

**ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ
ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΣΤΕΓΑΣΤΡΟΥ ΝΕΟΥ ΓΗΠΕΔΟΥ
ΠΑΝΑΘΗΝΑΪΚΟΥ ΣΤΟ ΒΟΤΑΝΙΚΟ**

Bodo Ruck

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.
Laboratory of Building- and
Environmental Aerodynamics
Universität Karlsruhe
Karlsruhe, Γερμανία
e-mail: ruck@uka.de

Χάρης Ι. Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Χρήστος Π. Γκολογιάννης

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Μηχανικοί Μελετών & Εφαρμογών
Αθήνα, Ελλάδα
E-mail: cpgol@mhxme.gr

Κωνσταντίνα Κουλάτσου

Πολ. Μηχανικός Ε.Μ.Π., M.Sc. Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: konkoulatsou@gmail.com

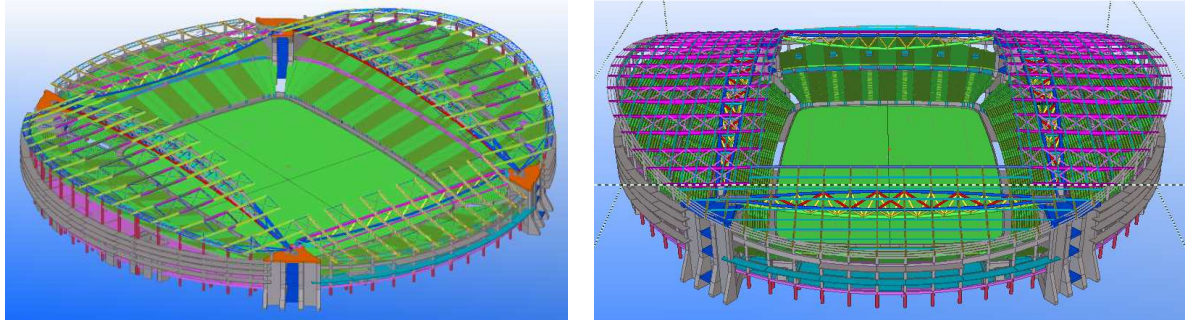
1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται ο υπολογισμός και ο τρόπος επιβολής των ανεμοπιέσεων στη μεταλλική στέγη του νέου γηπέδου του Παναθηναϊκού. Το γήπεδο, το οποίο θα κατασκευαστεί στην περιοχή του Βοτανικού στην Αθήνα, αποτελείται από κερκίδες από οπλισμένο σκυρόδεμα και στέγαστρο των κερκίδων του από δομικό χάλυβα. Όπως είναι αναμενόμενο για μια κατασκευή αυτού του τύπου, ο άνεμος παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό της μεταλλικής στέγης. Για τον υπολογισμό του φορτίου του ανέμου, το γήπεδο προσομοιώθηκε σε κλίμακα 1:250 σε αεροδυναμική σήραγγα και εκτέθηκε σε μία προσομοιωμένη ατμοσφαιρική οριακή στρώση. Μετρήθηκαν οι συντελεστές πίεσης σε επιλεγμένα σημεία μέτρησης για διευθύνσεις ανέμου ανά 30°. Οι μετρούμενοι συντελεστές πίεσης είναι χρονικές συναρτήσεις από τις οποίες με κατάλληλη μεθοδολογία προέκυψαν ο μέγιστος, ελάχιστος και μέσος συντελεστής πίεσης, καθώς και η τυπική απόκλιση. Τα αποτελέσματα αυτά αξιολογήθηκαν ώστε να προκύψουν κατάλληλες κατανομές φορτίων λόγω ανέμου επί των δομικών στοιχείων του μεταλλικού στεγάστρου. Τέλος, γίνεται συνοπτική σύγκριση των μετρήσεων με αντίστοιχα αποτελέσματα από ισχύοντες κανονισμούς.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΗΠΕΔΟΥ

Το νέο γήπεδο του Παναθηναϊκού θα κατασκευαστεί στην περιοχή του Βοτανικού, στην Αθήνα θα έχει χωρητικότητα περίπου 40.000 θεατών, και το σύνολο των κερκίδων του θα είναι στεγασμένο. Οι κερκίδες θα κατασκευαστούν από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ η

