

ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΛΕΒΗΤΑ HRSG

Γεώργιος Παπανίκας
Πολιτικός Μηχανικός
AMTE A.E. Τεχνικών Μελετών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: amte@otenet.gr

Μιχάλης Αγγελίδης
Πολιτικός Μηχανικός
AMTE A.E. Τεχνικών Μελετών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: amte@otenet.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η στατική μελέτη κτηρίου Λέβητα στο εργοστάσιο της ΔΕΗ στην Μεγαλόπολη. Σκοπός είναι να καταδειχθούν οι ιδιαιτερότητες που απορρέουν από την φύση του κτηρίου, δηλαδή την ανάρτηση του συνόλου του εξοπλισμού από την οροφή, ειδικά για περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Παραδοσιακά, οι δεσμίδες δεν προσομοιώνονται μαζί με τον φέροντα οργανισμό, αλλά θεωρείται μόνον η επιρροή των φορτίων τους. Επιπλέον, το περίβλημα του Λέβητα, αποτελούμενο από μεταλλικά ελάσματα, θεωρείται ότι παρέχει την πλήρη εκτός επιπέδου δυσκαμψία και αντοχή του φορέα. Αρχικά δεν προσομοιώθηκαν οι δεσμίδες σωλήνων, και διαστασιολογήθηκαν συμβατικά οι δοκοί πρόσκρουσης. Στη συνέχεια, εισήχθησαν στο μοντέλο οι δεσμίδες και διαπιστώθηκε ότι επετεύχθη εξοικονόμηση υλικού για τους προσκρουστήρες, οι οποίοι εξετάστηκαν λόγω του σημαντικού κόστους και των ακραίων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας που λειτουργούν. Αναφορικά με την πλευρική προστασία που παρέχουν τα ελάσματα του περιβλήματος, προέκυψε ότι αυτή δεν είναι επαρκής, τουλάχιστον για σεισμογενείς περιοχές, καθιστώντας τη χρήση κατακορύφων συνδέσμων δυσκαμψίας αναπόφευκτη.

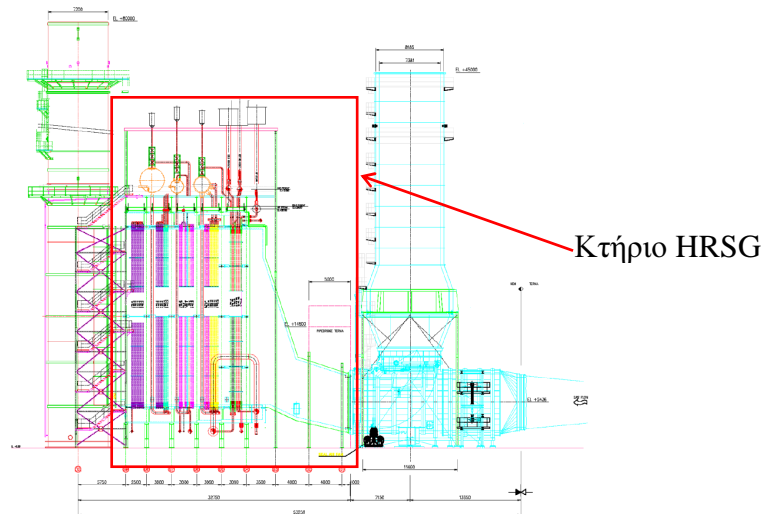
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου έχουν σήμερα την υψηλότερη απόδοση μεταξύ των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η αυξημένη απόδοση έγκειται στην αξιοποίηση της θερμότητας εξαγωγής του Αεριοστροβίλου (gas turbine–GT) προς παραγωγή ατμού, ο οποίος με τη σειρά του κινεί τον Ατμοστροβίλο (steam turbine–ST). Με τη συνδυασμένη λειτουργία των στροβίλων GT και ST παράγεται ρεύμα από τις Ηλεκτρογεννήτριες. Η αξιοποίηση της θερμότητας του αεριοστροβίλου γίνεται με τη χρήση Ατμογεννήτριας Ανάκτησης Θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator – HRSG).

