt{r \cdot t}}{l} = 0.0029 \Rightarrow \frac{1}{\omega} = 366.741$$

και επίσης

$$\frac{1}{\omega} = 366.741 > 0.5 \frac{r}{t} = 54.926$$

συνεπώς η εξεταζόμενη καπνοδόχος μπορεί να θεωρηθεί μακρύς κύλινδρος μεταβλητού πάχους καθ' ύψος. Έτσι ο συντελεστής C_x προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$C_x = 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2 \cdot \omega \frac{t}{r} \right] = 1.067 \leq 0.6$$

Σύμφωνα με την D2.2. του EN1993-1-6, για μακρύ κύλινδρο μεταβλητού πάχους η παράμετρος C_{xb} με συνθήκες στήριξης BC1 και BC2 είναι ίση με 3:

$$C_x = 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2 \cdot \omega \frac{t}{r} \right] = 1.067 \leq 0.6$$

και

$$\sigma_{xRc} = 0.605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}$$

$$\sigma_{xRc} = 0.605 \cdot 170 \text{ GPa} \cdot 1.067 \cdot \frac{17 \text{ mm}}{1.867 \text{ m}} = 998.665 \text{ MPa}$$

Ο συντελεστής ελαστικής μεσημβρινής ατέλειας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$a_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{w_k}{t} \right)^{1.44}}$$

Όπου w_k το χαρακτηριστικό εύρος ατέλειας που προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$w_k = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t$$

Όπου Q είναι ο συντελεστής ποιότητας που σχετίζεται με τη μεσημβρινή θλίψη και προσδιορίζεται από τον Πίνακα D.2. Επομένως για κατηγορία ποιότητας C, $Q=16$.

$$w_k = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{1.867 \text{ m}}{17 \text{ mm}}} \cdot 17 \text{ mm} = 1.114 \text{ cm}$$

$$a_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{w_k}{t} \right)^{1.44}} = 0.304$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{xRc}}}$$

Όπου f_{yk} είναι η χαρακτηριστική τάση διαρροής του χάλυβα

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{xRc}}} = \sqrt{\frac{345MPa}{998.665MPa}} = 0.588$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα διαρροής είναι:

$$\bar{\lambda}_{px} = \sqrt{2.5 \cdot a_x} = \sqrt{2.5 \cdot 0.304} = 0.872$$

Η οριακή ανηγμένη λυγηρότητα μεσημβρινής θλίψης λαμβάνεται ίση με:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0.2$$

Επειδή $\bar{\lambda}_{x0} < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_{px}$ λαμβάνεται μειωτικός συντελεστής κύρωσης:

$$\chi_x = 1 - 0.6 \left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_{x0}}{\bar{\lambda}_{px} - \bar{\lambda}_{x0}} \right) = 0.654$$

Έτσι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε κύρωση είναι:

$$\sigma_{xRk} = \chi_x \cdot f_{yk} = 0.654 = 225.574MPa$$

Η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε κύρωση είναι:

$$\sigma_{xRd} = \frac{\sigma_{xRk}}{\gamma_{M1}} = \frac{\sigma_{xRk}}{\gamma_{M1}} = 205.043MPa$$

Για να επαρκεί η κατασκευή έναντι μεσημβρινής θλίψης θα πρέπει να η ισοδύναμη τάση σχεδιασμού να είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε κύρωση, δηλαδή:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{xRd}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{eqEd} = 173.493MPa \leq 205.043MPa$$

Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.

- **Έλεγχος σε περιμετρική θλίψη**

Λόγω του ότι η καπνοδόχος είναι μεταβλητού πάχους ελέγχεται αν η εκκεντρότητα των τοιχωμάτων υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τιμή, όπως αυτή ορίζεται από τον Πίνακα D.7 :

$$e_{0,p} = 1.1 \cdot t_{\min}$$

Στη στάθμη $z=10m$ η εκκεντρότητα είναι:

$$e_0 = \frac{20mm - 18mm}{2} = 1mm < e_{0,p} = 1.1 \cdot 18mm = 19.8mm$$

Στη στάθμη $z=24m$ η εκκεντρότητα είναι:

$$e_0 = \frac{18mm - 12mm}{2} = 3mm < e_{0,p} = 1.1 \cdot 12mm = 13.2mm$$

Στη στάθμη $z=36m$ η εκκεντρότητα είναι:

$$e_0 = \frac{12mm - 10mm}{2} = 1mm < e_{0,p} = 1.1 \cdot 10mm = 11mm$$

Αφού πληρείται η συνθήκη σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, μπορούν να εφαρμοστούν οι σχέσεις που παρατίθενται στην παράγραφο D.2.3 του EN1993-1-6. Σύμφωνα με την ίδια παράγραφο, επειδή η καπνοδόχος αποτελείται από περισσότερα από τρία τμήματα διαφορετικού πάχους, θα πρέπει να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο κύλινδρο ο οποίος αποτελείται από τρεις ενότητες a, b, c .

Το μήκος της κάθε ενότητας θα πρέπει να εκτείνεται μέχρι το ανώτερο άκρο του πρώτου τμήματος που έχει πάχος μεγαλύτερο από 1.5 φορές του μικρότερου πάχους, και θα πρέπει να εκτείνεται περισσότερο από το μισό του συνολικού ύψους της καπνοδόχου.

Τα μήκη των άλλων δύο τμημάτων θα είναι:

$$l_b = l_a \text{ και } l_c = L - 2 \cdot l_a \text{ αν } l_a \leq \frac{L}{3}$$

$$l_b = l_c = 0.5 \cdot (L - l_a) \text{ αν } \frac{L}{3} \leq l_a \leq \frac{L}{2}$$

Επομένως επειδή:

$$l_a = \frac{L}{2} = \frac{60}{2} = 30m$$

Έπεται ότι

$$l_b = l_c = 0.5 \cdot (L - l_a) = 0.5 \cdot (60 - 30) = 15m$$

Τα πλασματικά πάχη t_a, t_b, t_c των τριών ενότητων καθορίζονται ως ο μέσος όρος των παχών κατά μήκος της κάθε ενότητας:

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j \cdot t_j, \quad t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j \cdot t_j, \quad t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j \cdot t_j$$

Επισημαίνεται ότι τα αναφερόμενα πάχη t_i περιλαμβάνουν τη διάβρωση, συνεπώς:

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j \cdot t_j = \frac{1}{30} \cdot (2m \cdot 5mm + 22m \cdot 7mm + 6m \cdot 9mm) = 7.3mm \approx 8mm$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j \cdot t_j = \frac{1}{15} \cdot (6m \cdot 9mm + 9m \cdot 15mm) = 12.6mm \approx 13mm$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j \cdot t_j = \frac{1}{15} \cdot (5m \cdot 15mm + 10m \cdot 17mm) = 16.33mm \approx 17mm$$

Η καπνοδόχος των τριών ενότητων αντικαθίσταται από μια ισοδύναμη απλή καπνοδόχο ενεργού μήκους L_{eff} και ομοιόμορφου πάχους $t=t_a$. Το ενεργό μήκος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$L_{eff} = \frac{l_a}{\kappa}$$

Όπου κ είναι ο αδιάστατος συντελεστής που προσδιορίζεται από το σχήμα D.6. του EN1993-1-6.

Για:

$$\frac{t_c}{t_a} = 2.042 \quad \frac{t_b}{t_a} = 1.575 \quad \frac{l_a}{L} = \frac{30}{60} = 0.5$$

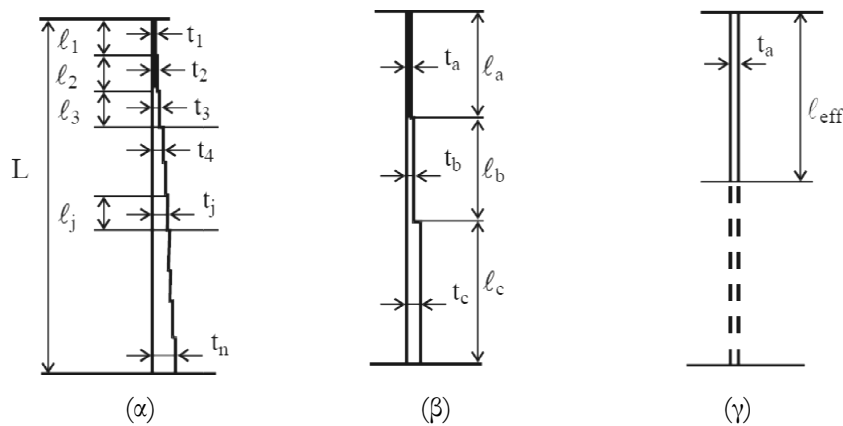
από το σχήμα D.6. προκύπτει:

$$\kappa = 0.9$$

επομένως το ενεργό μήκος είναι:

$$L_{eff} = \frac{l_a}{\kappa} = 33.33m$$

$$\text{και } t = t_a = 8mm$$



Σχήμα 9.32: Μετατροπή βαθμιδωτού κυλίνδρου σε ισοδύναμο κύλινδρο. (α) κύλινδρος με βαθμιδωτά μεταβλητό πάχος τοιχώματος, (β) ισοδύναμος κύλινδρος αποτελούμενος από τρία τμήματα, (γ) ισοδύναμος κύλινδρος σταθερού πάχους τοιχώματος

Επειδή:

$$\frac{r}{t} = 233.438 > 0.21 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = 4.662$$

Απαιτείται έλεγχος έναντι περιμετρικής θλίψης

$$\omega = \frac{r}{L_{eff}} \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} = 0.0037$$

Σύμφωνα με την Παράγραφο D.2.3.1(7) κατά τον προσδιορισμό της κρίσιμης περιμετρικής τάσης λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου ο συντελεστής C_θ τίθεται ίσος με μονάδα.

Και επειδή:

$$20 < \frac{1}{C_\theta \cdot \omega} = 336.741 < 1.63 \cdot \frac{r}{t} = 380.503$$

Έπεται ότι η εξεταζόμενη ισοδύναμη καπνοδόχος μπορεί να θεωρηθεί μεσαίου μήκους. Επομένως η κρίσιμη περιμετρική τάση κύρτωσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0.92 \cdot E \cdot C_\theta \cdot \omega \cdot \frac{t}{r} = 1.99MPa$$

Ο συντελεστής ελαστικής περιμετρικής ατέλειας a_θ προκύπτει από το Πίνακα D.5. ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας σε σχέση με την κατασκευή. Έτσι για κατηγορία C:

$$a_\theta = 0.50$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα σύνθλιψης τίθεται ίση με:

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0.4$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα διαρροής είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{p\theta 0} = \sqrt{2.5 \cdot a_\theta} = 1.118$$

- **Ανώτερο τμήμα**

Εξετάζεται το ανώτερο τμήμα των 30m είναι μακρύ

$$\omega_j = \frac{r}{l_j} \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} = 0.0049$$

$$20 < \frac{1}{C_\theta \cdot \omega_j} = 204.534 < 1.63 \cdot \frac{r}{t} = 380.503$$

Έτσι το ανώτερο τμήμα θεωρείται μεσαίου μήκους και η κρίσιμη περιμετρική τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta, Rcr, j} = \frac{t_a}{t_j} \cdot \sigma_{\theta, Rcr, eff}$$

Όπου $\sigma_{\theta, Rcr, eff}$ είναι η περιμετρική τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου, μήκους L_{eff} , που προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\theta, Rcr, eff} = 0.92 \cdot E \cdot C_\theta \cdot \omega \cdot \frac{t}{r} = 1.99 MPa \quad (\text{για } C_\theta = 1)$$

$$\sigma_{\theta, Rcr, j} = \frac{t_a}{t_j} \cdot \sigma_{\theta, Rcr, eff} = 1.99 MPa$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα της καπνοδόχου στο ανώτερο τμήμα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta, Rcr, eff}}} = 13.168$$

Επειδή :

$$\bar{\lambda}_\theta = 13.168 > \bar{\lambda}_{\theta 0}$$

Ο μειωτικός συντελεστής κύρωσης x_θ , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$x_\theta = \frac{a_\theta}{\bar{\lambda}_\theta^2} = 0.00289$$

Επομένως η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε κύρωση είναι:

$$\sigma_{\theta Rk} = x_\theta \cdot f_y = 0.995 MPa$$

Και η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε κύρωση:

$$\sigma_{\theta Rd} = \frac{\sigma_{\theta Rk}}{\gamma_{M0}} = 0.995MPa$$

Επειδή η τιμή σχεδιασμού των συνισταμένων των παραμέτρων των περιμετρικών τάσεων μεταβάλλεται μέσα στο μήκος L_j του ανωτέρου τμήματος, η τιμή της περιμετρικής θλιπτικής μεμβρανικής τάσης θα πρέπει να τεθεί ίση με την πλασματική τιμή της $\sigma_{\theta Ed, j, mod}$ που καθορίζεται από τη μέγιστη τιμή της συνισταμένης περιμετρικής τάσης $n_{\theta sd}$, οπουδήποτε μέσα στο μήκος L_j , διαιρούμενη με το πάχος t_j :

$$\sigma_{\theta Ed, j, mod} = \frac{\max(n_{\theta sd})}{t_j}$$

Σύμφωνα με την παράγραφο D.1.3.2. του EN1993-1-6, η ανομοιόμορφη κατανομή της πίεσης q_w στη διατομή της καπνοδόχου, λόγω εξωτερικής ανεμοφόρισης, μπορεί να αντικατασταθεί από μια ισοδύναμη ομοιόμορφη εξωτερική πίεση σύμφωνα με την σχέση:

$$q_{eq} = q_{w, max} \cdot k_w$$

Όπου $q_{w, max}$ είναι η μέγιστη πίεση ανέμου και ο k_w υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_w = 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt{C_{\theta} \cdot \omega \cdot \frac{r}{t}} \right)$$