στέγη από δομικό χάλυβα. Το γήπεδο έχει κυκλική κάτοψη με εξωτερική διάμετρο 211.0m. Οι διαγώνιοι του αγωνιστικού χώρου διαχωρίζουν το κτίριο σε 4 τομείς, που ονομάζονται αντίστοιχα Βόρειος, Νότιος, Ανατολικός και Δυτικός. Στον Ανατολικό και Δυτικό Τομέα, παράλληλα προς τον διαμήκη άξονα του αγωνιστικού χώρου, διαμορφώνονται οι «περιοχές των μεγάλων κερκίδων», ενώ στον Βόρειο και Νότιο Τομέα, πίσω από τα τέρματα, οι «περιοχές των μικρών κερκίδων».

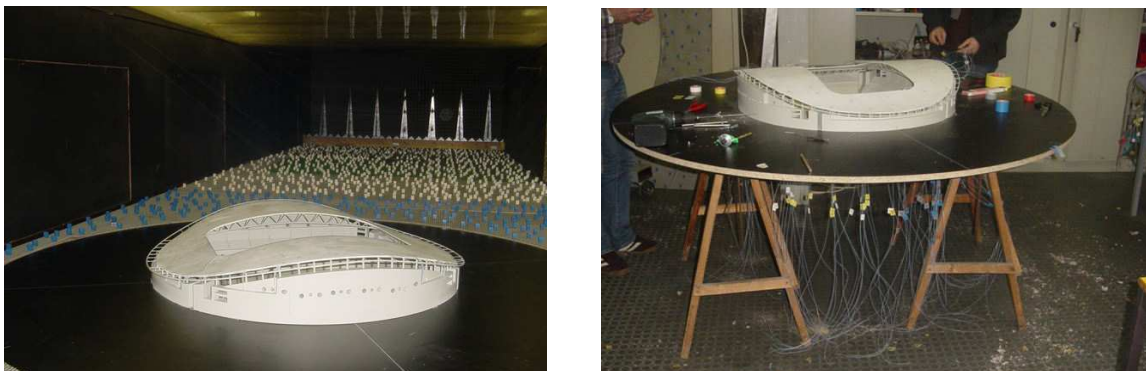


Σχ. 1: Τρισδιάστατη άποψη νέου γηπέδου Παναθηναϊκού

Σε κάθε περιοχή μεγάλων κερκίδων κατασκευάζονται τρία στατικώς ανεξάρτητα κτίρια και οι κερκίδες διατάσσονται καθ' ύψος σε τρία διαζώματα. Σε κάθε περιοχή μικρών κερκίδων κατασκευάζονται δύο στατικώς ανεξάρτητα τμήματα και οι κερκίδες διατάσσονται καθ' ύψος σε δύο διαζώματα. Στις τέσσερις γωνίες του γηπέδου κατασκευάζονται οι τέσσερις πυλώνες για την έδραση του μεταλλικού στεγάστρου των κερκίδων. Το μεταλλικό στέγαστρο απαρτίζεται από τέσσερα στατικώς ανεξάρτητα τμήματα, από ένα για κάθε έναν από τους τομείς του γηπέδου, και κάθε τμήμα έχει έναν κύριο δικτυωτό φορέα που εδράζεται στους πυλώνες, δευτερευουσες δοκούς που στηρίζονται στον κύριο φορέα και στα υποστυλώματα των κερκίδων, και συστήματα δυσκαμψίας.

