

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΠΝΟΔΟΧΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ

Μιγάλης Αγγελίδης

Πολιτικός Μηχανικός

ΑΜΤΕ Μελετητές Μηχανικοί

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: ma_amte@otenet.gr

Χάρης Ι. Γαντές

Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Κωνσταντίνος Ε. Καλοχαιρέτης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: kalkostis@hotmail.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταλλικές καπνοδόχοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη προσφέροντας οικονομικές και κατασκευαστικά επαρκείς λύσεις σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Οι σύγχρονες βιομηχανικές απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στη χρήση καπνοδόχων με διαμέτρους της τάξης των 7m και οι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται στην πράξη (όπως οι CICIND, EN1993-1-6 και ASME STS-1) περιέχουν αβεβαιότητες σε ό,τι αφορά την αντιμετώπιση συνήθων πρακτικών ζητημάτων που σχετίζονται με την ανάλυση και διαστασιολόγηση τέτοιων κατασκευών.

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του CICIND (International Committee for Industrial Chimneys), διερευνήθηκε η στατική απόκριση μιας μεταλλικής βιομηχανικής καπνοδόχου διαμέτρου 7m και ύψους 60m υπό κατακόρυφα στατικά φορτία και φορτία ανέμου, με έμφαση στα προβλήματα λυγισμού. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για την περίπτωση της βιομηχανικής καπνοδόχου με οπές και εξετάζεται η επάρκεια διαφορετικών τρόπων ενίσχυσης της. Τα αποτελέσματα βασίζονται σε πλήρως μη γραμμικές αναλύσεις και εκτός των ποιοτικών συμπερασμάτων που παρουσιάζονται, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προβλέψεις του CICIND σε ό,τι αφορά την αντοχή της κατασκευής.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεταλλικές βιομηχανικές καπνοδόχοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη προσφέροντας οικονομικές και κατασκευαστικά επαρκείς λύσεις. Μέχρι πρόσφατα η διάμετρος τέτοιων κατασκευών δε ξεπερνούσε τα 4m, κάτι το οποίο αντανακλάται στις υφιστάμενες κανονιστικές διατάξεις. Οι σύγχρονες βιομηχανικές απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στη χρήση διαμέτρων της τάξης των 7m και οι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται στην πράξη (όπως οι CICIND [1], EN1993-1-6 [2] και ASME STS-1 [3]) περιέχουν αβεβαιότητες σε ό,τι αφορά την αντιμετώπιση συνήθων πρακτικών ζητημάτων που σχετίζονται με την ανάλυση και διαστασιολόγηση τέτοιων κατασκευών. Μια βασική παραδοχή είναι η θεώρηση των καπνοδόχων ως προβόλων και κατ' επέκταση η προσομοίωσή τους με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων (δοκού). Αυτή η παραδοχή απλοποιεί ιδιαίτερα το αριθμητικό προσομοίωμα και τους αντίστοιχους υπολογισμούς, κάνοντας την ελκυστική για τους μηχανικούς της πράξης. Σε περιπτώσεις όμως μικρότερου λόγου ύψους προς διάμετρο της καπνοδόχου, η παραδοχή αυτή δεν οδηγεί σε ορθά αποτελέσματα, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής βιομηχανικής καπνοδόχου μεγάλης διαμέτρου με οπές και διαφορετικούς τρόπους ενίσχυσης της περιοχής περί τις οπές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα της απόκρισης της καπνοδόχου υπό φορτία βάρους και ανέμου, που βασίζονται σε γραμμικοποιημένες αναλύσεις λυγισμού και σε πλήρως μη γραμμικές αναλύσεις. Εκτός των ποιοτικών συμπερασμάτων που εξάγονται, τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προβλέψεις του CICIND σε ό,τι αφορά την αντοχή της κατασκευής και κατ' αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η επάρκεια της αναλυτικής μεθόδου.

Ο τοπικός λυγισμός οφείλεται σε θλιπτικές τάσεις. Στις μεταλλικές καπνοδόχους, οι κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις οφείλονται κυρίως στην κάμψη λόγω οριζόντιων φορτίσεων (ανεμοπιέσεις, σεισμικές δυνάμεις) και σε μικρότερο βαθμό στα κατακόρυφα μόνιμα και κινητά φορτία. Η θεωρητική ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού κυλινδρικού κελύφους με απλές συνοριακές συνθήκες υπό αξονική θλίψη είναι:

