

ΚΕΛΥΦΟΣ Ή ΠΥΛΩΝΑΣ ΩΣ ΒΑΣΙΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΑΔΩΝ

Μιχάλης Αγγελίδης

Πολιτικός Μηχανικός

AMTE A.E.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνήθης πρακτική είναι οι μεταλλικές καμινάδες να κατασκευάζονται ως αυτοφερόμενα κελύφη-πρόβολοι. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η επιλογή πυλώνα στήριξης αποτελεί συμφερότερη λύση. Εκτός από περιπτώσεις όπου η χρήση πυλώνα υπαγορεύεται από λειτουργικούς λόγους, το σύνηθες κίνητρο είναι η αύξηση της δυσκαμψίας του συστήματος. Παρουσιάζεται μια απλουστευτική μέθοδος για την εκτίμηση των απαιτούμενων διαστάσεων του πυλώνα, από την οποία προκύπτει ότι η χρήση του είναι ελκυστική για μικρές σχετικά διαμέτρους καμινάδων. Τέλος, ο πυλώνας αποτελεί συμφέρουσα λύση όταν το άνοιγμα της εισόδου των καυσαερίων είναι μεγάλο ή βρίσκεται ψηλά.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο συνηθέστερος φορέας μεταλλικής καμινάδας συνίσταται από κατακόρυφο κέλυφος πρόβολο με ή χωρίς εσωτερικό αυλό. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου μια εναλλακτική διάταξη φορέα είτε επιβάλλεται είτε συμφέρει να αξιολογηθεί. Η παρούσα εργασία εξετάζει τις περιπτώσεις αυτές και επιχειρεί να προσφέρει γενικές οδηγίες σχετικά με το θέμα αυτό.

3. ΚΙΝΗΤΡΑ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΠΥΛΩΝΑ

Η χρήση πυλώνα για τη στήριξη της καμινάδας συχνά υπαγορεύεται από λειτουργικές ή στατικές ιδιαιτερότητες. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση "υγρής καμινάδας" (wet stack) απευθείας επάνω από δεξαμενή απορρόφησης σε μονάδα αποθείωσης καυσαερίων δεν μπορεί να υλοποιηθεί παρά μόνο μέσω πυλώνα ο οποίος θα στηρίζει την καμινάδα. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί ειδική περίπτωση όπου ο πυλώνας είναι η μοναδική διαθέσιμη λύση, εφόσον η δεξαμενή απορρόφησης δεν είναι σε θέση να στηρίζει την

καμινάδα. Άλλη ειδική περίπτωση όπου η χρήση πυλώνα αποτελεί τη μόνη διέξοδο για λειτουργικούς λόγους είναι η περίπτωση καμινάδων by-pass σε σταθμούς παραγωγής ρεύματος συνδυασμένου κύκλου. Οι καμινάδες αυτές τοποθετούνται απευθείας επάνω από αγωγό εκτροπής καυσαερίων και απαιτείται να είναι στατικά ανεξάρτητες από τον αγωγό αυτό. Η διάταξη αυτή είναι συνεπώς παρόμοια με εκείνη της "υγρής καμινάδας" επάνω από δεξαμενή απορρόφησης και δεν επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση πυλώνα. Η επιχειρηματολογία που αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια δεν αφορά στις περιπτώσεις αυτές, για τις οποίες η χρήση πυλώνα υπαγορεύεται από λειτουργικές ανάγκες. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου ένας γειτνιάζων φορέας μπορεί να προσφέρει στήριξη στην καμινάδα, είναι μερικές φορές συμφέρον να εκμεταλλευόμαστε τη δυνατότητα αυτή και να συνδέουμε τους φορείς (βλ. Εικ. 1), με στόχο τον οικονομικότερο σχεδιασμό. Οι περιπτώσεις αυτές δεν εξετάζονται περαιτέρω στην παρούσα εργασία.



Εικ. 1 Καμινάδα ύψους 130 μ στηριζόμενη επί παρακείμενου φορέα.