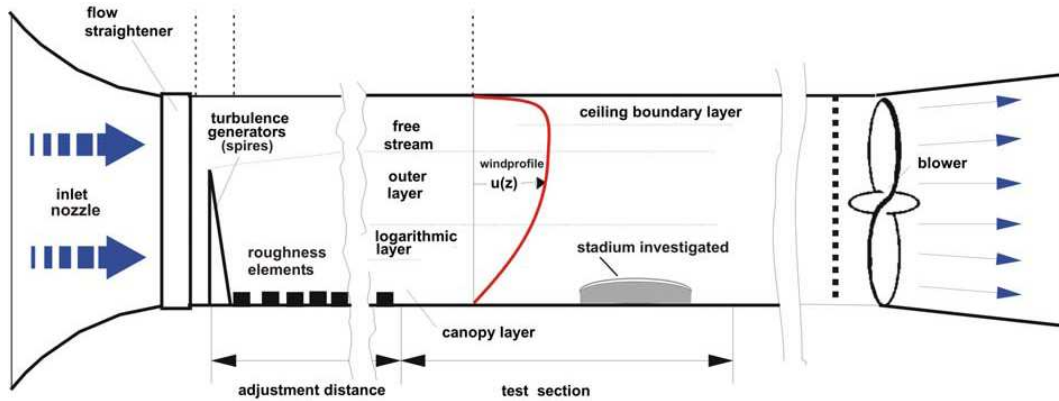
3. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

Για τον υπολογισμό ανεμοπιέσεων επί του μεταλλικού στεγάστρου έγιναν δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής κτιρίων και Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου της Καρλσρούης στη Γερμανία. Το φυσικό προσομοίωμα του σταδίου κατασκευάστηκε σε κλίμακα 1:250 και περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειες που αφορούν και επηρεάζουν την αεροδυναμική του συμπεριφορά (Σχ. 2).



Σχ. 2: Φυσικό προσομοίωμα γηπέδου

Το στεγάστρο προσομοιώθηκε ως μικρού πάχους φορέας τύπου «sandwich» με οπές μέσω των οποίων διοχετεύεται ο αέρας και μετράται η πίεση εσωτερικά και εξωτερικά, με χρήση μικρών εύκαμπτων αγωγών. Το προσομοίωμα εδράστηκε πάνω σε έναν περιστρεφόμενο δίσκο που τοποθετήθηκε στην αεροδυναμική σήραγγα τύπου Eiffel του εργαστηρίου με διατομή 2m x 1m (Σχ. 3), όπου έγιναν οι δοκιμές με προσομοίωση ατμοσφαιρικής οριακής στρώσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ταχύτητα ανέμου και την ένταση στροβιλισμού.



Σχ. 2: Μηχανισμός λειτουργίας αεροδυναμικής σήραγγας

Για τα πειράματα, δημιουργήθηκε ροή ανέμου με εκθετικό συντελεστή $\alpha=0.21$, ο οποίος έχει μετατραπεί για να αντιστοιχεί στο προσομοίωμα με κλίμακα 1:250 και σε μήκος τραχύτητας $z_{0,M}=1.87\text{mm}$ (ισοδύναμο με $z_{0,N}=0.47\text{mm}$ στη φύση). Για την επιλογή του εκθετικού συντελεστή α , ελήφθησαν υπόψη οι γεωγραφικοί παράγοντες και η απόσταση από τη θάλασσα. Η ένταση του στροβιλισμού μετρήθηκε περίπου στο 32% και αντιστοιχεί σε ύψος αναφοράς 10m σε πραγματική κλίμακα.

Το φυσικό μήκος τύρβης κατά τη διεύθυνση ροής του ανέμου υπολογίστηκε ίσο με 140 m σε ύψος 38 m από την επιφάνεια του εδάφους, όσο το μέσο ύψος του στεγάστρου. Ο αριθμός Reynolds προέκυψε ίσος με $Re_M = 4.0 \cdot 10^5$ με βάση ταχύτητα αναφοράς στην αεροδυναμική σήραγγα ίση με 10 m/sec, σε ύψος 60 cm. Στην πραγματικότητα ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος, αλλά εφόσον το πεδίο ροής του ανέμου χαρακτηρίζεται συνήθως από φαινόμενα διαχωρισμού στις απότομες ακμές του προσομοιώματος και των κτιρίων της περιοχής, ο αριθμός Reynolds είναι ανεξάρτητος από τα φαινόμενα αυτά.