$$\sigma_{cr} = 0.605 \times E \times t / r \quad (1)$$

Στην ανωτέρω σχέση E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του κελύφους, t είναι το πάχος του κελύφους και r η ακτίνα του κυλίνδρου. Συνεπώς η κρίσιμη τάση εξαρτάται από το υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, ενώ η επιρροή του μήκους του κυλίνδρου δε συμπεριλαμβάνεται. Με χρήση της κρίσιμης τάσης λυγισμού δύνανται μέσω κλειστών τύπων να υπολογιστεί η τάση αστοχίας που ενσωματώνει την επιρροή τόσο του λυγισμού όσο και της διαρροής του υλικού. Εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση για λεπτότοιχες κελυφωτές κατασκευές συμπεριλαμβανομένων και των βιομηχανικών καπνοδόχων παρουσιάζεται από τους Teng και Rotter [4]. Η έρευνα που παρουσιάζεται στο παρόν άρθρο έγινε υπό τη χρηματοδότηση του CICIND και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις αναφορές [5], [6] και ειδικά στην [7].

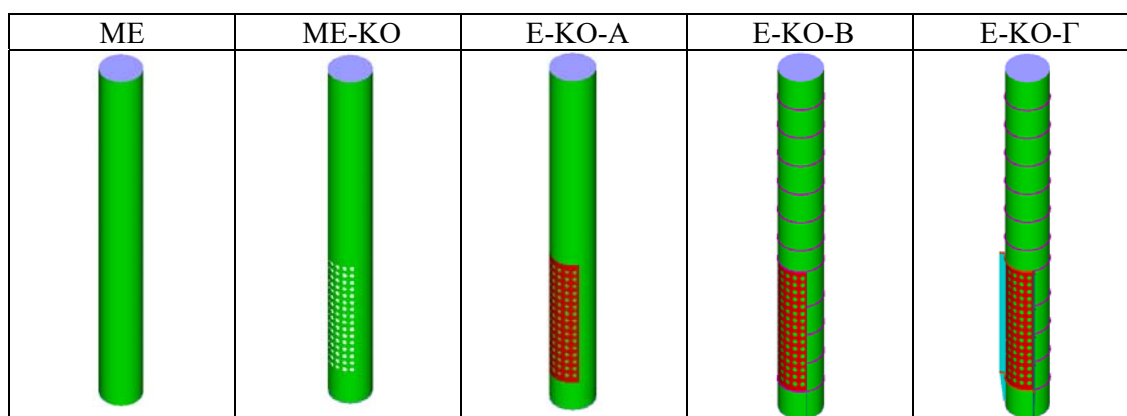
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ

3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η καπνοδόχος που εξετάζεται, η οποία βασίζεται σε εμπειρία από πραγματικές καπνοδόχους, αλλά ενσωματώνει και απλοποιητικές παραδοχές που διευκολύνουν τους υπολογισμούς χωρίς σημαντική επίδραση στην στατική απόκριση.

Η καπνοδόχος αποτελεί τμήμα μιας μονάδας HSRG σε έναν Ηλεκτροπαραγωγικό Σταθμό. Το συνολικό ύψος της κατασκευής είναι 60.00m και η εξωτερική διάμετρος ίση με 7.00m. Το πάχος του κελύφους είναι ίσο με 16mm, μειούμενο κατά 3mm για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της διάβρωσης, οδηγώντας σε ένα τελικό υπολογιστικό πάχος κελύφους ίσο με 13mm. Η ενσωμάτωση της καπνοδόχου στο σύστημα παραγωγής απαιτεί την ύπαρξη οπών κοντά στη βάση της. Στην υπό εξέταση κατασκευή, η περιοχή των οπών ξεκινάει στα +5.00m από τη βάση της καπνοδόχου και έχει συνολικό ύψος 20.00m και πλάτος 120°. Η περιοχή των οπών αποτελείται από 16 σειρές οπών η κάθε μία εκ των οποίων αποτελείται από 6 οπές. Η κάθε οπή έχει διάμετρο 80cm ενώ η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σειρών οπών είναι 125cm. Σε μια πραγματική καπνοδόχο θα χρησιμοποιούνταν μεταβλητό πάχος κελύφους αλλά για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται σταθερό πάχος τόσο καθ' ύψος όσο και κατά πλάτος.