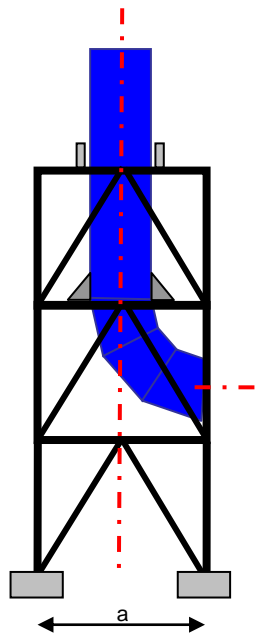
Εκτός λοιπόν από τους λειτουργικούς και πρακτικού λόγους που προαναφέρθηκαν, το σύνηθες κίνητρο για την εξέταση της περίπτωσης χρήσης πυλώνα είναι για να αντιμετωπισθούν ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω θέματα.

1. Οι μετακινήσεις του κελύφους-προβόλου είναι σημαντικές και απαιτείται ο περιορισμός τους.
2. Οι θλιπτικές τάσεις επί του κελύφους προβόλου είναι υψηλές.
3. Τό κελύφος-πρόβολος είναι επιρρεπές σε ταλαντώσεις από τυρβώδη ροή.
4. Οι απαιτήσεις του ανοίγματος εισόδου καυσαερίων οδηγούν σε σημαντική εξασθένηση της αντοχής και ευστάθειας του κελύφους.

Συνήθως, και οι τέσσερις προαναφερθέντες λόγοι αντιμετωπίζονται μέσω αύξησης της δυσκαμψίας ή/και αντοχής του κελύφους-προβόλου. Επειδή όμως στις περισσότερες περιπτώσεις, η διάμετρος του κελύφους υπαγορεύεται από θερμοδυναμικούς λόγους, η μόνη διαθέσιμη επιλογή είναι η αύξηση του πάχους του κελύφους. Στα επόμενα κεφάλαια εξετάζεται η καταλληλότητα χρήσης πυλώνα για την οικονομικότερη αντιμετώπιση των παραπάνω θεμάτων.

4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

Ο τυπικός πυλώνας στήριξης καμινάδας είναι τετράγωνος ή ορθογωνικός σε κάτοψη και διαθέτει κατακόρυφα αντιανέμια και στις τέσσερις όψεις. Στηρίζει ένα κυλινδρικό μεταλλικό κέλυφος σε δυο σημεία καθ' ύψος. Στο χαμηλότερο σημείο, συνήθως αμέσως επάνω από την έναρξη της καμπύλης για σύνδεση με τον εισερχόμενο αγωγό καυσαερίων, διατάσσονται κατακόρυφες και οριζόντιες στηρίξεις και στο υψηλότερο σημείο διατάσσονται οριζόντιες δεσμεύσεις με τη μορφή κατακορύφων οδηγήσεων. Ο πυλώνας μπορεί να έχει το ίδιο ύψος με την καμινάδα που στηρίζει, ή χαμηλότερος, ανάλογα με τη δυσκαμψία της καμινάδας. Η τυπική διάταξη ενός τέτοιου πυλώνα παρουσιάζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα.



Εικ. 2 Τυπική διάταξη πυλώνα στήριξης καμινάδας.

Η οριζόντια δυσκαμψία του φορέα αυτού αποτελείται από ένα καμπτικό και ένα διατμητικό τμήμα. Το καμπτικό τμήμα αντιστοιχεί στο έργο λόγω αξονικών παραμορφώσεων των υποστλωμάτων, ενώ το διατμητικό τμήμα αντιστοιχεί στο έργο λόγω παραμορφώσεων στα διαγώνια και τις δοκούς. Η καμπτική δυσκαμψία μπορεί να περιγραφεί ως:

- $I_{\text{lattice,flex}} = 4 \times A_c \times (a/2)^2$, όπου A_c είναι το εμβαδόν της διατομής του υποστυλώματος του πυλώνα και a είναι η αξονική απόσταση μεταξύ υποστυλωμάτων στη διεύθυνση της ζητούμενης απόκρισης.