4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Λόγω της κλίμακας του προσομοιώματος οι παράμετροι του ανέμου είναι διαφορετικές από αυτές του πραγματικού στεγάστρου. Η μετατροπή γίνεται βάσει του αριθμού Strouhal που για πλήρως τυρβώδη ροή παραμένει σταθερός:

$$St = \frac{d \cdot f}{u} = \text{σταθ.} = \frac{d_N \cdot f_N}{u_N} = \frac{d_M \cdot f_M}{u_M} \quad (1)$$

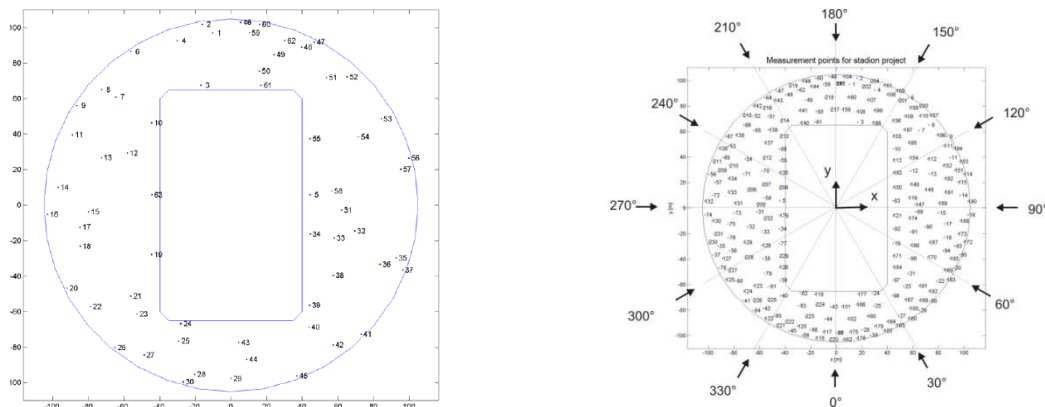
όπου f είναι η συχνότητα, d το χαρακτηριστικό μήκος (εδώ η διάμετρος) και N υποδηλώνει την πραγματική κλίμακα ενώ M το προσομοίωμα. Ο συντελεστής μετατροπής για τη συχνότητα υπολογίζεται ως

$$\lambda_f = \frac{f_M}{f_N} = \frac{u_M \cdot d_N}{u_N \cdot d_M} \quad (2)$$

Εισάγοντας στην Εξ. 2 την κλίμακα της προσομοίωσης MS (=1:250) και το συντελεστή ταχυτήτων, προκύπτει ο συντελεστής μετατροπής συχνοτήτων από την πραγματική κλίμακα στην κλίμακα του πειράματος

$$\lambda_f = \frac{f_M}{f_N} = \frac{u_M}{u_N \cdot MS} = \frac{\lambda_v}{MS} \quad (3)$$

Πειράματα έγιναν για κατευθύνσεις ανέμου ανά 30°, ενώ συγχρονισμένες καταγραφές των αποτελεσμάτων έγιναν σε 60 θέσεις μέτρησης και μη συγχρονισμένες σε 240 θέσεις, που φαίνονται στο Σχ. 3. Οι μετρούμενοι συντελεστές πίεσης από κάθε θέση μέτρησης υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να εξαχθούν ο μέγιστος, ελάχιστος και μέσος συντελεστής πίεσης, $c_{p,max}$, $c_{p,min}$ και $c_{p,mean}$, αντίστοιχα, και η τυπική απόκλιση, $c_{p,std}$.



Σχ. 3: Σημεία μέτρησης και γωνίες επιβολής ανέμου

Ο αδιάστατος συντελεστής πίεσης c_p είναι συνάρτηση του χρόνου και υπολογίζεται ως

$$c_p(t) = \frac{P_{eff}(t) - P_{st}}{0.5 \cdot \rho \cdot \bar{u}_R^2} \quad (4)$$

όπου p_{eff} η ενεργός πίεση, p_{st} η «στατική» πίεση, ρ η πυκνότητα του αέρα και \bar{u}_R η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς για αδιατάρακτη ροή ανέμου. Ο μέσος συντελεστής πίεσης υπολογίζεται ανάλογα, για περίοδο πολύ μεγαλύτερη από τις χαρακτηριστικές διακυμάνσεις στροβιλισμού

$$\bar{c}_p = c_{p,mean} = \frac{\overline{P_{eff}} - \overline{P_{st}}}{0.5 \cdot \rho \cdot \bar{u}_R^2} \quad (5)$$