Έτσι ώστε

$$0.65 \leq k_w \leq 1$$

Συνεπώς στο ανώτερο τμήμα των 25m η μέγιστη πίεση ανέμου είναι:

$$q_{w, max} = 5.841kPa$$

και

$$k_w = 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt{C_{\theta} \cdot \omega \cdot \frac{r}{t}} \right) = 0.503 \Rightarrow k_w = 0.65$$

Επομένως:

$$q_{eq} = q_{w, max} \cdot k_w = 0.00294MPa$$

Η τιμή σχεδιασμού της ισοδύναμης πίεσης είναι:

$$q_{eq, sd} = \gamma_f q_{eq} = 0.00411MPa$$

Η τιμή σχεδιασμού τη περιμετρικής τάσης είναι:

$$\sigma_{\theta Ed} = q_{eq, sd} \cdot \frac{r}{t} = 0.96MPa$$

Επομένως:

$$\sigma_{\theta Ed} = 0.96MPa < \sigma_{\theta Rd} = 0.995MPa$$

Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

- **Κατώτερο τμήμα**

Εξετάζεται το κατώτερο τμήμα των 5m αν είναι μακρύ:

$$\omega_j = \frac{1.867}{5m} \cdot \sqrt{\frac{17mm}{1.867m}} = 0.0036$$

επειδή:

$$\frac{1}{\omega_j} = 28.062 < \frac{r}{t} = 109.853$$

έπεται ότι το κατώτερο τμήμα δεν είναι μεγάλου μήκους

Έτσι η κρίσιμη περιμετρική τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = \frac{t_a}{t_j} \cdot \sigma_{\theta,Rcr,eff}$$

Όπου $\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ είναι η περιμετρική τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου, μήκους L_{eff} , που προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = \frac{t_a}{t_j} \cdot \sigma_{\theta,Rcr,eff} = 1.99MP$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα της καπνοδόχου στο ανώτερο τμήμα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr,eff}}} = 12.415$$

Επειδή :

$$\bar{\lambda}_{\theta} = 112.415 > \bar{\lambda}_{\theta 0}$$

Ο μειωτικός συντελεστής κύρτωσης x_{θ} , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$x_{\theta} = \frac{a_{\theta}}{\bar{\lambda}_{\theta}^2} = 0.00324$$

Επομένως η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε κύρτωση είναι:

$$\sigma_{\theta Rk} = x_{\theta} \cdot f_y = 1.119MPa$$

Και η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε κύρτωση:

$$\sigma_{\theta Rd} = \frac{\sigma_{\theta Rk}}{\gamma_{M0}} = 1.119MPa$$

Συνεπώς στο ανώτερο τμήμα των 25m η μέγιστη πίεση ανέμου είναι:

$$q_{w,max} = 3.302kPa$$

και

$$k_w = 0.46 \cdot \left(1 + 0.1 \cdot \sqrt{C_{\theta} \cdot \omega \cdot \frac{r}{t}} \right) = 0.562 \Rightarrow k_w = 0.65$$

$$q_{eq} = q_{w,max} \cdot k_w$$

Επομένως:

$$q_{eq} = q_{w,\max} \cdot k_w = 0.00215 \text{MPa}$$

Η τιμή σχεδιασμού της ισοδύναμης πίεσης είναι:

$$q_{eq,sd} = \gamma_f q_{eq} = 0.00301 \text{MPa}$$

Η τιμή σχεδιασμού τη περιμετρικής τάσης είναι:

$$\sigma_{\theta Ed} = q_{eq,sd} \cdot \frac{r}{t} = 0.624 \text{MPa}$$

Επομένως:

$$\sigma_{\theta Ed} = 0.624 \text{MPa} < \sigma_{\theta Rd} = 1.119 \text{MPa}$$

Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

- **Έλεγχος σε διάτμηση**

Ο έλεγχος γίνεται στη βάση της καπνοδόχου. Επειδή:

$$\frac{r}{t} = 109.853 > 0.16 \cdot \left(\frac{E}{f_y} \right)^{0.67} = 10.19$$

επομένως απαιτείται έλεγχος σε διάτμηση.

Και επειδή:

$$10 < \frac{1}{\omega_j} = 168.371 < 8.7 \frac{r}{t} = 955.721$$

έπεται ότι το κατώτερο τμήμα δεν είναι μεγάλου μήκους, οπότε λαμβάνεται $C_t=1.0$.

Η κρίσιμη τάση διατμητικής κύρτωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\tau_{Rc} = 0.75 \cdot E \cdot C_t \cdot \sqrt{\omega} \cdot \frac{t}{r} = 89.447 \text{MPa}$$

Για κατηγορία κατασκευής καπνοδόχου C, από Πίνακα D.6. είναι $\alpha_t=0.50$

Η ανηγμένη λυγηρότητα διαρροής είναι:

$$\bar{\lambda}_{pt} = \sqrt{2.5 \cdot a_\tau} = 1.118$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα είναι:

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right) / \tau_{Rc}} = 1.492$$

Επειδή $\bar{\lambda}_t > \bar{\lambda}_{pt}$ λαμβάνεται ως μειωτικός συντελεστής κύρτωσης:

$$\chi_{\tau} = \frac{\alpha_{\tau}}{\lambda_{\tau}^2} = 0,225$$

Συνεπώς η χαρακτηριστική τιμή αντοχής κύρτωσης είναι:

$$\tau_{Rk} = \frac{\chi_{\tau} \cdot f_y}{\sqrt{3}} = 44.723 \text{MPa}$$

Και η τιμή σχεδιασμού αντοχής σε κύρτωση είναι:

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{Rk}}{\gamma_{M1}} = 44.723 \text{MPa}$$

Επομένως

$$\tau_{x\theta,d} = 9.13 \text{MPa} < \tau_{Rd} = 44.723 \text{MPa}$$

Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

- **Αλληλεπίδραση μεσημβρινής θλίψης, περιμετρικής θλίψης και διάτμησης**

Πρέπει να προσδιοριστούν οι πλέον δυσμενέστερες τριάδες λόγω δρώντων εντατικών μεγεθών προς αντίστοιχων αντοχών σχεδιασμού καθ' ύψος του κυλίνδρου, εξαιρουμένων των ακραίων περιοχών μήκους $l_R = 0.1 \cdot L = 6 \text{m}$.

Περαιτέρω, επειδή πρόκειται για μακρύ κύλινδρο, η ομάδα δυσμενών εντατικών μεγεθών αναζητείται εντός του μήκους:

$$l' = 1.3 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 1.3 \cdot 1.867 \text{m} \cdot \sqrt{\frac{1.867 \text{m}}{7 \text{mm}}} = 39.654 \text{m}$$

Εν προκειμένω όμως θα ληφθούν για λόγους της εφαρμογής οι μέγιστοι ανωτέρω λόγοι από εκείνους που έχουν υπολογισθεί. Η εξίσωση ελέγχου είναι:

$$\left(\frac{\sigma_{xE d}}{\sigma_{xR d}} \right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta E d}}{\sigma_{\theta R d}} \right)^{k_{\theta}} + \left(\frac{\sigma_{t E d}}{\sigma_{t R d}} \right)^{k_t} < 1$$

Όπου τα k_x , k_{θ} , k_t υπολογίζονται από την Παράγραφο D.1.6, ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} k_x &= 1.25 + 0.75 \cdot \chi_x = 1.74 \\ k_{\theta} &= 1.25 + 0.75 \cdot \chi_{\theta} = 1.252 \\ k_t &= 1.75 + 0.75 \cdot \chi_{\tau} = 1.806 \end{aligned}$$

Συνεπώς:

$$\left(\frac{173.493 \text{MPa}}{205.043 \text{MPa}} \right)^{1.74} + \left(\frac{0.624 \text{MPa}}{1.119 \text{MPa}} \right)^{1.252} + \left(\frac{9.13 \text{MPa}}{44.723 \text{MPa}} \right)^{1.806} = 0.941 < 1$$

Στον **Πίνακα 9.22** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τους έλεγχους για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS3. Όπως μπορεί να φανεί από τα αποτελέσματα, κρίσιμος είναι ο έλεγχος έναντι περιμετρικής θλίψης και συγκεκριμένα στο άνω τμήμα της καπνοδόχου. Αυτό εναπόκειται γενικά στο γεγονός ότι στα ανώτερα τμήματα το κέλυφος της καπνοδόχου είναι σχετικά λεπτό με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπές σε περιμετρικό λυγισμό.

Έτσι με τα συγκεκριμένα πάχη του κελύφους η σχεδίαση της καπνοδόχου έναντι λυγισμού λαμβάνει συντελεστή ασφαλείας ίσο με:

$$r_{Rk} = \frac{\sigma_{\theta Rd} = 0.995MPa}{\sigma_{\theta Ed} = 0.96MPa} = 1.036 > 1$$

Ο οποίος εξάγεται από τον έλεγχο σε περιμετρική θλίψη στο ανώτερο τμήμα της καπνοδόχου

Πίνακας 9.22: Αποτελέσματα ελέγχων, μέσω τάσεων, για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS3

Έλεγχος	Συνθήκη
Έλεγχος σε μεσημβρινής θλίψης	$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{eqEd} = 173.493MPa \leq 205.043MPa$
Έλεγχος σε περιμετρική θλίψη	<p><i>Ανώτερο τμήμα</i></p> $\sigma_{\theta Ed} = 0.96MPa < \sigma_{\theta Rd} = 0.995MPa$
	<p><i>Κατώτερο τμήμα</i></p> $\sigma_{\theta Ed} = 0.624MPa < \sigma_{\theta Rd} = 1.119MPa$
Έλεγχος διάτμησης	$\tau_{x\theta,d} = 9.13MPa < \tau_{Rd} = 44.723MPa$
Αλληλεπίδραση μεσημβρινής θλίψης, περιμετρικής θλίψης και διάτμησης	$\left(\frac{173.493MPa}{205.043MPa}\right)^{1.74} + \left(\frac{0.624MPa}{1.119MPa}\right)^{1.252} + \left(\frac{9.13MPa}{44.723MPa}\right)^{1.806} = 0.941 < 1$

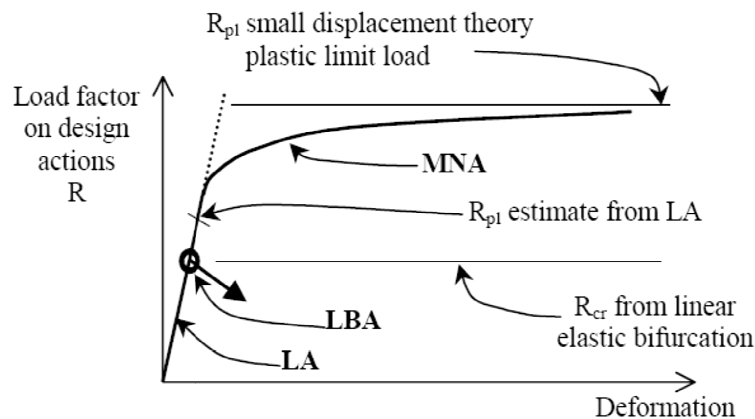
9.4.2.3.2. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις αναλύσεις MNA και LBA

Αρχικά πραγματοποιείται αριθμητική ανάλυση Collapse ορίζοντας μη γραμμικότητα υλικού. Από την ανάλυση υπολογίζεται ο λόγος της πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} (**Σχήμα 9.33**). Ο λόγος του φορτίου r_{Rpl} λαμβάνεται ως η μέγιστη τιμή που υπολογίζεται από την ανάλυση, αγνοώντας την επιρροή της κράτυνσης (**Σχήμα 9.34**). Οι τιμές του συντελεστή r_{Rpl} και για τα δύο στατικά προσομοιώματα φαίνονται στον **Πίνακα 9.23**.

Για τον υπολογισμό του λόγου κρίσιμης ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} πραγματοποιείται ανάλυση ιδιοτιμών λυγισμού (LBA) εφαρμοζόμενη στην υπολογισμένη γραμμική ελαστική κατάσταση τάσεων του τέλειου κελύφους (LA) υπό τις τιμές σχεδιασμού των φορτίων. Ο συντελεστής λαμβάνεται ως η μικρότερη ιδιοτιμή (συντελεστής διακλάδωσης του φορτίου). Οι τιμές του λόγου ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} , των πρώτων πέντε ιδιομορφών λυγισμού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9.24**.