Η διατμητική δυσκαμψία εξαρτάται από το είδος της δικτύωσης που χρησιμοποιείται. Για τις συνήθεις περιπτώσεις διαγωνίων τύπου X και Λ, οι αντιστοιχούσες διατμητικές δυσκαμψίες είναι ([1]):

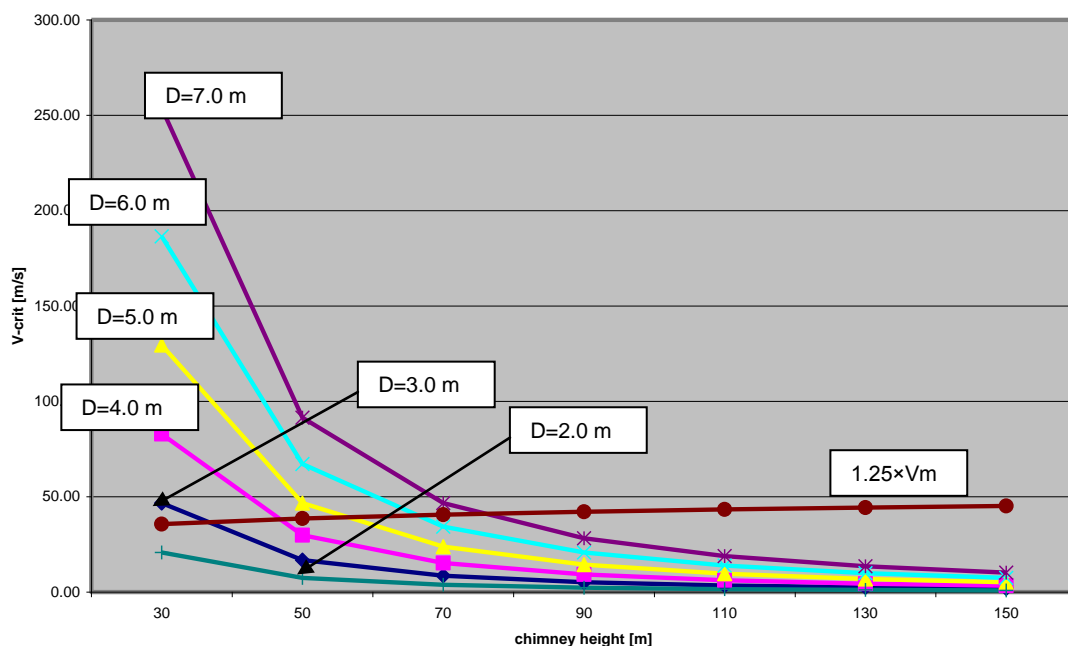
- $I_{\text{lattice,shear-X}} = 4 \times A_d \times a^2 / d^3$, όπου A_d είναι το εμβαδόν της διατομής του διαγωνίου και d είναι το αξονικό μήκος του διαγωνίου.
- $I_{\text{lattice,shear-Λ}} = 2 \times (A_d \times a^2 / 2d^3 + 4A_g / a)$, όπου A_g είναι το εμβαδόν της διατομής της δοκού του πυλώνα.

Οι παραπάνω σχέσεις αντιστοιχούν σε δυσκαμψίες ενός φατνώματος, οπότε η συνολική δυσκαμψία του φορέα προκύπτει από την άθροιση των επί μέρους δυσκαμψιών, λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη φόρτιση σε κάθε στάθμη. Για υψηλούς και σχετικά λυγηρούς φορείς, η αντίσταση στην οριζόντια φόρτιση παρέχεται κυρίως από την καμπτική δυσκαμψία. Συνεπώς, η αύξηση της διατομής των υποστυλωμάτων προσφέρει συνήθως στις περιπτώσεις αυτές ικανοποιητική αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του φορέα.

5. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΠΥΛΩΝΑ

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η καταλληλότητα ενός πυλώνα για την ικανοποιητική αύξηση της δυσκαμψίας του συστήματος, εξετάζεται πρώτα η απαιτούμενη ζήτηση. Ο έλεγχος των οριζοντίων μετακινήσεων λόγω ανεμοφόρτισης εξαρτάται αποκλειστικά από τη δυσκαμψία του φορέα. Όπως προαναφέρθηκε, στις περιπτώσεις των μεταλλικών καμινάδων, αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την αύξηση του πάχους. Για ομοιόμορφα κυλινδρικά κελύφη σταθερού πάχους, η μείωση των οριζοντίων μετακινήσεων εξαρτάται γραμμικά από την αύξηση του πάχους. Μπορεί συνεπώς να εκτιμηθεί σχετικά απλά κατά πόσον μια εύλογη αύξηση του πάχους του κελύφους θα προσφέρει την επιθυμητή μείωση των μετακινήσεων. Εάν το πάχος δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, τότε ο πυλώνας αποτελεί μια κατάλληλη εναλλακτική λύση.

