



**Πανεπιστήμιο
Κύπρου**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ:
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΛΗΔΡΑΣ ΣΤΗ ΛΕΥΚΩΣΙΑ**

ΓΙΩΡΓΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ

**Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση μεταπτυχιακού
τίτλου σπουδών στο Πανεπιστήμιο Κύπρου**

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΓΙΩΡΓΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ

**ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ:
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΛΗΔΡΑΣ ΣΤΗ ΛΕΥΚΩΣΙΑ**

Γιώργος Αλεξάνδρου

Η Διατριβή αυτή
Υποβλήθηκε προς Μερική Εκπλήρωση των
Απαιτήσεων για την Απόκτηση
Μεταπτυχιακού Τίτλου Σπουδών
στη Μηχανική Περιβάλλοντος
στο
Πανεπιστήμιο Κύπρου
Συστήνεται προς Αποδοχή
από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Ιανουάριος, 2022

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΛΗΔΡΑΣ ΣΤΗ ΛΕΥΚΩΣΙΑ

Παρουσιάστηκε από

Γιώργο Αλεξάνδρου

Ερευνητικός Σύμβουλος

Όνομα Ερευνητικού Συμβούλου

Μέλος Επιτροπής

Όνομα Μέλους Επιτροπής

Μέλος Επιτροπής

Όνομα Μέλους Επιτροπής



Πανεπιστήμιο Κύπρου

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος



Πανεπιστήμιο Κύπρου

Πολυτεχνική Σχολή
Εργαστήριο - Νησίδα Αριστείας
Περιβαλλοντικής Ρευστομηχανικής



Environmental Fluid Mechanics Laboratory

AA Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέποντα Δρ. Μαρίνα Νεοφύτου, Καθηγήτρια και Πρόεδρος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, για την επιστημονική, πνευματική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής.

Επίσης ευχαριστώ τον Νέστορα Αντωνίου Διδακτορικό φοιτητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, του οποίου οι συμβουλές υπήρξαν πολύτιμες για την λογική ροή και τη βέλτιστη δομή της μεταπτυχιακής διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω για την βοήθεια τα μέλη και συνεργάτες του Εργαστηρίου – Νησίδας Αριστείας Περιβαλλοντικής Ρευστομηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Η ολοκλήρωση αυτής της ερευνητικής μελέτης δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη από την ερευνητική επιχορήγηση του Ιδρύματος Ερευνάς και Καινοτομίας (ΙΔΕΚ) μέσω του προγράμματος "Urban Microclimate, and the Design of Sustainable Built Environments" EXCELLENCE/1216/0294.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο της αστικής θερμνησίδας (UHI) είναι όλο και πιο έντονο τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα οι ψηλές θερμοκρασίες στις αστικές περιοχές να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, άνεση και παραγωγικότητα. Προκειμένου να βρεθούν λύσεις μετριασμού των υψηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο οι προσομοιώσεις Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) του αστικού μικροκλίματος. Αναμφισβήτητα, η παρουσία της βλάστησης εντός των αστικών περιοχών έχει θετικό αντίκτυπο στην θερμική άνεση που προκαλείται από την σκίαση και την διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Σε αυτή τη μελέτη πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις CFD του αστικού μικροκλίματος για το ιστορικό κέντρο της Λευκωσίας και πιο συγκεκριμένα για τον δρόμο της Λήδρας. Επίκεντρο αυτής της μελέτης είναι οι μεταβολές στην θερμοκρασία αέρα και στην ταχύτητα του ανέμου υπό την παρουσία της βλάστησης, εντός του οδικού φαραγγιού της Λήδρας. Οι προσομοιώσεις CFD πραγματοποιούνται με βάση τις εξισώσεις 3D Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) και η προσομοιωμένη περίοδος καλύπτει το διάστημα μιας ολόκληρης ημέρας που αφορά τις 15 Ιουλίου 2010. Η επίδραση της βλάστησης σε αυτή τη προσομοίωση πραγματοποιείται μέσω επιπρόσθετων όρων στις εξισώσεις επίλυσης. Παράλληλα, η διαδικασία ψύξης που εμφανίζεται από το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιείται μέσω του όρου της ογκομετρικής ισχύος ψύξης (P_c) ενώ η σκίαση μέσω του συντελεστή απορρόφησης της σκιασμένης περιοχής. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων υψηλής ανάλυσης μετρήσεων πεδίου. Αποδεικνύεται ότι η προσομοίωση της βλάστησης μπορεί να προκαλέσει μείωση της θερμοκρασίας μέχρι και 0.92°C στο ύψος του ανθρώπου. Τα μοντέλα CFD μπορούν να προβλέψουν θερμοκρασίες αέρα με μέση απόλυτη διαφορά μέχρι $0.38 - 0.75^{\circ}\text{C}$. Με βάση τα συγκριτικά αποτελέσματα, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του URANS για την επιλεγμένη εφαρμογή και συζητούνται πιθανοί λόγοι για αποκλίσεις μεταξύ μετρούμενων και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The Urban Heat Island (UHI) phenomenon has become more intense in recent years, resulting in high temperatures in urban areas with a negative impact on human health, comfort, and productivity. In order to find solutions for high-temperature mitigation, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations of the urban microclimate are used. Undoubtedly, the presence of vegetation within the urban areas has a positive impact on the thermal comfort caused by shading and the process of evapotranspiration. In this study, CFD simulations of the urban microclimate were performed for the historic center of Nicosia (Cyprus) and more specifically for the road of Ledras. This study focuses on the changes in air temperature and wind velocity magnitude caused by vegetation, inside the road canopy of Ledras. The CFD simulations are performed with 3D Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) equations and the simulated period include an entire day of July 15, 2010. The effect of vegetation on this simulation takes place through additional terms of source in the equations. The cooling effect that occurs from the phenomenon of evapotranspiration is carried out through the term of volumetric cooling power (P_c) while shading effect through the absorption coefficient of the shaded area. The validation of the results was performed using high-resolution field measurement data of the area. It is shown that the simulation of vegetation can cause a decrease in temperature of up to 0.92°C in mean pedestrian height (2m). CFD models can predict air temperatures with an average absolute difference of up to $0.38 - 0.75^{\circ}\text{C}$. Based on the comparative results, conclusions are drawn about the performance of the URANS for this application, Possible reasons for discrepancies between field measured and simulated results are discussed.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	viii
Κεφάλαιο 1.....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός	1
1.2 Στόχος.....	2
1.3 Δομή της Εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2.....	4
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	4
Κεφάλαιο 3.....	7
Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	7
3.1 Κλίμακα ατμοσφαιρικών φαινομένων.....	7
3.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ABL).....	8
3.3 Αστικό Οριακό Στρώμα (UBL).....	9
3.4 Φαινόμενο της Αστικής Θερμνησίδας (UHI).....	9
3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο UHI.....	10
3.6 Ενεργειακό Ισοζύγιο εντός Οδικών φαράγγιων	12
3.7 Ροές.....	13
3.7.1 Ροή αέρα σε ομοιόμορφη επίπεδη επιφάνεια	14
3.7.2 Ροές μέσα στα οδικά φαράγγια.....	16
Κεφάλαιο 4.....	17
Computational Fluid Dynamics (CFD).....	Error! Bookmark not defined.
4.1 Εισαγωγή	17
4.2 Χρήση του CFD σε γεωμετρίες πόλεων	17
4.3 Υπολογιστικός Τομέας	17
4.4 Προ-επεξεργασία.....	18
4.4.1 Τύποι κελιών	18
4.4.2 Τύποι Πλέγματος.....	19
4.5 Εξισώσεις κίνησης των ρευστών.....	20
4.6 Μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής.....	20
4.7 Reynolds Average Navier-Stokes equations (RANS)	21
4.8 Turbulence k-ε model	21
4.8.1 Standard k-ε model	22
4.8.2 Realizable k-ε model.....	22
4.9 Μοντελοποίηση κοντά σε τείχους.....	23

4.9.1	Περιοχές κοντά σε τοιχώματα	23
4.9.2	Wall Functions.....	23
4.10	Εξίσωση Ενέργειας.....	24
4.11	Εξίσωση Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	24
4.12	Boundary Conditions	24
4.13	Μοντελοποίηση Θερμοκρασίας	24
4.14	Διαδικασία Επίλυσης.....	25
4.14	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στον αερισμό των πόλεων.....	25
Κεφάλαιο 5.....		27
Επίδραση του Πράσινου		27
5.1	Ροές γύρω από τα δέντρα.....	27
5.2	Βλάστηση.....	27
5.3	Επιρροή της βλάστησης εντός αστικών περιοχών.....	28
5.4	Μοντελοποίηση Δέντρου	29
5.5	Ψύξη από την εξατμισοδιαπνοή των δέντρων.....	29
5.6	Σκίαση από τα δέντρα.....	30
5.7	Πορώδες Δέντρου.....	31
5.8	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την μοντελοποίηση της βλάστησης	31
Κεφάλαιο 6.....		33
Περιοχή Μελέτης.....		Error! Bookmark not defined.
6.1	Περιοχή Μελέτης	33
6.2	Επιφάνεια Εδάφους	34
6.3	Δομικά Υλικά.....	34
6.4	Καιρικές Συνθήκες	35
Κεφάλαιο 7.....		36
Case Study: Ledras CFD modeling setup.....		Error! Bookmark not defined.
7.1	Γεωμετρία	36
7.1.1	Υπολογιστικός Τομέας.....	36
7.1.2	Κτήρια.....	38
7.1.3	Βλάστηση.....	38
7.2	Computational Grid	39
7.2.1	Δημιουργία Εξαεδρικό πλέγμα.....	39
7.2.2	Δημιουργία Πολυεδρικό Πλέγμα	40
7.2.3	Πλέγμα.....	41
7.3	Οριακές Συνθήκες	45
7.3.1	Είσοδος Υπολογιστικού Τομέα (Inlet).....	45

7.3.2	Έδαφος.....	48
7.4	Μοντέλο Ρευστότητας.....	48
7.5	Μοντέλο Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	49
7.6	Θερμικές Ιδιότητες Υλικών.....	49
7.7	Βλάστηση.....	50
7.8	Μέθοδος Επίλυσης (Methods)	52
7.9	Monitors.....	52
7.10	Υπολογισμός (Calculation).....	53
	Κεφάλαιο 8.....	54
	Αποτελέσματα	Error! Bookmark not defined.
8.1	Αποτελέσματα της Ροής του ανέμου.....	54
8.2	Θερμοκρασιακές Μεταβολές.....	57
8.2.1	Θερμοκρασία στο μέσο ύψος του ανθρώπου	57
8.2.2	Θερμοκρασία Επιφανειών.....	59
8.3	Μετρήσεις Πεδίου.....	60
8.4	Συγκρίσεις CFD στην παρουσία και απουσία δέντρου	67
	Κεφάλαιο 9.....	70
	Επίλογος.....	70
	References	73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ποιο προσφάτων μελετών για την επιρροή του πράσινου. Εμφανίζεται η κλίμακα και το είδος της γεωμετρίας, το μοντέλο τυρβώδους ροής και k-ε που χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος που έγινε η επικύρωση, το πεδίο όπου εστιάζει η έρευνα (Ρύποι όπου μελετήθηκαν για την ποιότητα του αέρα: (1)=PM ₁₀ , (2)=CO, (3)=NO _x ,(4)=VOCs, (5)=PM _{2.5} , (6)=O ₃ ,(7)=Elemental Carbon (EC)). Επιπλέον αναγράφεται μια σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων όπου εξάχθηκαν.	6
Πίνακας 3.1: Μεταβολή στα κλιματικά στοιχεία μεταξύ μιας αστικοποιημένης περιοχής και μιας περιαστικής περιοχής.	11
Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση του αεροδυναμικού ύψους τραχύτητας z ₀ βάσει της φύσης της επιφάνειας σε 8 κατηγορίες.	15
Πίνακας 4.1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μεθοδολογία (κλίμακα, γεωμετρία, μοντέλο τύρβης, μοντέλο k-ε και μορφή της επικύρωσης) που χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες πρόσφατες μελέτες CFD για την μοντελοποίηση των ροών εντός των οδικών φαραγγιών.	26
Πίνακας 5.1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση της βλάστησης (Cd, β _p , β _a , Cε4, Cε5 LAD, Pc) από διάφορες πρόσφατες μελέτες στο μοντέλο CFD.	32
Πίνακας 7.1: Πίνακας με τον διαχωρισμό των κτηρίων σε τρεις κατηγορίες βάσει το ύψος τους.	38
Πίνακας 7.2: Πίνακας με τις μέσες ωριαίες τιμές που καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες εισόδου για την προσομοίωση.	46
Πίνακας 7.3: Δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου ρευστότητας στο Ansys Fluent 49	49
Πίνακας 7.4: Δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου ηλιακής ακτινοβολίας στο Ansys Fluent.	49
Πίνακας 7.5: Θερμικές Ιδιότητες υλικών που αποτελούν την περιοχή.	50
Πίνακας 7.6: Πάχος και θερμοκρασία κάθε επιφάνειας για το μοντέλο Shell Conduction ...	50
Πίνακας 7.7: Παράμετροι για τους υπολογισμούς των όρων πηγής και καταβόθρας του δέντρου.	51
Πίνακας 7.8: Υπολογισμός της ογκομετρικής ισχύς ψύξης ανά ώρα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία.	52
Πίνακας 8.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 1.	62
Πίνακας 8.2 Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 2.	64
Πίνακας 8.3: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 1.8m και 4m από τον Τοίχο 1.	66
Πίνακας 8.4: Πίνακας με τις διαφορές στα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα της προσομοίωσης CFD συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του δέντρου και της προσομοίωσης CFD χωρίς την συμπερίληψη του δέντρου για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 1 και του Τοίχου 2.	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Χωρική και χρονική κλίμακα των ατμοσφαιρικών φαινομένων https://www.atmos.washington.edu/academics/classes/2010Q3/101/materials/ATMS101_WE EK8.pdf	7
Εικόνα 3.2: Τυπική εξέλιξη του ΑΟΣ εντός ενός ημερήσιου κύκλου (https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/712).....	8
Εικόνα 3.3: Κατακόρυφη υποδιαίρεση των ζωνών εντός του αστικού οριακού στρώματος (https://bmeafl.com/the-project-proposal/).....	9
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τον κυκλοφοριακό σταθμό Λευκωσίας και τον σταθμό υποβάθρου Αγίας Μαρίνας Ξυλιάτου για τις 8 Ιουνίου 2020.....	10
Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του λ_p και λ_f . Οι πράσινες επιφάνειες αναπαριστούν την προσήνεμη επιφάνεια των κτηρίων, οι κόκκινες την άτοψη των κτηρίων και η μαύρη επιφάνεια την επιφάνεια της πόλης. Το πορτοκαλί βέλος παρουσιάζει την διεύθυνση του ανέμου.....	12
Εικόνα 3.6: Αναπαράσταση των ορίων του όγκου αέρα του φαραγγιού. Επιπλέον παρουσιάζει τον λόγο ύψους πλάτους που χαρακτηρίζει τα οδικά φαράγγια.....	12
Εικόνα 3.7: Ενεργειακό Ισοζύγιο του Όγκου αέρα ενός φαραγγιού.....	13
Εικόνα 3.8: Απεικόνιση (α) της τυρβώδους και (β) της στρωτής ροής ενός ρευστού ανάμεσα σε δυο τοιχώματα. Με το μαύρο συνεχόμενο βέλος αναπαρίστανται οι ρευματογραμμές.....	14
Εικόνα 3.9: Κατακόρυφο προφίλ ανέμου για διάφορες τιμές του z_0 (ανοικτή θάλασσα ($z_0=0.002$), ανοικτή πεδιάδα ($z_0=0.02$), περαστική περιοχή ($z_0=0.2$), κέντρο πόλης ($z_0=2$)).	15
Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση των ρευματογραμμών ανάμεσα σε δυο κτήρια. Σχηματισμός 3 ζωνών (προσίνεμη πλευρά κτηρίου (κόκκινο χρώμα), κοιλότητα μεταξύ κτηρίων (πράσινο χρώμα) και αμψήνεμη πλευρά (μπλε χρώμα)).	16
Εικόνα 4.1: Διαχωρισμός του υπολογιστικού τομέα σε τρεις περιοχές (περιοχή πριν τα εμπόδια, περιοχή που εμπεριέχει τα εμπόδια και περιοχή μετά τα εμπόδια).	18
Εικόνα 4.2: Σχήματα από διάφορους τύπους κελίων (2D και 3D) τα οποία χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν το πλέγμα.	19
Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση ενός (α) δομημένου πλέγματος από εξάεδρα (HEX) και (β) ενός μη δομημένου πλέγματος από τετράεδρα (TET).	19
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση του μεγέθους των αναταραχών για περιοχές κοντά και μακριά από τα τοιχώματα.....	23
Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της ροής στην παρουσία βλάστησης. Με μαύρο συνεχόμενο βέλος παρουσιάζονται οι ρευματογραμμές που αναταράσσονται στην παρουσία του δέντρου ενώ με μπλε βέλος παρουσιάζονται οι ρευματογραμμές που διαπερνούν την “κορόνα” του δέντρου.....	27
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της επιρροής του πράσινου μέσω της σκίασης, της εξατμισοδιαπνοής και την ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	28
Εικόνα 5.3: Σχηματική απεικόνιση του πορώδους ενός δέντρου. Αριθμητική τιμή ένα αντιστοιχεί σε δέντρο χωρίς φύλλωμα, ενώ αριθμητική τιμή μηδέν αντιστοιχεί σε δέντρο με πλήρες φύλλωμα.....	31
Εικόνα 6.1: Εικόνες από την περιοχή μελέτης (Google Maps). (α) Κύπρος, (β) Λευκωσία, (γ) Ιστορικό κέντρο Λευκωσίας και (δ) Περιοχή μελέτης (Λήδρας).	33
Εικόνα 6.2: Διαχωρισμός της επιφάνειας του εδάφους σε 7 τμήματα βάσει των μορφολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους για την περιοχή μελέτης. (α) πραγματική εικόνα περιοχής (β) εικονογραφημένη περιοχή [5].	34

Εικόνα 6.3: Φωτογραφίες από την περιοχή μελέτης που παρουσιάζουν τα υλικά από τα οποία είναι δομημένη η περιοχή.....	34
Εικόνα 6.4: Μέσες ωριαίες τιμές της (α) θερμοκρασίας περιβάλλοντος (AT), (β) σχετικής υγρασίας (RH), (γ) έντασης και (δ) διεύθυνσης του ανέμου (WS,WD) που συλλέχθηκαν από το σταθμό Αθαλάσσας από την 01/07/2010 μέχρι τις 20/07/2010	35
Εικόνα 6.5: Ροδόγραμμα από το σταθμό Αθαλάσσας από τις 01/07/2010 μέχρι τις 20/07/2010	35
Εικόνα 7.1: Στην εικόνα (α) κάτοψη και (β) πλάγια όψη, παρουσιάζονται τα όρια της περιοχής μελέτης από πραγματικές εικόνες της περιοχής. Με κόκκινο παρουσιάζονται τα όρια, με κίτρινο απεικονίζεται ο δρόμος της Λήδρας και με πράσινο το σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο.....	37
Εικόνα 7.2: Στην εικόνα παρουσιάζεται ο υπολογιστικός τομέας Στο εσωτερικό του βρίσκεται η τριών διαστάσεων απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Ο υπολογιστικός τομέας έχει διαστάσεις 461x515x78m.	37
Εικόνα 7.3: Στην εικόνα παρουσιάζεται η 3D απεικόνιση της γεωμετρίας διαχωρισμένη σε κατηγορίες κτηρίων βάσει το ύψος. Με πράσινο παρουσιάζονται τα κτήρια με ύψος 5-8m, με κίτρινο τα κτήρια με 9-12m, ενώ με κόκκινο τα κτήρια που έχουν ύψος 12-15m.	38
Εικόνα 7.4: Απεικόνιση του δέντρου (“κορόνα”) εντός του υπολογιστικού τομέα. Το δέντρο έχει διαστάσεις 6x6x4m και βρίσκεται σε απόσταση 4m από την επιφάνεια του εδάφους	39
Εικόνα 7.5: Διαδικασία δημιουργίας εξαεδρικού πλέγματος με την χρήση του λογισμικού SPACECLAIM, (α) προβολή επιφανειών, (β) δημιουργία μπλοκ, (γ) αφαίρεση των μπλοκ στο εσωτερικό των κτηρίων, (δ) προσαρμογή στο μέγεθος των κελίων.	40
Εικόνα 7.6: Διαδικασία δημιουργίας πολυεδρικού πλέγματος με την χρήση του λογισμικού ANSYS FLUENT MESHING, (α) καθορισμός του τοπικού μεγέθους των κελίων, (β) δημιουργία επιφανειακού τετραεδρικού πλέγματος, (γ) μετατροπή του τετραεδρικού πλέγματος σε πολυεδρικό πλέγμα.....	41
Εικόνα 7.7: Εξαεδρικό πλέγμα αποτελούμενο από 12 εκατομμύρια εξαεδρικά κελιά μέσω του ANSYS SpaceClaim	42
Εικόνα 7.8: Πολυεδρικό πλέγμα αποτελούμενο από 5.2 εκατομμύρια πολυεδρικά κελιά μέσω του ANSYS Fluent Meshing	43
Εικόνα 7.9: Στην εικόνα παρουσιάζεται το πλέγμα του υπολογιστικού τομέα. Κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος τα κελιά έχουν μικρότερο μέγεθος ενώ μακριά από αυτή το μέγεθος των κελίων αυξάνεται σταδιακά.	44
Εικόνα 7.10: Στο αριστερό μέρος των εικόνων παρουσιάζονται οι πραγματικές εικόνες της περιοχής μελέτης, ενώ στο δεξί μέρος των εικόνων παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες με το πλέγμα της γεωμετρίας.	45
Εικόνα 7.11: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.....	46
Εικόνα 7.12: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.	47
Εικόνα 7.13: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της διεύθυνσης του ανέμου περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.	47
Εικόνα 7.14: Ροδόγραμμα ανέμου από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.....	48
Εικόνα 8.1: Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 03:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου (z=2m), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου	55
Εικόνα 8.2: Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 11:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου (z=2m), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του	

επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου.	55
Εικόνα 8.3: Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 15:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου.	56
Εικόνα 8.4: Διάγραμμα με τα αποτελέσματα για την ένταση του ανέμου σε απόσταση 1m από τον Τοίχο 1 (πορτοκαλί γραμμή) και σε απόσταση 1m από τον Τοίχο 2 (μπλε γραμμή).	56
Εικόνα 8.5: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 03:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.	58
Εικόνα 8.6: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 11:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.	58
Εικόνα 8.7: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 13:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.	58
Εικόνα 8.8 Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 16:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.	59
Εικόνα 8.9: Αποτελέσματα CFD για την επιφανειακή θερμοκρασία στις 03:00 για τις (α) 07:00, (β) 10:00, (γ) 13:00 και (δ) 16:00. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας.	60
Εικόνα 8.10: (α) Εικόνα από τις μετρήσεις πεδίου στην περιοχή (εκστρατεία TOPEUM) (β) Σχηματική αναπαράσταση των σημείων που τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία εντός του οδικού παραγγιού.	61
Εικόνα 8.11: Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για τον Τοίχο 1 για τα ύψη (α) $z=2m$, (β) $z=3m$, (γ) $z=4m$	63
Εικόνα 8.12 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για τον Τοίχο 2 για τα ύψη (α) $z=2m$, (β) $z=3m$, (γ) $z=4m$	65
Εικόνα 8.13 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για ύψος $z=4m$ και απόσταση (α) $z=1.8m$ και (β) $z=4m$, (γ) από τον Τοίχο 1.	67
Εικόνα 8.14: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 13:00 (α) για την περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της βλάστησης και (β) για την περίπτωση που δεν συμπεριλαμβάνεται η βλάστηση.	68

Ελληνικά Ακρωνύμια

ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
ΔΤ	Διαφορά θερμοκρασίας

Αγγλικά Ακρωνύμια

ABL	Atmospheric Boundary Layer
AT	Ambient Temperature - Θερμοκρασία Περιβάλλοντος
bVOCs	Biogenic Volatile Organic Compounds - Βιογενείς πτητικές ενώσεις
CFD	Computational Fluid Dynamics - Υπολογιστική Ρευστοδυναμική
CV	Control Volume - Όγκος Ελέγχου
DNS	Direct Numerical Simulation
HEX	Hexahedral - Εξάεδρα
LAD	Leaf Area Density
LES	Large Eddy Simulation
POLY	Polyhedral - Πολύεδρα
QUAD	Quadrilateral – Τετράπλευρα
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes equations
RH	Relative Humidity – Σχετική Υγρασία
RSL	Roughness Sublayer – Υπόστρωμα Τραχύτητας
SF	Shadow Factor - Συντελεστής Σκίασης
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent
TET	Tetrahedral - Τετράεδρα
TRI	Triangle - Τρίγωνα
UBL	Urban Boundary Layer – Αστικό Οριακό Στρώμα
UCL	Urban Canopy Layer -Αστικό Στρώμα Φαραγγιού
UDF	User Defined Function
UHI	Urban Heat Island – Αστική Θερμνησίδα

USL	Urban Surface Layer
WD	Wind Direction - Διεύθυνση Ανέμου
WS	Wind Speed - Ταχύτητα Ανέμου
WED	Wedge

Ελληνικά Σύμβολα

α	Ηλιακή απορροφητικότητα
β_p, β_d	Σταθερές που παραμετροποιούν την βλάστηση
Γ	Παράμετρος Γ
δ_{ij}	Δέλτα του Kronecker
Θ	Μέση θερμοκρασία αέρα
ε	Turbulent Dissipation Energy - Ποσοστό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας
κ	Σταθερά Von Karman
λ	Λανθάνουσα θερμότητα
λ_F	Frontal Area Density - Πυκνότητα κατά την μετωπική επιφάνεια
λ_p	Planar Area Density - Πυκνότητα κατά την κάτοψη
μ	Δυναμικό μοριακό ιξώδες
μ_t	Τυρβώδες ιξώδες
ρ	Πυκνότητα
σ	Σταθερά Stefan–Boltzmann
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Αριθμός Prandtl για το k και το ε
τ_w	Διατμητική τάση του τοίχου
φ	Πορώδες

Αγγλικά Σύμβολα

A_0, A_s	Σταθερές του μοντέλου realizable k-ε
A_F	Προσήνεμη επιφάνεια των κτηρίων
A_P	Επιφάνεια κάτοψης των κτηρίων
A_T	Επιφάνεια της πόλης
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	Σταθερές του μοντέλου k-ε
$C_{\varepsilon 4}, C_{\varepsilon 5}$	Σταθερές που παραμετροποιούν την βλάστηση
C_μ	Παράμετρος στο μοντέλο k-ε
C_d	Drag coefficient – Συντελεστής οπισθοτροχιάς της βλάστησης

C_p	Ειδική Θερμότητα
C_s	Σταθερά Τραχύτητας
e_t	Άθροισμα Εσωτερικής Κινητικής και Δυναμικής Ενέργειας
$ET_{eq,h}$	Ισοδύναμη ωριαία εξατμισοδιαπνοή
ETP	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή
G	Προσπίπτουσα ακτινοβολία στο μοντέλο ακτινοβολίας
G_k	Παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας
H	Ύψος Οδικού Φαραγγιού
h_f	Συντελεστής τοπικής μεταφοράς θερμότητας
k	Turbulent Kinetic Energy – Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια
k	Θερμική αγωγιμότητα
k_s	Ύψος τραχύτητας
L	Χαρακτηριστικό Μήκος
m	Μάζα
N	Δείκτης διάθλασης
p	Πίεση
P_c	Όρος της ογκομετρικής ισχύος ψύξης
Q	Ροή θερμότητας
q	Ροή θερμότητας στα κελιά
q_{grad}	Ροή θερμότητας με ακτινοβολία
Re	Αριθμός Reynolds
R_h	Ηλιακή ακτινοβολία
S_g	Επιπρόσθετες πηγές στις εξισώσεις
S_{ij}	Mean Strain Rate – Μέσος ρυθμός καταπόνησης
S_T	Μέτρο του τανυστή του S _{ij}
S_u, S_k, S_ε	Όροι που περιγράφουν την επιρροή των δέντρων για την ορμή, k και ε
t	Χρόνος
T	Θερμοκρασία
T_f	Τοπική θερμοκρασία του ρευστού

T_w	Θερμοκρασία της επιφάνειας
U	Ταχύτητα
U^*	Ταχύτητα τριβής στα wall functions
U_{ABL}	Ταχύτητα ανέμου στο ABL
u^+	Αδιάστατη ταχύτητα ρευστού για τα wall functions
u_τ	Ταχύτητάς τριβής για τα wall functions
u, v, w	Συνιστώσες της ταχύτητας
V	Όγκος
W	Πλάτος Οδικού Φαραγγιού
x, y, z	Συνιστώσες της θέσης
y^+	Αδιάστατη συντεταγμένη για τα wall functions
z_0	Αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας
e, w, f, t	ανατολικός τοίχος, δυτικός τοίχος, έδαφος, κορυφή

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Έρευνες των τελευταίων ετών δείχνουν ότι το παρόν κλίμα αλλάζει. Η παγκόσμια αύξηση στη μέση τιμή της θερμοκρασίας αναμένεται να ξεπεράσει τους 1.5°C με το σενάριο της IPCC AR4 να δίνει αύξηση κατά 2-4.5°C [1]. Η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει άμεσους και έμμεσους κινδύνους στον άνθρωπο όπως πρωτογενείς επιπτώσεις στην υγεία από θερμικά κύματα, ακραία καιρικά φαινόμενα και αλλοιωμένη ποιότητα αέρα (ιδιαίτερα από τις αυξημένες συγκεντρώσεις του όζοντος στο επίπεδο του εδάφους) [2]. Αντίκτυπο της αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος είναι η ανθρώπινη υγεία. Αποτελέσματα έρευνας δείχνουν ότι οι ψηλές θερμοκρασίες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις εισαγωγές νοσοκομείων, ειδικά στον μεγάλο ηλικιακά πληθυσμό σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες [3]. Αντίστοιχη έρευνα στην Κύπρο δείχνει ότι ψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος διαδραματίζουν σημαντική επιρροή στα ποσοστά θνησιμότητας [4].

1.1 Σκοπός

Η αστική κλιματολογία είναι ένα πολυσυζητημένο πεδίο έρευνας, το οποίο επηρεάζεται από τη συνεχιζόμενη παγκόσμια αστικοποίηση, την αύξηση του πληθυσμού και την κλιματική αλλαγή. Είναι αναγκαίο να βρεθούν λύσεις για να μειωθεί το αρνητικό αντίκτυπο των πόλεων στο περιβάλλον εξασφαλίζοντας παράλληλα έναν υγιή και κατοικήσιμο χώρο για τους ανθρώπους. Στα αρχικά στάδια της έρευνας του αστικού κλίματος οι μελέτες περιλάμβαναν την εμπειριστικώς ανάλυση των παρατηρήσεων πεδίου. Οι αριθμητικές μελέτες κέρδισαν ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή, ειδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics (CFD)), όπως για παράδειγμα ένα μοντέλο πρόγνωσης καιρού, σε σύγκριση με τις προσεγγιστικές παρατηρήσεις. Διαφορετικά σενάρια και στρατηγικές μπορούν εύκολα να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν, και οι μεταβλητές ενδιαφέροντος είναι διαθέσιμες για κάθε τοποθεσία στον υπολογιστικό τομέα και όχι μόνο για μερικά σημεία μέτρησης. Εκτός από την άνεση των πεζών για τον άνεμο, τη διασπορά ρύπων ή τη βροχή που προκαλείται από τον άνεμο, το CFD έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη διερεύνηση των θερμικών συνθηκών σε πραγματικές αστικές περιοχές.

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να διερευνήσει τη δυνατότητα εφαρμογής ενός μοντέλου CFD για την ανάλυση του αστικού μικροκλίματος σε ένα πολύπλοκο, αστικό περιβάλλον για μια καλοκαιρινή ημέρα. Το φάσμα των εφαρμογών για τα μοντέλα CFD όπως αυτό της παρούσας μελέτης είναι μεγάλο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την αξιολόγηση του θερμικού περιβάλλοντος, αλλά και για τη μελέτη της εξωτερικής θερμικής άνεσης ή την επίδραση του αστικού μικροκλίματος στην ενεργειακή ζήτηση των κτιρίων, αλλά και για την αξιολόγηση τοπικών συνθηκών ανέμου για παραγωγή αστικής αιολικής ενέργειας, διασπορά ρύπων ή ακόμα και για τον καθορισμό των συντελεστών πίεσης για αερισμό των κτηρίων.

Η βλάστηση εντός των αστικών περιοχών είναι ένα από τα ποιο διαδεδομένα μέτρα για την βελτίωση του αστικού μικροκλίματος. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα βλάστησης στις αστικές περιοχές είναι οι πράσινες στέγες, οι πράσινοι τοίχοι, τα δέντρα του δρόμου και τα αστικά πάρκα. Μεταξύ αυτών των μέτρων, οι πράσινες στέγες και οι πράσινοι τοίχοι έχουν τη μικρότερη επίδραση στο μικροκλίμα λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δέντρα του δρόμου έχουν μεγαλύτερη έκταση επιρροής, ανάλογα με τον τύπο, και την πυκνότητα του δέντρου. Παρόλα αυτά, οι μελέτες που επικεντρώνονται στην επίδραση της βλάστησης εντός του αστικού μικροκλίματος είναι περιορισμένες. Σε αυτή την εργασία, περιγράφεται η συμπερίληψη της εξίσωσης για την εξατμισο-διαπνοή που προκαλούν τα δέντρα στο αστικό μικροκλίμα. Οι προσομοιώσεις CFD πραγματοποιούνται για το ιστορικό κέντρο της Λευκωσίας, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με δεδομένα μετρήσεων πεδίου. Παρόμοιες μελέτες έχουν γίνει στο παρελθόν για την ίδια περιοχή μελέτης αγνοώντας την επίδραση της βλάστησης στο μικροκλίμα [5]. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μπορούν να προστεθούν στα ήδη υπάρχοντα για την περιοχή, καλύπτοντας το κενό που υπάρχει στην θετική επίδραση που προκαλούν τα δέντρα στην θερμική άνεση στο επίπεδο του πεζού.

1.2 Στόχος

Αυτή η έρευνα χρησιμοποιεί εργαλεία προσομοίωσης της ρευστοδυναμικής για να μοντελοποιήσει πραγματικές συνθήκες που επικρατούν εντός αστικών περιοχών. Συνδυάζει πραγματικά δεδομένα όπως πραγματικές γεωμετρίες πόλεων, καιρικών συνθηκών και υλικών με αποτέλεσμα να εξάγει αποτελέσματα που να αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Η έρευνα επικεντρώνεται στην παλιά πόλη της Λευκωσίας και πιο συγκεκριμένα στο δρόμο της Λήδρας, που αποτελεί έναν πολυσύχναστο και ιστορικό δρόμο.

Με την χρήση τέτοιων εργαλείων, μπορεί να εξαχθούν σημαντικά αποτελέσματα για τις επικρατούσες συνθήκες ροής ανέμου και θερμοκρασίας εντός των οδικών φαραγγιών. Η λήψη κατάλληλων αποφάσεων βασισμένες σε προσομοιώσεις μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση των υψηλών θερμοκρασιών αέρα, ιδίως κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στο αστικό περιβάλλον. Επιπλέον η κατανόηση των ροών ανέμου εντός των οδικών φαραγγιών μπορεί να οδηγήσει σε αποφάσεις που θα επωφελήσουν την αναπνευστικότητα και την ποιότητα αέρα εντός αυτών.

Ο τελικός στόχος αυτής της εργασίας είναι να προσομοιώσει και να αναλύσει την επιρροή της βλάστησης εντός του οδικού φαραγγιού της Λήδρας με την χρήση CFD. Να μελετήσει την επιρροή του πράσινου στις ροές ανέμου καθώς επίσης και τις ενδεχόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές που μπορούν να προκληθούν κατά την ύπαρξη πρασίνου λόγω σκίασης και εξατμησοδιαπνοής. Επιπλέον, να συγκρίνει τα αποτελέσματα με παρόμοιου τύπου μελέτες καθώς επίσης και με πραγματικές τιμές από μετρήσεις πεδίου που έγιναν στην περιοχή.

1.3 Δομή της Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων CFD με επίκεντρο την επίδραση της βλάστησης. Το Κεφάλαιο 3 αναφέρει το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της μελέτης. Τα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων CFD για γεωμετρίες πόλεων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4, ενώ το Κεφάλαιο 5 αναλύει την επίδραση της βλάστησης σε αυτού του τύπου γεωμετρίες. Τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της διάταξης και η μεθοδολογία της μοντελοποίησης για την συγκεκριμένη

μελέτη. Τέλος, το Κεφάλαιο 8 παρουσιάζει και αναλύει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ενώ το Κεφάλαιο 9 συνοψίζει τα συμπεράσματα και τα μελλοντικά βήματα αυτής της μελέτης.

ΓΙΩΡΓΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων CFD οι οποίες έχουν ως επίκεντρο την επίδραση του πρασίνου. Κάθε μια από αυτές έχει το δικό της σκοπό, στόχο και μεθοδολογία. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση με τα κύρια χαρακτηριστικά και αποτελέσματα παρόμοιων τύπου μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόσφατο παρελθόν.

Κάθε μια από τις μελέτες έχει την δική της ιδιαίτερη γεωμετρία η οποία μπορεί να βασίζεται σε μια πραγματικά υπαρκτή γεωμετρία [6,7,8,9,14,15,17,18,19] ή σε μια ιδανική γεωμετρία [10,11,12,15,16,17]. Το μέγεθος της γεωμετρίας μπορεί να έχει διαστάσεις δρόμου [12], γειτονιάς [6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19] ή πόλης [15] καθορίζοντας έτσι την κλίμακα την οποία μελετούν.

Σημαντικό ρόλο στις προσομοιώσεις CFD διαδραματίζουν τα μοντέλα τυρβώδους ροής τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν τις ροές του ανέμου εντός των οδικών φαραγγιών. Στις πλείστες μελέτες έχει χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο το RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) το οποίο αποσυνθέτει τις λύσεις των μεταβλητών όπως εμφανίζονται στις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes σε ένα μέσο όρο και ένα κυμαινόμενο στοιχείο.

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα που χρησιμοποιείται στη προσομοίωση των μέσων χαρακτηριστικών ροής για τις συνθήκες τυρβώδους ροής είναι το k-ε. Το μοντέλο k-ε μοντελοποιεί τις τάσεις Reynolds υιοθετώντας την υπόθεση Boussinesq η οποία συσχετίζει το μέσο ρυθμό απορρόφησης με τις τάσεις. Πολλές από τις μελέτες χρησιμοποιούν το realizable k-ε model [6,7,11,14,16,], ενώ άλλες το standard k-ε model. [7,8,9,10,12,13,15,19]

Η επίδραση του πρασίνου μπορεί να προκαλέσει μεταβολές σε πολλούς τομείς όπως στην ροή του ανέμου ως φυσικό εμπόδιο, στην ποιότητα του αέρα ως προς την συγκέντρωση διάφορων ρύπων, καθώς επίσης και σε θερμοκρασιακές μεταβολές μέσω της σκίασης και της εξατμισοδιαπνοής. Κάθε μια από τις μελέτες έχει τον δικό της σκοπό και στόχο, με πολλές από αυτές να επικεντρώνονται στο πως μεταβάλλεται η ροή εντός των οδικών φαραγγιών με ή χωρίς την παρουσία βλάστησης [7,9,10,11,13,14,15,16,17,18]. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η επιρροή της βλάστησης στις διάφορες συγκεντρώσεις των ρύπων και υπό ποιες προϋποθέσεις η βλάστηση έχει θετική ή αρνητική επίδραση [8,9,10,11,12,15,16,18,19]. Μέχρι σήμερα ο αριθμός των μελετών που συμπεριλαμβάνουν την επίδραση του πρασίνου στις θερμοκρασιακές μεταβολές είναι μικρός [6,11,14].

Στον Πίνακα που ακολουθεί εμφανίζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση με τα διάφορα χαρακτηριστικά και αποτελέσματα παρόμοιων μελετών που έγιναν στο παρελθόν. Η ανασκόπηση αυτή βασίζεται στο είδος και στη κλίμακα της γεωμετρίας, στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, στο πεδίο όπου εστιάζει η επιρροή της βλάστησης σε κάθε μελέτη, καθώς επίσης σε κάποια βασικά αποτελέσματα όπου εξάχθηκαν.