Πίνακας 9.23: Τιμές του λόγου πλαστικής αντίστασης r_{Rk} για την οριακή κατάσταση αστοχίας LS3 για ανάλυση MNA

	MNA	
	Σ.Π.1	Σ.Π.2
r_{Rk}	2,483	2,527

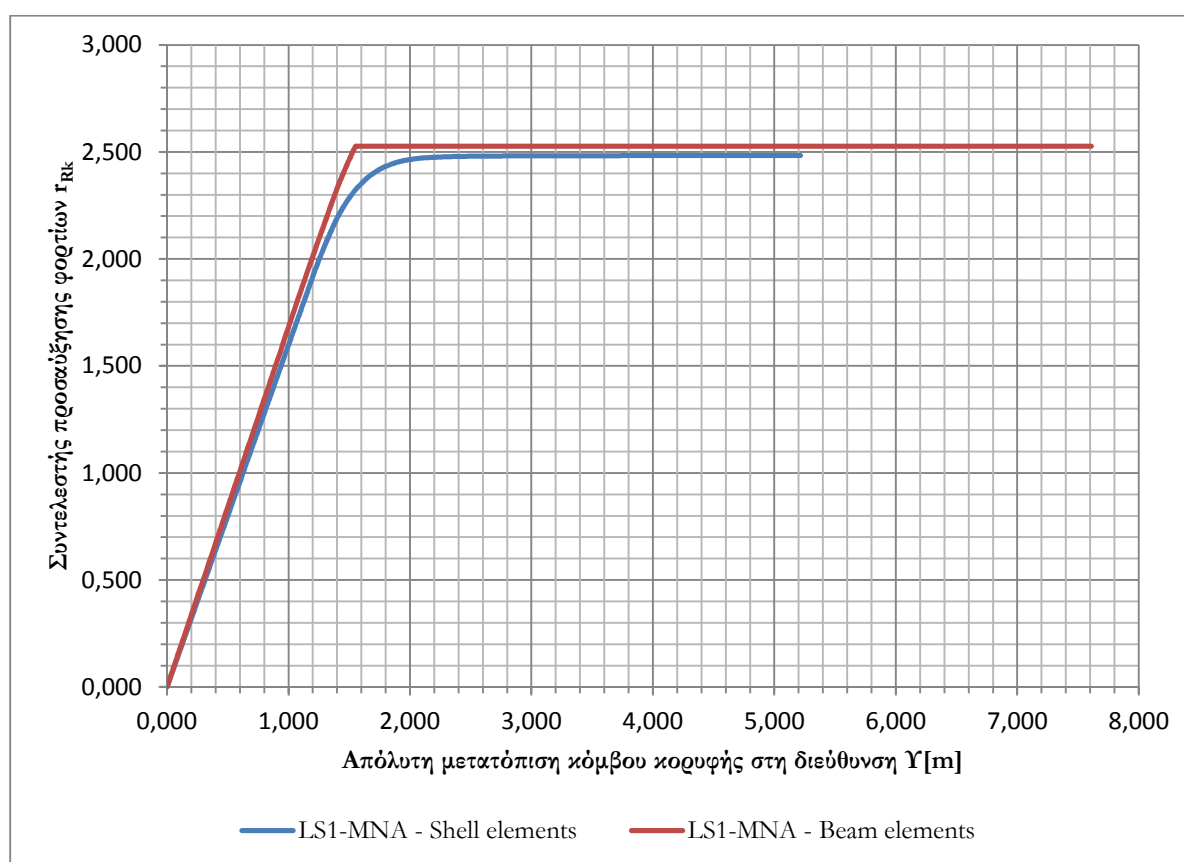


Σχήμα 9.33: Ορισμός του λόγου πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} και του λόγου κρίσιμης αντίστασης σε λυγισμό r_{Rcr} , που προκύπτουν από καθολικές αναλύσεις MNA και LBA.

Στα **Σχήματα 9.35 -9.39** παρουσιάζονται οι πρώτες πέντε ιδιομορφές λυγισμού όπως προέκυψαν για το στατικό προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους. Σημειώνεται ότι για σκοπούς ανάλυσης LBA εφαρμόστηκε το 0.25% του τελικού φορτίου σχεδιασμού. Συνεπώς, ο συντελεστής προσαύξησης που φαίνεται στις πρώτες πέντε ιδιομορφές λυγισμού θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 0.25%. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και οι πέντε ιδιομορφές αντιστοιχούν σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού στη βάση της καπνοδόχου. Η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού αντιστοιχεί στην κλασική περίπτωση λυγισμού κελυφών λόγω πτύχωσης (κοιλότητες κατά τον μεσημβρινό). Στις επόμενες ιδιομορφές είναι φανερό ότι κοιλότητες εμφανίζονται και κατά την περιφέρεια.

Πίνακας 9.24: Τιμές του λόγου ελαστικής αντίστασης λυγισμού Γ_{Rcr} , για τις πρώτες πέντε ιδιοτιμές λυγισμού για το στατικό προσομοίωμα 1.

LBA	
Ιδιομορφή λυγισμού	Γ_{Rcr}
1	4.457
2	4.540
3	4.592
4	4.675
5	4.685



Σχήμα 9.34: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση MNA και για τα δύο στατικά προσομοιώματα.

Είναι κατανοητό ότι φαινόμενα τοπικού λυγισμού, όπως αναφέρθηκε, δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν στο στατικό προσομοίωμα με τα ραβδωτά στοιχεία (Σ.Π.2). Ο λόγος της κρίσιμης ελαστικής αντίστασης λυγισμού Γ_{Rcr} για το στατικό Σ.Π.2 λαμβάνει τιμές σχετικά πολύ μεγάλες ($\gg 50$) οι οποίες, στην συγκεκριμένη περίπτωση, δεν θεωρήθηκαν ρεαλιστικές.

Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι ο λόγος ελαστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rcr} είναι αλγεβρικά μεγαλύτερος από το λόγο πλαστικής αντίστασης αναφοράς r_{Rpl} . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καπνοδόχος δεν καταπονείται από σημαντικά αξονικά φορτία τα οποία θα ενθάρρυναν την αστοχία λόγω λυγισμού. Έτσι φαίνεται ότι το υλικό διαρρέει προτού εκδηλωθεί ο τοπικός λυγισμός.

Έτσι, από τα αποτελέσματα υπολογίζεται ο λόγος της χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rk} :

$$r_{Rk} = \chi_{ov} \cdot r_{Rpl}$$

όπου χ_{ov} είναι ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού και υπολογίζεται ως $\chi_{ov} = f(\bar{\lambda}_{ov}, \bar{\lambda}_{ov,0}, a_{ov}, \beta_{ov}, \eta_{ov})$ όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 7(7.4.3.1).

Η ολική ανοιγμένη λυγηρότητα λ_{ov} του κελύφους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{F_{Rpl}}{F_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}}$$

Άρα για το προσομοίωμα 1 είναι:

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{F_{Rpl}}{F_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}} = 0.746$$

Οι τιμές των $\lambda_{ov}, \lambda_0, \beta_{ov}, \eta_{ov}$ και r_{Rov} λαμβάνονται συντηρητικά από την Παράγραφο D.1.2.2 ως:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_{ov,0} &= \bar{\lambda}_{x0} = 0.20 \\ \beta_{ov} &= \beta = 0.60 \\ \eta_{ov} &= \eta = 1.0\end{aligned}$$

Ο ολικός μειωτικός συντελεστής ατελειών a_{ov} υπολογίζεται από τη σχέση

$$a_{ov} = \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{w_k}{t} \right)^{1.44}}$$

Από προηγούμενους υπολογισμούς (9.4.2.2.):

$$a_{ov} = 0.304$$

Άρα η τιμή του πλαστικού ορίου ανηγμένης λυγηρότητας είναι

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} = 0.871$$

Συνεπώς, επειδή $\bar{\lambda}_{ov,0} \leq \bar{\lambda}_{ov} \leq \bar{\lambda}_p$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda}_{ov} - \bar{\lambda}_{ov,0}}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{ov,0}} \right)^\eta = 0.512$$

Έτσι ο λόγος της χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού r_{Rk} είναι:

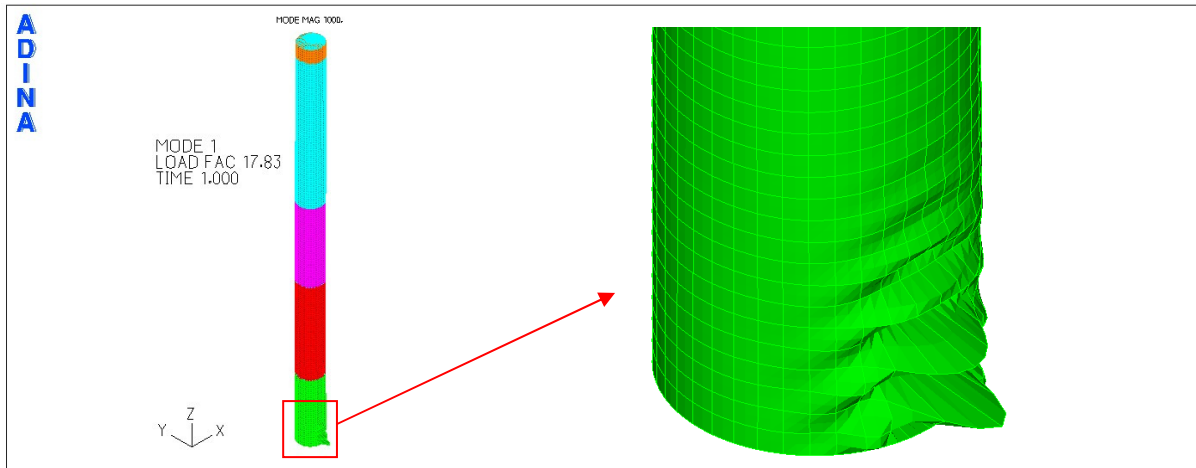
$$r_{Rk} = 0.512 \cdot 2.483 = 1.271$$

Και παρομοίως ο λόγος αντίστασης σχεδιασμού σε λυγισμό r_{Rd} είναι:

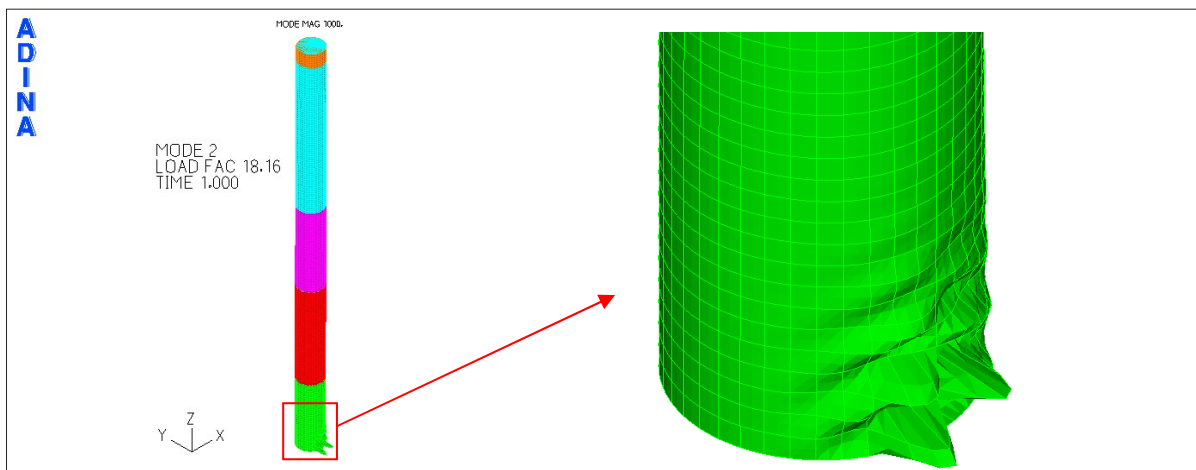
$$r_{Rk} = 1.271/1.1 = 1.155 > 1$$

Επειδή ο συντελεστής r_{Rk} λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας, η καπνοδόχος θεωρείται ασφαλής σε λυγισμό.

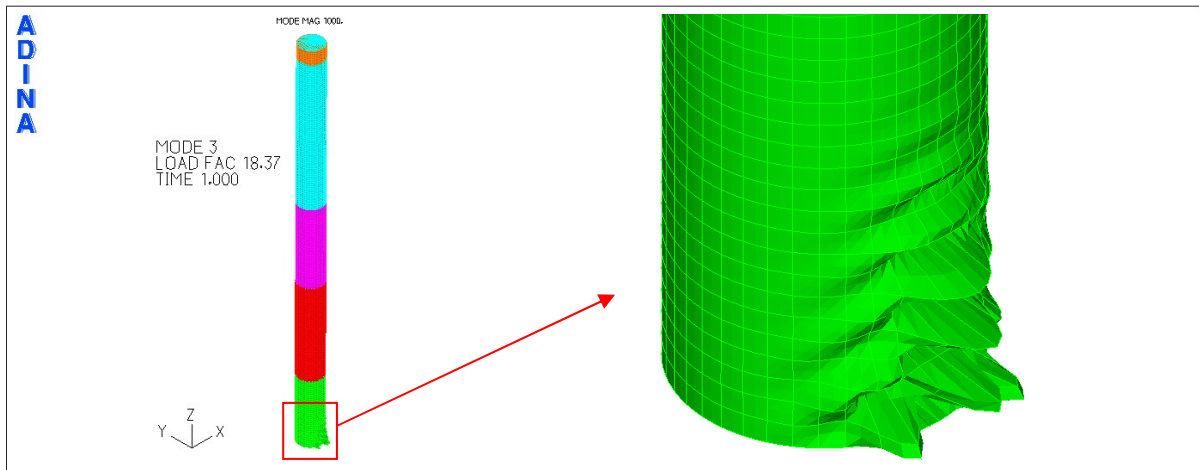
Όπως μπορεί να διαφανεί ο έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας LS3 μέσω ανάλυσης MNA δίνει μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τους προηγούμενους αντίστοιχους υπολογισμούς μέσω τάσεων. Αυτό εναπόκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση ανάλυσης MNA λαμβάνεται υπόψη και η μη γραμμικότητα υλικού.