Συνήθως, εάν ένα κέλυφος πρόβολος δεν διαθέτει ικανή δυσκαμψία για τον έλεγχο των μετακινήσεων, θα υπολείπεται επίσης και αναφορικά με ταλαντώσεις από τυρβώδη ροή ανεμοφόρτισης. Σε μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί η απαίτηση δυσκαμψίας για τέτοιες περιπτώσεις, διεξάγονται υπολογισμοί παραμετροποίησης, βασισμένοι σε βασική ταχύτητα ανέμου 25 m/sec και κατηγορία εδάφους 2.



Εικ. 3 Μεταβολή της V_{crit} σε σχέση με ύψος και διάμετρο καμινάδας.

Μπορεί εύκολα να αναγνωσθεί από την παραπάνω εικόνα ότι οι περισσότεροι συνδυασμοί διαμέτρου και ύψους καμινάδων αντιστοιχούν σε κρίσιμες ταχύτητες κάτω του ορίου του $1.25 \times V_m$ που θέτει ο κανονισμός. Στις περιπτώσεις αυτές το έλλειμμα σε σχέση με το όριο είναι σημαντικό. Η συνήθης προσέγγιση θα ήταν η χρήση μηχανικής απόσβεσης για τον έλεγχο των ταλαντώσεων από διέγερση κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου, εφόσον η απαιτούμενη δυσκαμψία δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω αύξησης του πάχους του κελύφους. Επισημαίνεται εδώ ότι, για κατακόρυφους κυκλικούς κυλίνδρους, η αύξηση του πάχους δεν επιδρά σημαντικά στην ιδιοσυχνότητα, καθότι συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση και της μάζας. Συνεπώς, εάν αναζητείται εναλλακτική λύση στη μηχανική απόσβεση, αυτή μπορεί να προέρθει μόνο μέσα από σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας με τη βοήθεια πυλώνα. Παρουσιάζεται ακολούθως μια απλοποιητική μεθοδολογία για την εκτίμηση των απαιτούμενων διαστάσεων του πυλώνα, έτσι ώστε η ιδιοσυχνότητα του συνδυασμένου συστήματος να οδηγεί σε κρίσιμη ταχύτητα επάνω από το όριο του κανονισμού.

Λόγω των αναμενομένων διαστάσεων των φορέων, η μεθοδολογία περιορίζεται στην καμπτική δυσκαμψία, καθότι η διατμητική δυσκαμψία θα είναι συνήθως σχετικά μικρότερη και μπορεί να ληφθεί υπόψη στο τελικό στάδιο της μελέτης.

- $I_{\text{windshield}} = A_{\text{windshield}} \times d_m^2 / 8 = d_m^3 \times \pi \times t / 8$, όπου $A_{\text{windshield}}$ είναι το εμβαδόν της διατομής του κελύφους, d_m είναι η αξονική διάμετρος του κελύφους και t είναι το μέσο πάχος του κελύφους.
- $I_{\text{lattice, flex}} = 4 \times A_c \times (a/2)^2$, όπου A_c είναι το εμβαδόν της διατομής των υποστλωμάτων του πυλώνα.

Το γράφημα στην παραπάνω εικόνα υποδηλώνει ότι απαιτείται σημαντική αύξηση της ιδιοσυχνότητας. Θεωρώντας μια στοχευόμενη αύξηση ιδιοσυχνότητας της τάξης του 500% και προσεγγίζοντας τη συνεισφορά της καμπτικής δυσκαμψίας στο 70% της συνολικής δυσκαμψίας, προκύπτει ότι:

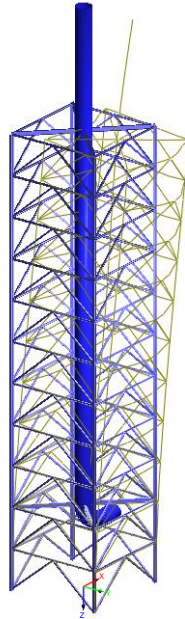
- $4 \times A_c \times (a/2)^2 = (5 \times 1.3)^2 \times d_m^3 \times \pi \times t / 8$.