Άρθρο	Κλίμακα	Γεωμετρία	Turbulence model	k-ε model	Επικύρωση Αποτελεσμάτων	Μελέτη της επιρροής της βλάστησης
[6]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	realizable k-ε	-	Θερμοκρασιακές Μεταβολές
Αποτελ.	Η ανάλυση δείχνει την επίδραση ενός αστικού πάρκου στις θερμοκρασίες του αέρα και τη θερμική άνεση. Παρατηρείται μείωση κατά 1°C στο πάρκο σε απόσταση 27m για εισερχόμενη ταχύτητα ανέμου 2.3m/s, η οποία μειώνεται σε 0.6°C σε απόσταση 117 m από το πάρκο. Ο Universal Thermal Comfort Index (UTCI) δείχνει μείωση του θερμικού στρες μέσα και γύρω από το πάρκο.					
[7]	Γειτονιάς	Πραγματική	RANS	standard k-ε realizable k-ε SST k-ω	Πειραματικά δεδομένα	Ροή Ανέμου
Αποτελ.	Μείωση στις ταχύτητες του ανέμου στο επίπεδο των πεζών κατά 3.5%, 25% και 66% σε τρεις περιοχές ενδιαφέροντος ανάλογα με την διάταξη και τον τύπο του δέντρου. Η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται όταν οι κορώνες των δέντρων βρίσκονται πιο κοντά στα κτίρια και στο έδαφος.					
[8]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	standard k-ε	Μετρήσεις Πεδίου	Ποιότητα Αέρα ^(1,2,3,4)
Αποτελ.	Μείωση των μέσων συγκεντρώσεων των τεσσάρων ρύπων στο επίπεδο του πεζού εξαρτώμενη της διεύθυνσης του ανέμου και του είδους της βλάστησης. Η καλύτερη βελτίωση της ποιότητας του αέρα επιτεύχθηκε στα PM ₁₀ με μειώσεις 9% και 8%. Με την αύξηση της πυκνότητας της επιφάνειας των φύλλων, παρατηρήθηκαν μικρές παραλλαγές της αεροδυναμικής επίδρασης, αλλά τα αποτελέσματα απόθεσης για τα PM ₁₀ και VOC αυξήθηκαν σημαντικά.					
[9]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	standard k-ε	Μετρήσεις Πεδίου	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα ^(3,5)
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επιπτώσεις των δέντρων είναι τοπικές. Για παράλληλους ανέμους, η φύτευση νέων δέντρων είναι θετική, αφού η διοχέτευση ροής και η αναταραχή κατανέμουν τον ρύπο πάνω από το ύψος της οροφής. Οι περιοχές κοντά και μακριά από τα δέντρα μέσα στο δρόμο έχουν θετική επίδραση, με τη μέση συγκέντρωση στο ύψος των πεζών να μειώνεται έως και 18% λόγω αεροδυναμικών επιδράσεων. Για τους κάθετους ανέμους, οι ζώνες ανακυκλοφορίας μειώνουν τη διασπορά των ρύπων και η εισαγωγή δέντρων έχει επιπρόσθετα αρνητικά αποτελέσματα με την αύξηση της τοπικής μέσης συγκέντρωσης έως και 108% κοντά στα δέντρα. Συνολικά, τα θετικά αποτελέσματα εναπόθεσης είναι μεγαλύτερα για αυξημένο LAD και για κάθετους ανέμους και αντισταθμίζουν τις αρνητικές αεροδυναμικές επιδράσεις σε τοποθεσίες κοντά σε δέντρα.					
[10]	Γειτονιάς	Ιδανική	-	standard k-ε	-	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα ⁽⁵⁾
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα έδειξαν εξάρτηση από το μοτίβο των κτηρίων που βασίζεται στην επίδραση του ανέμου. Τα μοτίβα όπου τα κτήρια και τα δέντρα σχηματίζουν ένα κεντρικό χώρο προσφέρουν καλύτερες συνθήκες αερισμού. Τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής και της εναπόθεσης έδειξαν ότι οι χαμηλότεροι όροφοι εκτίθενται σε χαμηλότερα επίπεδα PM _{2.5} σε σχέση με τα ψηλότερα. Τέλος τα μοτίβα με μεγάλη πρόσοψη κτηρίων και δέντρων κάθεται στον επικρατούντα άνεμο παρουσιάζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις.					
[11]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	realizable k-ε	Μετρήσεις Πεδίου	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα ^(3,6) Θερμοκρασιακές Μεταβολές
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ροή αντιστρέφεται στην παρουσία δέντρων και ενισχύεται καθώς αυξάνεται η πυκνότητα της επιφάνειας των φύλλων. Η αύξηση του LAD προκαλεί την αύξηση της αντίστροφης ροής και τη μείωση της θερμοκρασίας. Οι υψηλότερες αναλογίες διαστάσεων οδηγούν σε περισσότερη μείωση της θερμοκρασίας σε ύψος 2m. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν επίσης ότι η διασπορά των οξειδίων του αζώτου επηρεάζεται από τη ροή του αέρα με την βλάστηση να αποδυναμώνει την απόδοση αερισμού NO και NO ₂ και να βελτιώνει την απόδοση αερισμού του O ₃ .					
[12]	Δρόμου	Ιδανική	Steady RANS	standard k-ε	Ανεμοσύραγα	Ποιότητα Αέρα ^(1,7)
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι λόγω της παρουσίας δέντρων, οι ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις ρύπων αυξάνονται κατά περίπου 8% (εύρος 1% έως 13%) για το EC και κατά περίπου 1,4% (εύρος 0,2 έως 2,6%) για PM ₁₀ . Η μελέτη υποδεικνύει ότι υπάρχει επιρροή από την διεύθυνση ανέμου, το είδος της βλάστησης και από τις εκπομπές κυκλοφορίας.					
[13]	Γειτονιάς	Ιδανική	RANS	standard k-ε	Ανεμοσύραγα	Μεθοδολογία για την επίδραση του πράσινου στη ροή ανέμου
Αποτελ.	Οι συντελεστές οπισθέλκουσας ολίσθησης των κτιρίων δεν απαιτούν τροποποίηση λόγω της παρουσίας φυλλώματος δέντρων για την ακριβή πρόβλεψη των προφίλ ροής μέσα και πάνω από αστικά στέγαστρα. Ως εκ τούτου, οι επιπτώσεις των δέντρων και των κτιρίων στη χωρική μέση ροή μπορούν να αναπαρασταθούν ανεξάρτητα στις προγνωστικές εξισώσεις για την ορμή και το TKE. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το φύλλωμα των δέντρων με LAD $\geq 0,06 \text{ m}^2/\text{m}^3$ επηρεάζει σημαντικά την μέση και τυρβώδη ροή για ένα εύρος πυκνότητας κτηρίων. Επηρεάζει επίσης σημαντικά η μέση χωρική ροή εάν το φύλλωμα βρίσκεται στο ύψος ή κάτω από το ύψος του κτιρίου.					

[14]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	realizable k-ε	Μετρήσεις Πεδίου	Ροή Ανέμου Θερμοκρασιακές Μεταβολές
Αποτελ.	Καθορίζοντας ένα όρο ψύξης στην ενεργειακή εξίσωση αναπαριστώντας την βλάστηση τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη μείωση στη μέση και μέγιστη θερμοκρασία στο επίπεδο των πεζών έφτασε τους 0.43C και 1.6C αντίστοιχα. Η βλάστηση στην πρόσοψη των κτηρίων οδήγησε σε μικρές μεταβολές θερμοκρασίας κοντά στους 0.04 C και 0.3 C, αντίστοιχα ενώ για το πράσινο της στέγης δεν βρέθηκαν αισθητές μειώσεις στο φαράγγι. Ο συνδυασμός όλων των ειδών βλάστησης της μελέτης έδειξε μείωση στη μέση και μέγιστη θερμοκρασία κατά 0.52C και 2C.					
[15]	Γειτονιάς Πόλης	Ιδανική Πραγματική	Steady RANS	standard k-ε	Ανεμοσύραγα	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα
Αποτελ.	Διαπιστώθηκε ότι τα δέντρα προκάλεσαν μείωση στο μέσο όρο των συγκεντρώσεις οδικής κυκλοφορίας κατά 7% στο ύψος των πεζών. Αυτή η μείωση είναι κυρίως αποτέλεσμα της αύξησης της αναταραχής που με τη σειρά της αυξάνει τη μίξη των εκπομπών κυκλοφορίας. Τα δέντρα είναι λιγότερο αποτελεσματικά στα φαράγγια των μεγάλων δρόμων καθώς τείνουν να παγιδεύουν τις εκπομπές. Η μείωση είναι πιο αποτελεσματική όταν τα δέντρα τοποθετούνται σε ανοιχτούς χώρους. Η αναταραχή που προκαλείται φαίνεται να διαδίδεται στον άνεμο όπου αυξάνει την ανάμειξη των εκπομπών.					
[16]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	realizable k-ε	Μετρήσεις Πεδίου Ανεμοσύραγα	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα έδειξαν την μεταβλητότητα του τυρβώδους αριθμού Schmidt (Sc_i) για σενάρια με και χωρίς δέντρα για παράλληλο και κάθετο άνεμο στα εμπόδια. Ωστόσο, με βάση διάφορες μετρήσεις, ο κατάλληλος τυρβώδης αριθμός Schmidt για αριθμητική μοντελοποίηση διασποράς ρύπων στη γενική αστική γειτονιά εκτιμήθηκε στο $Sc_i = 0,5$.					
[17]	Γειτονιάς	Ιδανική και Πραγματική	-	-	-	Ροή Ανέμου
Αποτελ.	Η προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα κυρίως μειώσεις και τοπικές αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή. Οι μειώσεις σχετίζονται κυρίως με τη θέση των δέντρων και τη διαμόρφωση της αστικής γεωμετρίας. Επιπλέον, η ποσοτική ανάλυση υποδεικνύει ότι λόγω των δέντρων η ροή του όγκου του αέρα που διασχίζει τα οριζόντια επίπεδα μέσα στο φαράγγι του δρόμου θα μειωθεί. Ένα άλλο βασικό σημείο είναι ότι η επίδραση των δέντρων δεν περιορίζεται στο φαράγγι του δρόμου αλλά εκτείνεται πάνω από το φαράγγι.					
[18]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	-	Μετρήσεις Πεδίου	Ροή Ανέμου Ποιότητα Αέρα ⁽³⁾
Αποτελ.	Τα αποτελέσματα του πρώτου μοντέλου δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις στην πλατεία είναι μικρότερες κατά παράγοντα 2-3 από ό,τι στους δρόμους. Παράλληλα, τα αποτελέσματα του δεύτερου μοντέλου έδειξαν ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις είναι στις λεωφόρους με έντονη κίνηση οχημάτων κοντά στο σημείο του σταθμού. Εκτιμάται έντονη διαφορά (περισσότερο από έναν παράγοντα 2) στη συγκέντρωση μεταξύ πεζοδρομίων της ίδιας λεωφόρου.					
[19]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	standard k-ε	Μετρήσεις Πεδίου	Ποιότητα Αέρα ⁽²⁾
Αποτελ.	Συμπεραίνεται ότι για μια εισερχόμενη κατεύθυνση ανέμου περίπου 45 ° με την κύρια λεωφόρο (Λισαβόνας) οι συγκεντρώσεις CO βρέθηκαν να αυξάνονται κατά μέσο όρο κατά 12% λόγω της αεροδυναμικής πρόσφυσης των δέντρων έναντι των ρυθμού ανταλλαγής ρυπασμένου αέρα με την ατμόσφαιρα πάνω από το επίπεδο της οροφής. Αντίθετα, για τον σχεδόν παράλληλο άνεμο (Aveiro) παρατηρήθηκε γενική μείωση 16% στις συγκεντρώσεις CO σε ολόκληρη την περιοχή λόγω αυξημένης ικανότητας εξαερισμού και διασποράς του φαραγγιού του δρόμου. Ωστόσο, σε ορισμένα σημεία, όπως στη θέση του AQS, η συγκέντρωση αυξήθηκε λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου.					

Πίνακας 2.1: Σύνοψη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ποιο προσφάτων μελετών για την επιρροή του πράσινου. Εμφανίζεται η κλίμακα και το είδος της γεωμετρίας, το μοντέλο τυρβώδους ροής και k-ε που χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος που έγινε η επικύρωση, το πεδίο όπου εστιάζει η έρευνα (Ρύποι όπου μελετήθηκαν για την ποιότητα του αέρα: (1)=PM₁₀, (2)=CO, (3)=NO_x, (4)=VOCs, (5)=PM_{2.5}, (6)=O₃, (7)=Elemental Carbon (EC)). Επιπλέον αναγράφεται μια σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων όπου εξάχθηκαν.

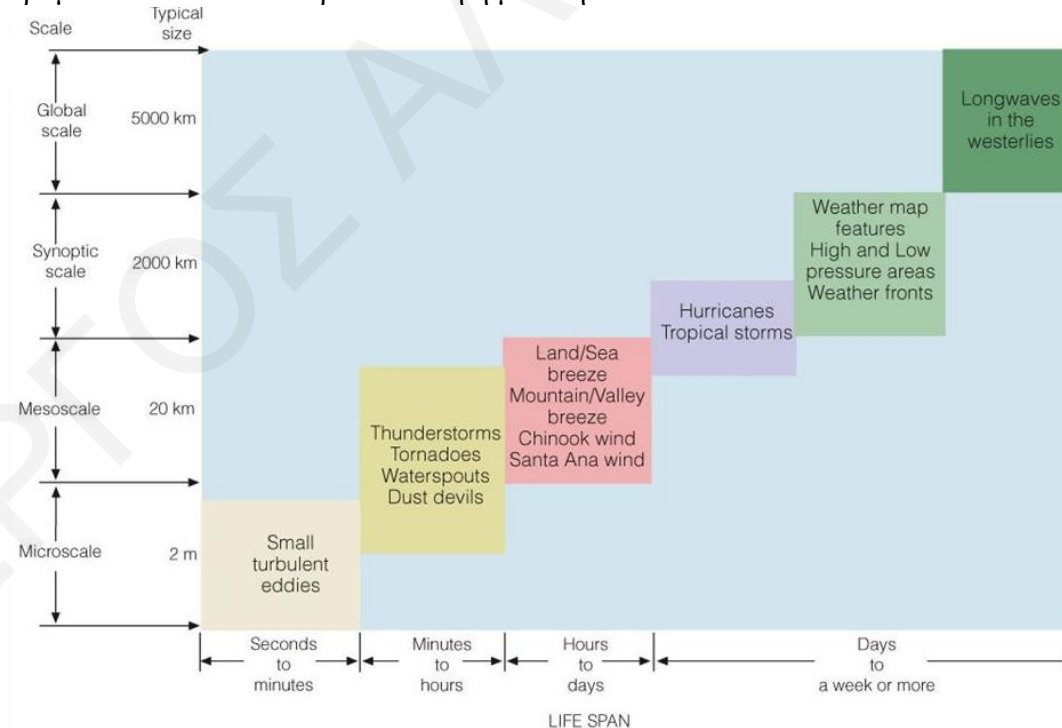
Κεφάλαιο 3

Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Κλίμακα ατμοσφαιρικών φαινομένων

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας και αστικών περιοχών μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορες κλίμακες. Οι κλίμακες της ατμόσφαιρας διαχωρίζονται σύμφωνα με το κατακόρυφο ύψος σε τρεις κύριες υποκατηγορίες. [20]

- **Συνοπτική Κλίμακα:** Σε αυτή την κλίμακα συμπεριλαμβάνονται φαινόμενα των οποίων η χρονική κλίμακα κυμαίνεται από ημέρες μέχρι εβδομάδες και με απόσταση μεγαλύτερη των 2000km, π.χ. μεγάλοι κυκλώνες.
- **Μεσοκλίμακα:** Μεταξύ της συνοπτικής κλίμακας και της μικροκλίμακας με φαινόμενα τα οποία έχουν χωρική διάσταση από 200km μέχρι 2000km και χρονική κλίμακα από ώρα μέχρι ημέρες, π.χ. τυφώνες.
- **Μικροκλίμακα:** Σε αυτή την κλίμακα συμπεριλαμβάνονται τα φαινόμενα τα οποία εκτυλίσσονται κοντά στην επιφάνεια της γης (λιγότερο από 2km) και έχουν διάρκεια από δευτερόλεπτα μέχρι κάποια λεπτά. Εντός αυτής της κλίμακας συμπεριλαμβάνονται και μικρότερης τάξης κλίμακες όπως είναι αυτή της κλίμακας πόλης, γειτονιάς και δρόμου όπου θα επικεντρωθεί αυτή η μελέτη.



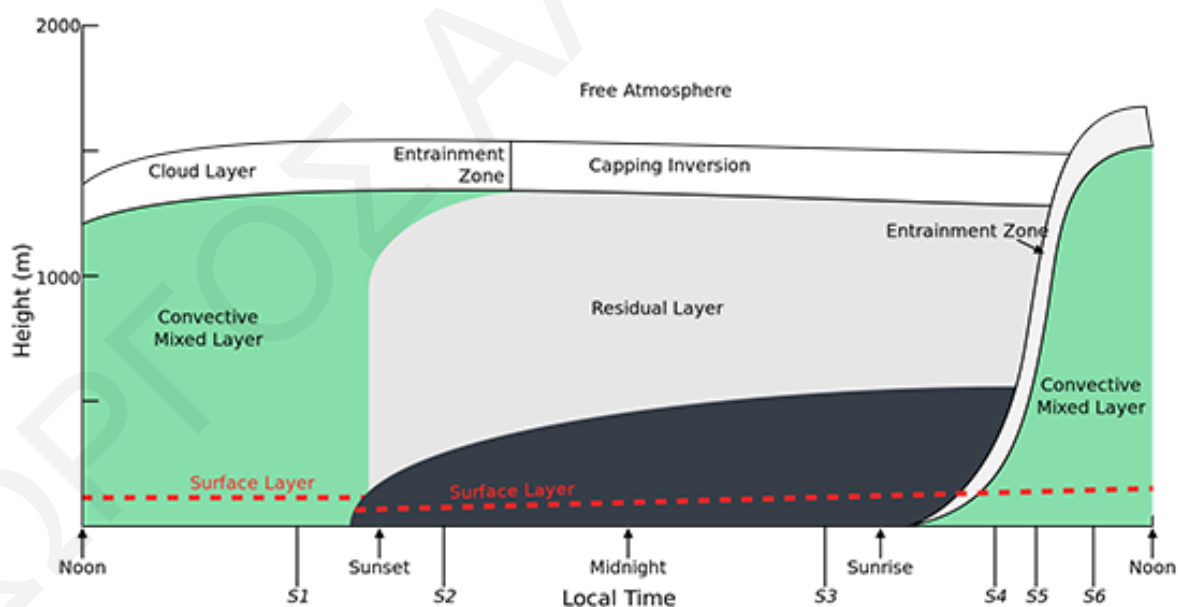
Εικόνα 3.1: Χωρική και χρονική κλίμακα των ατμοσφαιρικών φαινομένων

https://www.atmos.washington.edu/academics/classes/2010Q3/101/materials/ATMS101_WEEK8.pdf

3.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα - Atmospheric Boundary Layer (ABL)

Το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ ή ABL) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ανθρώπινη ύπαρξη καθώς είναι το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας στο οποίο ζει μέσα ο άνθρωπος. Σχηματίζεται σαν συνέπεια της αλληλεπίδρασης της ατμόσφαιρας με την υποκείμενη επιφάνεια (έδαφος ή νερό) για χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από λίγες ώρες έως περίπου ημέρα. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το ΑΟΣ είναι συνέχεια τυρβώδης, πολύ καλά αναμειγμένο και ανταποκρίνεται σχετικά γρήγορα στις αλλαγές που συμβαίνουν στην γήινη επιφάνεια. Το ύψος του ΑΟΣ μπορεί να μεταβάλλεται, αλλά είναι γενικά μικρότερο από 2-3 km. [21]. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται μια τυπική εξέλιξη του ΑΟΣ κατά τον ημερήσιο κύκλο. Τα τρία κύρια στρώματα που το περιγράφουν είναι το στρώμα ανάμειξης, το ευσταθές οριακό στρώμα, και το αποκομμένο οριακό στρώμα.

- Το στρώμα ανάμειξης αποτελεί το 75% του ασταθούς οριακού στρώματος. Κατά την διάρκεια της ημέρας όπου υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία, μεταδίδεται θερμότητα από την επιφάνεια του εδάφους προς τα χαμηλότερα στρώματα του ΑΟΣ. Ως αποτέλεσμα δημιουργούνται ανωστικές κινήσεις αέριων μαζών και ισχυρές τυρβώδεις ροές.
- Το ευσταθές οριακό στρώμα δημιουργείται κατά τις νυχτερινές ώρες λόγω της ψύξης του εδάφους. Από την υπέρυθη ακτινοβολία τη νύχτα, δημιουργούνται συνθήκες ευστάθειας όπου συμβάλουν στην εξασθένηση της τύρβης.
- Το αποκομμένο οριακό στρώμα εμφανίζεται μετά τον σχηματισμό του νυχτερινού οριακού στρώματος. Το στρώμα αυτό αποκόπτεται από το έδαφος διατηρώντας έτσι τις αρχικές ιδιότητες που είχε κατά την διάρκεια της ημέρας, όπως η ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας.