Οι κατασκευές που εξετάζονται φαίνονται στο Σχ. 1. Η μη ενισχυμένη κατασκευή (ME) δεν αποτελεί ρεαλιστική περίπτωση αλλά συμπεριλαμβάνεται στη διερεύνηση γιατί αποτελεί τη βάση για τις κανονιστικές οδηγίες. Επιπρόσθετα χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επιρροής της περιοχής των οπών στην απόκριση. Η μη ενισχυμένη κατασκευή με κυκλικές οπές (ME-KO) περιλαμβάνει την περιοχή των οπών χωρίς ενίσχυση παρά την αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού. Η ενισχυμένη κατασκευή με κυκλικές οπές (E-KO-A) είναι ακριβώς ίδια με την προηγούμενη κατασκευή με τη διαφορά πως το πάχος του κελύφους στην περιοχή των οπών (κόκκινο χρώμα) είναι αυξημένο. Η ενισχυμένη κατασκευή με κυκλικές οπές, νευρώσεις και μικρές κατακόρυφες ενισχύσεις (E-KO-B) εκτός της αύξησης του πάχους του κελύφους στην περιοχή των οπών περιλαμβάνει και τη χρήση δακτυλιοειδών νευρώσεων διατομής L120x120x10 ανά σταθερές αποστάσεις 5.00m καθ' ύψος της καπνοδόχου όπως επίσης και τη χρήση μικρών ενισχύσεων (115x35) στις δύο κατακόρυφες πλευρές της περιοχής των οπών. Τέλος, η ενισχυμένη κατασκευή με κυκλικές οπές, νευρώσεις και μεγάλες κατακόρυφες ενισχύσεις (E-KO-Γ) περιλαμβάνει εκτός των προηγούμενων, μεγάλες ενισχύσεις (1000x35) στις δύο κατακόρυφες πλευρές της περιοχής των οπών όπως επίσης και άκαμπτα διαφράγματα στο ανώτατο και κατώτατο οριζόντιο επίπεδο της περιοχής των οπών.



Σχ. 1 Μη ενισχυμένη και ενισχυμένες καπνοδόχοι με κυκλικές οπές

3.2 Ιδιότητες υλικών και συνοριακές συνθήκες

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται είναι S235 JR. Η θερμοκρασία λειτουργίας που υιοθετείται στη διερεύνηση είναι 200 βαθμοί C. Αυτό οδηγεί στις ακόλουθες ιδιότητες για το χάλυβα S235 (σύμφωνα με το EN 13084-7):

Μέτρο Ελαστικότητας $E=202.5$ GPa, λόγος Poisson $\nu=0.3$, όριο διαρροής $f_y=160$ MPa

Η καπνοδόχος θεωρείται πακτωμένη στη βάση της. Στο ανώτατο οριζόντιο επίπεδο της, η καπνοδόχος θεωρείται πως έχει έναν σχετικά δύσκαμπτο περιμετρικό δακτύλιο που περιορίζει όλες τις πιθανές παραμορφώσεις της ανώτατης διατομής. Συνεπώς, η ανώτατη διατομή διατηρεί το κυκλικό της σχήμα ανεξάρτητα από το είδος της φόρτισης.

3.3 Εξεταζόμενες φορτίσεις

Στις εξεταζόμενες φορτίσεις λαμβάνεται υπόψη το ίδιο βάρος της καπνοδόχου και των εξαρτημάτων της, όπως επίσης και το φορτίο ανέμου ως πίεση κάθετη στην επιφάνεια του κελύφους. Τα κατακόρυφα φορτία περιλαμβάνουν 3 περιμετρικές πλατφόρμες 7.0t στα επίπεδα +30.00, +50.00 και +55.00. Επιπρόσθετα λαμβάνεται υπόψη 1 αποσβεστήρας 11.0t στο επίπεδο των +35.00, 1 σιγαστήρας με κατώτατο επίπεδο στα +40.00 και βάρος 15.0t και 1 αγωγός εισόδου με συνολικό βάρος 35.0t που ασκείται στις κατακόρυφες πλευρές της περιοχής των οπών. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει περιοχή οπών το βάρος του αγωγού εισόδου αγνοείται. Ο άνεμος ασκείται με τέτοιο τρόπο ώστε η περιοχή των οπών να βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά. Ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου βασίζεται στον EN 1991-1-4. Η ανεμοπίεση που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στην ταχύτητα του ανέμου, στην κατηγορία εδάφους και θεωρείται σταθερή ανά 5m καθ' ύψος.

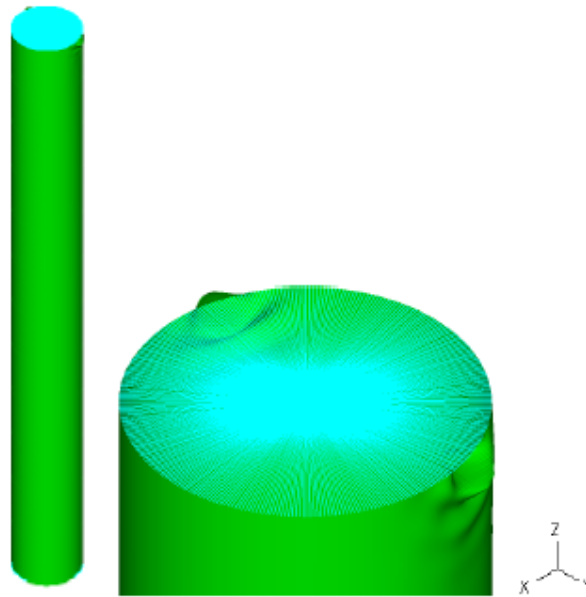
3.4 Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος

Το αριθμητικό προσομοίωμα κατασκευάστηκε με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA [8] που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ευρέως για την διερεύνηση της στατικής απόκρισης διαφόρων τύπων κατασκευών συμπεριλαμβανομένων και των κελυφωτών. Για την προσομοίωση του κελύφους χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά στοιχεία 4 κόμβων. Το γεγονός ότι δεν ήταν γνωστή εκ των προτέρων η περιοχή αστοχίας οδήγησε στην επιλογή ομοιόμορφου μεγέθους στοιχείων σε όλη την κατασκευή. Το μέγεθος των 7cm κάθε στοιχείου, παρά το γεγονός ότι αποδείχτηκε ιδιαίτερα απαιτητικό από άποψη υπολογιστικού κόστους, κρίθηκε απαραίτητο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τελικά χρησιμοποιήθηκε. Ακαμπτοι σύνδεσμοι χρησιμοποιήθηκαν στο ανώτατο και κατώτατο κυκλικό επίπεδο της κατασκευής. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή ενός ενιαίου συντελεστή φορτίου με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστούν τα φορτία σχεδιασμού ώστε να αστοχήσει ο φορέας.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

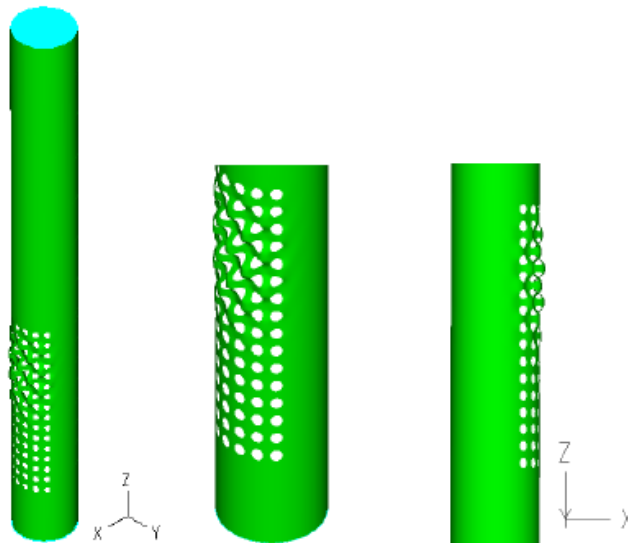
4.1 Γραμμικοποιημένες Αναλύσεις Λυγισμού (LBA)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με βάση Γραμμικοποιημένες Αναλύσεις Λυγισμού. Ο συντελεστής φορτίου λυγισμού για την ΜΕ κατασκευή υπολογίστηκε ως 12.3. Η 1^η ιδιομορφή λυγισμού για την ΜΕ κατασκευή φαίνεται στο Σχ. 2 όπου η διεύθυνση του ανέμου είναι +X. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο λυγισμός δεν εκδηλώθηκε στην περιοχή που προβλέπει η θεωρία δοκού (δηλαδή στη βάση όπου εμφανίζεται τόσο η μέγιστη αξονική δύναμη όσο και η μέγιστη ροπή). Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο γεγονός ότι η ανεμοπίεση ασκούμενη εγκαρσίως στα λεπτά τοιχώματα της καπνοδόχου οδηγεί σε τοπική παραμόρφωση της διατομής της και σε διαφορετική κατανομή τάσεων σε αυτή.



Σχ. 2 1^η ιδιομορφή λυγισμού της ΜΕ κατασκευής

Ο συντελεστής φορτίου λυγισμού για την ΜΕ-ΚΟ κατασκευή υπολογίστηκε ως 3.2, αναδεικνύοντας τη δραστική πτώση της αντοχής λυγισμού της κατασκευής εξαιτίας της ύπαρξης των οπών. Η 1^η ιδιομορφή λυγισμού της ΜΕ-ΚΟ κατασκευής φαίνεται στο Σχ. 3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο τοπικός λυγισμός εντοπίζεται στην περιοχή των οπών οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η ενίσχυση της συγκεκριμένης περιοχής αναμένεται να αυξήσει την αντοχή του φορέα.