Εισάγοντας και μια πρόσθετη απλούστευση θεωρώντας μια συνήθη τιμή για το εμβαδόν του υποστλώματος σε περίπου 200 cm^2 , που αντιστοιχεί σε διατομή HEB 400, και μια μέση τιμή πάχους κελύφους 10 mm , τότε προκύπτει ότι:

- $4 \times 200 \times (a/2)^2 = 42.25 \times d_m^3 \times \pi \times 1.0 / 8 \rightarrow a \approx 4.1 \times d_m^{1.5}$

Αυτή η προσεγγιστική σχέση για χρήση σε φάση προμελέτης ελέγχεται με τη βοήθεια προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Για καμινάδα ύψους 70 μέτρων και διαμέτρου 2 μέτρων , η ιδιοσυχνότητα υπολογίζεται σε 0.38 Hz , θεωρώντας ένα μέσο πάχος 10 mm . Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, το απαιτούμενο πλάτος του πυλώνα είναι: $4.07 \times 2.0^{1.5} = 11.5 \text{ m}$. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του υπολογισμού της ιδιοσυχνότητας για πυλώνα στήριξης καμινάδας συνολικού ύψους 70 μέτρων και διαμέτρου 2.0 μέτρων . Η υπολογισθείσα ιδιοσυχνότητα είναι 1.80 Hz , που αντιστοιχεί σε $4.7 \times$ ιδιοσυχνότητα του κελύφους-προβόλου.

RF-DYNAM 2007 FA1
1. Eigenform - 1.0043 Hz
0



Max u: 1.0, Min u: 0.0 [m]

Εικ. 4 Ιδιοσυχνότητα πυλώνα 11.5×11.5 m που στηρίζει καμινάδα 2.0 m διαμέτρου και ύψους 70 m.

Καθίσταται σαφές από την παρουσιασθείσα απλοποιητική προσέγγιση ότι, εφόσον καλείται ένας πυλώνας να αυξήσει την ιδιοσυχνότητα του συστήματος άνω του ορίου ταλαντώσεων τυρβώδους ροής, οι διαστάσεις του πρέπει να είναι σημαντικές. Ουσιαστικά, η απλουστευτική σχέση που αναπτύχθηκε υποδηλώνει ότι μια παρόμοια προσέγγιση έχει πρακτική αξία για διαμέτρους καμινάδων μέχρι 3.0 m. Καταδεικνύεται επίσης ότι ο πυλώνας δεν απαιτείται να προσφέρει οριζόντια στήριξη μέχρι την κορυφή της καμινάδας. Γενικά, η υψηλότερη στάθμη του πυλώνα θα καθορισθεί από την ικανότητα του κελύφους να υφίσταται κινήσεις και από τις συνολικές απαιτήσεις δυσκαμψίας. Από την υφιστάμενη εμπειρία, το ύψος του πυλώνα δεν χρειάζεται να υπερβαίνει το 80% του ύψους της καμινάδας. Περαιτέρω αύξηση του ύψους του πυλώνα δεν ωφελεί το σύστημα, καθότι θα αυξάνεται και η μάζα χωρίς αντίστοιχη αύξηση δυσκαμψίας, οδηγώντας σε μείωση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος.

