

## ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΤΕΓΑΣΤΡΟΥ ΑΠΟ FERROCEMENT ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ ΙΔΡΥΜΑ ΣΤΑΥΡΟΣ ΝΙΑΡΧΟΣ

**Γρηγόρης Πενέλης**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, MSc, DIC, Πενέλης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ*

**Γεώργιος Πενέλης**

*Ομ. Καθηγητής ΑΠΘ*

**Κωνσταντίνος Πασχαλίδης**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, Πενέλης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ*

**Ηλίας Παρασκευόπουλος**

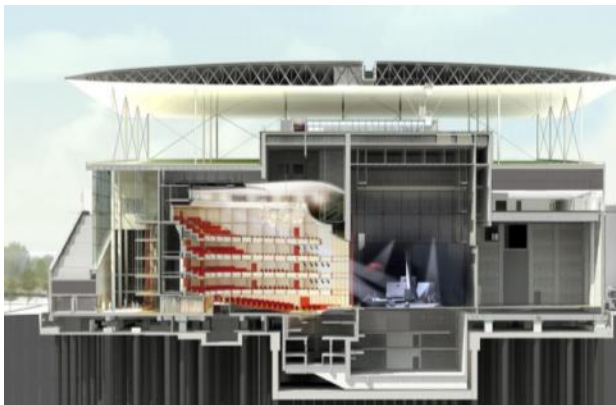
*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, Πενέλης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ*

**Βασίλης Παπανικολάου**

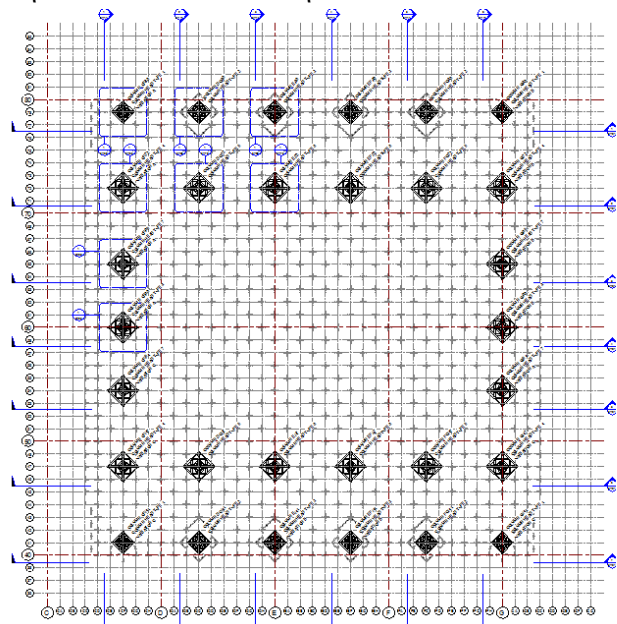
*Επ. Καθηγητής ΑΠΘ*

### Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την αναλυτική προσέγγιση για την ανάλυση και τον επιτελεστικό σχεδιασμό του στεγάστρου από Ferrocement που βρίσκεται στο Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος. Η αρχική μελέτη του στεγάστρου έγινε από την EXPEDITION και την ΟΜΕΤΕ.



Σχ. 1 Τομή όπερας και στεγάστρου



Σχ. 2 Κάτοψη του στεγάστρου με τις στηρίξεις

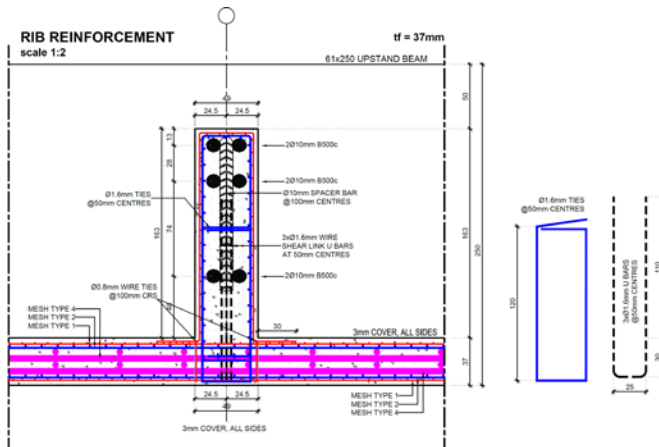
### Γεωμετρία

Το στεγάστρο αποτελεί την μεγαλύτερη κατασκευή Ferrocement παγκοσμίως με διαστάσεις 100x100μ σε κάτοψη (δηλαδή 10,000μ<sup>2</sup>), 4,50 μέτρα ύψος στο κέντρο και 30εκ στην περίμετρο. Το συνολικό του βάρος είναι 4500 τόνοι. Είναι σύμμεικτη κατασκευή από μεταλλικό χωροδικτύωμα εσωτερικά και εξωτερικές μεμβράνες (πέλματα) από Ferrocement ενώ αναρτάται από 120 ελατήρια και η κίνηση του ελέγχεται από 60 αποσβεστήρες ενέργειας. Τα ελατήρια μεταφέρουν το φορτίο σε 30 κυλινδρικές