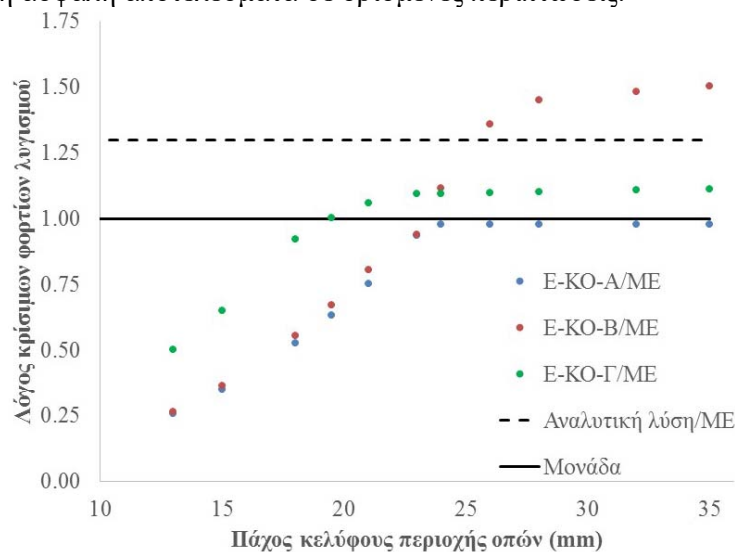


Σχ. 3 1^η ιδιομορφή λυγισμού της ΜΕ-ΚΟ κατασκευής

Στο Σχ. 4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση Γραμμικοποιημένων Αναλύσεων Λυγισμού για διάφορα πάχη κελύφους στην περιοχή των οπών. Παρατηρείται πως η Ε-ΚΟ-Α κατασκευή απαιτεί ένα ελάχιστο πάχος περίπου ίσο με 24mm στην περιοχή των οπών προκειμένου να επιτευχθεί το φορτίο λυγισμού της ΜΕ. Περίπου ίδιο πάχος απαιτείται και για την Ε-ΚΟ-Β, κάτι το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ύπαρξη των δακτυλίων δε συμβάλλει άμεσα στην αύξηση του φορτίου λυγισμού για πάχη μικρότερα

των 24mm. Για μεγαλύτερες τιμές του πάχους στην περιοχή των οπών, η ύπαρξη των δακτυλίων συνεισφέρει στην αύξηση του φορτίου λυγισμού. Στην περίπτωση της E-KO-Γ κατασκευής απαιτείται ένα πάχος περίπου ίσο με 20mm, κάτι το οποίο δείχνει πως η χρήση των μεγάλων κατακόρυφων ενισχύσεων και των διαφραγμάτων συνέβαλλε στη βελτίωση της απόκρισης. Στην E-KO-Γ κατασκευή για μικρές τιμές του πάχους (συμπεριλαμβανομένης αυτής των 20mm) ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται στην περιοχή των οπών. Για μεγαλύτερες τιμές (>24mm), ο λυγισμός των μεγάλων λεπτότοιχων ενισχύσεων γίνεται κρίσιμος και περιορίζει το φορτίο λυγισμού.

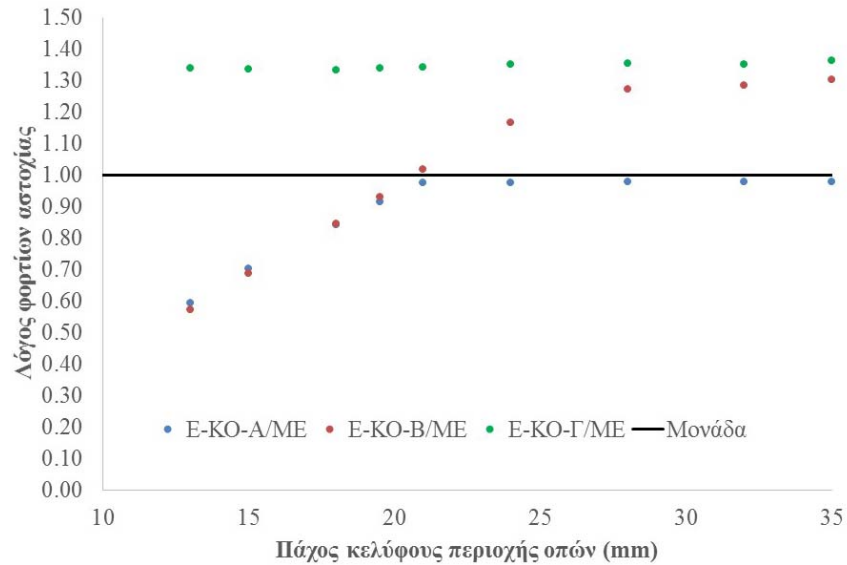
Το αναλυτικό φορτίο λυγισμού, που παραμένει σταθερό σε σχέση με το πάχος στην περιοχή των οπών καθώς δεν εξαρτάται από αυτό, δεν είναι μόνο μεγαλύτερο από το φορτίο λυγισμού της ΜΕ κατασκευής αλλά και από τα φορτία λυγισμού άλλων ενισχυμένων κατασκευών με κυκλικές οπές. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αναδεικνύει το γεγονός πως ο υπολογισμός του φορτίου λυγισμού με βάση τη θεωρία δοκού μπορεί να οδηγήσει σε μη ασφαλή αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις.