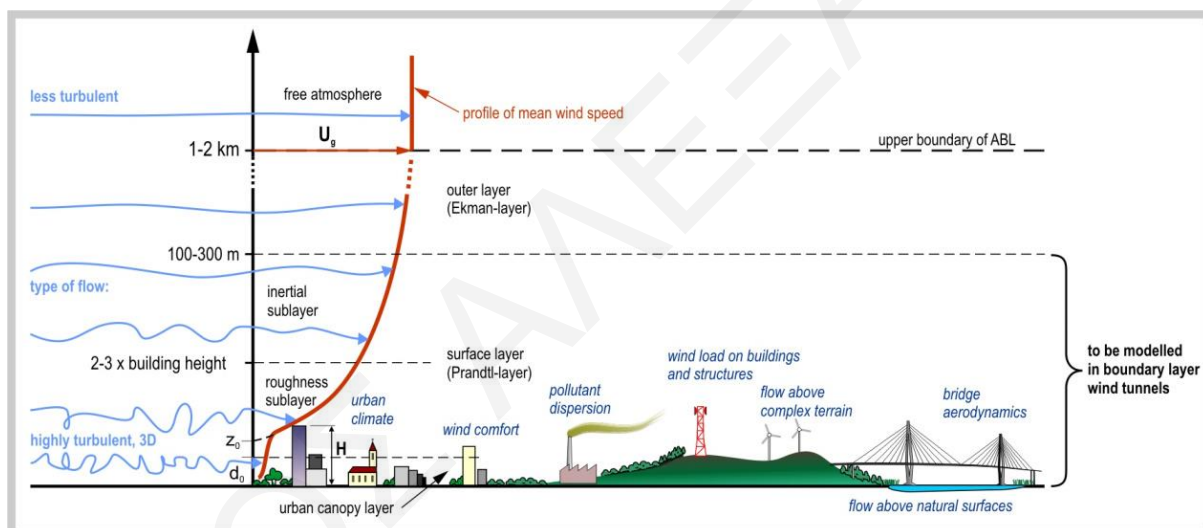
Εικόνα 3.2: Τυπική εξέλιξη του ΑΟΣ εντός ενός ημερήσιου κύκλου (<https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/712>)

Το χαμηλότερο στρώμα εντός του ΑΟΣ ονομάζεται επιφανειακό στρώμα (Surface Layer). Στο στρώμα αυτό το οποίο είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια της γης, όλες οι τυρβώδεις ροές μεταβάλλονται σε ποσοστό λιγότερο του 10%. Έτσι κυριαρχούν εντός αυτού μικρής αλλά

έντονης κλίμακας τύρβη που παράγεται εξαιτίας της επιφανειακής τραχύτητας σε συνδυασμό με τη μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων. Η παρούσα εργασία, επικεντρώνεται στο επιφανειακό στρώμα όπου επηρεάζει άμεσα τον άνθρωπο.

3.3 Αστικό Οριακό Στρώμα – Urban Boundary Layer (UBL)

Οι ροές πάνω από τις αστικές περιοχές εντός του αστικού οριακού στρώματος (UBL) μπορούν να υποδιαιρεθούν σε διαφορετικά τμήματα: στο αστικό στρώμα φαραγγιού – Urban Canopy Layer (UCL), υπόστρωμα τραχύτητας – Roughness Sublayer (RSL), στο επιφανειακό στρώμα – Urban Surface Layer (USL) και στο εξωτερικό (μικτό) στρώμα – Outer Layer. Το UCL αναφέρεται στο στρώμα από το έδαφος μέχρι το επίπεδο του ψηλότερου κτηρίου. Εντός αυτού του στρώματος η ροή είναι πολύ περίπλοκη και εξαρτάτε από την γεωμετρία των φαραγγιών. Το RSL είναι το στρώμα στο οποίο η ροή εξακολουθεί να επηρεάζεται από την τραχύτητα αλλά με τις αναταραχές να ομοιογενοποιούν την ροή. Το RSL κυμαίνεται από 2-5 φορές στο μέσο ύψος των κτηρίων. Πάνω από το RSL δημιουργείται το στρώμα USL στο οποίο το προφίλ του ανέμου είναι λογαριθμικό υπό ουδέτερες συνθήκες και οι τυρβώδεις ροές είναι σχεδόν σταθερές με το ύψος. Πιο πάνω βρίσκεται το εξωτερικό στρώμα όπου το προφίλ του ανέμου είναι λογαριθμικό και οι ροές ποικίλλουν σημαντικά με το ύψος.

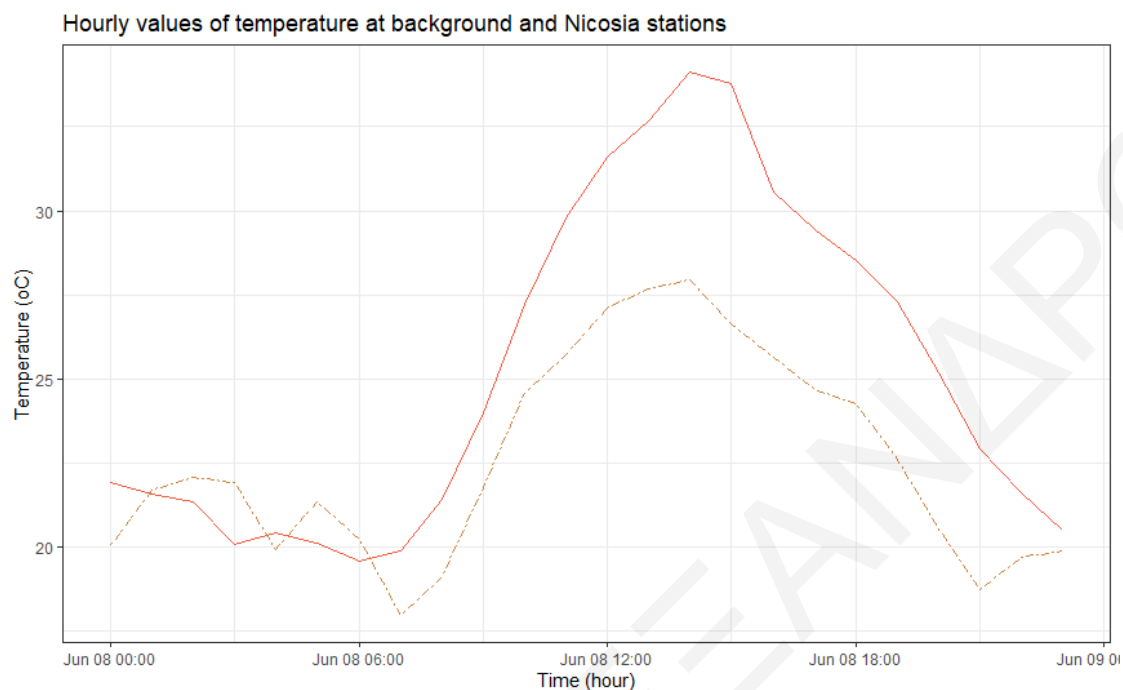


Εικόνα 3.3: Κατακόρυφη υποδιάρθρωση των ζωνών εντός του αστικού οριακού στρώματος (<https://bmeafl.com/the-project-proposal/>)

3.4 Το Φαινόμενο της Αστικής Θερμνησίδας – Urban Heat Island (UHI)

Το φαινόμενο της αστικοποίησης γίνεται όλο και πιο καταφανής τα τελευταία χρόνια, με τους νέους σε ηλικία ανθρώπους να τείνουν να μετακινηθούν προς τις αστικές περιοχές. Έτσι ως αποτέλεσμα αυξάνεται η ανθρωπογενής θερμότητα σε αυτές τις περιοχές. Η ανθρωπογενής θερμότητα σε συνδυασμό με την έμμεση ηλιακή θέρμανση προκαλούν το γνωστό φαινόμενο της αστικής θερμνησίδας - Urban Heat Island (UHI)) [22]. Έτσι παρατηρούνται μεγαλύτερες μέσες τιμές θερμοκρασίας στις αστικές περιοχές σε σχέση με αυτές των αγροτικών περιοχών. Στην Εικόνα 3.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας για μια τυχαία ημέρα στις 8 Ιουνίου 2020 για δυο σταθμούς. Ο πρώτος σταθμός βρίσκεται στην Αγία Μαρίνα Ξυλιάτου και θεωρείτε σταθμός υποβάθρου ενώ ο δεύτερος σταθμός είναι ο κυκλοφοριακός

σταθμός Λευκωσίας ο οποίος βρίσκεται εντός της Λευκωσίας. Παρατηρείται ότι οι δυο σταθμοί έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες με αυτόν της Λευκωσίας να έχει μέχρι και 6°C μεγαλύτερη θερμοκρασία κατά την διάρκεια του μεσημεριού.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τον κυκλοφοριακό σταθμό Λευκωσίας και τον σταθμό υποβάθρου Αγίας Μαρίνας Ξυλιότου για τις 8 Ιουνίου 2020

Σε μια τυπική αστική περιοχή υπάρχουν πολλά είδη δομικών υλικών σε ένα μικρό χώρο εκ τον οποίο το καθένα συλλαμβάνει διαφορετικής έντασης ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, κάθε πόλη έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως αστική δόμηση, το μέγεθος πόλης, η πυκνότητα των κτηρίων, το ύψος των κτηρίων, τα δομικά υλικά και συντελεστής όψης του ουρανού. Όλα αυτά είναι παράγοντες που μπορούν να συμβάλουν ή να επιβαρύνουν το φαινόμενο της αστικής θερμοκηφίδας [23].

3.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο UHI

Στην διαδικασία μετατροπής μιας υπαίθριας έκτασης σε αστική, σημειώνονται σημαντικές αλλαγές στα στοιχεία που συνθέτουν το μικροκλίμα μιας περιοχής. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι μεταβολές στα κλιματικά στοιχεία λόγω αστικοποίησης μιας περιοχής. Αρχικά στο αστικό μικροκλίμα λόγω της δόμησης υπάρχει μειωμένη ηλιοφάνεια ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Οι θερμοκρασίες παρουσιάζουν αύξηση σε σχέση με τις περιαστικές περιοχές ενώ σημειώνεται μείωση του θερμοκρασιακού εύρους. Οι ταχύτητες και διευθύνσεις των ανέμων μεταβάλλονται εξαιτίας της δόμησης που μεταβάλλει την τραχύτητα. Η μείωση της μέσης ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των νηνεμιών και την συσσώρευση των αέριων ρύπων. Τέλος παρουσιάζεται αύξηση της θερμοχωρητικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας εξαιτίας των κτηρίων αλλά και αύξηση της προσροφούμενης θερμότητας λόγω της αύξησής των πηγών εκπομπής θερμότητας.

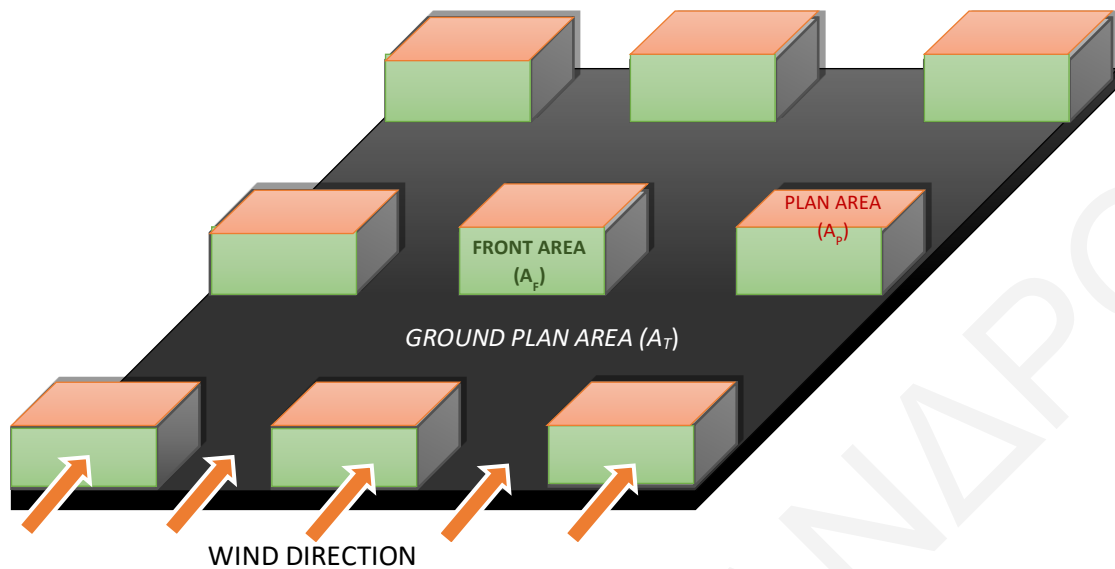
Κλιματικό Στοιχείο		Σύγκριση με υπαίθρια περιοχή
Ρύποι	Πυρήνες Συμπύκνωσης	10 φορές περισσότεροι
	Αέρια συστατικά	5-25 φορές περισσότερα
Νέφωση	Νεφοκάλυψη	5-10% μεγαλύτερη
	Ομίχλες τον χειμώνα	100% περισσότερες
	Ομίχλες το καλοκαίρι	30% περισσότερες
Υετός	Συνολικά	5-10% περισσότερο
	Ημέρες με λιγότερο από 5mm	10% περισσότερο
	Χιονόπτωση	5% περισσότερη
Σχετική Υγρασία	Χειμώνας	2% μικρότερη
	Καλοκαίρι	8% μικρότερη
Ακτινοβολία	Ολική	15-20% λιγότερη
	Υπεριώδης	5-30% λιγότερη
	Διάρκεια ηλιοφάνειας	5-15% μικρότερη
Θερμοκρασία	Μέση ετήσια	0.5-1 μεγαλύτερη
	Μέση ελάχιστη	1-2 μεγαλύτερη
Ταχύτητα Ανέμων	Μέση ετήσια	20-30% μικρότερη
	Ισχυροί άνεμοι	10-20% λιγότερη
	Νηνεμία	5-10% περισσότερες

Πίνακας 3.1: Μεταβολή στα κλιματικά στοιχεία μεταξύ μιας αστικοποιημένης περιοχής και μιας περιαστικής περιοχής.

Πέραν από την φύση των υλικών από τα οποία αποτελείται η πόλη, σημαντικό παράγοντα έχει και ο τύπος της δόμησης από τον οποίο αποτελείται. Για την μορφολογία των αστικών περιοχών υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι βασίζονται στην πυκνότητα των κτηρίων και μπορούν να περιγράψουν μια πόλη. Ο πρώτος είναι ο λόγος της επιφάνειας της κάτοψης των κτηρίων (A_P) προς την επιφάνεια της πόλης (A_T) και ονομάζεται πυκνότητα κατά την κάτοψη - planar area density (λ_p) και ο δεύτερος είναι ο λόγος της προσήνεμης επιφάνειας των κτηρίων (A_F) προς την επιφάνεια της πόλης (A_T) ο οποίος καλείτε πυκνότητα κατά μετωπική επιφάνεια - frontal area density (λ_f).

$$\lambda_f = \frac{A_F}{A_T}$$

$$\lambda_p = \frac{A_P}{A_T}$$

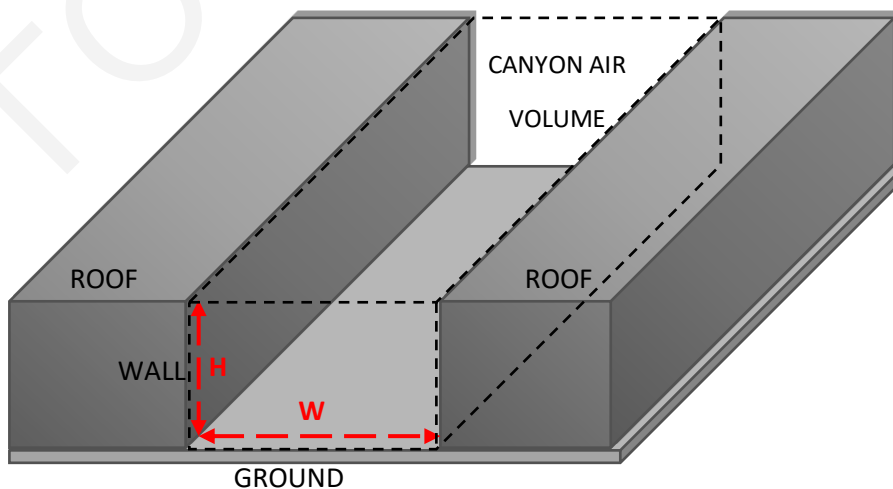


Εικόνα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του λ_p και λ_f . Οι πράσινες επιφάνειες αναπαριστούν την προσήνεμη επιφάνεια των κτηρίων, οι κόκκινες την κάτοψη των κτηρίων και η μαύρη επιφάνεια την επιφάνεια της πόλης. Το πορτοκαλί βέλος παρουσιάζει την διεύθυνση του ανέμου.

Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη γεωμετρία της πόλης έχει ο λόγος του ύψους προς το πλάτος (W/H) μέσα σε ένα οδικό φαράγγι το οποίο επηρεάζει και την “αναπνευστικότητα” του οδικού φαραγγιού (Εικόνα 3.6).

3.6 Ενεργειακό Ισοζύγιο εντός Οδικών φαραγγιών

Ο αέρας που βρίσκεται μέσα στο φαράγγι ονομάζεται Όγκος αέρα φαραγγιού και οριοθετείται από την κορυφή των ταρατσών. Η κορυφή αυτού του όγκου αέρα μαζί με την κορυφή των κτηρίων σχηματίζουν το χαμηλότερο όριο του αστικού οριακού στρώματος. [24]



Εικόνα 3.6: Αναπαράσταση των ορίων του όγκου αέρα του φαραγγιού. Επιπλέον παρουσιάζει τον λόγο ύψους πλάτους που χαρακτηρίζει τα οδικά φαράγγια.

Το ισοζύγιο ενέργειας του οδικού φαραγγιού επηρεάζεται τόσο από την ενέργεια ακτινοβολίας από τις επιφάνειες (έδαφος και τοίχοι) όσο και από το ενεργειακό ισοζύγιο του αέριου όγκου. Το ενεργειακό ισοζύγιο μιας επιφάνειας φαραγγιού δίνεται από τη σχέση:

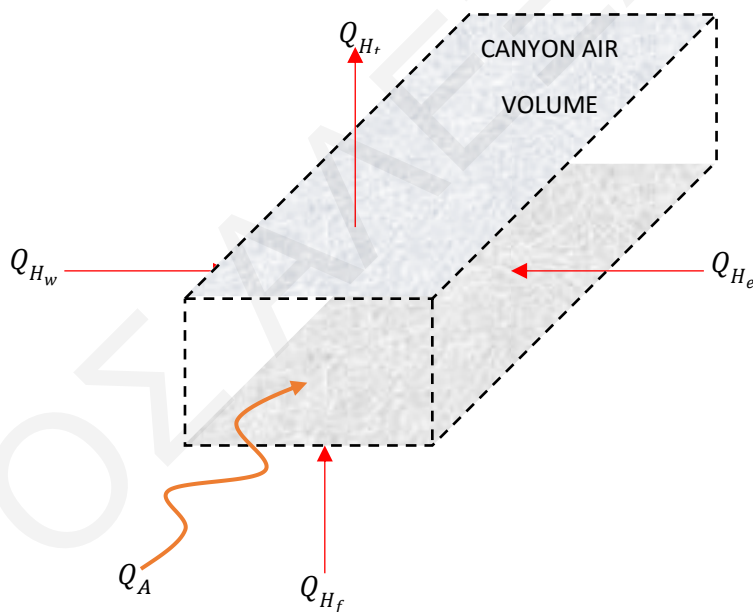
$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

Όπου, Q_H είναι η ροή θερμότητας προς τον αέρα (W/m^2) Q_E η λανθάνουσα ροή θερμότητας (W/m^2) και Q_G η ροή θερμότητας από την κάτω επιφάνεια (W/m^2).