Οι Ατμογεννήτριες είναι μεταλλικά κτήρια, που παρουσιάζουν τρεις σημαντικές ιδιαιτερότητες:

1. Το σύνολο του εξοπλισμού του κτηρίου αναρτάται από την οροφή.
2. Θεωρείται παραδοσιακά ότι το περίβλημα του λέβητα αποτελεί παράλληλα και οργανικό τμήμα του φέροντος οργανισμού.
3. Συγκεκριμένα δομικά στοιχεία είναι εκτεθημένα σε ακραίες θερμοκρασίες, ως 650°C, στο εσωτερικό του λέβητα.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η στατική μελέτη ενός κτηρίου Ατμογεννήτριας σε περιοχή υψηλής σεισμικότητας, εστιάζοντας κυρίως στις παραπάνω ιδιαιτερότητες.



Σχ. 1 Μηχανολογική όψη κτηρίου

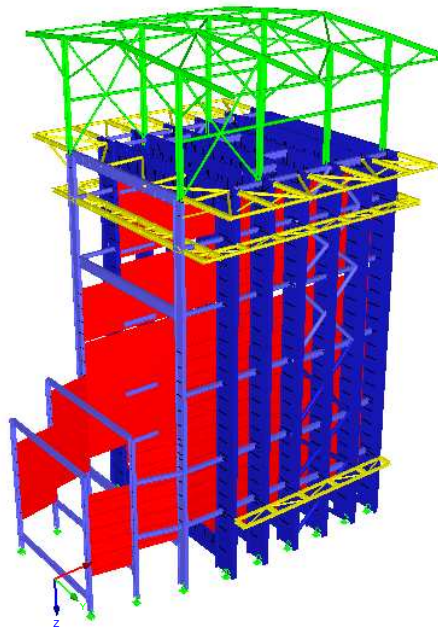
3.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΟΥ

Το κτήριο είναι μέρος της Μονάδας 5 του εργοστασίου ηλεκτοπαραγωγής της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη. Το έργο κατασκευής της μονάδας έχει αναλάβει η κοινοπραξία ΜΕΤΚΑ-ΕΤΑΔΕ και εκτελείται από την ΤΕΡΝΑ. Η ΤΕΡΝΑ ανέθεσε στη ΝΕΜ Ολλανδίας την προμήθεια της καμινάδας και του λέβητα, και η ΝΕΜ ανέθεσε τη στατική και αντισεισμική μελέτη των φορέων αυτών στην ΑΜΤΕ. Ο έλεγχος της μελέτης διεξήχθη από τη ΔΕΗ (ΔΜΚΘ: Διεύθυνση Μελετών και Κατασκευών Θερμοηλεκτρικών έργων). Η μελέτη ολοκληρώθηκε το 2010. Το κτήριο αποτελείται από δύο τμήματα: το τμήμα που στηρίζει τον αγωγό εισαγωγής (inlet duct) και το τμήμα που στηρίζει τον Λέβητα (boiler). Τόσο ο Αγωγός Εισαγωγής όσο και ο λέβητας περιβάλλονται από μεταλλικά ελάσματα πάχους 6 mm, ενισχυμένα με διαμήκεις νευρώσεις. Τα ελάσματα αυτά αποτελούν το περίβλημα (casing) της ατμογεννήτριας και προσαρτώνται επί των δοκών και υποστρωμάτων του φέροντος οργανισμού, εν είδει πλαγιοκάλυψης και επικάλυψης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, το περίβλημα τοποθετείται εσωτερικά των δομικών στοιχείων ενώ παρεμβάλλεται επίσης μόνωση πάχους ως και 350 mm, που διατηρεί τον σκελετό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα γεωμετρικά στοιχεία του κτηρίου είναι:

- Ύψος κτηρίου = 30 m
- Ελεύθερο άνοιγμα πλαισίων = 14,5 m

- Απόσταση πλαισίων μεταξύ τους = 3 m
- Μήκος κτηρίου = 25 m
- Ύψος πρόσθετου στεγάστρου στην οροφή = 10 m



Σχ. 2 Προσομοίωμα στατικής μελέτης

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΩΝ / ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Εκτός από το περίβλημα και την μόνωση που προαναφέρθηκαν, ο εξοπλισμός του κτηρίου περιλαμβάνει:

α) Τρεις δεξαμενές ατμού (steam drums), χαμηλής πίεσης (LP), ενδιάμεσης (IP) και υψηλής (HP), όπου συγκεντρώνεται το μείγμα νερού και ατμού και απομονώνεται ο ατμός. Τα βάρη των δεξαμενών, που εδράζονται στην οροφή του κτηρίου (σε υψόμετρο +30), δίδονται στον Πιν. 1.