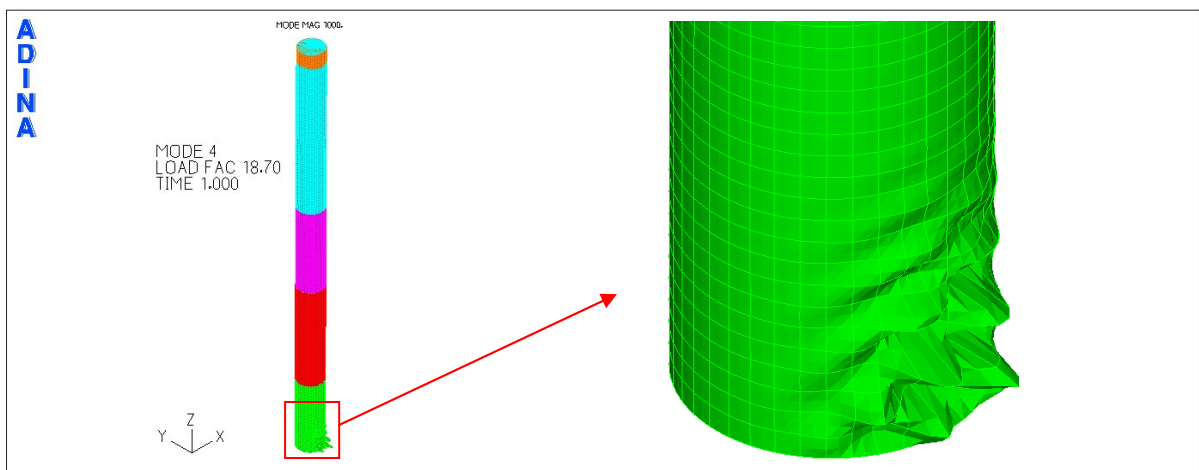
Σχήμα 9.35: 1^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους -ανάλυση LBA.



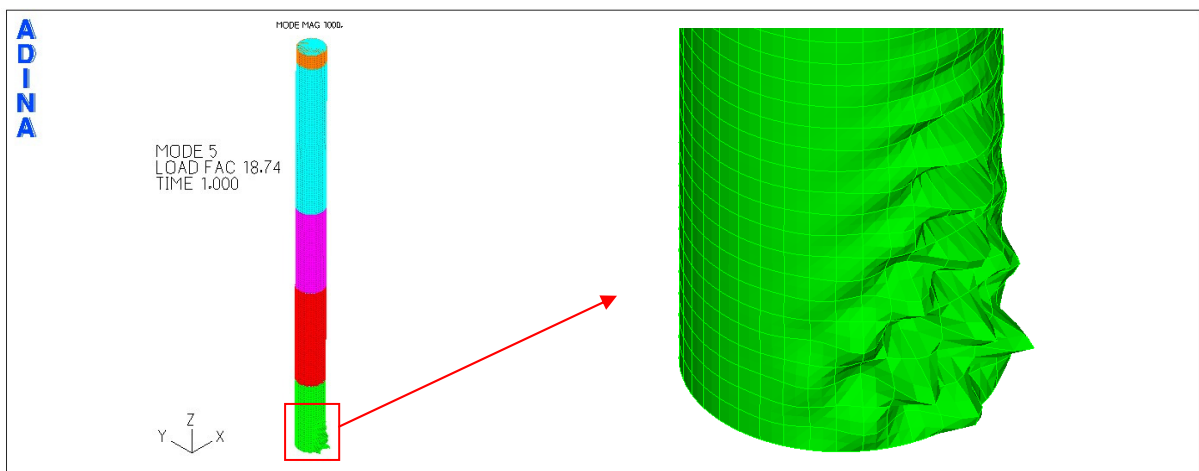
Σχήμα 9.36: 2^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους -ανάλυση LBA.



Σχήμα 9.37: 3^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.



Σχήμα 9.38: 4^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.

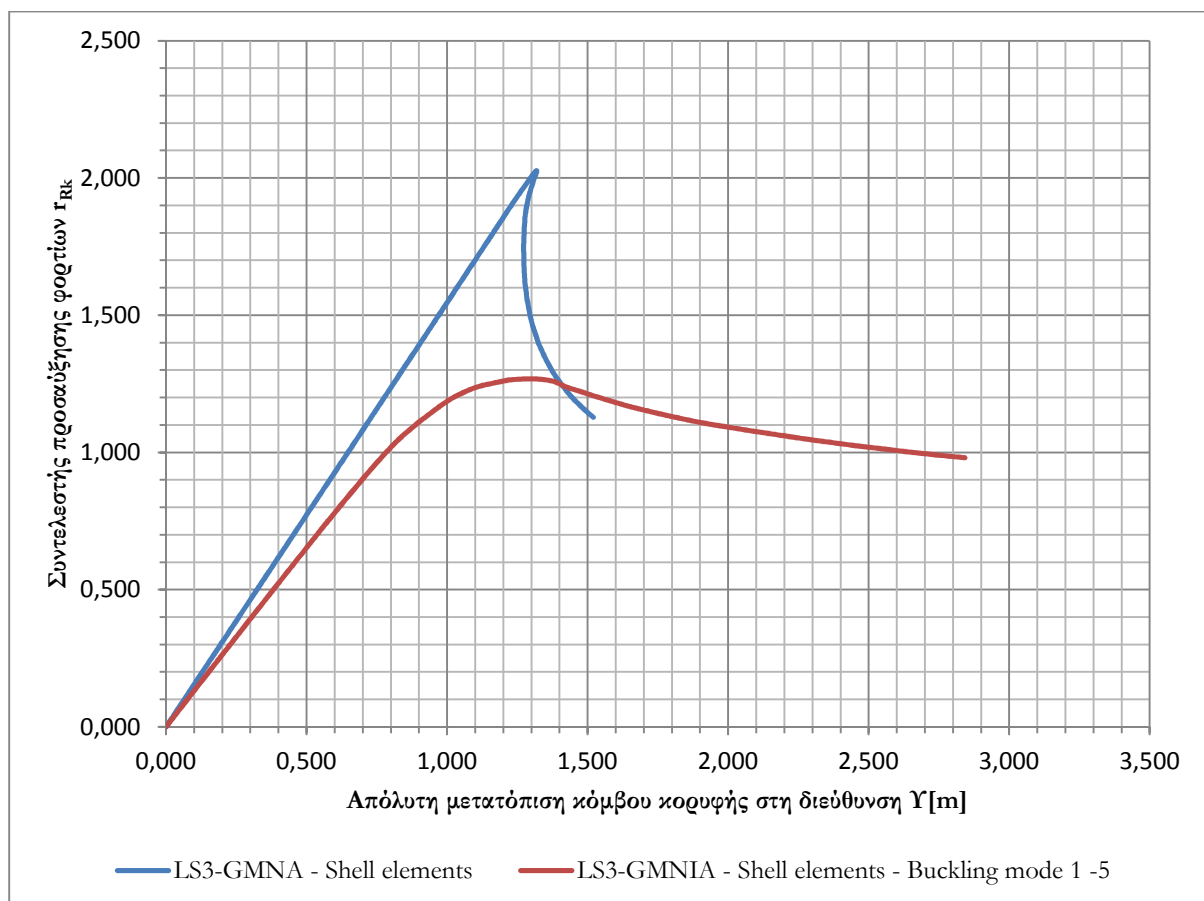


Σχήμα 9.39: 5^η ιδιομορφή λυγισμού στατικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων κελύφους - ανάλυση LBA.

9.4.2.3.3. Σχεδιασμός με καθολική αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιώντας την ανάλυση GMNIA

Ο έλεγχος έναντι λυγισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω μη γραμμικής αριθμητικής ανάλυσης που θα λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας αλλά και ενδεχόμενες ατέλειες στο κέλυφος της κατασκευής (GMNIA). Το EN1993-1-6 (βλέπε Κεφάλαιο 7) καθορίζει τριών ειδών ατέλειες που ενδέχεται να παρουσιάζει ο κελυφωτός φορέας και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση. Οι ατέλειες αφορούν πιθανή απόκλιση από το κυκλικό σχήμα, τυχηματικές εκκεντρότητας και ατέλειες λόγω πτύχωσης.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης λαμβάνονται υπόψη μόνο ενδεχόμενες ατέλειες του φορέας λόγω πτύχωσης. Οι ατέλειες λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση μέσω των ιδιομορφών λυγισμού και ορίζονται με βάση τις σχετικές μετατοπίσεις των κόμβων του προσομοιώματος για τις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα λαμβάνονται υπόψη οι πέντε πρώτες ιδιομορφές λυγισμού. Για κάθε ιδιομορφή εντοπίζεται ο κόμβος του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων με τη μέγιστη μετατόπιση και σε αυτόν ορίζεται η μέγιστη μετατόπιση λόγω ατέλειας. Οι μετατοπίσεις των υπόλοιπων κόμβων είναι ανάλογες της μέγιστης ορισμένης μετατόπισης.



Σχήμα 9.40: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση GMNA και GMNIA

Για το κέλυφος της καπνοδόχου θεωρείται απόκλιση από το κυκλικό σχήμα ίση με $U_{r,max}=0.016$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της παραμέτρου ανοχής πτύχωσης του κελύφους (**Πίνακας 7.4**). Έτσι η μέγιστη επιτρεπόμενη ατέλεια του φορέα λόγω πτύχωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$l_{gx} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 1.01m$$

$$U_{0,i} = \frac{\Delta w_{0i}}{l_{gi}} \Rightarrow \Delta w_{0x} = U_{0,x} \cdot l_{gx} = U_{r,max} \cdot l_{gx} = 0.016 \cdot 1.01m = 16.16mm$$

Το EN1993-1-6 ορίζει ότι πριν από την ανάλυση GMNIA θα πρέπει να προηγηθούν οι αναλύσεις LBA MNA ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές r_{Rp1} και r_{Rcr} αντίστοιχα. Στη συνέχεια, και από τους λόγους αυτούς, θα πρέπει να υπολογιστεί η ολική ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{ov}$. Όλοι οι προηγούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στην Παράγραφο 9.4.3.2.

Επίσης πριν την ανάλυση GMNIA θα πρέπει αν προηγείται GMNA ώστε να επαληθευτεί η επιρροή των επιλεχθέντων γεωμετρικών ατελειών. Η ανάλυση GMNA πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 9.4.3.2.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται μη-γραμμική ανάλυση, γεωμετρίας και υλικού, συμπεριλαμβανομένων και των ατελειών (GMNIA). Από την ανάλυση εξάγεται ο δρόμος ισορροπίας για ένα κόμβο στη κορυφή της καπνοδόχου, ο οποίος φαίνεται στο **Σχήμα 9.40**. Στο ίδιο σχήμα, για σκοπούς σύγκρισης παρατίθενται και ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε μέσω ανάλυσης GMNA. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι δύο δρόμοι ισορροπίας διαφέρουν κατά πολύ και αυτό επαληθεύει την επίδραση των ατελειών στην ευστάθεια της κατασκευής. Η επιρροή των ατελειών είναι εμφανής από την αρχή της παραμόρφωσης της καπνοδόχου. Από τη θέση ισορροπίας μέχρι και την παραμόρφωση κορυφής 0.80 m ο δρόμος ισορροπίας παραμένει γραμμικός, αλλά με μικρότερη κλίση από αυτή που λαμβάνεται από στο δρόμο ισορροπίας της κορυφής υπό ανάλυση GMNA. Για παραμόρφωση κορυφής μόλις 1.30m, η καπνοδόχος λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή αντίστασης για ανάλυση GMNIA. Αμέσως μετά από αυτό το σημείο συμβαίνει αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού στη βάση και έτσι ο δρόμος ακολουθεί μια καθοδική πορεία. Ο δρόμος ισορροπίας φαίνεται στη συνέχεια να τείνει να οριζοντιωθεί. Για λόγους υπολογιστικού "κόστους" η ανάλυση διεκόπη για παραμόρφωση κορυφής ίση με 3m. Για σκοπούς εποπτείας στο **Σχήμα 9.42** και στο **Σχήμα 9.43** παρουσιάζονται αντίστοιχα οι παραμορφώσεις καθώς και οι τάσεις στη βάση της καπνοδόχου μετά το τέλος της ανάλυσης.

