

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

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

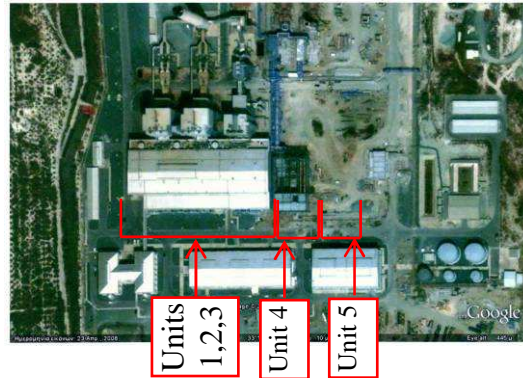
1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται η στατική μελέτη δύο κτιρίων Ατμοστρόβιλων στο εργοστάσιο της ΑΗΚ στην Κύπρο, που μελετήθηκαν σε διαφορετικές περιόδους, με σημαντικές διαφορές στις παραδοχές φορτίσεων. Σκοπός της εργασίας είναι ναδειχθεί ότι με κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί ένα κτίριο να παραλάβει σημαντικά μεγαλύτερα φορτία. Οι Αντισεισμικοί Κανονισμοί προβλέπουν την υιοθέτηση συμπεριφοράς χαμηλής ή υψηλής πλαστιμότητας για τη σεισμική ανάλυση των κατασκευών. Λόγω της σημαντικής διαφοράς σε υπολογιστικό κόστος, τις περισσότερες φορές υιοθετείται η παραδοχή χαμηλής πλαστιμότητας, τουλάχιστον για ειδικά και περίπλοκα κτίρια. Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα σχέδια και η κατασκευαστική εμπειρία του υφισταμένου κτιρίου, αποφασίστηκε να εφαρμοσθεί ικανοτικός σχεδιασμός, ώστε η σεισμική επιτάχυνση να περιορισθεί γενικά στα επίπεδα της παλαιότερης κατασκευής, οδηγώντας έτσι σε ομοιομορφία σχεδιασμού για τα δυο κτίρια. Συμπεραίνεται ότι με την επιλογή κατάλληλων υπολογιστικών μεθόδων, σε συνδυασμό με υιοθέτηση πλάστιμων λεπτομερειών σύνδεσης και συντηρητικής διαστασιολόγησης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική υπεραντοχή ενός κτιρίου έναντι υψηλοτέρων φορτίων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περίπου το 80% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως παράγεται με τη χρήση ατμοστρόβιλων. Ο ατμοστρόβιλος είναι μια μηχανή που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια του ατμού σε κινητική. Συγκεκριμένα, ατμός υψηλής ταχύτητας προσβάλλει τα πτερύγια του στροβίλου αναγκάζοντάς τον να περιστρέφεται. Η παραγόμενη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη απευθείας στον ατμοστρόβιλο.

Όλη αυτή η μετατροπή της ενέργειας από θερμική σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική γίνεται εντός των Κτηρίων Ατμοστροβίλων (Steam Turbine Building), που γενικά κατασκευάζονται με μεταλλικό φέροντα οργανισμό. Δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια της ζωής τους τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής επεκτείνονται, παρατηρείται το φαινόμενο τα νέα κτήρια να μελετώνται με διαφορετικές παραδοχές από τα αρχικά (βλ. Φωτ. 1).



Φωτ. 1 Αεροφωτογραφία Εργοστασίου ΑΗΚ στο Βασιλικό

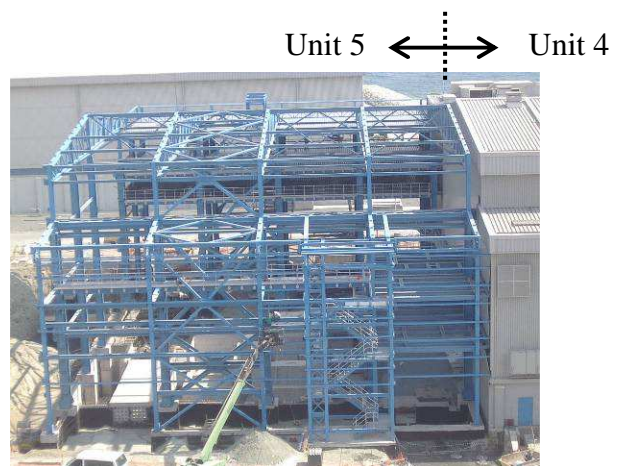
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι στατικές μελέτες δύο κτηρίων ατμοστροβίλων που εκπονήθηκαν σε διαφορετικές περιόδους, για το ίδιο εργοστάσιο. Ιδιαίτερα συγκρίνονται οι μέθοδοι αντισεισμικής ανάλυσης που εφαρμόστηκαν.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

