

## **Απόκριση ψηλών και εύκαμπτων κτιρίων σε δυναμικές φορτίσεις ανέμου ως αποτέλεσμα συζευγμένης ανάλυσης ροής-κατασκευής (Fluid Structure Interaction – FSI).**

### **Θεοδώρα Πάππου**

*Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, SOFiSTiK Hellas A.E., dora@sofistik.gr*

### **Σωκράτης Βραχλιώτης**

*Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, SOFiSTiK Hellas A.E., svrah@mail.ntua.gr*

### **Δημήτρης Κουμπογιάννης**

*Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Αθηνών, dkoubog@teiath.gr*

### **Βύρων Προτοψάλτης**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, SOFiSTiK Hellas A.E., byron@sofistik.gr*

### **Ανδρέας Γκισάκης**

*Πολιτικός Μηχανικός, SOFiSTiK Hellas A.E., agisakis@sofistik.gr*

### **Σωτήρης Μπιτζαράκης**

*Πολιτικός Μηχανικός, SOFiSTiK Hellas A.E., sotiris@sofistik.gr*

### **Εκτενής περίληψη (μέχρι τρεις σελίδες)**

Ο σχεδιασμός σύγχρονων υψηλών και εύκαμπτων κτιρίων απαιτεί δομικά υλικά υψηλής αντοχής και μειωμένου βάρους. Τέτοια δομικά συστήματα έχουν μειωμένη απόσβεση έναντι των συμβατικών και είναι πιο ευάλωτα σε διεγέρσεις που προκαλούνται από τον άνεμο. Για τη διαστασιολόγηση αλλά και τη βέλτιστη μορφή τους απαιτείται ακριβής υπολογισμός της απόκρισής τους στα χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία ανέμου.

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD – Computational Fluid Dynamics) είναι ένας ταχέως εξελισσόμενος τομέας της μηχανικής που προσφέρει ελκυστικές ευκαιρίες στο σχεδιασμό των κτιρίων. Εκτός από τις προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης ανέμου-κατασκευής, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για τον ακριβή υπολογισμό των φορτίων ανέμου σε περιπτώσεις μη-συμβατικών διαμορφώσεων κτιρίου (που δεν καλύπτονται από τους ισχύοντες κανονισμούς), σενάρια δοκιμών για διάφορες τοπογραφικές διαμορφώσεις του αστικού περιβάλλοντος και χαρακτηριστικά του ανέμου, κ.α. υποκαθιστώντας (ή περιορίζοντας τη χρήση) τις δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα.

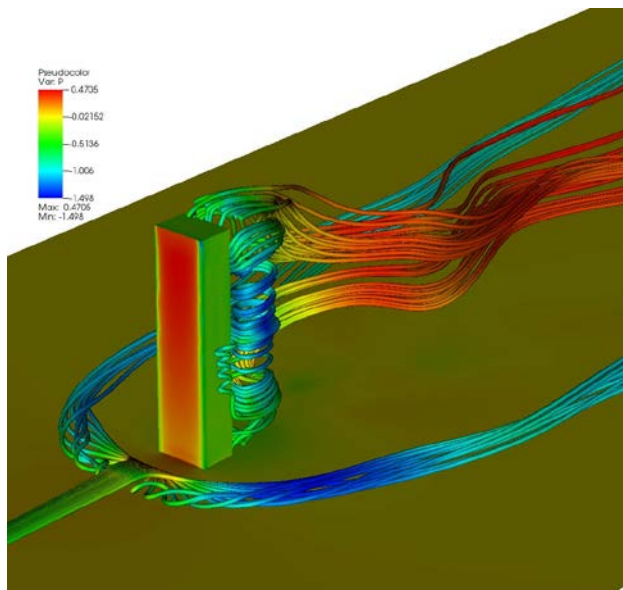
Η ροή γύρω από ένα κτίριο, το οποίο είναι ένα μη αεροδυναμικό σώμα, είναι εξαιρετικά περίπλοκη, δεδομένου ότι αποκαλύπτει πολλά φαινόμενα και είναι δύσκολο να προσομοιωθεί: αποκολλήσεις, επανασυνδέσεις, έκλυση δινών, μεγάλης κλίμακας τυρβώδεις ροές κλπ, που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά ανισότροπη κατανομή του ρυθμού μεταβολής των παραμορφώσεων (σχήμα 1).