Διεξήχθησαν επίσης διερευνήσεις για να διαπιστωθεί κατά πόσον η χρήση πυλώνα από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει ελκυστική εναλλακτική λύση σε σχέση με μεταλλικό πυλώνα. Η απλή εξέταση των ιδιοσυχνοτήτων φανερώνει ότι ένας πυλώνας οπλισμένου σκυροδέματος θα οδηγούσε σε μειωμένη ιδιοσυχνότητα σε σχέση με τον μεταλλικό πυλώνα, κυρίως λόγω της αυξημένης μάζας και του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Η μόνη περίπτωση όπου η χρήση οπλισμένου σκυροδέματος θα ήταν προτιμότερη είναι όταν χρησιμοποιούνται τοιχώματα. Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της δυσκαμψίας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αύξηση μάζας, οδηγώντας έτσι σε βελτιωμένη στατική απόκριση σε σχέση με τον μεταλλικό πυλώνα. Αυτό καταδείχθηκε στην περίπτωση καμινάδας ύψους 61 μέτρων υπό συνδυασμένη δράση σεισμού και ανέμου, όπου αντί για τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ισοδύναμη διάταξη υποστλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος ([2]).

6. ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Στην περίπτωση κελύφους-προβόλου, το άνοιγμα για την είσοδο των καυσαερίων αποτελεί σημαντική τοπική εξασθένηση και ως προς τη ευστάθεια και ως προς την αντοχή. Το θέμα συνήθως αντιμετωπίζεται με τοπικές ενισχύσεις γύρω από το άνοιγμα. Όταν όμως το πλάτος του ανοίγματος προσεγγίζει τη διάμετρο του κελύφους, σε συνδυασμό με ένα μεγάλο ύψος (το οποίο συμβαίνει συνήθως όταν ο αγωγός εισέρχεται υπό γωνία) οι απαιτήσεις ενισχύσεων είναι σημαντικές. Όταν επιπροσθέτως οι συνήθεις λύσεις των διαγωνίων διαμέσου του ανοίγματος ή η χρήση πολλαπλών μικροτέρων ανοιγμάτων δεν είναι δυνατές (όπως τυπικά συμβαίνει σε καμινάδες με εσωτερικούς αυλούς), η χρήση πυλώνα αποτελεί αξιόπιστη διάξοδο.

Ο πυλώνας προσφέρει επίσης πλεονεκτήματα όταν η σύνδεση με τον αγωγό των καυσαερίων είναι σε μεγάλο υψόμετρο. Στην περίπτωση αυτή, η χρήση πυλώνα οδηγεί σε εξοικονόμηση ποσοτήτων εφόσον το κέλυφος δεν χρειάζεται να επεκταθεί μέχρι το έδαφος.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση πυλώνα για στήριξη μεταλλικής καμινάδας μπορεί να υπαγορεύεται για λειτουργικούς λόγους, όπως για παράδειγμα όταν η είσοδος των καυσαερίων είναι κάτω από την καμινάδα. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, ο πυλώνας χρησιμοποιείται μόνο όταν μπορεί να αυξήσει τη δυσκαμψία του συστήματος. Από την απλουστευτική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε καταδεικνύεται ότι αυτό είναι πρακτικά ενδιαφέρον για καμινάδες σχετικά μικρής διαμέτρου. Τέλος, ο πυλώνας αποτελεί επίσης ελκυστική λύση όταν οι απαιτήσεις του ανοίγματος εισόδου καυσαερίων είναι σημαντικές ή όταν το άνοιγμα βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] STAFFORD-SMITH, B., COULL, A., "Tall Building Structures: Analysis and Design", John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [2] ANGELIDES, M., ZANNAKI, L., "Design of a 61 m Steel Chimney under Combined Earthquake and Wind Loading", CICIND Report, Vol. 21, No. 2, 2005.

LATTICE TOWER AS AN ALTERNATIVE TO CANTILEVER WINDSHIELD FOR STEEL CHIMNEYS

Michael Angelides

Structural Engineer

AMTE Consulting Engineers

Athens, Greece

e-mail: amte@otenet.gr

SUMMARY

A lattice tower may be used for the support of a steel chimney. Its use is mandatory in special cases where the inlet is below the chimney and the corresponding expansion joint is horizontal, usually corresponding to wet stacks over absorbers and by-pass stacks over diverters. For the remaining cases, the lattice tower solution may be advantageous when it offers the advantage of increased structural stiffness. A simplified approach has been developed for the estimation of required lattice tower dimensions. It has been seen that the requisite stiffness increase is efficiently provided by a lattice tower only for relatively smaller chimney diameters. Finally, the lattice tower offers an efficient alternative for cases where the breeching demands are significant or when the breeching level is high.