Τα δύο κτήρια ατμοστροβίλων που εξετάζονται αποτελούν τμήματα της Μονάδας 4 και Μονάδας 5 του ηλεκτροπαραγωγικού Σταθμού Βασιλικού στην Κύπρο. Ο συγκεκριμένος σταθμός αποτελεί το μεγαλύτερο έργο υποδομής στην ιστορία της Κύπρου, και παράγει σχεδόν τη μισή ηλεκτρική ενέργεια της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ).



Φωτ. 2 Κτήριο ατμοστροβίλου Μονάδας 4



Φωτ. 3 Κτήριο ατμοστροβίλου Μονάδας 5

Το κτήριο της Μονάδας 4 (βλ. Φωτ. 2) κατασκευάστηκε σε απόσταση έξι μέτρων από το υφιστάμενο κτήριο της Μονάδας 3, χωρίς να υπάρχει άμεση επικοινωνία μεταξύ τους, πλην δύο διαδρόμων-γεφυρών πρόσβασης πεζών. Μάλιστα, πέραν της μεταξύ τους απόστασης, η γενική γεωμετρία των δύο κτηρίων (Unit 3 και Unit 4) είναι αρκετά διαφορετική.

Αντιθέτως, το κτήριο της Μονάδας 5 (βλ. Φωτ. 3) κατασκευάστηκε έτσι ώστε να αποτελεί ενιαία ενότητα με αυτό της Μονάδας 4. Κατά συνέπεια, η γεωμετρία των δύο κτηρίων είναι όμοια ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της πλαγιο/επικάλυψης, της γερανογέφυρας και των εσωτερικών δαπέδων. Σημειώνεται ότι το νέο κτήριο (Unit 5) μελετήθηκε ως στατικά ανεξάρτητο από το παλαιό (Unit 4), με αρμό διαχωρισμού 1,6 m.

Τα γεωμετρικά στοιχεία των δύο κτηρίων είναι:

- Μέγιστο ύψος = 22 m
- Συνολικό πλάτος = 60 m
- Ελεύθερο άνοιγμα πλαισίων = 35 m
- Άνοιγμα γερανογέφυρας = 33 m
- Απόσταση πλασίων μεταξύ τους = 8 m
- Δάπεδα με σύμμικτες πλάκες σε τρεις ορόφους, σε υψόμετρα +10,5, +13,5 και +17,5m.
- Μήκος κτηρίου Unit 4 = 32 m
- Μήκος κτηρίου Unit 5 = 33 m

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, τα κτήρια των Μονάδων 4 και 5 είναι όμοια γεωμετρικά. Ομοιότητες υπάρχουν και από πλευράς φορτίσεων:

- Χιόνι = 0,75 kN/m²
- Επιβεβλημένα φορτία ορόφων μηχανολογικής λειτουργίας = 5 kN/m²
- Επιβεβλημένα φορτία ορόφων ηλεκτρολογικής λειτουργίας = 10 kN/m²
- Ανυψωτική ικανότητα κύριας γερανογέφυρας = 60 t
- Ανυψωτική ικανότητα γερανογέφυρας μηχανολογικού ορόφου = 7,5 t

Ωστόσο, ανάμεσα στις περιόδους μελέτης των δύο κτηρίων, προέκυψαν τρεις σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις παραδοχές:

- α) Το νέο κτήριο (Unit 5) θα έπρεπε να έχει πρόβλεψη για προσθήκη κατ'επέκταση επιπλέον 25 m.
- β) Η βασική ταχύτητα ανέμου αυξήθηκε στις προδιαγραφές του έργου, από 22,5 m/sec σε 26,2 m/sec.
- γ) Η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού αυξήθηκε από 0,25 g σε 0,70 g.

5. ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Εστιάζοντας στην τρίτη διαφοροποίηση, αναφέρεται ότι για την αντισεισμική μελέτη του πρώτου κτηρίου (Unit 4) χρησιμοποιήθηκε ο Κανονισμός UBC 1997, σύμφωνα με την προδιαγραφή του έργου. Βάσει του UBC, η συνολική τέμνουσα βάσης σχεδιασμού είναι:

$$V = \frac{2,5C_a I}{R} \cdot W, \text{ όπου}$$

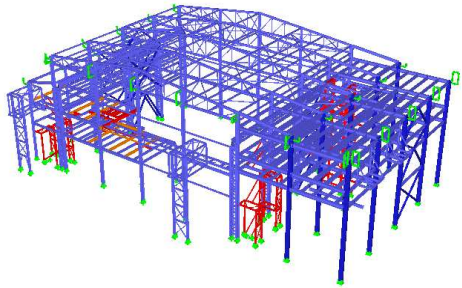
C_a = σεισμικός συντελεστής, ο οποίος για συντελεστή σεισμικής ζώνης $Z = 0,2$ και έδαφος τύπου S_B , προκύπτει ίσος με 0,20

I = συντελεστής σεισμικής σπουδαιότητας, ίσος με 1,25 για κτήρια υψηλής επικινδυνότητας.

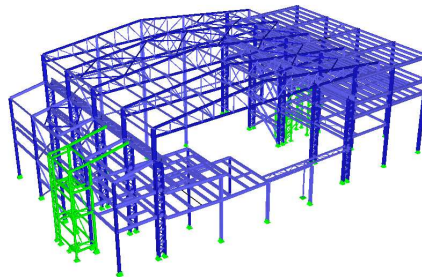
R = συντελεστής συμπεριφοράς, ίσος με 5,6 για συνδέσμους δυσκαμψίας χωρίς εκκεντρότητα

$$\text{Επομένως, } C = \frac{2,5 \times 0,20 \times 1,25}{5,6} W = 0,11W$$

Το προσομοίωμα της στατικής μελέτης φαίνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1 Προσομοίωμα στατικής μελέτης
Μονάδας 4



Σχ. 2 Προσομοίωμα στατικής μελέτης
Μονάδας 5

Για την αντισεισμική μελέτη του νέου κτηρίου (Unit 5), η προδιαγραφή του έργου απαιτούσε την χρήση του Ευρωκώδικα 8, σύμφωνα με τον οποίον η μέγιστη τιμή του φάσματος σχεδιασμού είναι:

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}, \text{ όπου}$$

a_g = εδαφική επιτάχυνση, η οποία για κατηγορία σπουδαιότητας IV (σταθμοί παραγωγής ενέργειας, $\gamma_I = 1,40$) και επιτάχυνση αναφοράς $a_{gR} = 0,25$ g (ζώνη 3) είναι ίση με $1,40 \times 0,25g = 0,35$ g.

S = συντελεστής εδάφους, ο οποίος για εδαφικό τύπο B είναι ίσος με 1,2.

q = συντελεστής συμπεριφοράς, ο οποίος για συνδέσμους δυσκαμψίας χωρίς εκκεντρότητα είναι ίσος με 4.

$$\text{Επομένως, } S_d(T) = 0,35g \times 1,2 \times \frac{2,5}{4} = 0,26g$$

Το προσομοίωμα της στατικής μελέτης φαίνεται στο Σχ. 2.

Εφαρμόζοντας στη σεισμική δύναμη του UBC 1997 με τον συντελεστή υπεραντοχής σεισμικών δυνάμεων, ο οποίος είναι $\Omega_0 = 2,2$ για συνδέσμους δυσκαμψίας χωρίς εκκεντρότητα, η τελική σεισμική καταπόνηση είναι ίση με:

$$\Omega_0 \cdot V = 2,2 \times 0,11W = 0,25W$$

Ομοίως, για τη σεισμική δύναμη του Ευρωκώδικα 8, η εφαρμογή πολλαπλασιαστικού συντελεστή $\Omega = 2,7$ θα έδινε ως τελική τιμή για τη σεισμική καταπόνηση:

$$\Omega \cdot S_d(T) = 2,7 \times 0,26g = 0,70g$$

Ο αρχικά θεωρούμενος πολλαπλασιαστικός συντελεστής $\Omega = 2,7$ ισοδυναμεί με την εναλλακτική εφαρμογή συντελεστή συμπεριφοράς $q = 1,5$ και παραδοχή συμπεριφοράς χαμηλής πλαστιμότητας, οπότε θα ήταν:

$$S_d(T) = 0,35g \times 1,2 \times \frac{2,5}{1,5} = 0,70g$$

Η επιλογή της τιμής $q = 1,5$ τόσο στον ΕΑΚ 2000 όσο και στον Ευρωκώδικα 8 είναι ελκυστική για τον Μελετητή, διότι οδηγεί σε απαλλαγή από τις πρόσθετες διατάξεις πλαστιμότητας, που αυξάνουν τον υπολογιστικό φόρτο, ιδιαίτερα για περίπλοκα κτήρια.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, η εφαρμογή σεισμικών δυνάμεων 2,5 φορές μεγαλύτερων από της αρχικής μελέτης, πέρα από τη σημαντική οικονομική επιβάρυνση του έργου, δεν θα επέτρεπε την αξιοποίηση των σχεδίων και της κατασκευαστικής εμπειρίας του υφισταμένου κτηρίου. Αποφασίστηκε λοιπόν να υιοθετηθεί παραδοχή υψηλής πλαστιμότητας.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Όσον αφορά στον χάλυβα των μεταλλικών δομικών στοιχείων, επελέγη η «χαμηλή» ποιότητα S235 για τα πλάστιμα στοιχεία, δηλαδή τα διαγώνια στοιχεία των συνδέσμων δυσκαμψίας και τις δοκούς των πλαισίων. Για τα μη πλάστιμα στοιχεία, δηλαδή όλα τα υποστυλώματα και τις δοκούς των συνδέσμων δυσκαμψίας, επελέγη «υψηλή» ποιότητα χάλυβα, S355. Για τα λοιπά δομικά στοιχεία, που δεν συμμετέχουν στα συστήματα παραλαβής σεισμικών φορτίων, επελέγη η «εμπορική» ποιότητα χάλυβα, S275.

Το δομικό σύστημα παραλαβής σεισμικών δυνάμεων κατά τη διεύθυνση του πλάτους του κτηρίου είναι το πλαίσιο. Οι οριζόντιες δυνάμεις παραλαμβάνονται από στοιχεία που καταπονούνται κυρίως σε κάμψη, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα υποστυλώματα και οι δοκοί οροφής ισογείου, μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών ορόφων. Οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας εντοπίζονται σε πλαστικές αρθρώσεις σε δοκούς, όπου η ενέργεια απορροφάται μέσω κυκλικής κάμψης.

Κατά τη διεύθυνση του μήκους του κτηρίου, δηλαδή εκτός επιπέδου των πλαισίων, το δομικό σύστημα είναι οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας χωρίς εκκεντρότητα. Οι οριζόντιες δυνάμεις παραλαμβάνονται από στοιχεία που καταπονούνται κυρίως σε αξονικά φορτία, που στην περίπτωσή μας είναι τα υποστυλώματα, οι δοκοί και τα διαγώνια στοιχεία των συνδέσμων. Και για τα δύο δομικά συστήματα, ο Ευρωκώδικας δίνει συντελεστή συμπεριφοράς $q = 4$. Οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας εντοπίζονται στα διαγώνια στοιχεία. Σημειώνεται ότι λόγω της χρήσης διαγωνίων μορφής «V», στην παραλαβή των οριζοντίων δυνάμεων συμμετέχουν και τα θλιβόμενα διαγώνια.

Οι συνδέσεις των πλαστίμων μελών (δοκοί πλαισίων και διαγώνια, βλ. Φωτ. 5 και 6) σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να έχουν επαρκή υπεραντοχή για να επιτρέψουν την ανάπτυξη κυκλικής διαρροής στα πλάστιμα τμήματα. Το κριτήριο αυτό οδηγεί στον σχεδιασμό συνδέσεων πλήρους αντοχής, με προεντεταμένους κοχλίες. Απαιτείται επιπλέον ιεράρχηση των μορφών αστοχίας ώστε να προηγούνται πλαστικές μορφές, έναντι των ψαθυρών.