Δεξαμενή	Ίδιο βάρος και νερό [t]
HP	112
IP	32
LP	146
Σύνολο	290

Πίν. 1 Φορτία δεξαμενών ατμού

β) Σωληνώσεις και γραμμές ατμού. Στηρίζονται επί της οροφής, ή αναρτώνται από αυτήν μέσω των δεσμίδων. Τα βάρη τους δίδονται στον Πίνακα 2.

Σωληνώσεις	Ίδιο βάρος και νερό [t]
Προσαρτημένες σε δεσμίδες	144
“Downcomers”	30
Κύριες γραμμές ατμού	135
Διάφορες	188
Σύνολο	497

Πίν. 2 Φορτία σωληνώσεων

γ) Δεσμίδες (bundles). Είναι ομάδες σωλήνων μήκους 22 m, σε πυκνή διάταξη, που αναρτώνται από την οροφή κάθετα στη ροή των καυσαερίων του αεροστροβίλου. Αποτελούν τους αεροψυκτές (evaporators), όντας γεμάτοι με νερό. Πρόκειται για μεγάλο αριθμό κυκλικών κοίλων διατομών (CHS), μικρής διαμέτρου (περίπου 40 mm) που «δένονται» μεταξύ τους προς σχηματισμό δεσμίδων. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι κάθε δεσμίδα μπορεί να περιλαμβάνει ως και 700 σωλήνες, πυκνά διατεταγμένες σε αποστάσεις περίπου 50 mm μεταξύ τους. Σε κάθε φάτνωμα μεταξύ πλαισίων του φορέα τοποθετούνται τρεις δεσμίδες, που αποτελούν ένα κουτί (box). Συνολικά λοιπόν υπάρχουν πέντε κοντά στο κτήριο. Τα βάρη των κουτιών δίδονται στον Πίν. 3.

Κουτί	Ίδιο βάρος και νερό [t]
A	272
B	405
C	350
D	452
E	464
Σύνολο	1943

Πίν. 3 Φορτία κουτιών δεσμίδων

Το συνολικό φορτίο λοιπόν που φέρει η οροφή του κτηρίου προσεγγίζει τους 3000 t, μαζί με το στέγαστρο και τις πλατφόρμες συντήρησης.

5. ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Σύμφωνα με την προδιαγραφή της ΔΕΗ, κατέστη υποχρεωτική η εφαρμογή ποσοστού απόσβεσης ίσου με 3%, καθώς και συντελεστή συμπεριφοράς 1,5. Η επιλογή μικρών συντελεστών η δεν είναι σπάνια σε ενεργειακά έργα, όπου η αναθέτουσα αρχή πολλές φορές προδιαγράφει οριζόντιο ελαστική συμπεριφορά των κτηρίων. Σε συνδυασμό με τη σεισμική επιτάχυνση εδάφους που προβλέπει ο ΕΑΚ για την Μεγαλόπολη (0,24 g) και το συντελεστή σπουδαιότητας (1,30 για κτήρια παραγωγής ενέργειας), η μέγιστη φασματική επιτάχυνση λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλή τιμή, ίση με:

$$\Phi_d(T) = 1,30 \times 0,24g \times 1,18 \times 2,5 / 1,5 = 0,615 g.$$

Υπό τα σεισμικά φορτία, τα πέντε κουτία δεσμίδων που αναρτώνται από την οροφή ουσιαστικά δρουν ως εκκρεμμή. Η πλευρική στήριξη των σωλήνων που αποτελούν τις δεσμίδες εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση προσκουστήρων, δηλαδή δοκών σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος του κτηρίου, κάθετα προς τις δεσμίδες. Πέραν των σεισμικών φορτίων, οι δοκοί πρόσκρουσης εμποδίζουν και την μετατόπιση των δεσμίδων λόγω της εισαγωγής των υψηλής πίεσης καυσαερίων από τον αεριοστροβίλο.