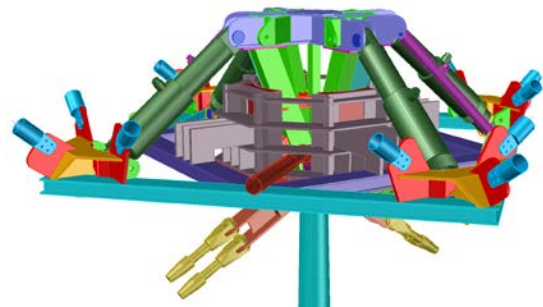
κολώνες διαμέτρου 40εκ στην οροφή της Όπερας (σχ.1, σχ.2). Η όπερα είναι κτίριο σεισμικά μονωμένο.

### Ferrocement

Το Ferrocement είχε εγκαταλειφτεί ως στατικό σύστημα από το 1960 που χρησιμοποιήθηκε στην Ιταλία από τον Nervi. Πρακτικά είναι ισχυρά οπλισμένη τσιμεντοκονία ιδιαίτερα μεγάλης θλιπτικής αντοχής (100Μρα) η οποία οπλίζεται με ένα σάντουιτς πλεγμάτων (σχ.3), πολύ λεπτών εξωτερικά (Φ1/10mm) και διαβαθμιζόμενων σε χοντρότερα εσωτερικά (έως Φ10/50mm)



Σχ. 3 Διατομή T κάτω πέλματος



Σχ. 4 3D BIM του Column head

### Column Heads

Η κατακόρυφη κίνηση του στεγάστρου ελέγχεται από ένα συνδυασμό ελατηρίων, αποσβεστήρων ενέργειας και κατακόρυφων επιφανειών κύλισης. Κάθε στύλος στην κορυφή του έχει ένα κεφαλοκόλωνα (column head) το οποίο περιλαμβάνει 4 κεκλιμένα ελατήρια, 2 αποσβεστήρες ενέργειας και 4 κατακόρυφα εφέδρανα τριβής. Τα κατακόρυφα φορτία του στεγάστρου, το οποίο είναι αναρτημένο πλήρως από τα ελατήρια, δια των ελατηρίων μεταφέρονται στους στύλους, ενώ οι 2 κεκλιμένοι αποσβεστήρες ενέργειας ελέγχουν την ταλάντωση σε μεγάλες διεγέρσεις. Στις μικρές διεγέρσεις ανέμου τα εφέδρανα τριβής διασφαλίζουν την ακινησία του στεγάστρου έτσι ώστε να αποφεύγονται θέματα κοπώσεως.

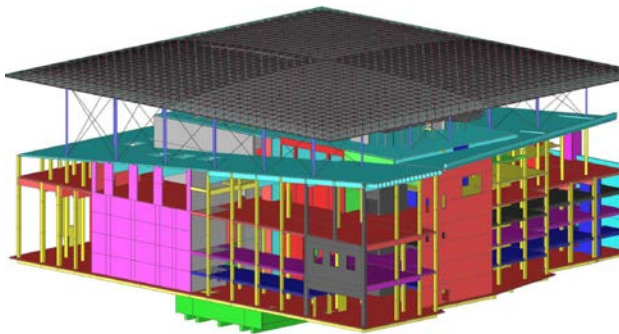
### Ελαστική Δυναμική Ανάλυση

Ελαστική φασματική δυναμική ανάλυση για σεισμό και άνεμο για το συνολικό προσομοίωμα κτιρίου όπερας και στεγάστρου έγινε στο Scia Engineer και στο Etabs. Τα φορτία ανέμου εισήχθησαν ως στατικά φορτία με βάση τα στοιχεία από την αεροδυναμική σήραγγα. Δεδομένης της σεισμικής μόνωσης, κρίσιμη διέγερση ήταν η ανεμοπίεση προς τα κάτω. Οι αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την διαστασιολόγηση της όπερας και του στεγάστρου, ενώ οι ανελαστικές για τον προσδιορισμό των επιπέδων επιτελεστηκότητας.