Φωτ. 5 Σύνδεση δοκών-στύλων πλαισίων



Φωτ. 6 Σύνδεση διαγωνίων στοιχείων συνδέσμων δυσκαμψίας

Για τα πλάστιμα μέλη εξασφαλίστηκε επίσης ότι αυτά ανήκουν σε κλάσεις 1 ή 2, προς περιορισμό τοπικού λυγισμού από υψηλές τιμές b/t.

Η διαστασιολόγηση των πλαστίμων στοιχείων έγινε με τρόπο ώστε να επιτευχθεί η χαμηλότερη δυνατή τιμή για τους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές Ω. Μάλιστα, έγινε διαβάθμιση των διατομών καθ' ύψος, έτσι ώστε να υπάρχει ομοιομορφία των τιμών Ω σε ολόκληρο τον φορέα. Επιπλέον, ελήφθησαν υπ' όψιν οι πλαστικές τέμνουσες για τα πλαίσια και οι περιορισμοί λυγηρότητας για τα διαγώνια των συνδέσμων δυσκαμψίας.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Εφαρμόζοντας τον ικανοτικό σχεδιασμό, κατέστη δυνατόν να σχεδιασθούν οικονομικά όλα τα μη πλάστιμα δομικά στοιχεία. Ιδιαίτερα τα υποστυλώματα, που αποτελούσαν μεγάλο ποσοστό του συνολικού βάρους, διατήρησαν τις ίδιες διατομές με αυτές του υφισταμένου κτηρίου. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι για αρκετά δομικά στοιχεία τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη είχαν προκύψει από μη σεισμικούς συνδυασμούς. Αυτό είναι σύνηθες σε βαριά βιομηχανικά κτήρια, λόγω μεγάλων φορτίων εξοπλισμού αλλά και επιβαλλόμενων από την εν γένει λειτουργία του εργοστασίου γεωμετρικών περιορισμών. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις χρησιμοποιούμενες διατομές των δομικών στοιχείων.

Χώρος στέγασης ατμοστροβίλου			
Μεταπικά υποστυλώματα	HE-550A	Πέλματα δικτυωτών	HE-300A
Δίδυμα δικτυωτά υποστυλώματα	HE-600B	Διαγώνια δικτυωτών ζευκτών στέγης	SHS 120×6,3
Διαγώνια δικτυωτών υποστυλωμάτων	SHS 120×8	Γερανοδοκοί	HE-800B
Διαγώνια οριζοντίου επιπέδου στέγης	SHS 150×6		
Χώρος μηχανολογικών εγκαταστάσεων			
Γερανοδοκοί	HE-300B	Ζυγώματα	HE-400A
Υποστυλώματα	HE-400B / HE-300B	Δευτερεύουσες δοκοί δαπέδων	HE-300A
Κύριες δοκοί δαπέδων	HE-400B / HE-450B		
Χώρος ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων			
Σταυροειδή υποστυλώματα	HE-600B+2×1/2 HE-600B		
Κύριες δοκοί δαπέδων	Σύνθετη διατομή I450/300/30/30		
Δευτερεύουσες δοκοί δαπέδων	HE-360A		
Λοιπά δομικά στοιχεία			
Δοκοί πλευρικών τοίχων	HE-300A		
Διαγώνια συνδέσμων δυσκαμψίας	SHS320×12,5,SHS260×10, SHS200×6,SHS120×8,SHS180×4		