Το ενεργειακό ισοζύγιο του όγκου αέρα του φαραγγιού (στην περίπτωση φαραγγιού που είναι προσανατολισμένο από Βορρά προς Νότο) είναι:

$$Q_A + [H(Q_{H_e} + Q_{H_w}) + W(Q_{H_f} - Q_{H_t})]L = \rho C_p \int_V \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{div Q^*}{\rho C_p} \right) dV$$

Όπου Q_A είναι η πρόσθετη θερμότητα λόγω οριζόντιας μεταφοράς (J/s), H , L και W το ύψος, πλάτος και βάθος του φαραγγιού, Q_H η ροή θερμότητας προς τον αέρα για το τον ανατολικό τοίχο (e), δυτικό τοίχο (w), έδαφος (f) και κορυφή (t) (W/m^2), ρ η πυκνότητα του αέρα (Kg/m^3), C_p η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση ($J/kg K$), θ η μέση θερμοκρασία αέρα (K) και V ο όγκος του φαραγγιού. [24]



Εικόνα 3.7: Ενεργειακό Ισοζύγιο του Όγκου αέρα ενός φαραγγιού

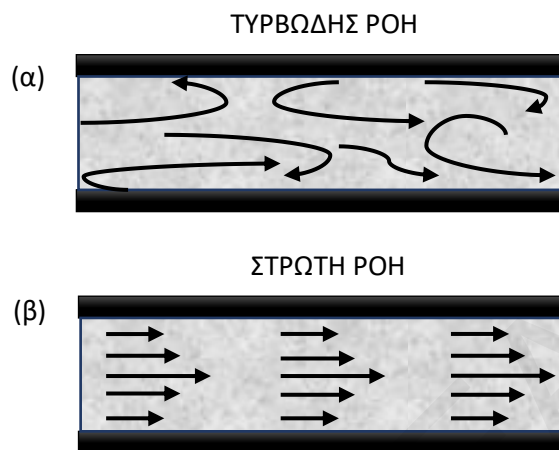
3.7 Ροές

Στην φύση υπάρχουν δύο είδη ροών, η στρωτή και η τυρβώδης ροή. Στην περίπτωση της στρωτής ροής οι γειτονικές στρώσεις ενός ρευστού κινούνται σχηματίζοντας λείες γραμμές ροής χωρίς να υπάρχει ανάμιξη μακροσκοπικής κλίμακας μεταξύ των γειτονικών στρώσεων. Η στρωτή ροή εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις ιξώδους είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας. Αντίθετα η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές. Σε αυτή την περίπτωση οι δυνάμεις αδράνειας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις ιξώδους. Στη φύση όλες σχεδόν οι ροές είναι τυρβώδεις. Το μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών

δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους δίνεται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds (Re) ο οποίος χαρακτηρίζει το είδος της ροής.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, u η ταχύτητα της ροής και L η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση.



Εικόνα 3.8: Απεικόνιση (α) της τυρβώδους και (β) της στρωτής ροής ενός ρευστού αναμεσα σε δυο τοιχώματα. Με το μαύρο συνεχόμενο βέλος αναπαρίστανται οι ρευματογραμμές

3.7.1 Ροή αέρα σε ομοιόμορφη επίπεδη επιφάνεια

Οι ροές πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια ομοιόμορφης τραχύτητας έχει ως αποτέλεσμα το προφίλ της ταχύτητας να εμφανίζει ένα ιδιαίτερο σχήμα. Ένα παρόμοιο προφίλ ακολουθεί και η ταχύτητα του ΑΟΣ το οποίο ρέει πάνω από την επιφάνεια της γης. Η σχέση που περιγράφει το προφίλ της ταχύτητας καθ' ύψος δίνεται από τη σχέση

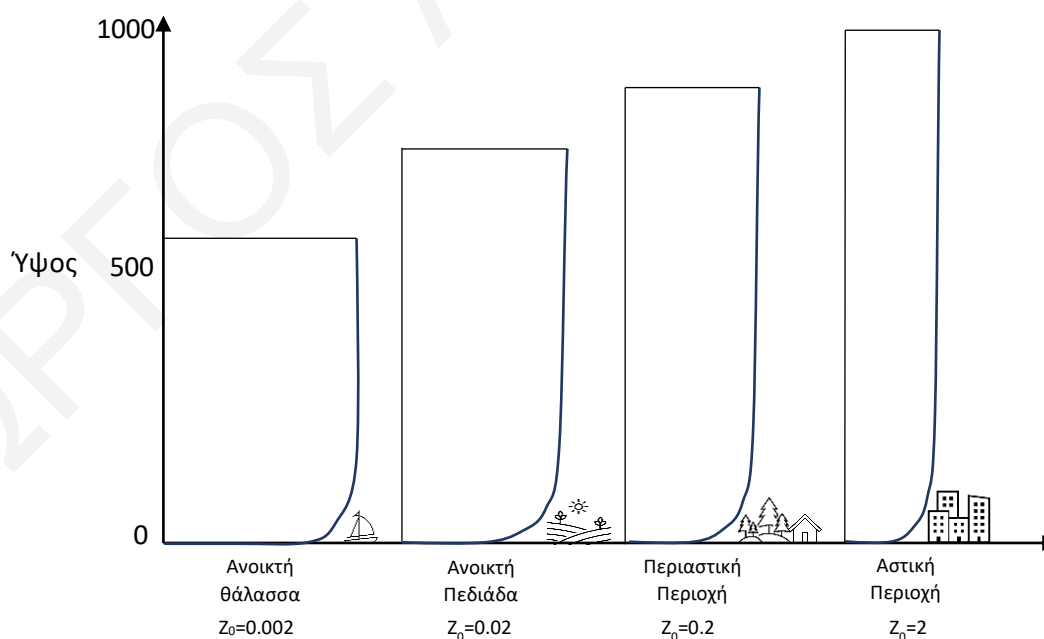
$$U(y) = \frac{U_{ABL}}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Όπου U_{ABL} είναι η ταχύτητα τριβής, κ η σταθερά Von Karman ($\kappa=0,42$) και z_0 το αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας. Το αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας εξαρτάτε από τη φύση της επιφάνειας (μέγεθος, σχήμα, απόσταση κτλ.). Η τιμή του z_0 καθορίζεται βάσει του Πίνακα 3.2 που ακολουθεί.

A/A	z_0 (m)	Είδος Εδάφους
1	0.0002 Θάλασσα	Ανοικτές θάλασσες ή λίμνες, περιοχές καλυμμένες με χιόνι ,επίπεδη πεδιάδα, άσφαλτο, σκυρόδεμα
2	0.005 Απαλό	Χωρίς επιφάνεια εδάφους χωρίς εμφανή εμπόδια και αμελητέα βλάστηση. π.χ. παραλίες, πάγοι χωρίς μεγάλες κορυφογραμμές, χλοοτάπητας, και χιονισμένες ή ανοιχτές περιοχές.
3	0.03 Ανοικτές	Περιοχές με χαμηλή βλάστηση (π.χ. γρασίδι) και απομονωμένα εμπόδια. π.χ. βοσκοτόπος χωρίς ανεμοφράχτες, τούνδρα, διάδρομος αεροδρομίων.
4	0.10 Ταχέως Ανοικτές	Καλλιεργημένη περιοχή με κανονική κάλυψη χαμηλών καλλιεργειών, ή μέτρια ανοιχτή με περιστασιακά εμπόδια (π.χ. χαμηλούς φράκτες, μεμονωμένες σειρές δέντρων, απομονωμένες εκμεταλλεύσεις) σε σχετικές οριζόντιες αποστάσεις.
5	0.25 Τραχιά	Πρόσφατα ανεπτυγμένα τοπία με υψηλές καλλιέργειες ή καλλιέργειες ποικίλου ύψους και διάσπαρτα εμπόδια (π.χ. πυκνές ζώνες προστασίας, αμπελώνες).
6	0.50 Πολύ Τραχιά	«Παλιά» καλλιεργημένο τοπίο με μεγάλες ομάδες εμποδίων (μεγάλα αγροκτήματα) χωρισμένα από ανοιχτούς χώρους. Επίσης, χαμηλή μεγάλη βλάστηση με μικρά διαστήματα όπως θάμνοι, σπαρώνες, νεαρά πυκνά φυτά
7	1.0 Κλειστή	Τοπία εντελώς ή αρκετά καλυμμένο με μεγάλα εμπόδια παρόμοιου μεγέθους, με ανοιχτούς χώρους συγκρίσιμους με τα ύψη εμποδίων. π.χ. ώριμα κανονικά δάση, ομοιογενείς πόλεις ή χωριά.
8	≥ 2.0 Χαοτική	Κέντρα μεγάλων πόλεων με συνδυασμό κτιρίων χαμηλών και πολυόροφων κτιρίων. Επίσης ακανόνιστα μεγάλα δάση με πολλές εκτάσεις.

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση του αεροδυναμικού ύψους τραχύτητας z_0 βάσει της φύσης της επιφάνειας σε 8 κατηγορίες.

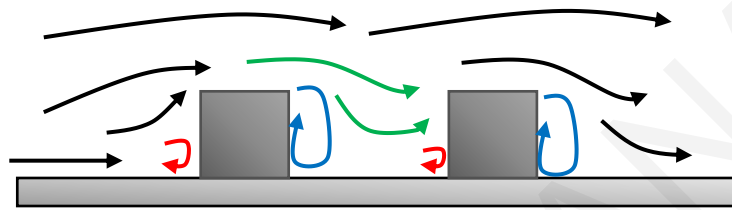
Η τραχύτητα δεν μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη για τις περισσότερες ταξινομήσεις. Η επιλογή του μήκους τραχύτητας βασίζεται στην οριζόντια περιγραφή για μήκος το οποίο είναι τουλάχιστον 5Km. Κάθε τραχύτητα θα δώσει διαφορετικό προφίλ ταχύτητας ανέμου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9 που παρουσιάζει το λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας καθ' ύψος για διάφορες τιμές του z_0 .



Εικόνα 3.9: Κατακόρυφο προφίλ ανέμου για διάφορες τιμές του z_0 (ανοικτή θάλασσα ($z_0=0.002$), ανοικτή πεδιάδα ($z_0=0.02$), περιαστική περιοχή ($z_0=0.2$), κέντρο πόλης ($z_0=2$)).

3.7.2 Ροές μέσα στα οδικά φαράγγια

Τα κτήρια θεωρούνται εμπόδια στην ροή του αέρα με αποτέλεσμα να διαταράσσουν τις ρευματογραμμές. Η διαταραχή αυτή εκφράζεται από τρεις κύριες ζώνες. Στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου υπάρχει μια στροβιλώδης ροή προς την κάτω πλευρά. Στην αμφήνεμη πλευρά του κτηρίου υπάρχει μια ευθείς ροή που τραβιέται προς τα κάτω προς την κοιλότητα χαμηλής πίεσης μέσα στο οδικό φαράγγι. Η τρίτη διαταραχή εμφανίζεται στην αμφήνεμη πλευρά του κτηρίου κοντά στο κτήριο η οποία είναι αρκετά τυρβώδης. Ο λόγος W/H μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στο σχηματισμό των διαταραχών. [25]



Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση των ρευματογραμμών ανάμεσα σε δυο κτήρια. Σχηματισμός 3 ζωνών (προσένεμη πλευρά κτηρίου (κόκκινο χρώμα), κοιλότητα μεταξύ κτηρίων (πράσινο χρώμα) και αμφήνεμη πλευρά (μπλε χρώμα)).

Computational Fluid Dynamics (CFD)

4.1 Εισαγωγή

Ο όρος Computational Fluid Dynamics (CFD), στα ελληνικά Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων τα οποία περιέχουν ρευστά (υγρά ή αέρια) με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί όπως αυτόν που έδωσε ο Anderson το 1995.

"Το CFD είναι η τέχνη της αντικατάστασης των ολοκληρωμάτων ή των μερικών παραγώγων στις κυρίαρχες εξισώσεις με διακριτές αλγεβρικές μορφές, οι οποίες με τη σειρά τους επιλύονται για τη λήψη αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις τιμές πεδίου ροής σε διακριτά σημεία του χρόνου ή χώρου. Το τελικό προϊόν του CFD είναι πράγματι μια συλλογή αριθμών, σε αντίθεση με μια αναλυτική λύση κλειστής μορφής. "

Ο όρος CFD προήλθε από την χρήση στην αεροδιαστημική μηχανική την δεκαετία του 1960, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται στον ευρύτερο τομέα της ρευστοδυναμικής. Ως υπολογιστικό εργαλείο μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των πειραματικών δοκιμών. Το CFD εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος επιστημών. Η εφαρμογή του CFD στη μηχανική των κτηρίων περιλαμβάνει μελέτες όπως η άνεση των πεζών, μελέτες γύρω από τα κτήρια, μελέτες διασποράς ατμοσφαιρικών ρύπων, μελέτες αερισμού κ.α.

Επιπλέον, το CFD χρησιμοποιείται για τη μελέτη διεργασιών στα κάτω μέρη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (0–200 m), συμπεριλαμβανομένης της διασποράς και της εναπόθεσης ρύπων, της βροχής από τον άνεμο, του αερισμού κτιρίων κλπ. Πρόσφατα, έχουν δημοσιευτεί ολοκληρωμένες αναλυτικές αναφορές σχετικά με τη χρήση του CFD για αυτές τις εφαρμογές [26]. Η προσομοίωση της ροής του ΑΟΣ γίνεται με τα προφίλ ροής της μέσης ταχύτητάς του ανέμου και των ποσοτήτων στροβιλισμού που εφαρμόζονται μέσω του επιπέδου εισόδου του υπολογιστικού πεδίου.

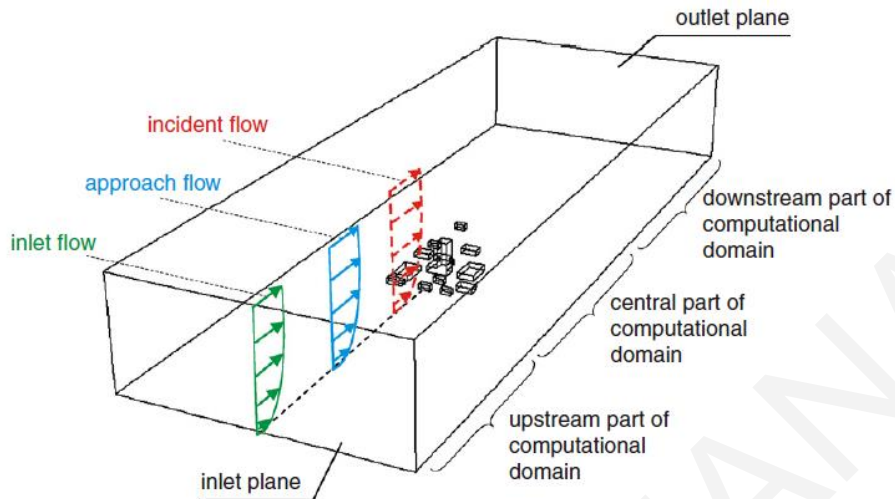
4.2 Χρήση του CFD σε γεωμετρίες πόλεων

Η χρήση του CFD σε γεωμετρίες πόλεων χρησιμοποιείται με σκοπό να εξάγει αποτελέσματα για την παροχή ενός άνετου και υγιούς εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος κτηρίων. Μπορεί να προσφέρει λύσεις σε οικολογικούς, ενεργειακούς αλλά και οικονομικούς περιορισμούς. Μπορεί να εμπεριέχει μελέτη πολλών φυσικών διεργασιών μέσα και έξω από τα κτήρια όπως η μεταφορά θερμότητας, αέρα, υγρασίας, ρύπων, φωτός και ήχου.

4.3 Υπολογιστικός Τομέας

Ο υπολογιστικός τομέας (computational domain) πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος με τα όρια να βρίσκονται αρκετά μακριά από τους όγκους κτηρίων ούτως ώστε να μην επηρεάζεται η ροή από τα εμπόδια. Ο υπολογιστικός τομέας μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις περιοχές. Η κεντρική περιοχή του τομέα η οποία αποτελείται από τα πραγματικά εμπόδια (όπως κτίρια, δέντρα κλπ.) τα οποία διαμορφώνονται βάση της πραγματικής τους γεωμετρίας. Οι άλλες δυο περιοχές

αποτελούν την περιοχή του τομέα πριν (upstream part) και μετά τα εμπόδια (downstream part). Οι διαστάσεις του υπολογιστικού τομέα επιλέγονται βάσει των οδηγιών βέλτιστης πρακτικής. Το ύψος του υπολογιστικού τομέα πρέπει να απέχει 6H φορές το ύψος του ψηλότερου κτηρίου (H), ενώ το πλάτος και το μήκος πρέπει να είναι 15H.



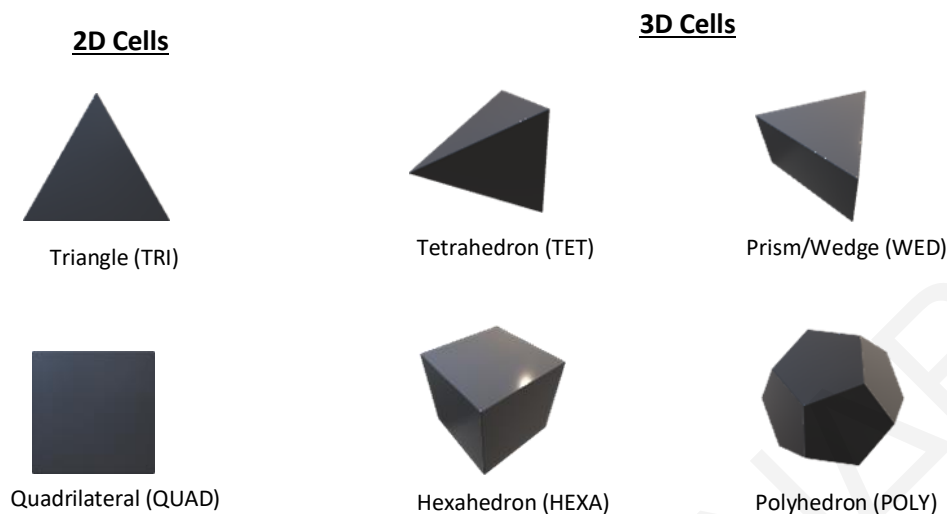
Εικόνα 11: Διαχωρισμός του υπολογιστικού τομέα σε τρεις περιοχές (περιοχή πριν τα εμπόδια, περιοχή που περιέχει τα εμπόδια και περιοχή μετά τα εμπόδια).

Η γεωμετρία των κτηρίων δεν συμπεριλαμβάνεται μέσα στον τομέα. Τα κτήρια εμφανίζονται ως κενοί χώροι μέσα στον τομέα τα οποία μπορεί να διαμορφωθούν ως προς την τραχύτητα μέσω λειτουργιών του λογισμικού στο κάτω μέρος του τομέα. Έτσι, μπορούν να αντικατασταθούν ως πραγματικά εμπόδια τραχύτητας. Αυτή η τραχύτητα εκφράζεται σε όρους αεροδυναμικής τραχύτητας z_0 η οποία κυμαίνεται από 0.03-2m. Στις προσομοιώσεις CFD το έδαφος ανάντι και κατάντι της πόλης θεωρείται ως ένα κοινό έδαφος με μια τραχύτητα. Στο κέντρο του υπολογιστικού τομέα όπου βρίσκονται τα κτήρια τα οποία αποτελούνται από τοίχους ταράτσες δρόμους κλπ., η τραχύτητα αυτών των επιφανειών εκφράζεται από το ύψος τραχύτητας k_s η οποία είναι συνήθως αρκετά μικρή (0-0.1m).