Και οι δύο συντελεστές πίεσης των εξ. (4) και (5) μπορούν να μετρηθούν σε αεροδυναμική σήραγγα. Ο συντελεστής πίεσης που εξαρτάται από το χρόνο, είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού του μέσου συντελεστή, $c_{p,mean}$ και της διακύμανσης, $c_p'(t)$:

$$c_p(t) = \bar{c}_p + c_p'(t) \quad (6)$$

Για να ληφθεί υπόψη η διακύμανση της πίεσης με το χρόνο, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση του συντελεστή πίεσης \bar{c}_p' :

$$\bar{c}_p' = \sqrt{\sigma_{c_p}^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_1^T (\bar{c}_p - c_p(t))^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_1^T (c_p'(t))^2 \cdot dt} \quad (7)$$

Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του συντελεστή πίεσης εξάγονται βάσει της κατανομής Gumbel από ακραίες καταμετρημένες τιμές μέσω της μεθόδου των ροπών (Cook & Mayne [1980]):

$$\tilde{c}_p = \overline{c_p} \pm k \cdot \overline{c_p}' \quad (8)$$

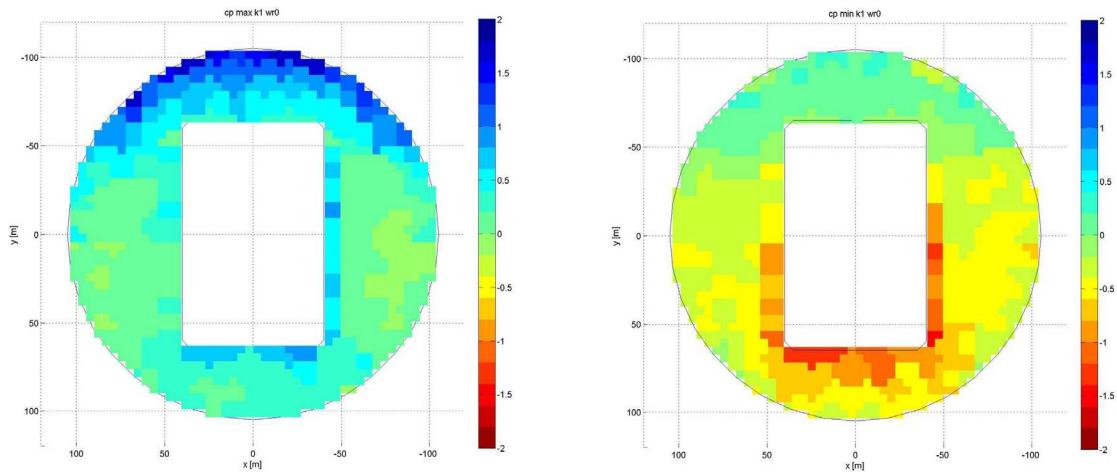
όπου k ο συντελεστής αιχμής που συνήθως λαμβάνεται ίσος με 3.5. Η δύναμη ανέμου σε ένα στοιχείο με προσβαλλόμενη επιφάνεια ΔA υπολογίζεται ως

$$\Delta F = (\overline{c_p} \pm k \cdot \overline{c_p}') \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \overline{u}^2 \cdot \Delta A \quad (9)$$

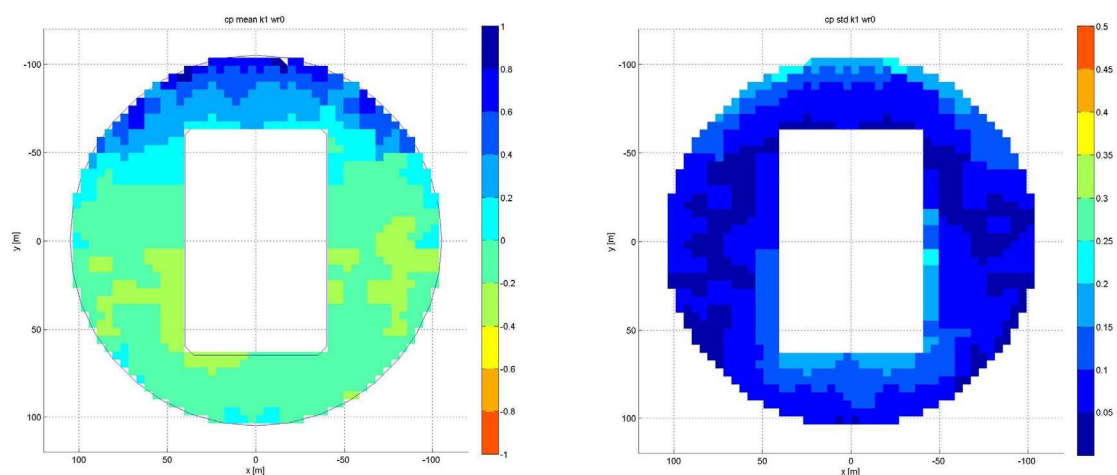
Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του συντελεστή πίεσης υπολογίζονται αντίστοιχα ως