Από την ανάλυση GMNIA λαμβάνεται ο λόγος της ατελούς ελαστοπλαστικής αντίστασης λυγισμού r_{RGMNIA} ως η μέγιστη τιμή που προκύπτει από τον δρόμο ισορροπίας (βλέπε Σχήμα 7.9). Έτσι:

$$r_{RGMNIA} = 1.268$$

Όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 7**, το EN1993-1-6 ορίζει ότι θα πρέπει να γίνεται έλεγχος για τη αξιοπιστία του αριθμητικώς προσδιορισμένου ατελούς ελαστοπλαστικής αντίστασης λυγισμού r_{RGMNIA} . Από

τους ελέγχους εξάγεται ο συντελεστής βαθμονόμησης k_{GMNIA} . Η υπολογισθείσα τιμή του συντελεστή όμως δεν πρέπει να υπερβαίνει την μονάδα. Επίσης ο συντελεστής δεν θα πρέπει να λαμβάνει τιμές πέραν των ορίων:

$$0.8 \leq k_{GMNIA} \leq 1.2$$

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης ο συντελεστής βαθμονόμησης λαμβάνεται συντηρητικά ίσος με:

$$k_{GMNIA} = 0.9$$

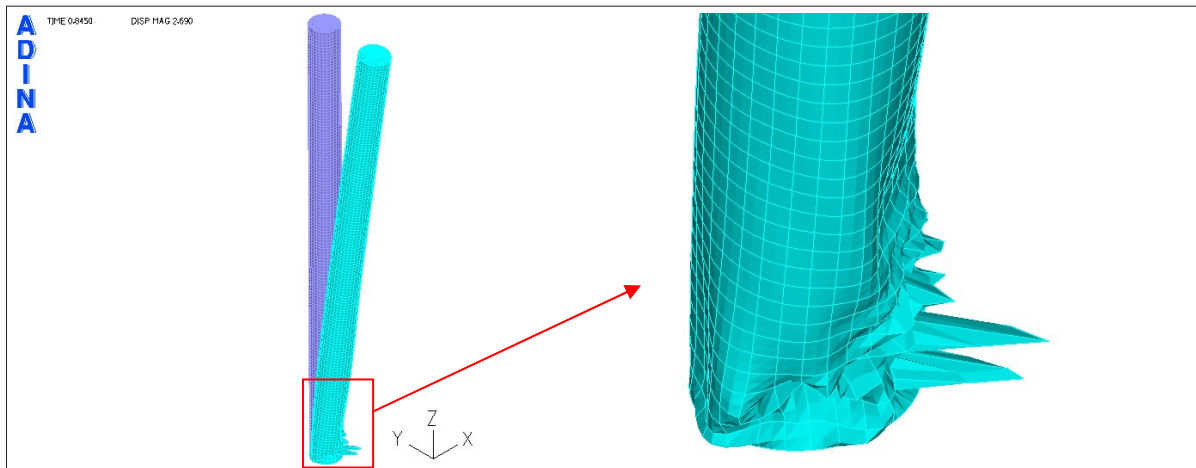
Άρα ο λόγος της χαρακτηριστικής αντίστασης λυγισμού είναι:

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} \cdot r_{R,GMNIA} = 0.9 \cdot 1.268 = 1.141$$

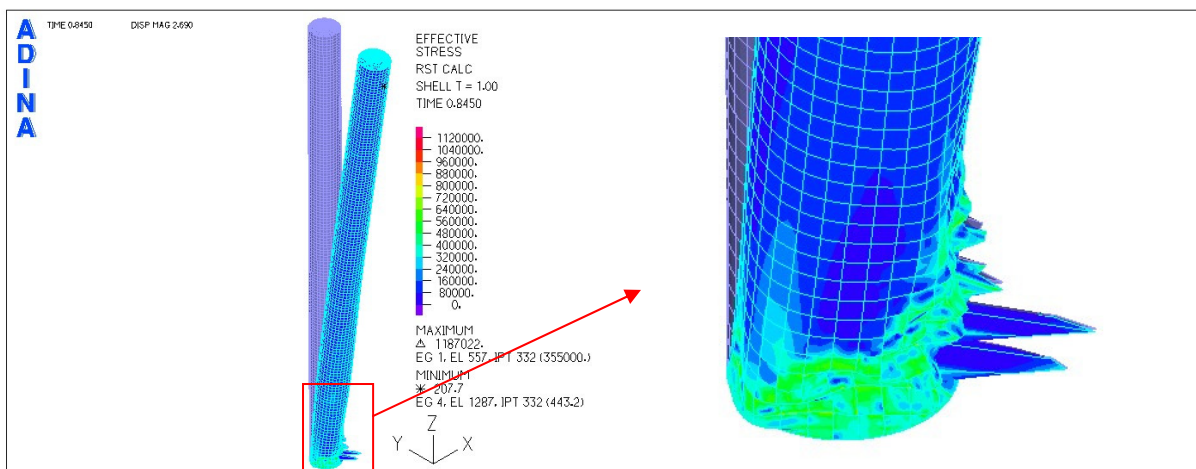
Και συνεπώς ο λόγος αντίστασης σχεδιασμού σε λυγισμό r_{Rd} είναι:

$$r_{Rk} = 1.141 / 1.1 = 1.037 > 1$$

Έτσι η καπνοδόχος είναι ασφαλής σε λυγισμό.



Σχήμα 9.41: Παραμόρφωση στη καπνοδόχο μετά από ανάλυση GMNIA

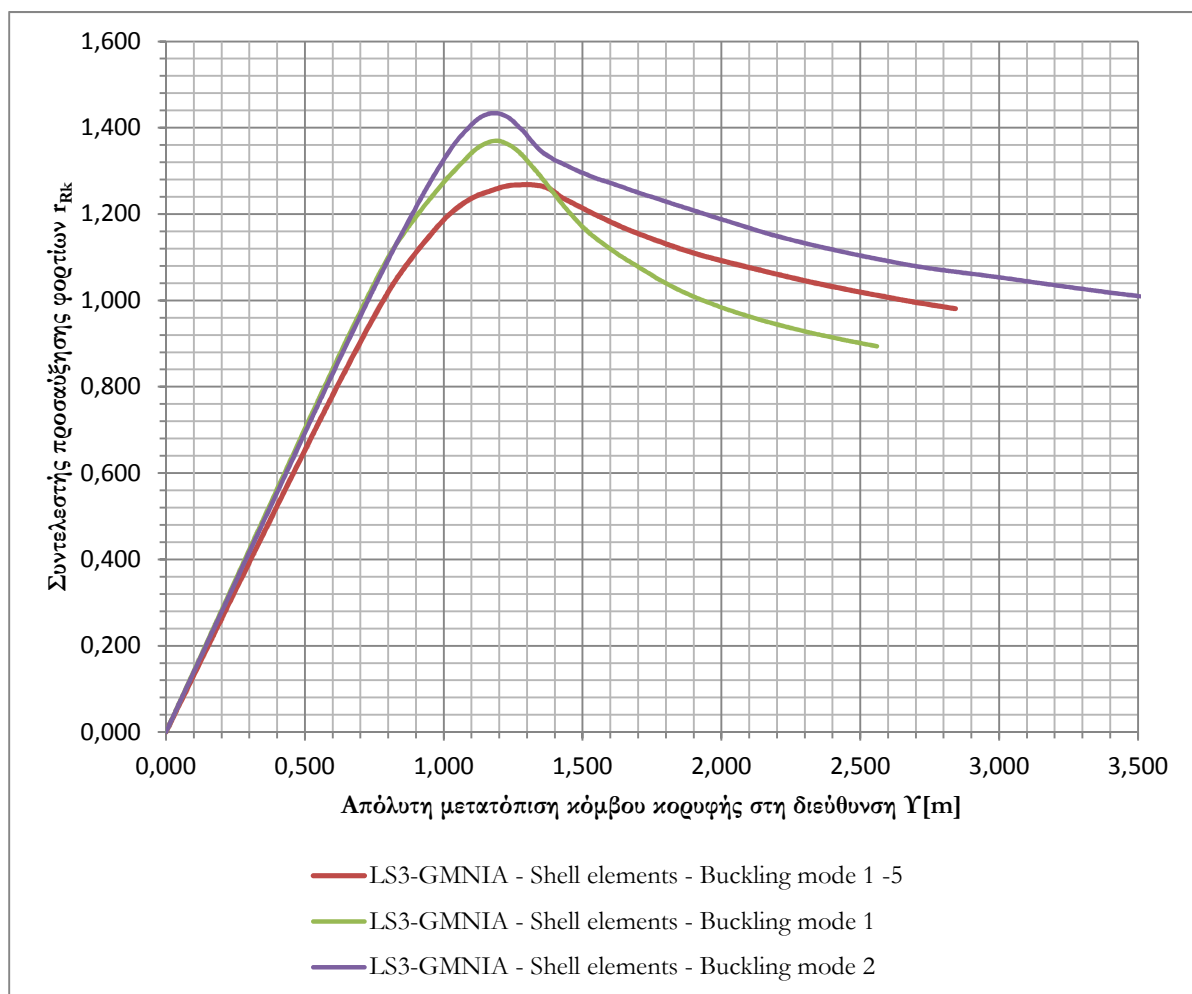


Σχήμα 9.42: Μέγιστες τάσεις στη καπνοδόχο μετά από ανάλυση GMNIA

Είναι φανερό από τα αποτελέσματα ότι μέσω ανάλυσης GMNIA προκύπτει μικρότερος συντελεστής ασφαλείας από ότι μέσω ανάλυσης GMNA. Πιθανές ατέλειες στο κέλυφος, όπως φαίνεται, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της τις καπνοδόχου.

Η επιλογή όμως των καταλληλότερων ατελειών όπου θα επιφέρουν το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας είναι ένα μείζον θέμα σε μια ανάλυση GMNIA. Το EN1991-1-6 ορίζει ότι η επιλογή των ατελειών θα πρέπει να προκύπτει μετά από μια διαδικασία δοκιμών.

Για σκοπούς της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση για την επιλογή ικανοποιητικού αριθμού ιδομορφών λυγισμού. Όσον αφορά το τελευταίο, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο αριθμός των ιδιομορφών που θα ληφθούν υπόψη στην ανάλυση δεν είναι πάντοτε αναλόγως της δυσμέλειας των αποτελεσμάτων. Πολύ πιθανό είναι στην περίπτωση συνδυασμού ιδομορφών λυγισμού οι παραμορφώσεις να αλληλοεξουδετερωθούν λόγω διαφοράς προσήμου. Για το λόγω αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθεί κατά πόσο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σωστό να ληφθεί ένας αριθμός ιδιομορφών λυγισμού ή αν πρέπει να ληφθεί μεμονωμένα η κάθε ιδιοτιμή.



Σχήμα 9.43: Δρόμος ισορροπίας κόμβου στη κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση GMNIA για διαφορετικό αριθμό ιδομορφών λυγισμού.

Στο **Σχήμα 9.43** παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας κόμβου στην κορυφή της καπνοδόχου για ανάλυση GMNIA. Για την καπνοδόχο διεξήχθησαν επιπλέον δύο διαφορετικές αναλύσεις GMNIA λαμβάνοντας υπόψη μεμονωμένα την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή λυγισμού

Όπως μπορεί να διαφανεί, στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο συνδυασμός των πρώτων πέντε ιδιομορφών λυγισμού φαίνεται να δίνει και το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας σε λυγισμό. Αντίθετα, στην περίπτωση που η ανάλυση GMNIA γίνεται λαμβάνοντας μεμονωμένα την πρώτη και την δεύτερη ιδιομορφή λυγισμού, ο συντελεστής ασφαλείας φαίνεται ότι λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές.

9.4.2.4. Κόπωση (LS4)

Όπως φάνηκε στην **Παράγραφο 9.3.3.3**, η καπνοδόχος θα πρέπει να ελεγχθεί έναντι στροβιλώδους διέγερσης. Σύμφωνα με τους ίδιους υπολογισμούς, το εύρος ταλάντωσης που υπολογίστηκε για την καπνοδόχο, υπό την επίδραση της στροβιλώδους διέγερσης, είναι 2.69m. Το εύρος αυτό, σύμφωνα με τον **Πίνακα 8.4** του **Κεφαλαίου 8**, είναι απαγορευτικό. Για το λόγο αυτό θα πρέπει ληφθούν μέτρα μείωσης του εύρους ταλάντωσης. Όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 8**, για την μείωση του εύρους ταλάντωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αεροδυναμικές συσκευές ή/και αποσβεστήρες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν αεροδυναμικές συσκευές θα πρέπει ο υπολογισμός του μέγιστου εύρους ταλάντωσης να γίνει σύμφωνα με την μέθοδο 1. Όπως περιγράφηκε όμως στην **Παράγραφο 9.3.2.3**, η μέθοδος αυτή υποεκτιμά το εύρος ταλάντωσης. Έτσι στο παράδειγμα λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τη δεύτερη μέθοδο. Για το λόγο αυτό προτιμάται όπως τοποθετηθεί στην καπνοδόχο αποσβεστήρας μάζας (TMD).

Για σκοπούς όμως της παρούσας μελέτης και για σκοπούς σύγκρισης, υπολογίζεται η μείωση του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης με τη χρήση αεροδυναμικών συσκευών. Έτσι στην περίπτωση που η μέθοδος 1 (για το υπολογισμό του μέγιστου εύρους ταλάντωσης) προσέδιδε ρεαλιστικά αποτελέσματα, τότε με βάση τη σχέση:

$$a = \left(1 - \frac{P_s}{h}\right)^3$$

και με την υπόθεση ότι θα τοποθετηθεί σπειροειδή αεροτομή στο 1/3 του άνω ύψους της καπνοδόχου:

$$a = \left(1 - \frac{20}{60}\right)^3 = 0.30$$

η αεροδυναμική συσκευή θα προσέδιδε μια μείωση στο μέγιστο εύρος ταλάντωσης ίση με 70%. Έτσι το τελικό εύρος ταλάντωσης με βάση την μέθοδο 1 θα ήταν:

$$y_{Fj} = 0.269 \cdot 0.3 \cdot b = 0.301m$$

Έτσι αν υποθεθεί ότι η καπνοδόχος είναι κατηγορίας αξιοπιστίας 2, το μέγιστο εύρος ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $0.10 \times b = 0.37\text{m}$. Επομένως το μέγιστο εύρος ταλάντωσης ικανοποιεί τους περιορισμούς.

Εν τέλει όμως, θεωρείται ότι θα τοποθετηθεί αποσβεστήρας στην καπνοδόχο που θα προσδώσει στην καπνοδόχο απόσβεση ίση με $\delta_s = 0.3$. Συνεπώς ο αριθμός Strouhal γίνεται:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} = 39.105$$

και

$$\frac{y_{F,\max}}{b} = 0.014$$

συνεπώς το μέγιστο εύρος ταλάντωσης σύμφωνα με την δεύτερη μέθοδο του EN1991-1-4 είναι:

$$y_{F,\max} = 0.051\text{m} < 0.37\text{m}$$

Η εκτιμώμενη αδρανειακή δύναμη φαίνεται στον **Πίνακα 9.25**:

Πίνακας 9.25: Δυνάμεις και πιέσεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης λαμβάνοντας υπόψη τη εγκατάσταση αποσβεστήρα μάζας στη καπνοδόχο.