4.4 Προ-επεξεργασία

4.4.1 Τύποι κελιών

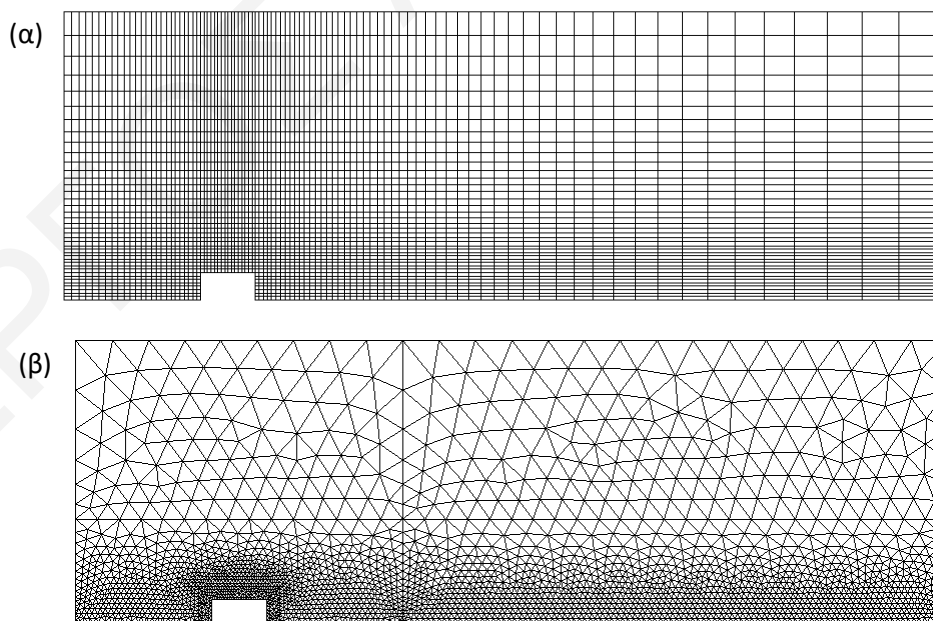
Η προ-επεξεργασία διαδραματίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή συμπεριλαμβάνει την υποδιαίρεση του υπολογιστικού τομέα σε μεγάλο αριθμό όγκων ελέγχου ή κελιών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κελιών όπως τα τετράεδρα, εξαέδρα, πολυέδρα κλπ. (Εικόνα 4.2). Κάθε είδος κελιού μπορεί να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Τα εξαεδρικά κελιά χαρακτηρίζονται από την ακρίβεια του αποτελέσματος που μπορούν να δώσουν παρόλα αυτά, είναι δύσκολο να περιγράψουν σύνθετες γεωμετρίες λόγω της μορφής τους. Αντίθετα, το τετράεδρα μπορούν ευχερώς να περιγράψουν σύνθετες γεωμετρίες δίνοντας μικρότερης ακρίβειας αποτελέσματα. Τα πολλά υποσχόμενα πολυέδρα συνδυάζουν μεγάλη εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και δύναται να περιγράψουν σύνθετες γεωμετρίες.



Εικόνα 12: Σχήματα από διάφορους τύπους κελίων (2D και 3D) τα οποία χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν το πλέγμα.

4.4.2 Τύποι Πλέγματος

Το πλέγμα μπορεί να είναι δομημένο πλέγμα (structured) ή μη δομημένο πλέγμα (unstructured) (Εικόνα 4.3). Το μη δομημένο πλέγμα μπορεί να αποτελείται από πολλά είδη κελιών ενώ έχει το σημαντικό πλεονέκτημα του χρόνου τον οποίο χρειάζεται για να δημιουργηθεί. Παράλληλα, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε σύνθετες γεωμετρίες στις οποίες είναι δύσκολο να δημιουργηθεί το δομημένο πλέγμα. Αντίθετα τα δομημένα πλέγματα είναι πιο χρονοβόρα στη δημιουργία τους, παρόλα αυτά έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Επιπλέον, υπάρχει το υβριδικό πλέγμα το οποίο μπορεί να αποτελείται από μέρη τα οποία είναι δομημένα και από μέρη τα οποία δεν είναι δομημένα.



Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση ενός (α) δομημένου πλέγματος από εξάεδρα (HEX) και (β) ενός μη δομημένου πλέγματος από τετράεδρα (TET).

4.5 Εξισώσεις κίνησης των ρευστών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα ρευστά εμφανίζονται μέσα από τρεις θεμελιώδεις φυσικές αρχές (διατήρηση μάζας, 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα και διατήρηση ενέργειας). Οι προκύπτουσες εξισώσεις είναι η εξίσωση συνέχειας, οι εξισώσεις ορμής και η εξίσωση της ενέργειας. Στην δυναμική των ρευστών οι εξισώσεις ορμής ονομάζονται εξισώσεις Navier–Stokes. Οι τρισδιάστατες εξισώσεις Navier–Stokes σε καρτεσιανό σύστημα για μια ασυμπίεστη στρωτή ροή για Νευτώνειο ρευστό στο οποίο ισχύουν οι σχέσεις ιξώδους του Stokes είναι

$$\nabla \vec{v} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \nabla (\vec{u}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

(Εξισώσεις 3)

Όπου ρ η πυκνότητα, μ το κινηματικό ιξώδες, u η ταχύτητα στις διευθύνσεις x, y, z , t ο χρόνος, P η πίεση. Σε αυτές τις εξισώσεις ο πρώτος όρος αναφέρεται στην επιτάχυνση του ρευστού, ο δεύτερος στην ταχύτητα και διεύθυνση του ρευστού. Ο τρίτος όρος είναι η κλίση της πίεσης όπου δείχνει την μεταβολή της, ενώ ο τελευταίος όρος αναφέρεται στην επίδραση του ιξώδους.

4.6 Μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής

Η μοντελοποίηση της τυρβώδους ροής είναι ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα στη κλασική φυσική. Ο καλύτερος τρόπος για την περιγραφή της τυρβώδους ροής στα μοντέλα βασίζεται στις κύριες ιδιότητες της όπως ότι:

1. Οι παραχώδεις ροές είναι εξαιρετικά ασταθείς (εμφανίζονται “τυχαία”).
2. Είναι τρισδιάστατες ακόμα και αν η μέση ροή είναι δυο διαστάσεων.
3. Υπάρχει μεγάλος στροβιλισμός.
4. Οι διατηρούμενες ποσότητες αναμειγνύονται.
5. Η ανάμιξη είναι μια διεργασία διάχυσης (κινητική ενέργεια προς εσωτερική ενέργεια).
6. Υπάρχουν συνεκτικές δομές.
7. Οι διακυμάνσεις συμβαίνουν σε ένα ευρύ φάσμα μήκους και χρόνου.

Οι τρεις κύριες κατηγορίες για την πρόβλεψη της ροής είναι οι (α) RANS (Reynolds Average Navier-Stokes equations), (β) LES (Large Eddy Simulation) και (γ) DNS (Direct Numerical Simulation). Κάθε μέθοδος έχει το δικό της υπολογιστικό κόστος με την RANS να μοντελοποιεί την τυρβώδη ροή εξοικονομώντας μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, την LES να μοντελοποιεί τις μικρές δίνες, ενώ την DNS να επιλύει τις μικρές και τις μεγάλες δίνες απαιτώντας έτσι περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Σε αυτή την εργασία θα γίνει χρήση του μοντέλου RANS όπου προέρχονται από τον μέσο όρο των εξισώσεων Navier–Stokes (Εξισώσεις 3). Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται ευρύτερα και έχει καθιερωθεί στο τομέα του αριθμητικού υπολογισμού σε ροές ανέμου γύρω από κτίρια και σε ροές αέρα μέσα σε αυτά. Με τις εξισώσεις του RANS επιλύεται μόνο η μέση ροή, ενώ όλες οι κλίμακες στροβιλισμού μοντελοποιούνται κατά προσέγγιση. Για την χρήση του RANS πρέπει να γίνουν προσεγγίσεις στα μοντέλα στροβιλισμού (όπως το μοντέλο $k-\epsilon$).

4.7 Reynolds Average Navier-Stokes equations (RANS)

Οι εξισώσεις του RANS λαμβάνονται αποσυνθέτοντας τις λύσεις των μεταβλητών όπως εμφανίζονται στις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes σε ένα μέσο όρο και ένα κυμαινόμενο στοιχείο ($A = \bar{A} + A'$). Με αντικατάσταση των στιγμιαίων μεταβλητών στις εξισώσεις Navier-Stokes έχουμε ως αποτέλεσμα τις επονομαζόμενες εξισώσεις RANS

$$\nabla(\vec{V}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \nabla(U\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 U + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial z} \right]$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho \nabla(V\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 V + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial z} \right]$$

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho \nabla(W\vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 W + \left[-\frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\rho w'^2}}{\partial z} \right]$$

(Εξισώσεις 4)

Αυτή η διαδικασία εμφανίζει νέους όρους οι οποίοι ονομάζονται τάσεις Reynolds και αντιπροσωπεύουν την επίδραση του στροβιλισμού στη μέση ροή. Σε αντίθεση από τις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes, οι εξισώσεις RANS δεν σχηματίζουν κλειστό σύνολο εξισώσεων λόγω της παρουσίας των τάσεων Reynolds. Το κλείσιμο επιτυγχάνεται με την μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds με την χρήση μοντέλων στροβιλισμού για την εφαρμογή του CFD. Ένα από τα πιο συνηθισμένα μοντέλα στροβιλισμού για τις εξισώσεις RANS είναι το μοντέλο k-ε.

4.8 Turbulence k-ε model

Το πλέον διαδεδομένο μοντέλο που χρησιμοποιείται στο CFD είναι το μοντέλο τύρβης k-ε το οποίο χρησιμοποιείται στη προσομοίωση των μέσων χαρακτηριστικών ροής για της συνθήκες τυρβώδους ροής. Πρόκειται για μοντέλο δύο εξισώσεων το οποίο περιγράφει τις διαταραχές μέσω εξισώσεων μεταφοράς. Το μοντέλο k-ε μοντελοποιεί τις τάσεις Reynolds υιοθετώντας την υπόθεση Boussinesq η οποία συσχετίζει το μέσο ρυθμό απορρόφησης με τις τάσεις. Αυτή η υπόθεση εκφράζεται από τη σχέση

$$-\rho \overline{u_i u_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

Όπου μ_t είναι το eddy viscosity, S_{ij} ο μέσος ρυθμός καταπόνησης (mean strain rate), δ_{ij} το δέλτα του Kronecker.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις το k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και ε το ποσοστό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας τα οποία ορίζονται ως

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad \varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$$

Η k είναι το μετρό της ενέργειας που σχετίζεται με τις τυρβώδεις διακυμάνσεις της ροής, ενώ η σκέδαση του ε προκαλείται από τους μικρότερους στροβίλους στη ροή ενάντια του ιξώδους.

4.8.1 Standard k-ε model

Το standard k-ε model χρησιμοποιεί τις εξής εξισώσεις μεταφοράς για το k και το ε

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(kV) &= \operatorname{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \operatorname{grad} k \right) + G_k - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\varepsilon V) &= \operatorname{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

(Εξισώσεις 5)

όπου,

$$G_k = \mu_t S_T^2 \text{ και } S_T = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Σε αυτές τις εξισώσεις σ_k και σ_ε είναι ο αριθμός Prandtl για το k και ε αντίστοιχα, G_k η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των βαθμίδων μέσης ταχύτητας και S_T το μέτρο του μέσου ρυθμού καταπόνησης και με τα C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k και σ_ε να αποτελούν σταθερές.

4.8.2 Realizable k-ε model

Σε αυτό το μοντέλο η εξίσωση μεταφοράς του k παραμένει η ίδια με αυτή του standard ενώ η εξίσωση μεταφοράς του ε παρουσιάζει μια βελτιωμένη μέθοδο. Παρουσιάζονται δύο κύριες διαφορές σε σχέση με το standard k-ε model. Η πρώτη είναι ότι το realizable k-ε χρησιμοποιεί διαφορετικό όρο για το eddy viscosity με το C_μ να μην αποτελεί σταθερά όπως συμβαίνει στο standard. Η δεύτερη είναι ότι η εξίσωση μεταφοράς για το ε προκύπτει από μια ακριβής εξίσωση για την μεταφορά της μέσης τετραγωνικής διακύμανσης στροβιλισμού. Οι εξισώσεις μεταφοράς σε αυτό το μοντέλο περιγράφονται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(kV) &= \operatorname{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \operatorname{grad} k \right) + G_k - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\varepsilon V) &= \operatorname{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon \right) + \rho C_{1\varepsilon} S_T \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned}$$

(Εξισώσεις 6)

Με το $C_{1\varepsilon} = \max \left(\frac{\eta}{\eta+5}, 0.43 \right)$ και $\eta = S \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)$ και τα σ_k , σ_ε , $C_{2\varepsilon}$ να αποτελούν σταθερές.

Το C_μ σε αυτό το μοντέλο υπολογίζεται από τη σχέση

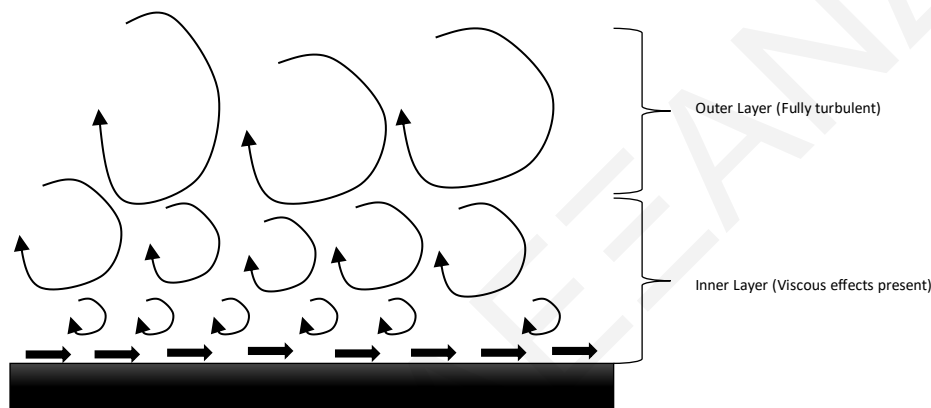
$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

Με το A_0 και A_s σταθερές και το U^* να υπολογίζεται από τον μέσο τανυστή ταχύτητας περιστροφής και το S_{ij} . [27]

4.9 Μοντελοποίηση κοντά σε τοίχους

4.9.1 Περιοχές κοντά σε τοιχώματα

Το μοντέλο k-ε χρησιμοποιείται για τυρβώδεις ροές ενώ σε περιοχές κοντά σε τοιχώματα ο τυπικός αριθμός Reynolds είναι μικρός και η επιρροή από το ιξώδες είναι σημαντική. Έτσι η ροή κοντά στα τοιχώματα απαιτεί ειδική επεξεργασία για να ληφθούν ακριβείς προβλέψεις πεδίου ροής. Στη σχέση Reynolds (Εξίσωση 1) για την ροή ανέμου μακριά από τα κτήρια, οι δυνάμεις αδράνειας (UL) είναι πολύ μεγαλύτερες από τις δυνάμεις ιξώδους (ν). Αντίθετα όταν πλησιάζουμε το τοίχωμα ο αριθμός Reynolds μειώνεται. Κοντά στο τοίχωμα ο αριθμός Re είναι της τάξης της μονάδας όπου οι δυνάμεις αδράνειας και ιξώδους είναι περίπου ίσες σε μέγεθος. Έτσι οι αναταράξεις μπορούν να διακριθούν σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με το πόσο κοντά είναι στο τοίχωμα.



Εικόνα 14.4: Σχηματική απεικόνιση του μεγέθους των αναταραχών για περιοχές κοντά και μακριά από τα τοιχώματα.

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς της ροής σε αυτές τις περιοχές ορίζονται οι αδιάστατες μονάδες y^+ και u^+

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad u^+ = \frac{U_\tau}{u_\tau}$$

Όπου $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ είναι η ταχύτητα τριβής, U_τ η ταχύτητα του ρευστού εφαπτομένη στο τοίχο και τ_w η διατμητική τάση του τοίχου. Πολύ κοντά στον τοίχο οι δυο αυτές μονάδες ισούνται. Απομακρυνόμενοι από τον τοίχο οι δυο αυτές μονάδες ακολουθούν μια λογαριθμική συσχέτιση.

4.9.2 Wall Functions

Τα wall function αποτελούνται από ένα σύνολο ημι-εμπειρικών τύπων και λειτουργιών ούτως ώστε να παρακάμπτουν τις αδυναμίες του μοντέλου k-ε κοντά στα τοιχώματα. Τα wall function συνδέουν τις τιμές στο κέντρο του γειτονικού κελιού με τις οριακές συνθήκες και την εξίσωση μεταφοράς για το k. Μια από τις πιο διαδεδομένες wall function είναι η “standard wall function”

4.10 Εξίσωση Ενέργειας

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η εξίσωση της ενέργειας όπου συμπεριλαμβάνει τους όρους που σχετίζονται με τον ρυθμό μεταβολής του συνόλου των ενεργειών e_t (εσωτερική, κινητική, δυναμική), με τους όρους διάχυσης των ειδών, με την ροή θερμότητας, με την ιξώδες διάχυση και τους επιπρόσθετους όρους που μπορεί να προσθέσει ο χρήστης στην εξίσωση.

$$\frac{\partial \rho e_t}{\partial t} - \nabla[\vec{V}(\rho e_t + p)] = \nabla[k\nabla T + \vec{\tau}V] + \dot{S}g$$

Όπου e_t το άθροισμα της εσωτερικής, κινητικής και δυναμικής ενέργειας, V η ταχύτητα, k η θερμική αγωγιμότητα, $\vec{\tau}$ ο τανυστής διατμητικής τάσης και $\dot{S}g$, όρος πηγής επιπρόσθετης παραγωγής ενέργειας

4.11 Εξίσωση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Το μοντέλο ακτινοβολίας P-1 είναι η απλούστερη περίπτωση του γενικότερου μοντέλου P-N, το οποίο βασίζεται στην έκφραση της έντασης της ακτινοβολίας (I)

$$-\nabla(\Gamma\nabla G) - aG + 4an^2\sigma T^4 = S_G$$

Όπου Γ η παράμετρος Γ που εξαρτάτε από το συντελεστή σκέδασης και συντελεστή απορρόφησης, G , η προσπίπτουσα ακτινοβολία, a ο συντελεστής απορρόφησης, n ο δείκτης διάθλασης του μέσου, σ η σταθερά Stefan–Boltzmann και S_G η επιπρόσθετες πηγές ακτινοβολίας από UDF

4.12 Boundary Conditions

Για τις εξωτερικές όψεις του πλέγματος πρέπει να οριστούν οριακές συνθήκες για να αντικατοπτρίζει το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, το k και το ϵ . Αυτό μπορεί να γίνει ορίζοντας στις οριακές συνθήκες τις κατάλληλες εξισώσεις με την χρήση του User-Defined Function (UDF). Για το κατακόρυφο προφίλ ανέμου ορίζεται η σχέση

$$U(y) = \frac{U_{ABL}}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z}\right)$$

Αντίστοιχα, για την τυρβώδες κινητική ενέργεια (k) και το ποσοστό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας ($\epsilon(z)$) [28] γίνεται μέσω των σχέσεων:

$$k = \frac{U_{ABL}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \text{και} \quad \epsilon(z) = \frac{U_{ABL}^3}{k(z+z_0)}$$

4.13 Μοντελοποίηση Θερμοκρασίας

Για να γίνει η μοντελοποίηση της θερμοκρασίας εντός του υπολογιστικού τομέα, πρέπει να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες στα τοιχώματα στην είσοδο και στην έξοδο. Η ροή θερμότητας από τα κελιά τα οποία αποτελούν το ρευστό και είναι γειτονικά σε τοιχώματα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q = h_f(T_w - T_f) + q_{rad}$$

όπου, T_w είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας, T_f είναι η τοπική θερμοκρασία του ρευστού, το q_{rad} είναι η ροή θερμότητας με ακτινοβολία και h_f είναι ο συντελεστής τοπικής μεταφοράς θερμότητας ο οποίος υπολογίζεται από τις τοπικές συνθήκες του πεδίου ροής (μέση ταχύτητα, θερμοκρασία και επίπεδο αναταραχής). [29, 5]

4.14 Διαδικασία Επίλυσης

Η διαδικασία της επίλυσης γίνεται με την γραμμικοποίηση και επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων σε κάθε όγκο ελέγχου – Control Volume (CV). Ο αλγόριθμος των λύσεων για τις μεθόδους “SIMPLE” (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Οι μεταβλητές ενημερώνονται με βάση την τρέχουσα λύση (ή την αρχικοποιημένη (initialize) λύση, εάν ο υπολογισμός είναι στην αρχή)
2. Οι εξισώσεις ορμής επιλύονται για να ληφθούν οι νέες τιμές της ταχύτητας, χρησιμοποιώντας και τις τρέχουσες τιμές πίεσης και ροής στις επιφάνειες.
3. Οι ταχύτητες ενδέχεται να μην ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας. Έτσι μια εξίσωση “Poisson” (διόρθωση πίεσης) προέρχεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Επιλύεται η απόδοση των διορθώσεων για τα πεδία πίεσης, ταχύτητας και ροής μάζας ούτως ώστε να διασφαλιστεί η συνέχεια.
4. Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ε, P1 και ενέργειας επιλύονται.
5. Τέλος τα βήματα επαναλαμβάνονται συνέχεια με τις βελτιωμένες εκτιμήσεις ταχύτητας, πίεσης έως ότου να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης.

Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι οι αριθμητικές τιμές των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, της πίεσης και των k και ε στο κέντρο του κάθε όγκου ελέγχου.

Ο αλγόριθμος “SIMPLEC” (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent) είναι μια τροποποιημένη μορφή του “SIMPLE”. Είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη αριθμητική διαδικασία στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική για την επίλυση των Navier-Stokes. Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα ίδια βήματα όπως ο αλγόριθμος SIMPLE με την διαφορά ότι στον χειρισμό των εξισώσεων ορμής, επιτρέπει να παραλείπονται όροι που είναι λιγότερο σημαντικοί.