$$c_{p,\max} = \overline{c_p} + k \cdot \overline{c_p}', \quad c_{p,\min} = \overline{c_p} - k \cdot \overline{c_p}' \quad (10)$$

Στα Σχ. 4 και 5, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης για τη μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, καθώς και για την τυπική απόκλιση. Τα αποτελέσματα αυτά είναι για επιβολή ανέμου υπό γωνία 0° (από το Νότο). Παρόμοια διαγράμματα συντάχθηκαν και για όλες τις άλλες γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου που μελετήθηκαν.



Σχ. 4: Μέγιστες τιμές (*max*) ελάχιστες τιμές (*min*) του συντελεστή πίεση c_p για γωνία 0°



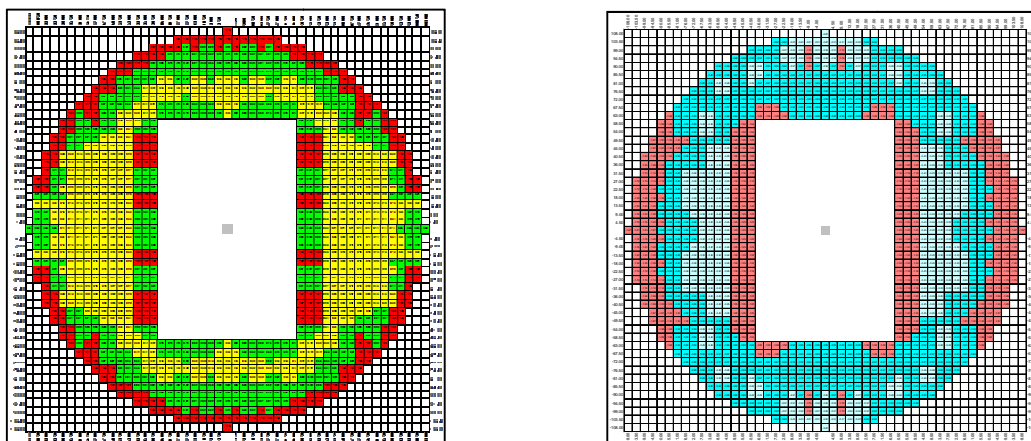
Σχ. 5: Μέση τιμή (*mean*) και τυπική απόκλιση (*standard deviation*) του συντελεστή πίεση c_p για γωνία 0°

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΝΕΜΟΥ

Μέσω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της αεροδυναμικής σήραγγας για το συντελεστή πίεσης σε περιβάλλον excel, εξήχθησαν από την ομάδα στατικής μελέτης του γηπέδου οι μέγιστες τιμές του $c_{p,max}$ και οι ελάχιστες τιμές του $c_{p,min}$ για κάθε γωνία επιβολής του ανέμου, σε κάθε θέση (Σχ. 6). Επισημαίνεται ότι στο διάγραμμα του $c_{p,max}$ το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί σε τιμές μικρότερες του 0.50, το πράσινο σε τιμές μεταξύ 0.50 και 1.00 και το κόκκινο σε τιμές μεγαλύτερες του 1.00, με μέγιστη τιμή 1.73. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα του $c_{p,min}$ το γκριζό χρώμα αντιστοιχεί σε τιμές μεταξύ 0 και -0.50, το γαλάζιο σε τιμές μεταξύ -0.50 και -1.00 και το ροζ σε τιμές μικρότερες του -1.00, με ελάχιστη τιμή -1.98. Βάσει των τιμών αυτών υπολογίστηκε η ανεμοπίεση επί του στεγάστρου ως