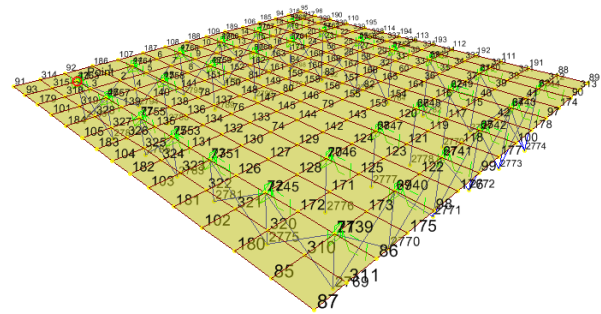
### Ανελαστική Δυναμική Ανάλυση

Δεδομένου ότι η ανεμοπίεση είναι δυναμική φόρτιση, θεωρήθηκε απαραίτητο να ελεγχθεί το στέγαστρο με ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονο-ιστορίας. Η ανελαστικότητα προφανώς

συγκεντρώνεται στα ελατήρια και στους αποβεστήρες οι οποίοι έχουν γεωμετρική ανελαστικότητα λόγω της κεκλιμένης θέσης τους και της κατακόρυφης κίνησης (large displacements) καθώς και της φύσης του υλικού τους που είναι βισκο-πλαστικό (viscous plastic). Το στέγαστρο προσομοιώθηκε στο Etabs2013 από τους στύλους και άνω με μια σειρά επίπεδων επιφανειακών στοιχείων τα οποία να δίνουν τα ίδια ιδιομορφικά χαρακτηριστικά με το πλήρες προσομοίωμα. Οι αναλύσεις απέδειξαν ότι δεν υπάρχει θέμα συντονισμού, ότι ακόμη και σε συντονισμό η υψηλή απόσβεση οδηγεί σε άμεση παύση της ταλάντωσης πριν την επόμενη ριπή ανέμου, και τέλος χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της εκτιμώμενης συνολικής κίνησης ελατηρίων που είναι 55Kmm για 25 χρόνια ζωής, με εγγύηση του κατασκευαστή στα 255Kmm.



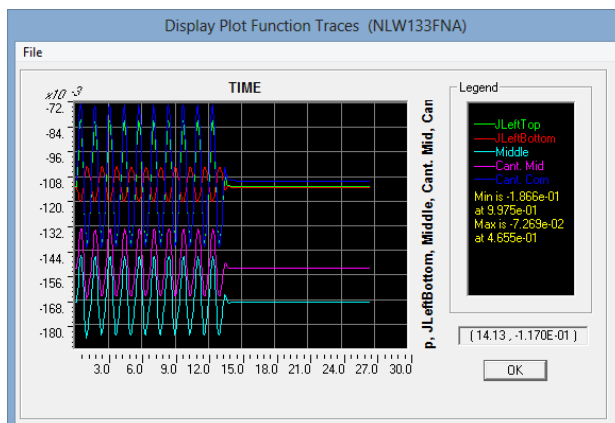
Σχ. 5 Πλήρες προσομοίωμα Π.Σ. στο SCIA



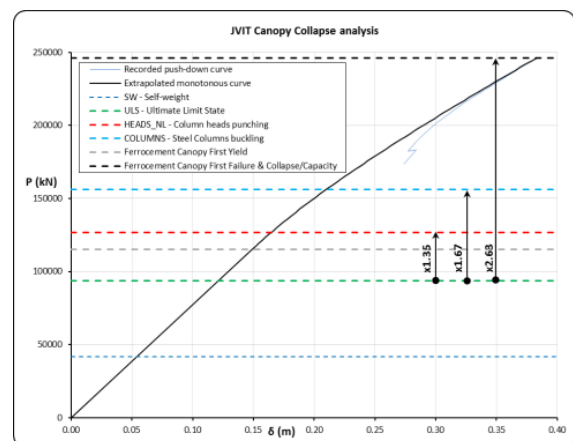
Σχ. 6 Προσομοίωμα στεγάστρου για ανελαστική δυναμική ανάλυση στο Etabs

### Στατική Ανελαστική Ανάλυση

Επιλέχθηκε να γίνει στατική ανελαστική ανάλυση του στεγάστρου με καθολικό κατακόρυφο φορτίο, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ο συντελεστής ασφαλείας της κατασκευής έναντι των φορτίων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ULS). Αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό το οποίο χρησιμοποιεί τον solver του SAP2000 και τα αποτελέσματα έδειξαν Σ.Α.=1,35 έναντι ULS (σχ. 8).



Σχ. 7 Δυναμική απόκριση στεγάστρου σε ανεμοπίεση



Σχ. 8 Καμπύλη αντοχής (pushdown)