4.15 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στον αερισμό των πόλεων

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει αρκετές μελέτες CFD σχετικά με τον εξαερισμό των πόλεων. Πολλές από αυτές επικεντρώνονται σε κλίμακα πόλης (~10km), ενώ κάποιες άλλες σε κλίμακα γειτονιάς (~1km) ή δρόμου (~100m). Οι πλείστες από αυτές χρησιμοποιούν ιδανικές γεωμετρίες ενώ κάποιες από τις προσομοιώσεις είναι βασισμένες σε πραγματικές γεωμετρίες πόλης. Καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα διαδραματίζουν οι παράμετροι που θα επιλεγούν στα μοντέλα τυρβώδους ροής και k-ε, ενώ εξίσου σημαντικό είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για να γίνει επικύρωση (validation) στα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κλίμακες, οι γεωμετρίες καθώς επίσης και τα μοντέλα που επιλέχθηκαν σε διάφορες πρόσφατες έρευνες για την μελέτη του εξαερισμού πόλεων με την χρήση CFD. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση φαίνεται ότι η πιο συχνά

χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για τέτοιου είδους μελέτες CFD είναι η Steady RANS συνδυαζόμενη με το Realizable ή το Standard k-ε model.

Άρθρο	Κλίμακα	Γεωμετρία	Turbulence model	k-ε model	Επικύρωση
[30]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Realizable	Ανεμοσύραγμα
[5]	Γειτονιάς	Πραγματική	Unsteady RANS	Realizable	Πεδίου
[31]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS LES	Realizable	Ανεμοσύραγμα και Πεδίου
[32]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	Realizable	Πεδίου
[33]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[34]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[35]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[36]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[37]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[38]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS		-
[39]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard, Realizable RNG RSM	Ανεμοσύραγμα
[40]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard, RNG	Ανεμοσύραγμα
[41]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard, RNG	Ανεμοσύραγμα
[42]	Δρόμου	Ιδανική	Steady RANS LES	Standard, RSM	Ανεμοσύραγμα
[43]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS LES	Standard	Ανεμοσύραγμα
[44]	Δρόμου	Ιδανική	Steady RANS LES	Realizable	-
[45]	Δρόμου	Πραγματική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[46]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[47]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[48]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα
[49]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard, RNG	Ανεμοσύραγμα
[50]	Πόλης	Ιδανική	Steady RANS	Standard, RNG	Ανεμοσύραγμα
[51]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Realizable	Ανεμοσύραγμα
[52]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	Standard	-
[53]	Γειτονιάς	Ιδανική	Steady RANS	RNG	Ανεμοσύραγμα
[54]	Δρόμου	Ιδανική	Steady RANS	Realizable	Ανεμοσύραγμα
[55]	Γειτονιάς	Πραγματική	Steady RANS	Standard	Ανεμοσύραγμα και Πεδίου
[56]	Πόλης	Ιδανική	Steady RANS	-	-

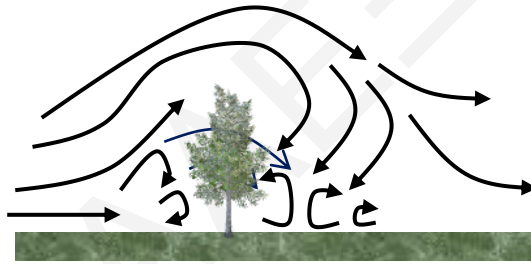
Πίνακας 4.1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μεθοδολογία (κλίμακα, γεωμετρία, μοντέλο τύρβης, μοντέλο k-ε και μορφή της επικύρωσης) που χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες πρόσφατες μελέτες CFD για την μοντελοποίηση των ροών εντός των οδικών φαραγγιών.

Κεφάλαιο 5

Επίδραση του Πράσινου

5.1 Ροές γύρω από τα δέντρα

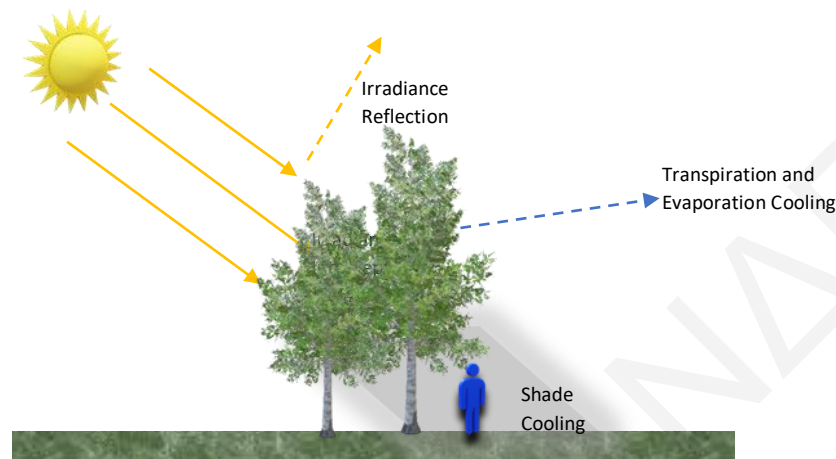
Μέσα στα αστικά τοπία υπάρχουν στοιχεία βλάστησης. Για ανοικτούς χώρους τα δέντρα μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα του αέρα, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση της θερμοκρασίας και του φαινομένου της αστικής θερμονησίδας. Τα δέντρα επηρεάζουν την ροή του ανέμου. Το σχήμα, το μέγεθος και το είδος του δέντρου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιρροή της ροής. Τα φύλλα, τα κλαδιά και ο κορμός του δέντρου θα λειτουργήσουν ως εμπόδιο στη ροή που θα οδηγήσει σε χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου μέσα και πίσω από τον όγκο της βλάστησης. Η κύρια ροή ανέμου θα διαχωρίζεται σε ένα μέρος που θα ρέει γύρω από το δέντρο και ένα μικρό μέρος που θα ρέει μέσω του όγκου της βλάστησης.



Εικόνα 15.1: Σχηματική απεικόνιση της ροής στην παρουσία βλάστησης. Με μαύρο συνεχόμενο βέλος παρουσιάζονται οι ρευματογραμμές που αναταράσσονται στην παρουσία του δέντρου ενώ με μπλε βέλος παρουσιάζονται οι ρευματογραμμές που διαπερνούν την “κορόνα” του δέντρου.

5.2 Βλάστηση

Η βλάστηση εντός μιας πόλης πέραν από το αισθητικό κομμάτι, μπορεί να βοηθήσει σε πολλούς τομείς όπως η μείωση της θερμοκρασίας και η βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Η βλάστηση έχει την χαρακτηριστική ιδιότητα της εξατμισοδιαπνοής όπου μέσω της εξάτμισης υπάρχει μετασχηματισμός του υγρού νερού σε υδρατμούς από τα φύλλα και τους κορμούς, ενώ κατά την διαπνοή γίνεται μεταφορά μέσω των “στομάτων” του φυτού. Οι δυο αυτές διαδικασίες έχουν ως αποτέλεσμα την άμεση ψύξη και υγρασία του αέρα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της επίδρασης του πρασίνου είναι η σκίαση. Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, η βλάστηση προκαλεί σκιασμένες περιοχές οι οποίες θερμαίνονται λιγότερο από την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 5.2). Διάφοροι παράγοντες όπως το μέγεθος του δέντρου, το είδος, το φύλλωμα κ.α. μπορούν να επηρεάσουν είτε θετικά είτε αρνητικά την μείωση της θερμοκρασίας μέσα σε μια αστική περιοχή.



Εικόνα 16: Απεικόνιση της επιρροής του πράσινου μέσω της σκίασης, της εξατμησοδιαπνοής και την ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

5.3 Επιρροή της βλάστησης εντός αστικών περιοχών

Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη [57] το πράσινο εντός της αστικής περιοχής μπορεί να έχει τις ακόλουθες επιπτώσεις.

- Την ρύθμιση του μικροκλίματος, καθώς η αύξηση της βλάστησης εντός των αστικών περιοχών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, καθώς επίσης και την αυξημένη εξατμησοδιαπνοή. Τέτοιες τοπικές μειώσεις της θερμοκρασίας ενδέχεται να προκαλέσουν αλλαγή στο ρυθμό των χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα οδηγώντας σε μειωμένες συγκεντρώσεις ρύπων όπως είναι το Όζον.
- Μείωση στην ηχορύπανση, καθώς τα δέντρα μειώνουν την ηχορύπανση εντός των οδικών φαραγγιών ακόμα και σε πολυσύχναστους δρόμους. [58]
- Εκπομπή βιογενών πτητικών ενώσεων - biogenic Volatile Organic Compounds (bVOCs). Τα δέντρα εντός των οδικών φαραγγιών εκπέμπουν bVOCs ως αντίδραση στο στρες του περιβάλλοντος τους, όπως όταν κυριαρχούν υψηλές τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας ή και όταν υπάρχει χαμηλή διαθεσιμότητα νερού.
- Η απορρόφηση και εναπόθεση ρύπων, καθώς τα δέντρα στους δρόμους έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την ποιότητα του αέρα. Αυτό γίνεται με την απορρόφηση των ρύπων και την αύξηση της εναπόθεσης των ρύπων. Επιπλέον τα δέντρα λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας επιβραδύνουν την ροή του αέρα βελτιώνοντας έτσι τις διαδικασίες απομάκρυνσης των ρύπων. Τα δέντρα έχουν την δυνατότητα να ενεργούν ως βιολογικά φίλτρα απορροφώντας CO₂ και αέριους ρύπους όπως O₃, NO₂ και SO₂ μέσω των “στομάτων” των φύλλων. [59]

5.4 Μοντελοποίηση Δέντρου

Για την αναπαράσταση της επίδρασης του πρασίνου από το δέντρο στη ροή του αέρα χρησιμοποιούνται οι όροι S_u, S_k, S_ε χωρίς να γίνει χρήση της λεπτομερής γεωμετρίας του δέντρου [60, 61]. Ο όρος S_u ($\frac{Pa}{m}$) προστίθεται στην εξίσωση μεταφοράς ορμής ως η επίδραση πρασίνου και δίνεται από τη σχέση:

$$S_u = -\rho C_d LAD U u_i \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), C_d ο αδιάστατος συντελεστής οπισθοτροχιάς της βλάστησης, LAD (Leaf Area Density) η περιοχή πυκνότητας των φύλλων ($\frac{m^2}{m^3}$), U η ταχύτητα του ανέμου ($\frac{m}{s}$) και u_i οι διάφορες συνιστώσες της ταχύτητας ($\frac{m}{s}$).

Η τιμή του C_d σχετίζεται με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, με την τιμή να κυμαίνεται από 0,1 – 0.3 σε παρόμοιου τύπου μελέτες. [57].

Επιπλέον, η βλάστηση προκαλεί τροποποίηση στη μέση κίνηση ροής. Η διαδικασία συνήθως παραμετροποιείται ως επιπρόσθετοι όροι στο k και ε που αναπαριστούν τους όρους πηγής και καταβόθρας του k και ε από την βλάστηση.

Ο όρος S_k (kg/ms^3) αναφέρεται στην τυρβώδης κινητική ενέργεια

$$S_k = \rho C_d LAD (\beta_p U^3 - \beta_d U k) \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Όπου, β_p είναι το κλάσμα της μέσης κινητικής ενέργειας που μετατρέπεται σε τυρβώδης κινητική ενέργεια από την βλάστηση και λαμβάνει τιμές από 0–1. Το β_d είναι ο συντελεστής όπου λογαριάζει το “βραχυκύκλωμα των στροβίλων” από αλληλεπιδράσεις με τη βλάστηση και είναι αδιάστατο.

Ο όρος S_ε ($\frac{kg}{ms^4}$) που σχετίζεται με το ε , περιγράφει την ποσότητα της αναταραχής που διαλύεται λόγω της παρουσίας βλάστησης.

$$S_\varepsilon = \rho C_d LAD \left(C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{k} U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U \varepsilon \right) \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Όπου $C_{\varepsilon 4}$ και $C_{\varepsilon 5}$ είναι σταθερές μοντέλου.

5.5 Ψύξη από την εξατμισοδιαπνοή των δέντρων

Η βλάστηση εντός των οδικών φαραγγιών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη θερμική άνεση στο εσωτερικό της πόλης, καθώς αποτελεί παράγοντα του μετριασμού των υψηλών θερμοκρασιών. Η σωστή παραμετροποίηση της σκίασης των δέντρων και της εξατμισοδιαπνοής πρέπει να γίνει με σκοπό να επιτευχθούν τα σωστά θερμικά αποτελέσματα.

Η ψύξη από την αναπνευστικότητα της βλάστησης συμπεριλήφθηκε πρόσφατα σε θερμικές προσομοιώσεις CFD για την επίδραση της θερμοκρασίας. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της βλάστησης στη θερμοκρασία του αέρα, χρησιμοποιείται ο όρος της ογκομετρικής ισχύος ψύξης P_c (W/m^3) ανά μονάδα όγκου βλάστησης συναρτήσει του LAD. Μια άλλη προσέγγιση

για την προσομοίωση της αναπνευσσιμότητας της βλάστησης είναι αυτή της μικροκλίμακας που λαμβάνεται υπόψη η λανθάνουσα ροή θερμότητας στα φύλλα, σε αντίθεση με την μέθοδο όπου η ψύξη κατανέμεται σε ένα όγκο που περιέχει βλάστηση.

Η βασική ιδέα της προσέγγισης είναι ότι ο αέρας ο οποίος διέρχεται μέσα από τη βλάστηση ψύχεται με διαπνοή από της επιφάνειες των φύλλων. Η θερμότητα H (J) η οποία απαιτείται για την αλλαγή της θερμοκρασίας ενός αντικειμένου υπολογίζεται από τη σχέση

$$H = c_p m \Delta T$$

Όπου, c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\frac{J}{kgK}$), m η μάζα του σώματος σε Kg και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας σε K.

Δεδομένου ότι η ογκομετρική ισχύς ψύξης P_c νοείται ως μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα χρόνου (s) και μονάδα όγκου V (m^3), η τελευταία εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί στην εξής:

$$P_c = \frac{\dot{H}}{V} = \frac{c_p \dot{m} \Delta T}{V} \Leftrightarrow \Delta T = P_c V \frac{1}{c_p} \frac{1}{\dot{m}}$$

Όπου, \dot{H} ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (W) και \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας ($\frac{kg}{s}$). Το τελευταίο μέρος της εξίσωσης εκφράζει τη μεταβολή της θερμότητας όταν ο αέρας ρέει μέσα από την βλάστηση και είναι ανάλογο με τον όγκο και την ισχύ ψύξης, ενώ αντιστρόφως ανάλογο με την ροή μάζας αέρα και την ειδική θερμοχωρητικότητα. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες στο μοντέλο steady RANS βρέθηκε ότι η τιμή $P_c = 250W/m^3$ ανά μονάδα LAD παρουσιάζει μεγαλύτερη συμφωνία πειραματικής θερμοκρασίας αέρα σε διάφορες μελέτες. [14, 11]

Για τον ποσοτικό υπολογισμό του ωριαίου P_c χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις [62]

$$ET_{eq,h} = \frac{R_h}{\lambda \rho}$$

$$ETP = (0.0252T_t - 0.078)ET_{eq,h}$$

$$P_c = ETP \rho \lambda_{(w)} LAD$$

(Εξίσωσεις 10)

Όπου, $ET_{eq,h}$ ($\frac{m}{h}$) είναι η ισοδύναμη ωριαία εξατμισοδιαπνοή, R_h ($\frac{MJ}{m^2h}$) η εισερχομένη ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας, λ (MJ/kg) είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) η πυκνότητα του νερού, ETP ($\frac{m}{h}$) η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, T_t (°C) η θερμοκρασία του αέρα την χρονική στιγμή t , $\lambda_{(w)}$ η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης σε Watt και LAD ($\frac{m^2}{m^3}$) η περιοχή πυκνότητας των φύλλων.

5.6 Σκίαση από τα δέντρα

Η σκίαση που προκαλούν τα δέντρα στο επίπεδο του πεζού έχουν αδιαμφισβήτητα ένα θετικό αντίκτυπο στην θερμική άνεση κατά τις ημέρες με έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Η σκίαση των

δέντρων σε προσομοιώσεις CFD αναπαριστάτε ως μια έκφραση στην ηλιακή απορροφητικότητα της επιφάνειας του εδάφους που βρίσκεται κάτω από την “κορόνα” του δέντρου. Η αδιάστατη τιμή της ηλιακής απορροφητικότητας της σκιασμένης περιοχής (α_{shaded}) υπολογίζεται από τη σχέση [62]:

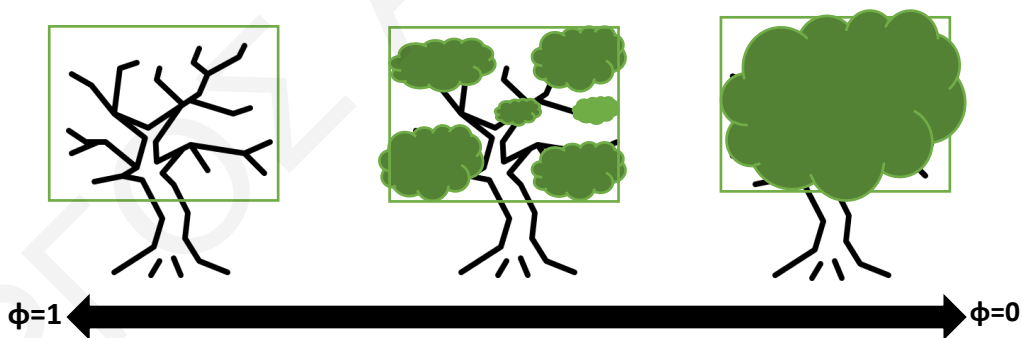
$$\alpha_{shaded} = \alpha_{open}(1 - SF) \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Όπου, α_{open} είναι η ηλιακή απορροφητικότητα της ίδιας επιφάνειας εάν δεν ήταν σκιασμένη από το δέντρο και SF (Shade Factor) είναι ο συντελεστής σκίασης του δέντρου. Το αδιάστατο SF ορίζει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάτε ή ανακλάτε από το δέντρο, ενώ η ποσότητα $(1 - SF)$ είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά το φύλλωμα του δέντρου. Η μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην σκιασμένη επιφάνεια του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη ηλιακή απορροφητικότητα του σημείου που είναι σκιασμένο.

5.7 Πορώδες Δέντρου

Το πορώδες (ϕ) ορίζεται ως το ποσοστό του κενού χώρου εντός του υλικού (Εικόνα 5.3). Είναι η αναλογία του όγκου των κενών (V_v) ως προς τον συνολικό όγκο (V_t). Συνήθως εκφράζεται είτε ως ποσοστό επί τις 100 είτε παίρνει τιμές από 0-1. Για να γίνει αντιληπτή η αντίσταση που προκαλεί η “κορόνα” του δέντρου στην προσομοίωση, αντιμετωπίζεται ως ένας όγκος ρευστού όπου υιοθετείται η πορώδης ζώνη. Η τιμή του πορώδους σχετίζεται με τον συντελεστή οπισθοτροχιάς C_d που προκαλείται από το δέντρο.