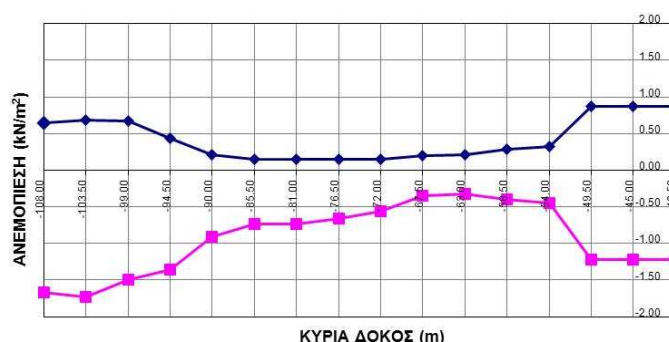
$$F_p = c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u_{ref}^2 \cdot \Delta A \quad (11)$$

όπου c_p ο συντελεστής πίεσης βάσει των διαγραμμάτων του Σχ. 6, u_{ref} η ταχύτητα αναφοράς στο υψόμετρο αναφοράς και ΔA το εμβαδόν της προσβαλλόμενης επιφάνειας κάθε δομικού στοιχείου.



Σχ. 6: Μέγιστες τιμές των μεγίστων και ελάχιστες των ελαχίστων για το συντελεστή πίεσης

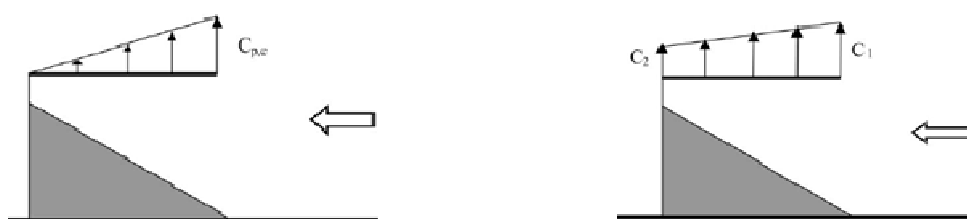
Η διαστασιολόγηση των τεγίδων έγινε για ανεμοπίεση προερχόμενη από τα τοπικά μέγιστα σε κάθε θέση τεγίδας, ενώ οι ανεμοπιέσεις κάθε κύριας δοκού του στεγάστρου προέκυψαν από την τομή των διαγραμμάτων του Σχ. 6 στην εκάστοτε θέση κύριας δοκού (Σχ. 7). Για τη διαστασιολόγηση έναντι ανέμου των κύριων δικτυωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι κατανομές του Σχ. 6 και κατάλληλοι συνδυασμοί τους, για να ληφθούν υπόψη πιθανές έκκεντρες φορτίσεις.



Σχ. 7: Κατανομές μέγιστων και ελαχίστων ανεμοπιέσεων για μία κύρια δοκό

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΙΣΧΥΟΝΤΕΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

Ο Ευρωκώδικας 1 [4] δεν περιλαμβάνει ειδικές διατάξεις για υπολογισμό ανεμοπιέσεων σε στάδια. Σχετικές διατάξεις περιέχονται στον Αυστραλιανό κανονισμό φορτίσεων AS 1170.2 [5] που προβλέπει τριγωνική κατανομή πιέσεων στα στέγαστρα (Σχ. 8α), και στους Letchford και Killen [6], οι οποίοι μετά από αξιολόγηση του AS 1170.2 και με χρήση της μεθόδου ενοποίησης συνδιασπορών, προτείνουν τραπεζοειδούς μορφής κατανομή πιέσεων για στέγαστρα που λειτουργούν ως πρόβολοι, η (Σχ. 8β). Για συνθετότερη όμως γεωμετρία δεν υπάρχουν σχετικές βιβλιογραφικές πηγές. Και όπως παρατηρείται από το Σχ. 8, οι διαθέσιμες κατανομές αποτυγχάνουν να προβλέψουν τις αιχμές ανεμοπιέσεων που μετρήθηκαν στα εξωτερικά (κυρίως) και εσωτερικά όρια του στεγάστρου.