$z(\text{m})$	$\Phi_1(z)$	$m_e (\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	$\max y_F$	$n_{i,y} (\text{Hz})$	$F_{ij} (\text{kN}/\text{m})$	$L_{\text{arc}} (\text{m})$	$F_{ij} (\text{kN}/\text{m}^2)$
2,5	0,002	1,137	0,051	1,038	0,004	2,440	0,010
10	0,028	1,137	0,051	1,038	0,069	2,440	0,167
24	0,160	1,137	0,051	1,038	0,395	2,440	0,963
36	0,360	1,137	0,051	1,038	0,888	2,440	2,167
47	0,614	1,137	0,051	1,038	1,513	2,440	3,693
58	0,934	1,137	0,051	1,038	2,305	2,440	5,624
60	1,000	1,137	0,051	1,038	2,467	2,440	6,018

Τα φορτία επιβάλλονται στα δύο στατικά προσομοιώματα. Στη συνέχεια περιγράφεται ο έλεγχος έναντι κόπωσης. Ο έλεγχος γίνεται με βάση το EN1993-1-9.

Ο αριθμός των κύκλων ταλαντώσεων λόγω στροβιλώδους διέγερσης εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{v_{\text{crit}}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left(- \left(\frac{v_{\text{crit}}}{v_0} \right)^2 \right) \quad \text{όπου:}$$

v_0 είναι $\sqrt{2}$ φορές η τιμή με τη μεγαλύτερη πιθανότητα στην κατανομή πιθανότητας Weibull η οποία ελήφθη υπόψη για την ταχύτητα ανέμου [m/s]

T είναι ο χρόνος ζωής σε δευτερόλεπτα, ο οποίος είναι ίσος με $3,2 \cdot 10^7$ επί τον προσδοκώμενο χρόνο ζωής σε χρόνια.

ε_0 είναι ο συντελεστής εύρους ο οποίος περιγράφει το εύρος ταχυτήτων ανέμου σε ταλαντώσεις λόγω στροβιλώδους διέγερσης (προσεγγιστική τιμή $\varepsilon_0=0.3$)

Η v_0 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_o = v_{m, Li} \cdot \frac{1}{5} = 59.14 \text{ m/s} \cdot \frac{1}{5} = 11.828 \text{ m/s}$$

και αν υποθεθεί χρόνος

ζωής $T=25$ έτη

τότε:

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left(- \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right) = 5.914 \times 10^7 > N = 1 \cdot 10^4$$

Ο έλεγχος έναντι ασφάλειας σε κόπωση λόγω στροβιλώδους διέγερσης πραγματοποιείται σύμφωνα με την παράγραφο 9.4 του EN1993-3-2:

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta \sigma_s \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_M}$$

όπου:

γ_{Ff} είναι ο μερικός συντελεστής για το φορτίο κοπώσεως

γ_M είναι μερικός συντελεστής για την αντοχή σε κόπωση

$\Delta \sigma_s$ είναι η διακύμανση των δρώσων τάσεων, που σχετίζονται με τον αριθμό των κύκλων N

$\Delta \sigma_c$ είναι η τιμή της αντοχής σε κόπωση σε $N_c=2 \cdot 10^6$ κύκλους για την κατηγορία κόπωσης της εξεταζόμενης λεπτομέρειας της συγκόλλησης

λ είναι ο συντελεστής ισοδυναμίας που μεταφράζει την $\Delta \sigma_s$ σε $N_c=2 \cdot 10^6$

ο συντελεστής ισοδυναμίας λ προσδιορίζεται από την εξίσωση:

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

όπου m είναι η κλίση της καμπύλης S-N.

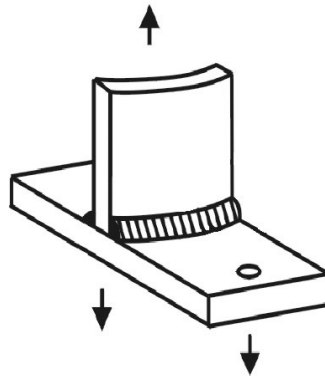
Σημειώνεται ότι οι συντελεστές ασφαλείας έναντι κόπωσης προσδιορίζονται από τον Πίνακα 3.1. του EN1993-1-9. Για συνήθη κατηγορία αξιοπιστίας καπνοδόχου 2 προκύπτει:

$$\gamma_{Mf} = 1.15, \quad \gamma_{Ff} = 1.20$$

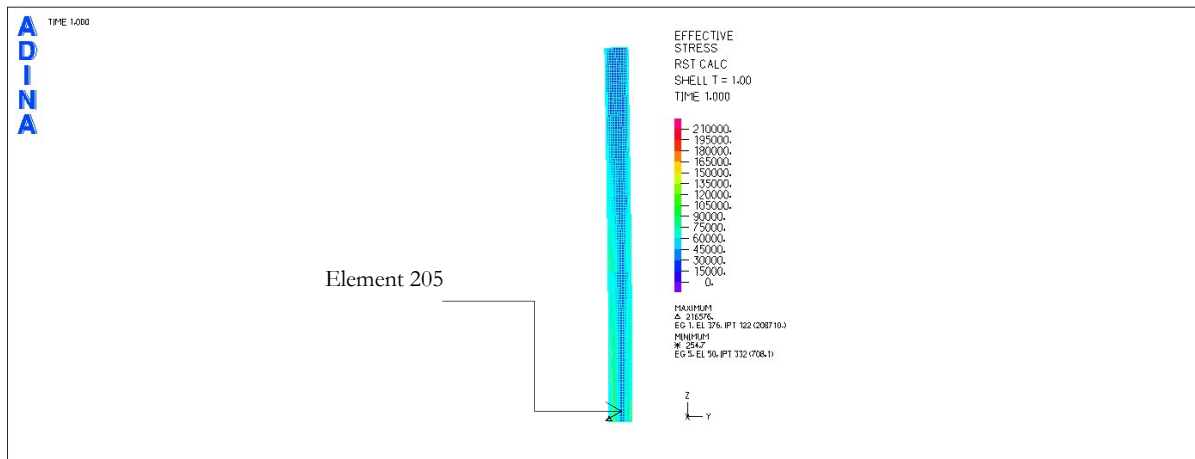
Για τους σκοπούς του παραδείγματος η καπνοδόχος θα ελεγχθεί σε κόπωση στη βάση. Η καπνοδόχος συγκολλάται στη βάση σε μετωπική πλάκα μέσω εσωρραφής T, πάχους 40mm (**Σχήμα 9.44**).

Σύμφωνα με την περίπτωση (20) του Πίνακα C.1 του EN1993-3-2, η συγκόλληση θα πρέπει να ελεγχθεί σε δύο σημεία, τουτέστιν στο άνω σημείο της ραφής που βρίσκεται σε επαφή με το κέλυφος της καπνοδόχου (πάχους 20mm) και στο κάτω σημείο της ραφής που βρίσκεται σε επαφή με την μετωπική πλάκα.

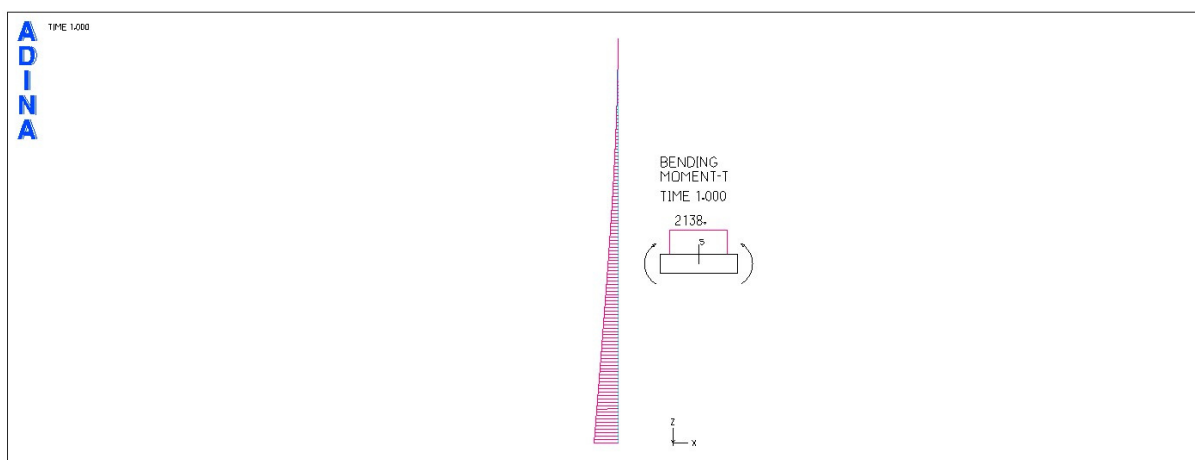
Ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης μέσω τάσεων ή αριθμητικών αναλύσεων (LA ή GNA) γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των τάσεων λόγω στροβιλώδους διέγερσης. Το EN1993-1-6 όμως δεν δίνει οποιεσδήποτε συγκεκριμένες οδηγίες όσο αφορά τις αναλύσεις LA ή GNA.



Σχήμα 9.44: Λεπτομέρεια βάσης και σημεία ελέγχου σε κόπωση



Σχήμα 9.45: Υπολογισμός διακύμανσης τάσεων λόγω στροβιλώδους διέγερσης από το Σ.Π.1



Σχήμα 9.46: Υπολογισμός μέγιστης ροπής βάσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης από το Σ.Π.2

Ο υπολογισμός της τάσης σχεδιασμού στη βάση της καπνοδόχου γίνεται μέσω υπολογισμού της ροπής σχεδιασμού από το Σ.Π.2 και μέσω υπολογισμού της τάσης σχεδιασμού από το Σ.Π.1. Στον **Πίνακα 9.26** παρουσιάζονται οι τιμές των προαναφερθέντων όπως πάρθηκαν από τα δύο Σ.Π.

Πίνακας 9.26: Ροπή και τάση σχεδιασμού για τον έλεγχο έναντι κοπώσεως.

	Προσομοίωμα 1	Προσομοίωμα 2
$\Delta\sigma_c$ [MPa]	33.076*	---
M_{sd} [kNm]	---	2138

*element 205 of element group 1

Δεδομένου ότι η διεύθυνση του ανέμου είναι τυχαία, η διακύμανση των τάσεων για το Προσομοίωμα 2 λαμβάνεται ως δύο φορές η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται κατά τη μια διεύθυνση του ανέμου:

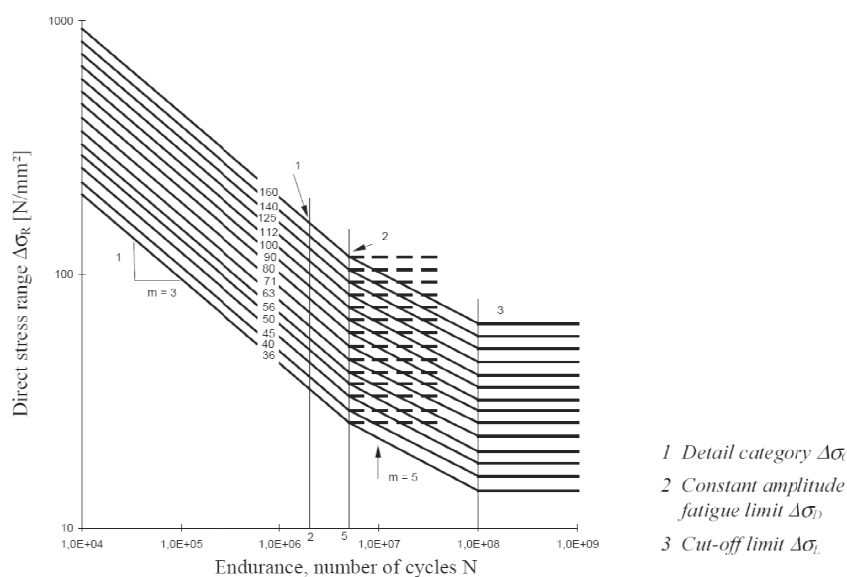
$$\Delta\sigma_s = \frac{2 \cdot M_{sd}}{w} = \frac{2 \cdot M_{sd}}{\pi \cdot r^2 \cdot t} = 30.652 \text{ MPa}$$

Ο συντελεστής ισοδυναμίας λ είναι:

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

Και προϋποθέτει σταθερή κλίση του διαγράμματος $\Delta\sigma - N$.

Από τις καμπύλες αντοχής σε κόπωση, για $N=5.914 \times 10^7$ παρατηρείται αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος από $m=3$ σε $m=5$. Επομένως δεν μπορεί να εφαρμοσθεί η παραπάνω σχέση απευθείας, αλλά πρέπει να παρεμβληθεί ο υπολογισμός του συντελεστή λ για $N=5 \times 10^6$, όπου είναι το σημείο τομής των καμπύλων με κλίση $m=3$ και $m=5$.