Σχ. 4 Μεταβολή του λόγου κρίσιμων φορτίων λυγισμού ενισχυμένων κατασκευών σε σχέση με τη μη ενισχυμένη κατασκευή για διάφορα πάχη κελύφους στην περιοχή των οπών

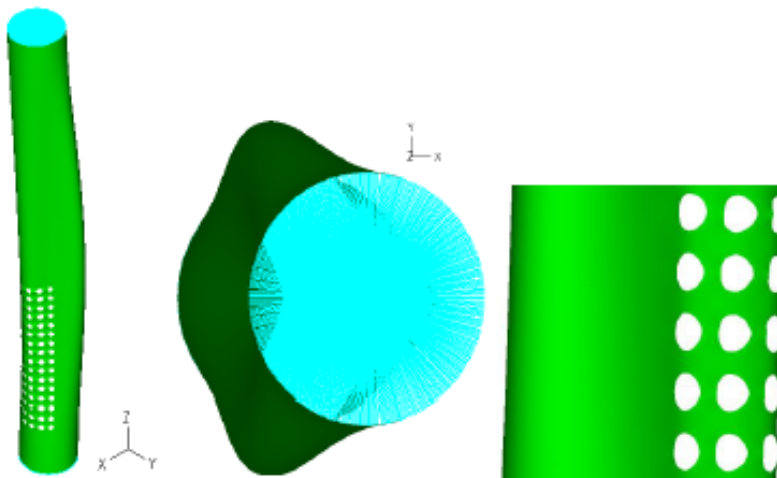
4.2 Μη Γραμμικές Αναλύσεις χωρίς Αρχικές Ατέλειες

Αντίστοιχα αποτελέσματα εξήχθησαν με τη χρήση Μη Γραμμικών Αναλύσεων Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA) που παρουσιάζονται στο Σχ. 5. Παρατηρείται πως στην περίπτωση της E-KO-A κατασκευής ένα πάχος περίπου ίσο με 21mm επαρκεί για την απόκτηση της αντοχής της ΜΕ, ενώ για επανάκτηση και της ελαστικής δυσκαμψίας απαιτείται πάχος 24mm (δε φαίνεται στο παρόν σχήμα). Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για την κατασκευή E-KO-B όπου η ύπαρξη ενισχυτικών δακτυλίων δύναται να οδηγήσει και σε περαιτέρω αύξηση της αντοχής για μεγαλύτερα πάχη στην περιοχή των οπών. Αξίζει να σημειωθεί όμως πως για πάχη μικρότερα των 21mm, η επιρροή της αύξησης του πάχους στην περιοχή των οπών είναι παρόμοια με εκείνη της E-KO-A, αναδεικνύοντας το γεγονός πως η χρήση των ενισχυτικών δακτυλίων δεν είναι σημαντική αν η περιοχή των οπών δεν ενισχυθεί επαρκώς με αύξηση του πάχους. Τέλος, η αντοχή στην κατασκευή E-KO-Γ φαίνεται να μην εξαρτάται από το πάχος του κελύφους στην περιοχή των οπών.

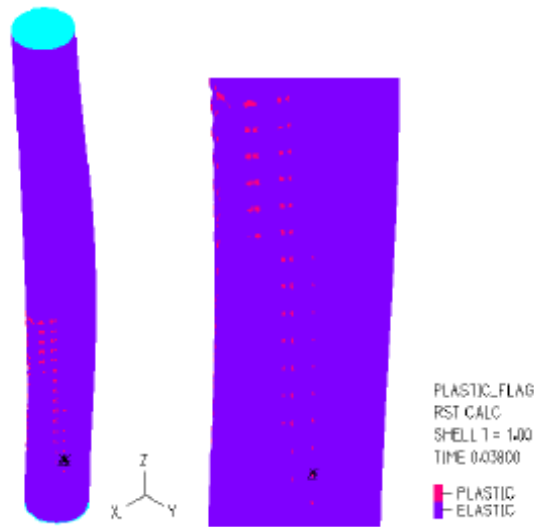


Σχ. 5 Μεταβολή του λόγου φορτίων αστοχίας ενισχυμένων κατασκευών σε σχέση με τη μη ενισχυμένη κατασκευή για διάφορα πάχη κελύφους στην περιοχή των οπών