Σχ. 8: Εκτίμηση ανεμοπιέσεων κατά τον AS1170.2 (α) και τους Letchford και Killen (β)

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκτίμηση των ανεμοπιέσεων σε σύνθετες κατασκευές, όπως το νέο γήπεδο ποδοσφαίρου του Παναθηναϊκού που παρουσιάζεται στο παρόν άρθρο, αποτελεί πρόβλημα υψηλού βαθμού δυσκολίας. Ιδιαίτερα πολύπλοκα ροϊκά φαινόμενα αναπτύσσονται στην περιοχή του κτιρίου. Από την αλληλεπίδραση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος με το κτίριο αναπτύσσονται κύριες και δευτερεύουσες δίνες και ζώνες αποκόλλησης στις μετωπικές επιφάνειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις η εκτέλεση δοκιμών φυσικού προσομοιώματος της υπό μελέτη κατασκευής σε αεροδυναμική σήραγγα, λαμβάνοντας υπόψη τις γεωγραφικές και τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής και την επιρροή των γύρω κτιρίων, κρίνεται ως η πλέον αξιόπιστη μέθοδος. Πέραν της εκτίμησης ανεμοπιέσεων για τη στατική μελέτη του στεγάστρου, οι δοκιμές αυτές μπορούν να χρησιμεύσουν και για τη βελτίωση του επιπέδου άνεσης αθλητών και θεατών υπό τις εμφανιζόμενες ροές ανέμου.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ruck, B., “Determination of wind loads on the roof of the new Panathinaikos football stadium in Athens/Greece (Wind tunnel study)”, February 2009.
- [2] Μηχανικοί Μελετών και Εφαρμογών, “Στατική μελέτη νέου γηπέδου Παναθηναϊκού στο Βοτανικό”, Τεχνική Έκθεση, 2010.
- [3] Cook, N.J. and Mayne, J.R., “A refined working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1980, pp. 125–137.
- [4] Ευρωκώδικας 1, “Δράσεις στις κατασκευές”, Μέρος 1-4, “Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου”, 2004.
- [5] Standards Australia, AS 1170.2, “SAA loading part 2: Wind Loads”, 1989.
- [6] Letchford C.W., Killen G.P., “Equivalent static wind loads for cantilevered grandstand roofs”, *Engineering Structures* 24, 2004, pp. 207-217.

**WIND TUNNEL TESTS FOR THE EVALUATION OF WIND PRESSURES ON
THE STEEL ROOF OF THE NEW FOOTBALL STADIUM OF PANATHINAIKOS
F.C. IN VOTANIKOS, GREECE**

Bodo Ruck

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.
Laboratory of Building- and
Environmental Aerodynamics
Universität Karlsruhe
Karlsruhe, Γερμανία
e-mail: ruck@uka.de

Charis J. Gantes

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

Christos P. Gkologiannis

Civil Engineer
Design & Application Engineers S.A.
Athens, Greece
e-mail: cpgol@mhxme.gr

Konstantina Koulatsou

Civil Engineer N.T.U.A., M.S.C. N.T.U.A.
Athens, Greece
e-mail: konkoulatsou@gmail.com

SUMMARY

In the present article the calculation and application of wind loads on the steel roof of the new football stadium of Panathinaikos F.C. in Votanikos, Greece are presented. The grandstand structures of the stadium will be made of reinforced concrete and the roof of structural steel. As expected for a structure of this type, wind loads play a pivotal role in the structural design of the roof. To obtain realistic wind pressure distributions, a model of the stadium was constructed in scale 1:250 and was tested in an atmospheric boundary layer wind tunnel. Differential pressure coefficients (between top and bottom) were measured at selected points for various wind directions, spaced at 30°. The measured coefficients are functions of time, which were then converted to max, min and mean values as well as standard deviations via an appropriate methodology. The results were then critically evaluated to obtain appropriate wind loads to be imposed on the structural elements of the roof for structural analysis and design. Finally, the obtained pressure coefficients are compared with corresponding recommendations given in pertinent codes.