Σχήμα 9.47: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη ορθών τάσεων

Συνεπώς ισχύει:

$$\lambda_1 = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{5 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.357$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{5.914 \cdot 10^7}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{5}} = 2.261$$

Επομένως:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 = 2.672$$

- Έλεγχος άνω σημείου συγκόλλησης βάσης

Για εσωραφή συγκολλημένη και από τις δύο πλευρές του ελάσματος και υψηλή ποιότητας εκτέλεσης, η κατηγορία της λεπτομέρειας είναι:

$$\Delta\sigma_c = 125MPa$$

Ο προσδιορισμός της ασφάλειας έναντι κόπωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης έχει ως εξής:

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_s = 1.20 \cdot 2.672 \cdot 33.076MPa = 106.055MPa \leq \frac{125MPa}{1.15} = 108.696MPa$$

Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται

- Έλεγχος κάτω σημείου συγκόλλησης βάσης

Το κάτω σημείο της ραφής σχεδιάζεται σύμφωνα με την λεπτομέρεια (11.2) του Πίνακα C.1. Έτσι για συνεχή εγκάρσια συγκόλληση του κελύφους στο έλασμα της βάσης και ποιότητα συγκόλλησης 5, η κατηγορία της λεπτομέρειας είναι:

$$\Delta\sigma_c = 90MPa$$

Η διακύμανση των δρώντων τάσεων είναι:

$$\Delta\sigma_s = 30.652 \cdot \frac{20}{40} = 16.538MPa$$

Έτσι, ο προσδιορισμός της ασφάλειας έναντι κόπωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης έχει ως εξής:

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_s = 1.20 \cdot 2.672 \cdot 16.538MPa = 53.027MPa \leq \frac{90MPa}{1.15} = 78.261MPa$$

Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

Όπως μπορεί να διαφανεί, ο έλεγχος έναντι κόπωσης των συνδέσεων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση της καπνοδόχου. Από τους υπολογισμούς φαίνεται ότι η συγκόλληση της βάσης της καπνοδόχου πληροί τους ελέγχους με συντελεστή ασφαλείας μόλις 1.024 (έλεγχος άνω σημείου συγκόλλησης). Για να αυξηθεί ο συντελεστής ασφαλείας θα πρέπει να αυξηθεί το πάχος του κελύφους στη βάση που συγκολλάται με τη μετωπική πλάκα.

9.4.3. Έλεγχος σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Η οριακή τιμή της παραμόρφωσης κατά την διεύθυνση του ανέμου στην κορυφή μιας αυτοστηριζόμενης καπνοδόχου, λόγω της συχνής επανάληψης του φορτίου του ανέμου, εκτιμάται από τη σχέση:

$$\delta_{\max} = \frac{h}{50}$$

όπου h είναι το ύψος της καπνοδόχου.

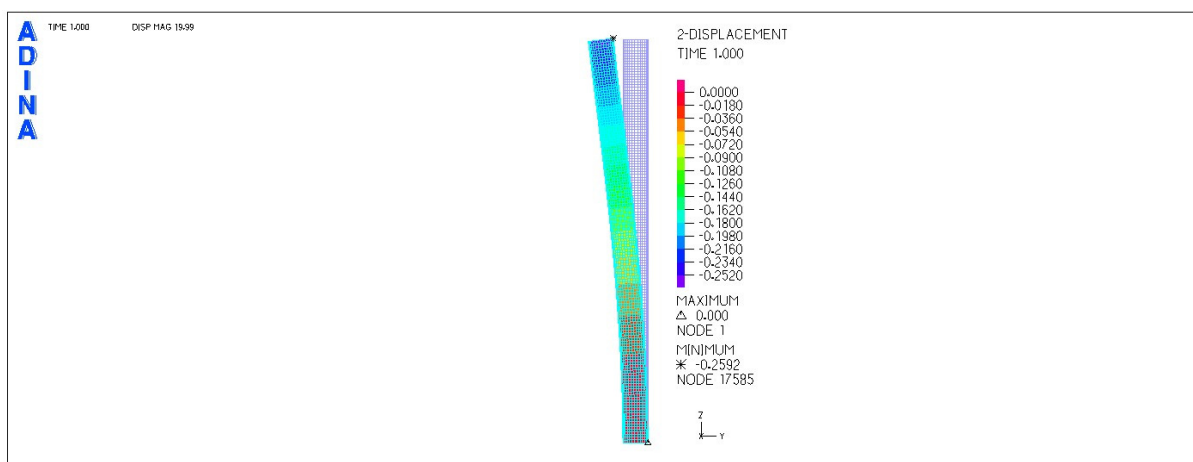
Η συχνή τιμή της ανεμοπίεσης προκύπτει από την τιμή σχεδιασμού όπως προσδιορίστηκε στους **Πίνακες 9.4-9.9**, πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή σχεδιασμού $\psi_1=0.6$. Έτσι, ο συνδυασμός φορτίων για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας είναι:

$$1.00G + 0.6W$$

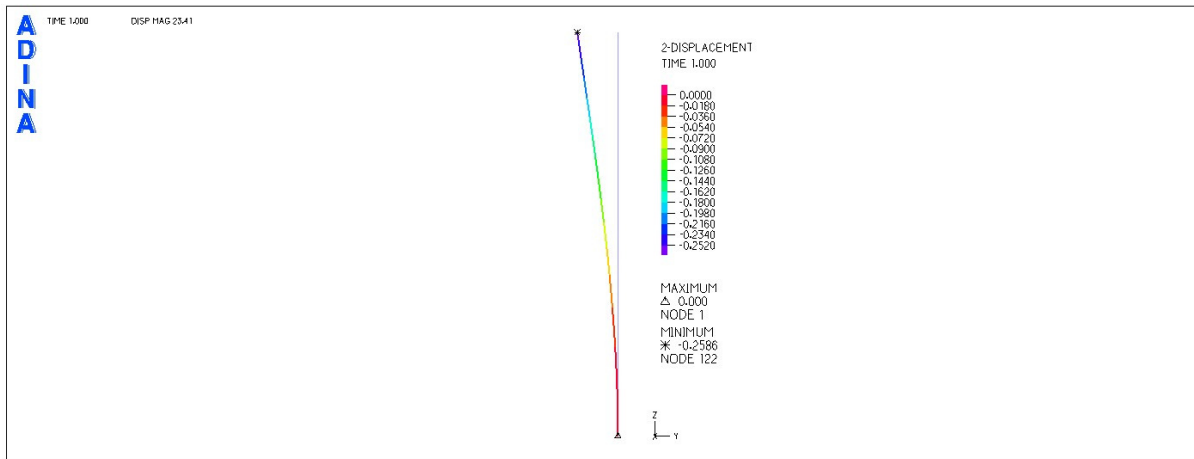
Οι τιμές των μετατοπίσεων της κορυφής της καπνοδόχου για τον παραπάνω συνδυασμό φορτίσεων και για τα δύο στατικά προσομοιώματα φαίνονται στον **Πίνακα 9.27**. Αντίστοιχα στα **Σχήματα 9.37** και **9.38** παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η παραμόρφωση της καπνοδόχου.

Πίνακας 9.27: Μετατοπίσεις κορυφής καπνοδόχου με βάση το συνδυασμό φορτίσεων για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

Κατά απόλυτη τιμή μετατόπιση κρυφής καπνοδόχου [m]	
Σ.Π.1	0,259
Σ.Π.2	0,258



Σχήμα 9.48: Παραμόρφωση καπνοδόχου για την συχνή τιμή της ανεμοπίεσης με βάση το Σ.Π.1



Σχήμα 9.49: Παραμόρφωση καπνοδόχου για την συχνή τιμή της ανεμοπίεσης με βάση το Σ.Π.2

Η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση κατά την διεύθυνση της πνοής του ανέμου είναι:

$$\delta_{\max} = \frac{60m}{50} = 1.20m$$

Προφανώς:

$$\delta = 0.259m < \delta_{\max} = 1.20m$$

δηλαδή τα πραγματοποιημένα βέλη λόγω ανεμοφόρτισης είναι εντός των ορίων.

9.5. Βιβλιογραφία

- [1] CICIND, *Model Code for Steel Chimneys*, Revision 1 – December 1999
- [2] Dyrbye, C., Hansen, S.O. *Wind Loads on Structures*. Wiley, New York, 1996.
- [3] EN 1993-3-2 Eurocode 3. Design of steel structures - Part 3.2: Towers, masts and chimney - Chimneys.
- [4] EN 1993-1-6 Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1.9: Fatigue.
- [5] EN 1991-1-4, Eurocode 1. Action on structures – General action – Part 1-4: Wind Action.
- [6] Manohar S N. *Tall chimneys – Design and Construction*. Tata McGraw-Will publishing company ltd, India, 1985.
- [7] International committee on industrial chimneys. *Chimney Book – Industrial Chimneys of concrete or steel*. CICIND, Zurich, Switzerland, 2005.
- [8] Ishizaki H, Hara H, Shimada T. *The efficiency of helical strakes for suppression of vortex-excited oscillation of steel stacks*, Journal of Structural Engineering, 1984 Vol.6, October.
- [9] Zdravkovich, M.M, Kawecki J. *Cross-wind vibration of steel chimney – A new case history*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95 (2007) 1166-1175.

10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

10.1. Γενικά

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη συμπεριφοράς, η ανάλυση και η διαστασιολόγηση μεταλλικών καπνοδόχων. Οι καπνοδόχοι γενικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως εξειδικευμένες μεταλλικές κατασκευές αφού η ανάλυση και διαστασιολόγηση τους χρήζει ιδιαίτερης μελέτης. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια ώστε η ανάλυση και η σχεδίαση της καπνοδόχου να γίνει με όλες τις μεθόδους που προτείνονται από το EN1993-1-6. Η καπνοδόχος ελέγχθηκε για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας LS1, LS2, LS3 και LS4. Κάθε μια από τις οριακές καταστάσεις ελέγχθηκε αρχικά με τις σχέσεις που προτείνει το EN1993-1-6 (Παράρτημα Α και Β), ενώ ακολούθως πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές μη γραμμικές αναλύσεις. Επίσης πραγματοποιήθηκαν δύο στατικά προσομοιώματα τουτέστιν, ένα στατικό προσομοίωμα 1 (Σ.Π.1) με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους και ένα στατικό προσομοίωμα 2 (Σ.Π.2) με τη χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων προσομοιωμάτων. Στόχος της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων, τόσο των διαφόρων μεθόδων που προτείνει ο κανονισμός, αλλά και η διαφορά στην χρήση των δύο στατικών προσομοιωμάτων.

10.2. Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε μεταλλική καπνοδόχος διαμέτρου 3.735m και ύψους 60m. Για τη σχεδίαση της καπνοδόχου λήφθηκαν υπόψη όλες οι ενδεχόμενες δράσεις, δηλαδή ίδια βάρη, θερμικές δράσεις, σεισμικές δράσεις και δράσεις ανέμου. Προκαταρκτικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο **Κεφάλαιο 9** (παρ. 9.4.2), με σκοπό να προσδιοριστεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός φορτίσεων, έδειξαν ότι η καπνοδόχος είναι περισσότερο επιρρεπής σε φορτία ανέμου παρά σε ενδεχόμενες σεισμικές δράσεις.

Εκτός των δράσεων από τις δυνάμεις άνωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης και λόγω της ροής του ανέμου, οι καπνοδόχοι, στις περισσότερες περιπτώσεις χρίζουν περαιτέρω μελέτης λόγω επιρροής της στροβιλώδους διέγερσης (vortex shedding). Η στροβιλώδης διέγερση, όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 4**, εκφράζει την εγκάρσια προς τη ροή του ανέμου ταλάντωση της καπνοδόχου λόγω της περιοδικής διάχυσης των δυνάμεων. Το φαινόμενο της στροβιλώδους διέγερσης είναι ιδιαίτερα έντονο για κυκλικής διατομής κατασκευές όπως είναι οι καπνοδόχοι. Λόγω της περιοδικής ταλάντωσης, η κατασκευή ενδέχεται να παρουσιάσει αστοχία έναντι κόπωσης. Για το σκοπό αυτό το μέγιστο εύρος ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην σχεδίαση των καπνοδόχων.

Το EN1991-1-4 προτείνει δύο κριτήρια τα οποία καθορίζουν αν η καπνοδόχος θα πρέπει να ελεγχθεί έναντι στροβιλώδους διέγερσης. Τα κριτήρια αυτά αφορούν την λυγηρότητα αλλά και την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής (καμπτική ή/και ελλειπτική). Στη παρούσα μελέτη η καπνοδόχος που μελετήθηκε δεν πληρούσε τα κριτήρια και για αυτό απαιτείτο να ελεγχθεί έναντι στροβιλώδους διέγερσης.

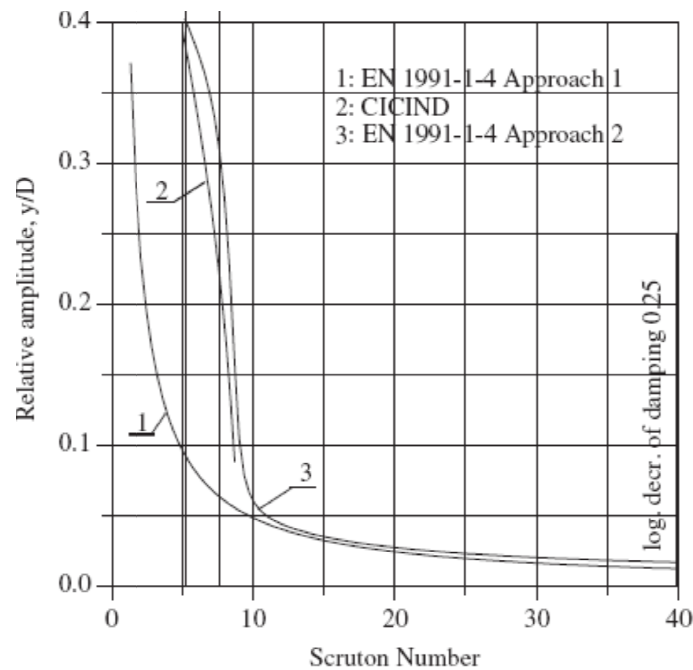
Το EN1991-1-4 προτείνει δύο μεθόδους για τον υπολογισμό του μέγιστου εύρους ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης. Με βάση το μέγιστο εύρος ταλάντωσης υπολογίζεται η αδρανειακή δύναμη που θα επιβληθεί στατικά στην κατασκευή. Το εθνικό προσάρτημα όμως δεν καθορίζει ποια από τις δύο μεθόδους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Το EN1991-1-4 προτείνει τη μέθοδο 2 για κατασκευές τύπου προβόλου. Στη παρούσα μελέτη έγινε ο υπολογισμός του μέγιστου εύρου ταλάντωσης και με τις δύο μεθόδους. Όπως παρατηρήθηκε από τους υπολογισμούς, η μέθοδος 2 δίνει πολύ πιο συντηρητικά αποτελέσματα από την μέθοδο 1. Για σκοπούς σύγκρισης της απόκλισης, αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση της τάξης του 250% (βλέπε Πίνακα 9.13). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μετά από ανασκόπηση και σε βιβλιογραφία (Dyrbye και Hansen (1996)) η σχέση E.17 (EN1991-1-4, Παράρτημα E) για τον υπολογισμό του συντελεστή αιχμής k_p φάνηκε ότι παρουσιάζει κάποια προβλήματα. Τα προβλήματα επιβεβαιώνονται και από τους Zdravkovich M.M. και Kawecki J. (2007). Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό του συντελεστή χρησιμοποιήθηκε η σχέση που προτείνουν οι Dyrbye και Hansen (1996). Για σκοπούς επαλήθευσης, το μέγιστο εύρος ταλάντωσης υπολογίστηκε και με τις σχέσεις που προτείνει ο CICIND. Τα αποτελέσματα από το τελευταίο μπορούν να ταυτιστούν με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέθοδο 2.