Ο λόγος του φορτίου αστοχίας E-KO-A/ME πρακτικά ταυτίζεται με τον λόγο αστοχίας ME-KO/ME για πάχος κελύφους στην περιοχή των οπών ίσο με 13mm (περιοχή οπών χωρίς ενίσχυση). Ο παραμορφωμένος φορέας ME-KO φαίνεται στο Σχ. 6 στο οποίο διακρίνεται η παραμόρφωση του κελύφους υπό την επίδραση της ανεμοπίεσης. Αυτή η παραμόρφωση συνδέεται με διαφορετική κατανομή τάσεων από εκείνη που υπολογίζεται με βάση τη θεωρία δοκού που δε λαμβάνει υπόψη την τροποποίηση του σχήματος της διατομής. Φαίνονται επιπρόσθετα και οι τοπικές παραμορφώσεις στην περιοχή των οπών. Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται οι πλαστικοποιημένες περιοχές της κατασκευής στην αστοχία. Οι συγκεντρώσεις των τάσεων στην περιοχή των οπών οδηγούν σε εκτεταμένη εμφάνιση πλαστικοποίησης σε αυτή.



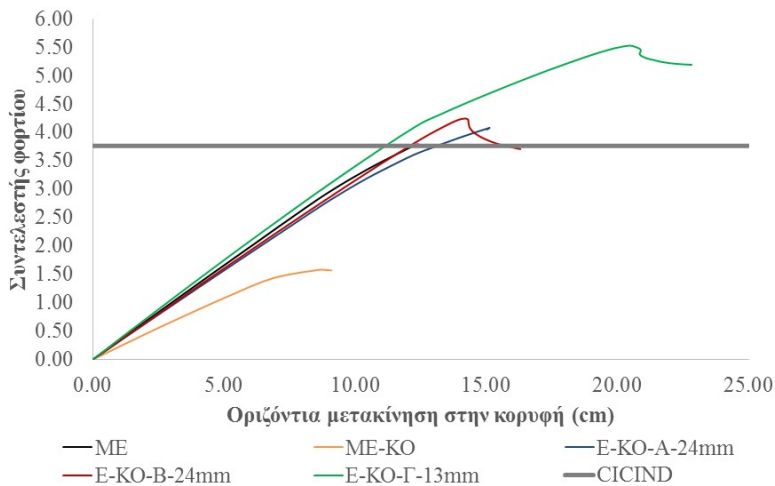
Σχ. 6 Παραμορφωμένη κατάσταση του ME-KO φορέα με βάση τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού



Σχ. 7 Ελαστικές και πλαστικοποιημένες περιοχές του κελύφους του ME-KO φορέα με βάση τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

4.3 Μη Γραμμικές Αναλύσεις με Αρχικές Ατέλειες

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση πλήρως μη γραμμικές αναλύσεις στις οποίες ενσωματώνεται και η επιρροή των αρχικών ατελειών (GMNIA). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίζονται στις πιο οικονομικές εναλλακτικές λύσεις των περιπτώσεων που εξετάστηκαν στις ενότητες 4.1 και 4.2. Συγκεκριμένα το πάχος στην περιοχή των οπών επιλέχθηκε ως 24mm για τις περιπτώσεις E-KO-A και E-KO-B ως εκείνο που απαιτείται για επαρκή αναπλήρωση τόσο της αντοχής όσο και της δυσκαμψίας. Για τους ίδιους λόγους για την E-KO-Γ χρησιμοποιήθηκε πάχος στην περιοχή των οπών 13mm, δηλαδή ίσο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε σε όλο το υπόλοιπο κέλυφος. Τα αποτελέσματα βασίζονται σε αρχική ατέλεια μεγέθους $0.65t = 0.845\text{cm}$ με σχήμα σύμφωνο με την 1^η ιδιόμορφη λυγισμό. Οι δρόμοι ισορροπίας για την κάθε κατασκευή φαίνονται στο Σχ. 8.



Σχ. 8 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για τις υπό εξέταση κατασκευές

Διαπιστώνεται πως η αντοχή που υπολογίστηκε για τη ME κατασκευή είναι πολύ κοντά στην αντοχή που υπολογίζεται με βάση τον CICIND. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται μόνο