Στην παρούσα εργασία, περιγράφονται ένα λογισμικό CFD και τα αποτελέσματά του το οποίον έχει αναπτυχθεί για την αριθμητική αξιολόγηση χρονικά μεταβλητών φορτίων ανέμου σε κτίρια και μπορεί

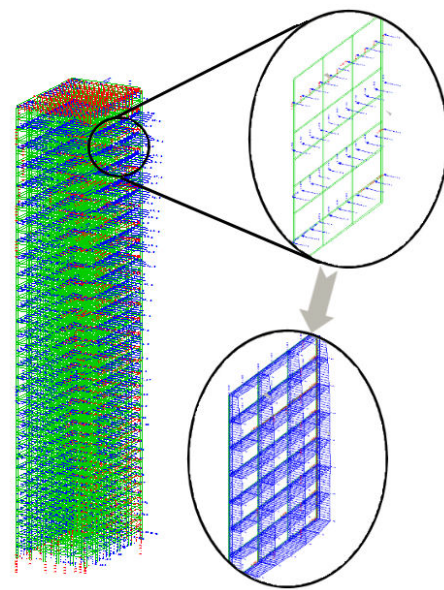
να χρησιμοποιηθεί πρακτικά ακόμα και από γραφεία μελετών με συνήθεις δυνατότητες hardware. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται ως βασικό συστατικό μίας διαδικασίας αλληλεπίδρασης (FSI-Fluid Structure Interaction) για αεροελαστικές αναλύσεις για την αξιολόγηση της απόκρισης υψηλών κτιρίων από διέγερση ανέμου κατά τη φάση του σχεδιασμού τους.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes τριδιάστατης, μη μόνιμης, ασυμπίεστης τυρβώδους ροής γύρω από κτίριο επιλύονται αριθμητικά με μια μέθοδο πεπερασμένων όγκων βασισμένης στην έννοια της “ψευδοσυμπίεστότητας” επί ενός υβριδικού, μη δομημένου αριθμητικού πλέγματος.

Για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται το ευρέως διαδεδομένο μοντέλο υψηλού κτιρίου CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) που αναφέρεται εκτενώς στη βιβλιογραφία σαν περίπτωση αναφοράς για τη μελέτη ανεμοπιέσεων και φαινομένων αεροελαστικότητας σε υψηλά κτίρια (σε αεροδυναμική σήραγγα ή με αριθμητικούς υπολογισμούς). Τα αποτελέσματα του λογισμικού της παρούσας εργασίας βρίσκονται σε ικανοποιητική σύμπτωση με αυτά της βιβλιογραφίας.



Σχ. 1 3D απεικόνιση στιγμιαίων γραμμών ροής γύρω από το κτίριο



Σχ. 2 Αλληλεπίδραση ροής-κατασκευής. Μεταφορά δυνάμεων του ρευστού ως φορτία στο προσομοίωμα του κτιρίου

Ο υπολογισμός της δυναμικής απόκρισης και η εν συνεχεία διαστασιολόγηση ενός κτιρίου απαιτούν τη σύζευξη των αναλύσεων ρευστού-κατασκευής σε μια ενοποιημένη υπολογιστική διαδικασία. Ο αλγόριθμος σύζευξης των λογισμικών ανάλυσης ροής και κατασκευής απαιτεί τη θέσπιση κατάλληλων κριτηρίων σύγκλισης για την αποτελεσματική ολοκλήρωση των δύο διαφορετικών λογισμικών σε ένα ενοποιημένο εργαλείο. Η σύζευξη αυτή βασίζεται στα παρακάτω βήματα :