Το EN1993-3-2 δίνει μέγιστες τιμές για το εύρος ταλάντωσης αναλόγως της κατηγορίας της καπνοδόχου (βλέπε Πίνακα 8.4). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το μέγιστο εύρος ταλάντωσης που υπολογίστηκε ήταν 2.671m. Με βάση τον **Πίνακα 8.4** (Κεφάλαιο 8) το εύρος αυτό είναι μη επιτρεπτό και για αυτό απαιτείτο να μειωθεί.

Η απόμειωση του εύρους ταλάντωσης, όπως περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 8**, μπορεί να επιτευχθεί μέσω αεροδυναμικών συσκευών ή με τη χρήση αποσβεστήρων. Στο EN1993-3-2 δίδονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή c_a της καπνοδόχου μετά την εγκατάσταση σπειροειδούς αεροτομής (Helical strakes). Για να γίνει όμως η χρήση των σχέσεων αυτών, θα πρέπει το μέγιστο εύρος ταλάντωσης να υπολογιστεί με βάση τη μέθοδο 1. Για σκοπούς της μελέτης γίνεται διερεύνηση της μείωσης του εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης με τη χρήση σπειροειδούς αεροτομής. Η μείωση του εύρους στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής ήταν της τάξης του 70%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την χρήση αεροδυναμικών συσκευών αυξάνεται η οπισθέλκουσα δύναμη λόγω της ροής του ανέμου. Η αύξηση είναι της τάξης του 10% με 40%. Όπως έχει αποδειχτεί όμως, η μέθοδος 1 υποεκτιμά το μέγιστο εύρος ταλάντωσης λόγω στροβιλώδους διέγερσης. Συνεπώς υπάρχουν ενδοιασμοί για τη χρήση αεροδυναμικών συσκευών ως λύση για τη μείωση του εύρους ταλάντωσης.

Στη συγκεκριμένη υπό μελέτη καπνοδόχο θεωρήθηκε ότι εν τέλη θα γίνει εγκατάσταση αποσβεστήρα μάζας στην κορυφή. Ο αποσβεστήρας θεωρήθηκε ότι θα παρέχει λογαριθμική απόσβεση $\delta_a=0.3$. Με την αύξηση της απόσβεσης της καπνοδόχου αυξήθηκε και ο αριθμός Sc της κατασκευής (σε 39.105 αντί του 2.607 που υπολογίστηκε αρχικά). Έτσι, αντίστοιχα, από τους υπολογισμούς φάνηκε ότι το μέγιστο εύρος ταλάντωσης με τον αποσβεστήρα για την συγκεκριμένη καπνοδόχο μειώθηκε δραματικά (από τα 2.69m που είχε υπολογιστεί χωρίς τη χρήση αποσβεστήρα στα 0.051m). Επίσης αντίστοιχη ήταν και η μείωση της αδρανειακής δύναμης, λόγω στροβιλώδους διέγερσης.

Έμμεσα από τα προηγούμενα φαίνεται η επιρροή του αριθμού Scruton στην απόκριση της καπνοδόχου. Όπως εξεγήθηκε στο **Κεφάλαιο 4**, ο αριθμός Sc εκφράζει την συχνότητα διάχυσης των δυνάμεων. Στο **Σχήμα 10.1** φαίνεται η επιρροή του αριθμού Sc στον υπολογισμό του μέγιστου εύρους εγκάρσιας ταλάντωσης. Οι υπολογισμοί του σχετικού εύρους ταλάντωσης στο σχήμα υπολογίζονται με τις μεθόδους 1 και 2 του EN1991-1-4 και τις σχέσεις που προτείνει ο CICIND. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για αριθμό Sc μεγαλύτερο από 10 το μέγιστο εύρος y ταλάντωσης λαμβάνει τιμές μικρότερες από το 0.05 της διαμέτρου της καπνοδόχου. Αντίστοιχα, από το ίδιο σχήμα φαίνονται οι σχετικά μεγάλες τιμές του σχετικού εύρους ταλάντωσης για αριθμούς Sc μικρότερους του 10. Αυτό επαληθεύει και τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης πριν και μετά την τοποθέτηση συστήματος απόσβεσης στην καπνοδόχο. Ο αριθμός Sc εξαρτάται, συν τοις άλλοις, από την διάμετρο και το ίδιο βάρος της καπνοδόχου. Συνεπώς, όπως είναι κατανοητό, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν πρωταρχικά μέριμνα στη σχεδίαση των καπνοδόχων θα πρέπει να είναι η εύρεση ικανοποιητικής αναλογίας διαμέτρου και ίδιου βάρους (ή ύψους) που θα επιφέρει και το μέγιστο αριθμό Sc . Έτσι θα αποφευχθεί η χρήση αεροδυναμικών συσκευών ή/και αποσβεστήρων εκ των υστέρων, οι οποίες ενδέχεται να αυξήσουν το κόστος της κατασκευής.



Σχήμα 10.1: Σχετικό εύρος εγκάρσιας ταλάντωσης στη κορυφή καπνοδόχου σε σχέση με τον αριθμό Sc υπολογισμένο με τις μεθόδους 1 και 2 του EN1991-1-4 και τις σχέσεις που προτείνει ο CICIND^[1].

Η καπνοδόχος σχεδιάστηκε με βάση τις σχέσεις που προτείνει το EN1993-1-6 (Παράρτημα Α και Β) αλλά και μέσω αριθμητικών μη γραμμικών αναλύσεων, όπως ορίζονται στο ίδιο κανονιστικό κείμενο. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι προκύπτουν σχεδόν εφάμιλλες τιμές συντελεστών ασφαλείας από τη σχεδίαση της καπνοδόχου μέσω των σχέσεων που δίνει το EN1993-1-6 και μέσω μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων που λαμβάνουν υπόψη πιθανές ατέλειες στο κέλυφος, μη γραμμικότητα υλικού και μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GMNIA).

Για την καπνοδόχο, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, πραγματοποιήθηκαν δύο στατικά προσομοιώματα. Όπως φάνηκε, η σχεδίαση της καπνοδόχου με στατικό προσομοίωμα ραβδωτών στοιχείων και χωρίς την χρήση των αναλυτικών σχέσεων δεν ενδείκνυται. Στο ραβδωτό μοντέλο δεν είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη ατέλειες του φορέα ενώ επίσης δεν μπορούν να αναπτυχθούν φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Ως εκ τούτου το συγκεκριμένο μοντέλο υπερεκτιμά τον συντελεστή ασφαλείας έναντι της σχεδίασης σε λυγισμό (οριακή κατάσταση αστοχίας LS3). Αντίθετα, με το στατικό προσομοίωμα πεπερασμένων κελυφωτών στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση GMNIA, η οποία λαμβάνει μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού αλλά και ενδεχόμενες τοπικές ατέλειες.

^[1] Zdravkovich, M.M, Kawecki J. *Cross-wind vibration of steel chimney – A new case history*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95 (2007) 1166-1175.

Για σκοπούς της μελέτης υιοθετήθηκε η μέγιστη επιτρεπόμενη ατέλεια λόγω πτύχωσης. Οι ατέλειες λήφθηκαν στην ανάλυση μέσω των ιδομορφών λυγισμού. Από τις ιδομορφές φάνηκε ότι η υπό μελέτη καπνοδόχος είναι επιρρεπής σε τοπικό λυγισμό στη βάση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ύπαρξη ατελειών στο κέλυφος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια της καπνοδόχου. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη ενδεχόμενες ατέλειες στο κέλυφος, προκύπτει ο συντελεστής ασφαλείας 1.037 (για ανάλυση GMNIA) ενώ αντίθετα χωρίς ατέλειες ο συντελεστής έλαβε τιμή 2.025 (για ανάλυση GMNA).

Καθοριστικής σημασίας για το σχεδιασμό της καπνοδόχου φάνηκε ότι ήταν και η οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω κόπωσης (LS4). Η LS4 λαμβάνει υπόψη την δράση και τους κύκλους φόρτισης που ενδέχεται να δεχθεί η καπνοδόχος λόγω της στροβιλώδους διέγερσης. Σε αυτή την περίπτωση ελέγχονται οι συνδέσεις της καπνοδόχου. Στη καπνοδόχο μελετήθηκε η δυσμείνεια σε κόπωση της σύνδεσης στη βάση (συγκόλληση κελύφους με την μετωπική πλάκα έδρασης). Τα πάχη της μετωπικής πλάκας έδρασης και το πάχος του κελύφους στη βάση έπαιξαν καθοριστικό ρόλο κατά την σχεδίαση σε LS4.

10.3. Σχόλια για τα κανονιστικά κείμενα

Η ανάλυση και διαστασιολόγηση μεταλλικών καπνοδόχων, όπως φάνηκε από την παρούσα εργασία, χρήζει ιδιαίτερης και εξειδικευμένης μελέτης. Το EN1993-1-6 αποτελείται από αρκετά μακροσεική κείμενα ενώ επίσης απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις αλλά και ειδικά λογισμικά προγράμματα, πράγμα που το καθιστά αρκετά δύσκολο. Οι έλεγχοι των οριακών καταστάσεων απαρτίζονται από μακροσεικές υπολογισμούς, κάνοντας έτσι επίπονη την διαδικασία σχεδιασμού των καπνοδόχων. Στον αντίποδα, αν ο έλεγχος δεν πραγματοποιηθεί με βάση τις σχέσεις που προτείνει ο κανονισμός, τότε ο μελετητής θα πρέπει να προσφύγει σε αριθμητικές μη-γραμμικές αναλύσεις οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος της καπνοδόχου σε ανακύκλωση (LS2) μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Η σχετική παράγραφος στο EN1993-1-6 παρουσιάζει αδυναμίες. Ο έλεγχος απαιτεί όπως υπολογιστεί η πλαστική παραμόρφωση λόγω ανακύκλωσης για τα φορτία λειτουργίας. Αυτό αποτελεί σχήμα οξύμωρο, αφού δεν είναι δυνατόν να υπάρξει πλαστική παραμόρφωση υπό φορτία λειτουργίας όταν ο συντελεστής πλαστικής αντίστασης υπό φορτία αντίστασης είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Γίνεται κατανοητό ότι πλαστική παραμόρφωση υπό φορτία λειτουργίας μπορεί να υπάρξει μόνο όταν αυτά επιβληθούν δυναμικά και όχι ισοδύναμα στατικά. Το EN1993-1-6 δεν διευκρινίζει αν τα φορτία αυτά πρέπει να εφαρμοστούν δυναμικά. Αλλά και πάλι σύμφωνα με τον τελευταίο συλλογισμό απαιτούνται επιπλέον πληροφορίες, όπως η συχνότητα επιβολής των φορτίων κ.α.

10.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στη παρούσα εργασία φάνηκε έμμεσα, πόσο σημαντικός είναι ο αριθμός Sc στην απόκριση της κατασκευής. Ο αριθμός Sc εξαρτάται, συν τοις άλλοις, και από τη γεωμετρία της κατασκευής (από την διάμετρο). Συνεπώς πολύ χρήσιμη θα ήταν μια μελέτη βέλτιστης σχεδίασης των καπνοδόχων με μεταβλητές τη διάμετρο και το ύψος τους. Με την μελέτη αυτή μπορεί να προκύψει ο βέλτιστος λόγος ύψους προς τη διάμετρο της καπνοδόχου. Αυτό θα μπορεί να αποτελέσει πολύ χρήσιμη πληροφορία για τον μελετητή ο οποίος προτίθεται να σχεδιάσει μια καπνοδόχο.

Επίσης στη παρούσα μελέτη δεν λήφθηκε υπόψη η οπή, για την είσοδο των καπναγωγών, στο κέλυφος της καπνοδόχου. Η ύπαρξη της οπής στο κορμό σίγουρα επηρεάζει την ευστάθεια της κατασκευής. Συνεπώς η επιρροή του σχήματος αλλά και της θέσης της οπής στο κέλυφος της καπνοδόχου μπορεί να αποτελέσει πρόταση για μελλοντική έρευνα.