Το κύριο χαρακτηριστικό των προσκρουστήρων είναι ότι βρίσκονται εντός του περιβλήματος του λέβητα, με αποτέλεσμα να εκτίθενται σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας, υψηλή πίεση αερίων και υγρασία λόγω της διαδικασίας ατμοπαραγωγής. Η θερμοκρασία μεγιστοποιείται στην περιοχή του αγωγού εισόδου (κουτί Α), και μειούται κατά την ροή των αερίων προς την Καμινάδα (κουτί Ε).

Για την πλευρική στήριξη των πέντε κουτιών διατάσσονται έξι σειρές προσκρουστήρων, των οποίων οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 650°C ως 80°C (βλ. Πίν. 4). Στον πίνακα δίδονται και τα όρια διαρροής του χάλυβα στις εκάστοτε θερμοκρασίες καθώς και τα μέτρα ελαστικότητας.

Θέση δοκών πρόσκρουσης	1	2	3	4	5	6
Θερμοκρασία σχεδιασμού [°C]	650	485	305	205	145	80
Όριο διαρροής [MPa]	98	141	188	228	246	298
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	147	181	195	202	205	208

Πίν. 4 Προδιαγραφές δοκών πρόσκρουσης

Λόγω των επικρατουσών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, για την κατασκευή των δοκών πρόσκρουσης χρησιμοποιούνται ειδικοί χάλυβες. Δεδομένων δε των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων που εμφανίζουν τα υλικά στις συγκεκριμένες συνθήκες, οι δοκοί έχουν τελικά μεγάλες διατομές, αποτελώντας σημαντικό κομμάτι του προϋπολογισμού του κτηρίου. Τονίζεται εδώ ότι οι παραπάνω συνθήκες είναι συνθήκες λειτουργίας, και όχι τυχηματικές, με αποτέλεσμα να συνδυάζονται με όλες τις λοιπές περιπτώσεις φόρτισης, συμπεριλαμβανομένου του σεισμού. Είναι λοιπόν κρίσιμο να διαστασιολογούνται οικονομικά οι δοκοί πρόσκρουσης.

Αρχικά, οι προσκρουστήρες υπολογίσθηκαν ως μεμονωμένες δοκοί, ανεξάρτητες από τις δεσμίδες, χωρίς δηλαδή οι τελευταίες να εντάσσονται στο στατικό μοντέλο. Θεωρώντας τις δοκούς ως «ακλόνητες» στηρίξεις των δεσμίδων, η διαστασιολόγηση έδωσε μεγάλες διατομές για τους προσκρουστήρες. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας τους, οδήγησαν σε μείωση της ιδιοπεριόδου του κτηρίου στη διαμήκη διεύθυνση, αυξάνοντας έτσι τη σεισμική καταπόνησή τους (και συνεπακόλουθα και του υπόλοιπου κτηρίου). Αποφασίσθηκε λοιπόν να εισαχθούν στο στατικό προσομοίωμα και οι δεσμίδες των σωλήνων. Λόγω του ότι οι σωλήνες δεν είναι συνεχώς συνδεδεμένοι μεταξύ τους, η συνολική ροπή αδράνειας κάθε δεσμίδας είναι σχετικά μικρή. Αυτό οδήγησε σε αύξηση της ιδιοπεριόδου, με ευεργετικές επιπτώσεις στην κατανομή των σεισμικών δυνάμεων. Παράλληλα όμως υπέδειξε τις μεγάλες μετακινήσεις που υφίστανται οι δεσμίδες υπό σεισμικά φορτία, που μπορούν να οδηγήσουν την κατασκευή εκτός φακέλου ορίων λειτουργίας. Τελικά, κατόπιν επαναληπτικής διαδικασίας, επετεύχθη η χρυσή τομή μεταξύ:

1. Των μετατοπίσεων των δεσμίδων.
2. Της απαιτούμενης δυσκαμψίας των προσκρουτήρων.
3. Της οικονομικής διαστασιολόγησης δοκών πρόσκρουσης, που είναι κατασκευασμένες από ακριβά κράματα.