Πίν. 1. Διατομές δομικών στοιχείων Μονάδας 4 και 5

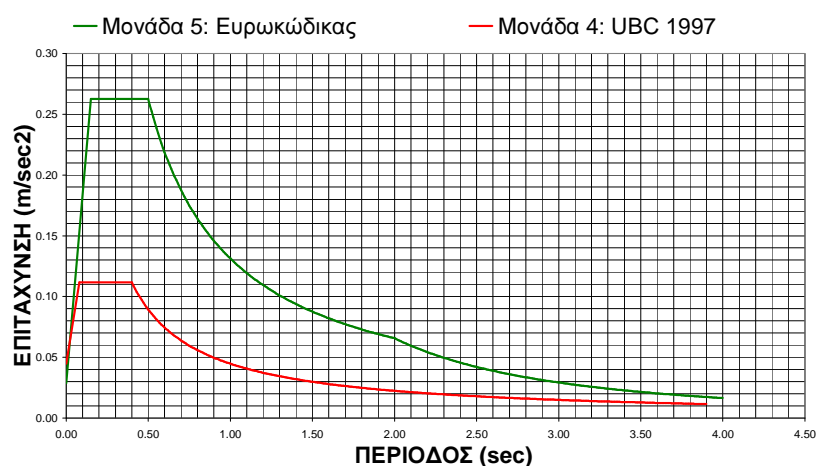
8. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαφορές των σεισμικών παραδοχών ανάμεσα στις προδιαγραφές του Ιδιοκτήτη (ΑΗΚ) για τις Μονάδες 4 και 5:

	Μονάδα 4	Μονάδα 5
Εδαφική επιτάχυνση	0,20 g	0,25 g
Συντελεστής σπουδαιότητας	1,25	1,40
Συντελεστής εδάφους	(1,00)	1,20
Συντελεστής συμπεριφοράς	5,6	4
Μέγιστη φασματική επιτάχυνση	0,112 g	0,262 g

Πίν. 2. Σύγκριση σεισμικών δεδομένων Μονάδων 4 και 5

Η σύγκριση των φασμάτων σχεδιασμού δίδεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 3).



Σχ. 3 Σύγκριση φασμάτων σχεδιασμού Μονάδων 4 και 5

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα στοιχεία του αναδόχου του έργου, (J&P-ΑΒΑΞ), το συνολικό βάρος του κτηρίου Μονάδας 5 ήταν παραπλήσιο με αυτό της Μονάδας 4: 912 t, έναντι 950 t (η μικρή μείωση έγκειται στο ότι στοιχεία του μετωπικού τοίχου του υφισταμένου κτηρίου χρησιμοποιήθηκαν στο νέο).

Φαίνεται λοιπόν ότι με σχεδιασμό, διαστασιολόγηση και διαμόρφωση λεπτομερειών σύμφωνα με ειδικές αντισεισμικές διατάξεις, δίδεται η δυνατότητα στο ίδιο ουσιαστικά κτήριο να ανταπεξέλθει σε υψηλότερες σεισμικές καταπονήσεις, με σημαντικά αυξημένο ωστόσο υπολογιστικό φόρτο.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.”
- [2] “Uniform Building Code 1997”, *International conference of Building Officials*.
- [3] KEY D. “Seismic Design Codes: Philosophy, Application and Effectiveness”, *Proceedings of the Caribbean Conference on Natural Hazard*, 1993, pp.273-282.
- [4] WALLACE J.W. “Seismic Code Requirements” *CE 243A, University of California, Los Angeles*.

APPLICATION OF DIFFERENT SEISMIC ANALYSIS METHODS ON STEAM TURBINE BUILDINGS

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 two Steam Turbine (ST) buildings is presented at the EAC Vasilikos Power Station in Cyprus. The two buildings have been designed in different time periods, with major variations in the loading data. Purpose of this presentation is to show that a building may conform to higher loads by employing suitable design tools.

Seismic codes provide various analysis methods depending on the adoption of low or high ductility. Being less time consuming, low ductility assumptions are often made for design of special and complicated buildings.

The maximum spectral acceleration according to the specification of Unit 4 - ST building was equal to 0,25g. For Unit 5 – ST building, which is statically independent of the Unit 4 building, the corresponding value was 0,70g. In order to make use of the existing drawings and exploit the overall constructing experience, it was decided to apply capacity design, i.e. to adopt high ductility principles. The design acceleration was thus reduced generally to the levels of the existing building, leading to uniformity for both structures. Furthermore, the structural integrity of the existing building against the newest specification has been confirmed without any need for retrofit. Finally, the continuity of the cranes and the architectural finishes was also achieved for the two-neighbouring buildings.

It is concluded that by utilizing suitable design methods, in combination with ductile detailing and conservative design, a considerable amount of overstrength may be achieved for a structure.