- Μετατροπή των αεροδυναμικών πιέσεων και διατμητικών τάσεων σε φορτία για το μοντέλο του κτιρίου.
- Εφαρμογή μιας εξίσωσης ισορροπίας στη διεπιφάνεια ρευστού-στερεού για την εξίσωση του τανυστή των τάσεων που δρουν στο στερεό όριο με τον τανυστή των τάσεων του ρευστού από την

ανάλυση CFD και την εξίσωση της ταχύτητας κίνησης του στερεού ορίου με την ταχύτητα του ρευστού στους αντίστοιχους κόμβους

- Ικανοποίηση των συνθηκών συνέχειας μεταξύ της κίνησης του πλέγματος και της κίνησης των σωματιδίων του ρευστού.
- Συνεχή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των προσομοιωμάτων της κατασκευής και του ρευστού.
- Συγχρονισμό των δύο αναλύσεων λόγω της μεγάλης διαφοράς των απαιτούμενων χρονικών βημάτων κατά τον υπολογισμό.
- Διαμόρφωση μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την ασθενή σύζευξη των αναλύσεων CFD και CSD (Computational Structural Dynamics) και την εφαρμογή των κατάλληλων διεπαφών για την ανταλλαγή των συνοριακών συνθηκών.
- Διατύπωση κριτηρίων συγκλίσεως για τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας συζεύξεως.

Το κτίριο αναφοράς CAARC προσομοιώνεται είτε ως ένα στερεό σώμα (όπως στις περισσότερες αναφορές στη βιβλιογραφία) το οποίο υπόκειται σε αεροδυναμικά φορτία που επιβάλλονται άμεσα στη διεπιφάνεια ρευστού-στερεού ή ως ένα τρισδιάστατο ραβδωτό προσομοίωμα με μετασχηματισμό των επικόμβιων φορτίων του ρευστού σε φορτία μελών (σχήμα 2). Η αεροελαστική συμπεριφορά του κτιρίου CAARC διερευνάται μέσω της ανάλυσης της δυναμικής απόκρισης του για διάφορα επίπεδα της ταχύτητας ανέμου αναφοράς. Οι αποκρίσεις των δύο προσομοιωμάτων συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με την απόκριση απλοποιημένου δομητικού προσομοιώματος (ισοδύναμης κατακόρυφης δοκού προβόλου) και με αντίστοιχα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία με τα οποία βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία.

Η χρήση της προτεινόμενης υπολογιστικής διαδικασίας κατά τη φάση σχεδιασμού ενός ψηλού ή εύκαμπτου κτιρίου θα μπορούσε να μειώσει τον απαιτούμενο αριθμό (ακριβών) πειραματικών δοκιμών σε αεροδυναμική σήραγγα και να μειώσει το χάσμα μεταξύ αεροδυναμικής ανάλυσης και δομοστατικού σχεδιασμού. Η έρευνα συνεχίζεται με στόχο την εφαρμογή της υπολογιστικής διαδικασίας και σε λοιπές περιπτώσεις κατασκευών πολιτικού μηχανικού που μπορεί να εμφανίζουν τρωτότητα σε αεροδυναμικές φορτίσεις (π.χ. καλωδιωτές γέφυρες).

## Βιβλιογραφία

- Vrahliotis S., Pappou Th. and Tsangaris S. (2012), “Artificial compressibility 3-D Navier-Stokes solver for unsteady incompressible flows with hybrid grids”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 6, pp. 248-270.
- Vrahliotis S., Koubogiannis D.G., Pappou Th., Bitzarakis S. and Tsangaris S. (2013), “CFD prediction of wind loads on a tall building”, 10th HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Crete, Greece, 27–29 May 2013,
- Windisch R., Scherer R.J., Pappou Th., Gissakis A. and Protosaltis B. (2012) “Virtual Wind Laboratory for the Aerodynamic Analysis of Building Structures”, 3. Fachkonferenz Bauinformatik-Baupraxis, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 21 September 2012.
- Obasaju E.D. (1992), “Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer”, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 40, pp 103-126.
- Huang S., Li Q.S. and Xu S. (2007), “Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD”, *J. of Constructional Steel Research* 63, pp. 612-627.