για τη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς γενικότερα διαπιστώθηκε πως ο λυγισμός και η πλαστικοποίηση εμφανίζονται σε διαφορετική περιοχή από εκείνη που προβλέπεται από τη θεωρία δοκού, στην οποία βασίζεται η αναλυτική διαδικασία του CICIND. Αναμένεται συνεπώς πως σε αρκετές περιπτώσεις η αναλυτική πρόβλεψη του CICIND θα οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Η παρουσία πολλών οπών οδηγεί σε σημαντική μείωση τόσο της δυσκαμψίας όσο και της αντοχής της κατασκευής (ME-KO). Στην αποδυναμωμένη περιοχή εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων, λυγισμός και πλαστικοποίηση. Απαιτείται συνεπώς κατάλληλη ενίσχυση. Η ενίσχυση της περιοχής των οπών με χρήση πάχους κελύφους 24mm (E-KO-A-24mm) οδηγεί σε επαρκή ανάκτηση της δυσκαμψίας και της αντοχής. Αν συμπληρωματικά χρησιμοποιηθούν και ενισχυτικοί δακτύλιοι (E-KO-B-24mm) δεν επιτυγχάνεται σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχική ατέλεια βασίζεται στην 1^η ιδιόμορφη λυγισμού που εντοπίζει τον τοπικό λυγισμό στην περιοχή των οπών, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 4.2. Η χρησιμότητα των ενισχυτικών δακτυλίων γίνεται σημαντική αφότου εξασφαλιστεί πως η αστοχία δε θα εμφανιστεί εντός της περιοχής των οπών. Στην περίπτωση E-KO-G-13mm φαίνεται πως δεν απαιτείται κάποια αύξηση του πάχους στην περιοχή των οπών. Η δυσκαμψία και η αντοχή ανακτάται πλήρως μέσω της χρήσης των κατακόρυφων μεγάλων ενισχύσεων και των άκαμπτων διαφραγμάτων στο ανώτατο και κατώτατο οριζόντιο επίπεδο της περιοχής των οπών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε βιομηχανικές καπνοδόχους μεγάλης διαμέτρου, η ανεμοπίεση, ασκούμενη κάθετα στην επιφάνεια του κελύφους, οδηγεί σε σημαντική αλλαγή του σχήματος της διατομής, με αποτέλεσμα να μην είναι ορθή η χρήση της κλασικής θεωρίας δοκού, αλλά να κυριαρχεί η συμπεριφορά κελύφους. Επιπρόσθετα, η παρουσία οπών, που είναι συνηθισμένη σε τέτοιες καπνοδόχους, οδηγεί σε σημαντική μείωση της αντοχής της κατασκευής. Βελτίωση της απόκρισης και ενίσχυση της κατασκευής μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά με αύξηση του πάχους του κελύφους στην περιοχή των οπών σε συνδυασμό με χρήση κατακόρυφων ενισχύσεων και δακτυλίων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] CICIND, "Model Code for Steel Chimneys", 2010.
- [2] EN 1993-1-6, "Design of Steel Structures – Strength and Stability of Shell Structures", 2004.
- [3] ASME STS-1, "Steel Stacks", 2006.
- [4] Teng, J.G. & Rotter, J.M., editors, "Buckling of Thin Metal Shells", Taylor & Francis, pp. 286-333, 2004.
- [5] Angelides, M., Gantes, C.J., Kalochairetis, K.E., "Buckling of Large Diameter Steel Chimneys, Part 1: Impact of Loading Distribution and Ring Stiffeners", CICIND Report, Vol. 31, No. 2, pp. 109-120, 2015.
- [6] Angelides, M., Gantes, C.J., Kalochairetis, K.E., "Buckling of Large Diameter Steel Chimneys, Part 2: Impact of Openings ", CICIND Report, Vol. 32, No. 1, pp. 57-66, 2016.
- [7] Angelides, M., Gantes, C.J., Kalochairetis, K.E., "Buckling of Large Diameter Steel Chimneys", CICIND Final Report, 2016.
- [8] ADINA R&D, Theory and Modeling Guide - Volume I: ADINA Solids & Structures, Report ARD 05-7, 2005.

BUCKLING OF LARGE DIAMETER INDUSTRIAL CHIMNEYS

Michael Angelides

Civil Engineer
AMTE Consulting Engineers
Athens, Greece
e-mail: ma_amte@otenet.gr

Charis J. Gantes

Professor
National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Konstantinos E. Kalochairetis

Dr. Civil Engineer
National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: kalkostis@hotmail.com

SUMMARY

Steel chimneys are commonly used in engineering practice, offering structurally efficient and economical solutions. During the last years, the development and proliferation of combined cycle power plants has led to boiler exhaust stacks with diameters in the order of 7 meters. Usually, steel chimneys are designed according either to CICIND provisions or to EN 1993-1-6 or to ASME STS-1. All these three provisions contain uncertainties related to frequently encountered issues concerning the analysis and design of large diameter steel chimneys.

In the context of a CICIND research project, the static response of a 60m tall steel industrial chimney was investigated. The diameter of the chimney was 7m and the loads considered included vertical gravity loads and wind loads. By using advanced numerical analyses, the effect of various parameters was investigated. In the present work, the conditions under which a large diameter steel chimney buckles and collapses in the area of openings are investigated and the efficiency of alternative strengthening measures is examined.