Χαρακτηριστικό του «μείγματος» του σχεδιασμού κτηρίου, προσκρουστήρων και δεσμίδων είναι ότι σε κάποιες περιπτώσεις προέκυψαν παραπλήσιες σεισμικές δυνάμεις τόσο στον

πόδα όσο και στην κεφαλή των δεσμίδων. Πράγματι, οι ιδιομορφές ενός εκ των πλαισίων είναι:

$$[\phi^{(1)}] = \begin{bmatrix} 1,000 \\ 0,948 \\ 0,104 \\ 0,032 \end{bmatrix} \text{ and } [\phi^{(2)}] = \begin{bmatrix} 0,337 \\ 0,110 \\ -1,000 \\ -0,320 \end{bmatrix}$$

Οι συντελεστές συμμετοχής είναι:

$$\psi_1 = \frac{\sum m_i \phi_i^{(1)}}{\sum m_i (\phi_i^{(1)})^2} = \frac{2290 \times 0,104 + 2290 \times 0,948}{2290 \times 0,104^2 + 2290 \times 0,948^2} = 1,1567$$

$$\psi_2 = \frac{2290 \times (-1,000) + 2290 \times 0,110}{2290 \times (-1,000)^2 + 2290 \times 0,110^2} = -0,8794$$

Οι δρώσεις ιδιομορφικές μάζες είναι:

$$M_1 = \psi_1 \sum m_i \phi_i^{(1)} = 1,1567 \times 2409 = 2786 \text{ kN}$$

$$M_2 = -0,8794 \times (-2098) = 1792 \text{ kN}$$

Επομένως, οι οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις είναι:

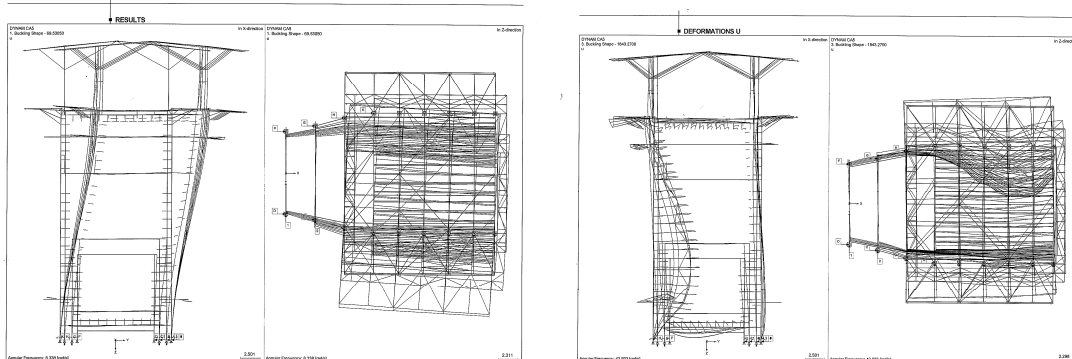
$$F_b^{(1)} = \psi_1 \cdot \Phi_d(T) \cdot m_2 \cdot \phi_2 = 1,1567 \times 0,588 \times 2290 \times 0,104 = 163 \text{ kN}$$

$$F_t^{(1)} = 1,1567 \times 0,588 \times 2290 \times 0,948 = 1476 \text{ kN}$$

$$F_b^{(2)} = -0,8794 \times 0,559 \times 2290 \times (-1,000) = 1125 \text{ kN}$$

$$F_t^{(2)} = -0,8794 \times 0,559 \times 2290 \times 0,110 = -123 \text{ kN}$$

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3, η επιρροή της δεύτερης ιδιομορφής του πλαισίου δίνει αυξημένα σεισμικά φορτία και για τις κάτω δοκούς πρόσκρουσης.

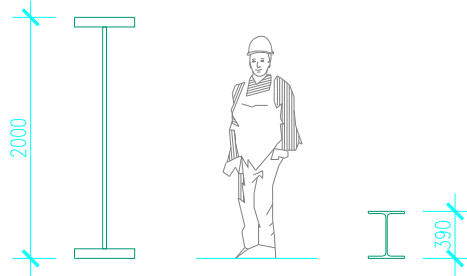


Σχ. 3 Πρώτη και δεύτερη ιδιομορφή πλαισίου

6. ΑΠΟΤΕΛΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Με τα συγκεκριμένα δεδομένα φορτίων εξοπλισμού και σεισμού, κατέστη γρήγορα σαφές ότι το περίβλημα πάχους 6 mm του λέβητα δεν θα μπορούσε να εξασφαλίσει τη διαμήκη δυσκαμψία του κτηρίου. Πολλώ δε μάλλον όταν αυτό προσαρτάται στο εσωτερικό μόνο πέλαμα δοκών – υποστυλωμάτων. Έτσι, το περίβλημα χρησιμοποιήθηκε στατικά μόνον για την παραλαβή της εσωτερικής πίεσης των αερίων. Εξάλλου, λόγω των μεγάλων εντατικών μεγεθών, της τάξης των 15 MN για την αξονική δύναμη και των 19 MNm για τις καμπτικές ροπές των υποστυλωμάτων, απαιτήθηκε και η διάταξη εγκάρσιων δοκών προς εξασφάλιση πλευρικής προστασίας έναντι λυγισμού. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι

διατομές των υποστυλωμάτων της περιοχής του λέβητα είχαν συνολικό ύψος 2 m, έναντι 0,4 m για την περιοχή του αγωγού εισόδου (βλ. Σχ. 5). Όσον αφορά τις δοκούς πρόσκρουσης, επετεύχθη μείωση του αρχικά υπολογισμένου βάρους των 90 t, στο μισό. Σημειώνεται ότι το βάρος του φέροντος οργανισμού χωρίς το περίβλημα του λέβητα είναι περίπου 700 t.



Σχ. 5 Διατομές υποστυλωμάτων πλαισίων λέβητα (αριστερά) και αγωγού εισόδου (δεξιά)

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ταχέως αναπτυσσόμενη χρήση Μονάδων Συνδυασμένου Κύκλου (CCPP), και η συνεπακόλουθη ανάγκη για κτήρια Ατμογεννητριών Ανάκτησης Θερμότητας (HRSG), έχει αναδείξει κάποιες ιδιαιτερότητες σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Η χρήση του περιβλήματος για την μεταφορά σεισμικών δυνάμεων καθίσταται απαγορευτική, και είναι απαραίτητη η χρήση κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας στον διαμήκη άξονα. Επιπροσθέτως, μέσω αναλυτικής διερεύνησης της δυναμικής συμπεριφοράς των αναρτημένων δεσμίδων σωλήνων, και των δοκών πρόσκρουσης, μπορεί να επιτευχθεί οικονομική διαστασιολόγηση των τελευταίων έναντι σεισμικών δυνάμεων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ο.Α.Σ.Π., “Ελληνικός αντισεισμικός Κανονισμός ΕΑΚ 2000”
- [2] Clough R.W, Penzien I. “Dynamics of Structures”, *McGraw Hill*

STEEL STRUCTURE FOR HRSG BUILDING

George Papanikas

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

Michael Angelides

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

SUMMARY

The structural analysis of a Heat Recovery Steam Generator (HRSG) building is presented, which consists part of the PPC Combined Cycle Power Plant in Megalopolis, Greece. Purpose of this presentation is to highlight some issues arising from the nature of the building, namely the suspension of all equipment from the roof, especially for high seismicity areas.

The roof loads come mainly from harps of bundles full of water, which recover heat from GT exhaust gases. In general, bundles are not modeled in structural models - only their loads are considered for the design of the building. Further, the boiler casing, consisting of stiffened steel plates, is traditionally considered to provide full out of plane stiffness for the structure.

In early design phases of the project, the bundles were not modeled, so the bumper beams (used to restrain bundle horizontal movements) turned up to be uneconomic. Following that, all boxes of bundles were introduced in the structural model, and was found that great economy was achieved for the bumper beams. Note that bumper beams are made of special steel grades in order to cope with aggressive environment within the boiler.

With respect to the lateral support provided by the boiler casing, it was found to be insufficient for high seismicity areas.

It is concluded that introducing bundles in the structural model may lead to economy in bumper beam design. Also, the use of vertical braced frames is unavoidable in the lateral direction of the building.