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} (x100)$$



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση του πορώδους ενός δέντρου. Αριθμητική τιμή ένα αντιστοιχεί σε δέντρο χωρίς φύλλωμα, ενώ αριθμητική τιμή μηδέν αντιστοιχεί σε δέντρο με πλήρες φύλλωμα

5.8 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση για την μοντελοποίηση της βλάστησης

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί συνοψίζονται οι τρέχουσες παραμετροποιήσεις που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν στα μοντέλα CFD για την επιρροή της βλάστησης στην ποιότητα του αέρα και τις θερμικές συνθήκες σύμφωνα με τους [57] σε μια πρόσφατη μελέτη ανασκόπησης. Όσον αφορά το C_d οι τιμές κυμαίνονται από 0.1-0.3 με τις περισσότερες μελέτες να ορίζουν την τιμή στο 0.2 σε μοντελοποίηση CFD αστικής βλάστησης, ούτως ώστε να

αντικατοπτρίζει μια μέση τιμή. Η τιμή του β_p η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0-1, σε όλες τις μελέτες ορίζεται ως 1, ενώ η τιμή του β_d σε πολλές από τις μελέτες ορίζεται ως 4.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία σε κάποιες από τις μελέτες όπως αυτή του [18], χρησιμοποιείται η τιμή της σταθεράς $\beta_p=1$ για να υπολογιστούν οι σταθερές β_d , $C_{\varepsilon 4}$ και $C_{\varepsilon 5}$ μέσα από τις σχέσεις:

$$\beta_d = C_{\mu}^{0.5} \left(\frac{2}{\alpha} \right)^{\frac{2}{3}} \beta_p + \frac{3}{\sigma_k} \quad \text{και} \quad C_{\varepsilon 4} = C_{\varepsilon 5} = \sigma_k \left(\frac{2}{\sigma_k} - \frac{C_{\mu}^{0.5}}{6} \left(\frac{2}{\alpha} \right)^{\frac{2}{3}} - C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1} \right)$$

33Έτσι, στις περισσότερες μελέτες η τιμή β_p είναι ίση με 1 ενώ οι τιμές των β_d , $C_{\varepsilon 4}$ και $C_{\varepsilon 5}$ κυμαίνονται μεταξύ 4-6.5, 0.9-2 και 0.9-1.8 αντίστοιχα. Οι τιμές του LAD βασίζονται στον τύπο της βλάστησης ενώ πολλές φορές σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η εποχή. Οι τιμές του LAD σε προσομοιώσεις CFD κυμαίνονται μεταξύ $0.1-4m^2/m^3$ ενώ η μέση τιμή κυμαίνεται κοντά στο $1m^2/m^3$. Λίγες είναι οι μελέτες όπου συμπεριλαμβάνουν την επιρροή της θερμοκρασίας στις προσομοιώσεις CFD. Στις ελάχιστες μελέτες που έχουν γίνει βρέθηκε ότι για την τιμή $P_c=250 W/m^3$ ανά μονάδα LAD υπάρχει η μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής θερμοκρασίας.

Άρθρο	Συντελεστής οπισθοτροχιάς	Σταθερές		Σταθερές		Περιοχή Πυκνότητας των Φύλλων	Ογκομετρική Ισχύς Ψύξης
Σύμβολο	C_d	β_p	β_d	$C_{\varepsilon 4}$	$C_{\varepsilon 5}$	LAD (m^2/m^3)	P_c (W/m^3)
[7]	0.2	1	4	1.5	0.4	1.6	-
[8]	0.2	1	5.1	0.9	0.9	0.5-1.5	-
[10]	-	1	3	1.5	1.5	2.3	-
[11]	0.2	1	5.1	0.9	0.9	0.5-2	250LAD
[12]	0.1-0.3	-	-	-	-	1.6-4	-
[13]	0.2	1	6.5	1.2 6	1.2 6	-	-
[14]	0.2	1	5.1	0.9	0.9	0.55-2	250LAD
[15]	0.25	1	4	1.5	1.5	1.6	-
[16]	0.2	1	5.1	0.9	0.9	1	-
[17]	0.2	1	4	-	-	-	-
[18]	0.2	1	6.5	1.2 6	1.2 6	0.1-0.5	-
[19]	0.2	1	4	1.5	1.5	1	-
[63]	-	1	6.51	1.5	0.4	-	-
[64]	0.1-0.3	1	4	0.9	0.9	-	-
[65]	0.3	1	4	1.5	0.6	-	-

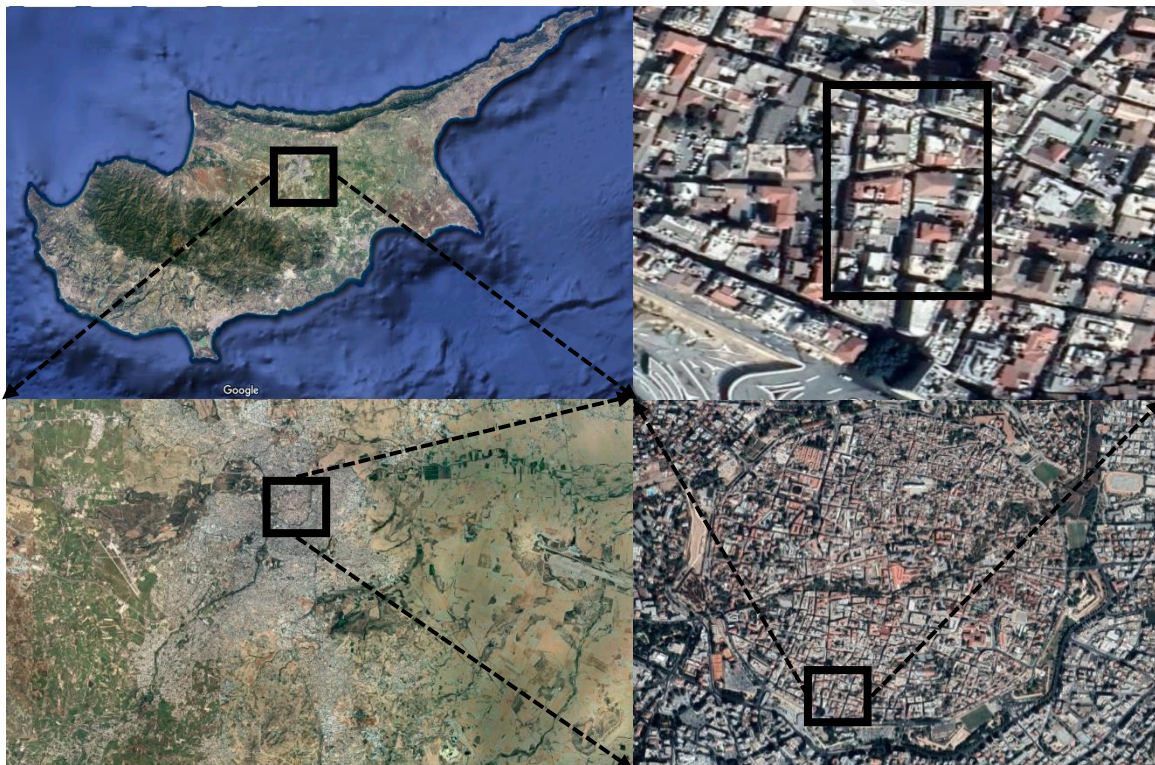
Πίνακας 5.1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση της βλάστησης (C_d , β_p , β_d , $C_{\varepsilon 4}$, $C_{\varepsilon 5}$ LAD, P_c) από διάφορες πρόσφατες μελέτες στο μοντέλο CFD.

Κεφάλαιο 6

Περιοχή Μελέτης

6.1 Περιοχή Μελέτης

Η Κύπρος είναι μια νησιωτική χώρα στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο η οποία χαρακτηρίζεται ως μια ευαίσθητη περιοχή με πολυδιάστατες και πολυκλιμακωτές επιρροές από φυσικά φαινόμενα (π.χ. επεισόδια σκόνης) τα οποία ασκούν σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα του αέρα του νησιού [66]. Η παλιά πόλη της Λευκωσίας οριοθετείται από τα Ενετικά τείχη. Αυτή η γειτονιά χαρακτηρίζεται από στενά φαράγγια αλλά περιέχει και κάποια πιο σύγχρονα κτήρια αλλά και κάποιες μεγάλες πλατείες.



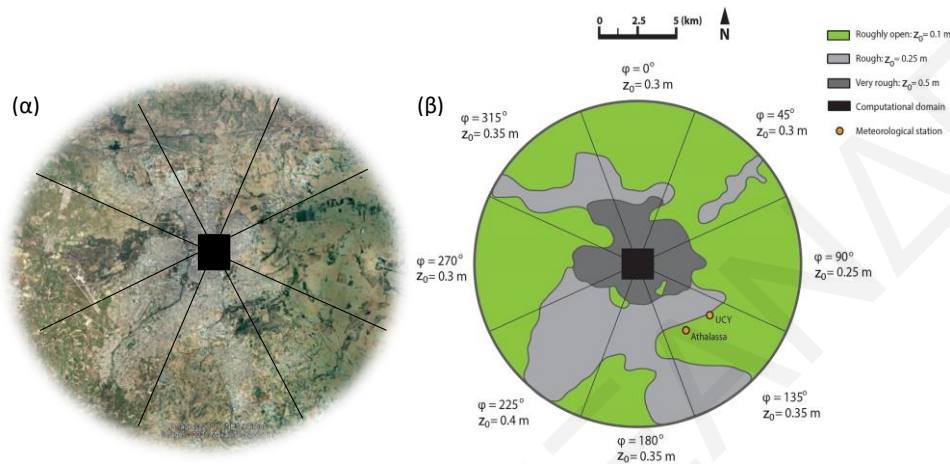
Εικόνα 6.18: Εικόνες από την περιοχή μελέτης (Google Maps). (α) Κύπρος, (β) Λευκωσία, (γ) Ιστορικό κέντρο Λευκωσίας και (δ) Περιοχή μελέτης (Λήδρας).

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο ιστορικό τμήμα της Λευκωσίας, που χαρακτηρίζεται σαν ένα τυπικό κέντρο μιας ανατολικής Μεσογειακής πόλης. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από χαμηλά και μεσαία κτίρια που αντιστοιχούν στην Τοπική Κλιματική Ζώνη 3 (συμπαγή χαμηλά κτίρια) με βάση την ταξινόμηση [67]. Στην περιοχή το μέσο ύψος κτηρίων είναι τα 8,1m ενώ το ψηλότερο κτήριο είναι ο πύργος Shakolas με ύψος 45,5m. Το λ_p για την περιοχή είναι ίσο με 0,4. Ο λόγος του W/H κυμαίνεται από 0,5-1 με το πλάτος των δρόμων να είναι από 6m έως 10m. Τα υλικά δόμησης από τα οποία αποτελείται η περιοχή είναι κυρίως από σκυρόδεμα και τούβλα, ενώ η βλάστηση στην περιοχή είναι χαμηλή με την παρουσία κάποιων δέντρων [5]. Γενικά στην περιοχή κατά την θερινή περίοδο κυριαρχούν αδύναμοι ανατολικοί άνεμοι τα

βράδια (00:00-00:60) και πολύ ισχυρότεροι δυτικοί άνεμοι κατά τη διάρκεια της ημέρας (09:00-18:00) [68].

6.2 Επιφάνεια Εδάφους

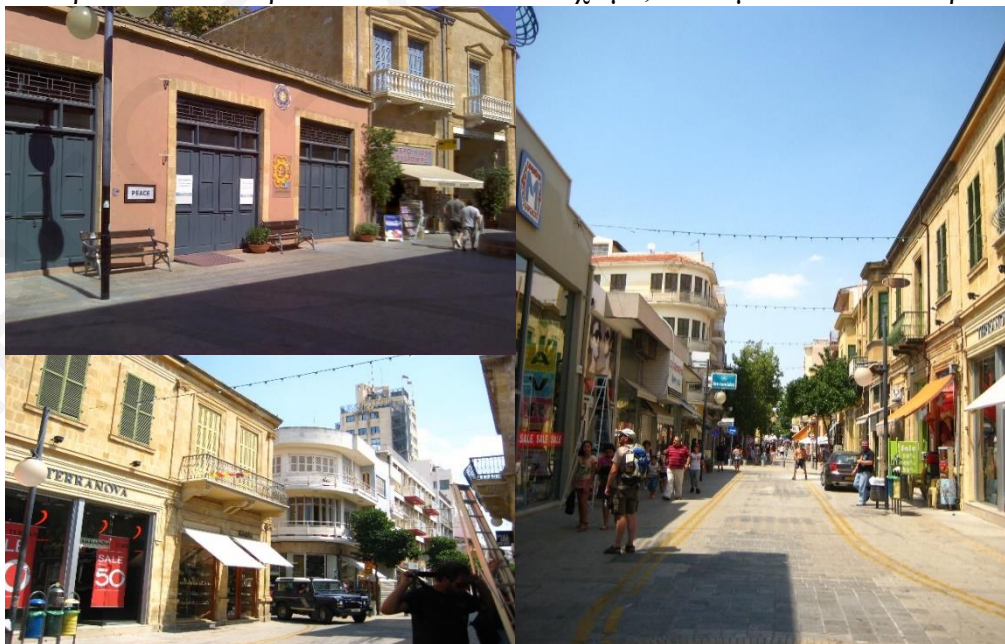
Στην Εικόνα 6.2 που ακολουθεί εμφανίζεται ο επιφανειακός χάρτης της ευρύτερης περιοχής ο οποίος διαχωρίζεται σε 7 τμήματα ανά 45 μοίρες. Κάθε τμήμα χαρακτηρίζεται από μια τιμή z_0 η οποία αντιπροσωπεύει το είδος της επιφάνειας του εδάφους του κάθε τμήματος. Στο κέντρο του χάρτη εμφανίζεται η περιοχή μελέτης.



Εικόνα 19: Διαχωρισμός της επιφάνειας του εδάφους σε 7 τμήματα βάσει των μορφολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους για την περιοχή μελέτης. (α) πραγματική εικόνα περιοχής (β) εικονογραφημένη περιοχή [5].

6.3 Δομικά Υλικά

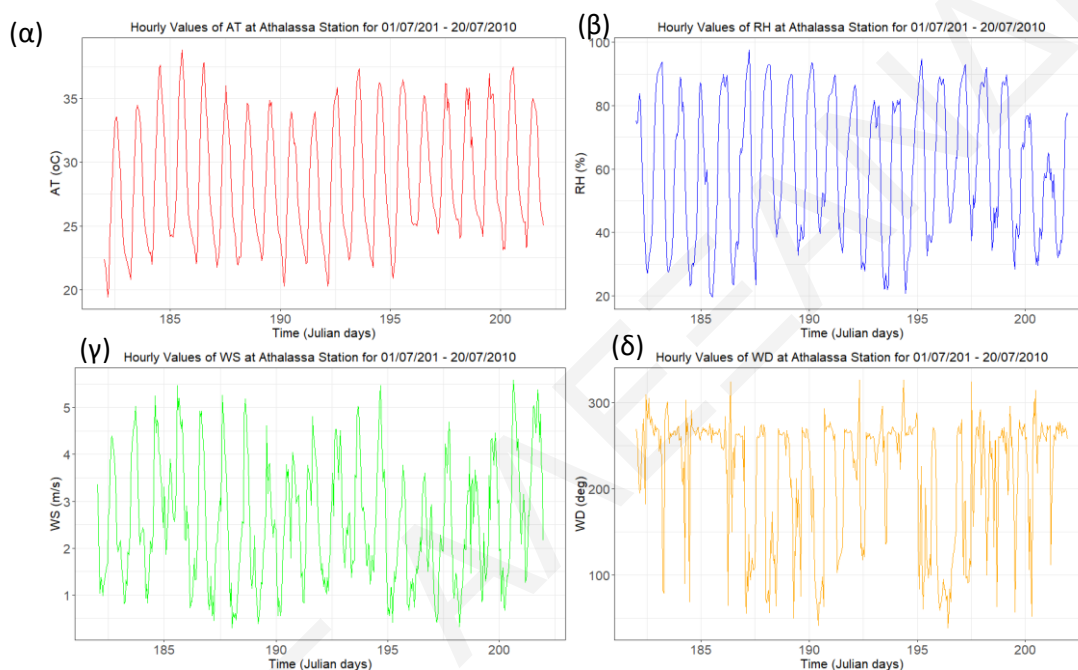
Ένας σημαντικός θερμικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία εντός των οδικών φαραγγίων είναι τα υλικά από τα οποία αποτελείται. Η περιοχή μελέτης αποτελείται κυρίως από τρία υλικά. Τα τρία αυτά υλικά είναι το χώμα, το τσιμέντο και το τούβλο. [5]



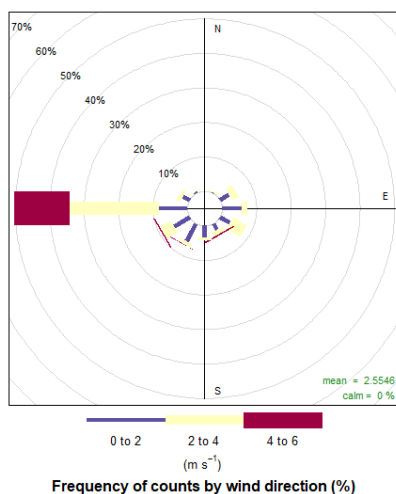
Εικόνα 20: Φωτογραφίες από την περιοχή μελέτης που παρουσιάζουν τα υλικά από τα οποία είναι δομημένη η περιοχή.

6.4 Καιρικές Συνθήκες

Η Λευκωσία διαθέτει ένα τυπικό μεσογειακό κλίμα, με ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και υγρούς χειμώνες, τα οποία διαχωρίζονται από μικρής διάρκειας Φθινόπωρο και Άνοιξη. Η περίοδος μελέτης αφορά την ημερομηνία στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις πεδίου (15 Ιουλίου 2010). Στην Εικόνα 6.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (AT), της σχετικής υγρασίας (RH), της έντασης και διεύθυνσης του ανέμου (WS,WD) που συλλέχθηκαν από το σταθμό Αθαλάσσας ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 5km από την περιοχή μελέτης. Οι ημερομηνίες αφορούν από την 01/07/2010 μέχρι τις 20/07/2010 όπου συμπεριλαμβάνουν την περίοδο μελέτης. Επιπλέον στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζεται το ροδόγραμμα της περιοχής για τις ίδιες ημερομηνίες με τους Δυτικούς ανέμους να είναι οι επικρατέστεροι για την περιοχή στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 21: Μέσες ωριαίες τιμές της (α) θερμοκρασίας περιβάλλοντος (AT), (β) σχετικής υγρασίας (RH), (γ) έντασης και (δ) διεύθυνσης του ανέμου (WS,WD) που συλλέχθηκαν από το σταθμό Αθαλάσσας από την 01/07/2010 μέχρι τις 20/07/2010



Εικόνα 22: Ροδόγραμμα από το σταθμό Αθαλάσσας από τις 01/07/2010 μέχρι τις 20/07/2010

Κεφάλαιο 7

Case Study: Ledras CFD modeling setup

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια περιγραφή των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της Λήδρας. Περιγράφονται οι οριακές συνθήκες για το προφίλ εισόδου και εξόδου, για τις επιφάνειες τοίχου και εδάφους, καθώς επίσης και οι συνθήκες όπου παραμετροποιούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη βλάστηση.

7.1 Γεωμετρία

7.1.1 Υπολογιστικός Τομέας

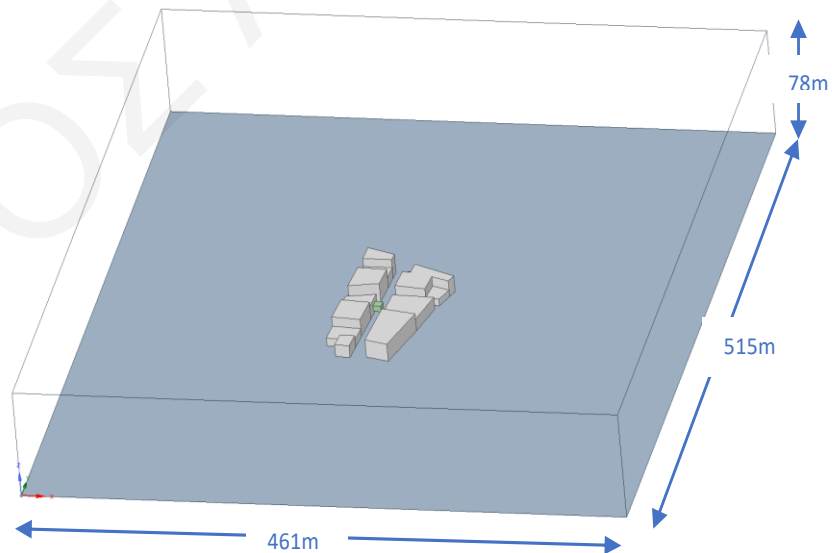
Η γεωμετρία αποτελείται από ένα μικρό κομμάτι του δρόμου της Λήδρας. Τα όρια της περιοχής μελέτης είναι εντός της κόκκινης συνεχόμενης γραμμής, ενώ ο δρόμος αναπαρίσταται με πορτοκαλί διακεκομμένη γραμμή. Με πράσινο αναπαρίσταται το σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο. Το ύψος των κτηρίων κυμαίνονται από 5m έως 15m. Το πλάτος και το μήκος του δρόμου της Λήδρας υπολογίζεται να είναι περίπου στα 12m και 110m αντίστοιχα. Ο υπολογιστικός τομέας έχει πλάτος μήκος και ύψος 461x515x78m.



(β)



Εικόνα 23: Στην εικόνα (α) κάτοψη και (β) πλάγια όψη, παρουσιάζονται τα όρια της περιοχής μελέτης από πραγματικές εικόνες της περιοχής. Με κόκκινο παρουσιάζονται τα όρια, με κίτρινο απεικονίζεται ο δρόμος της Λήδρας και με πράσινο το σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο.



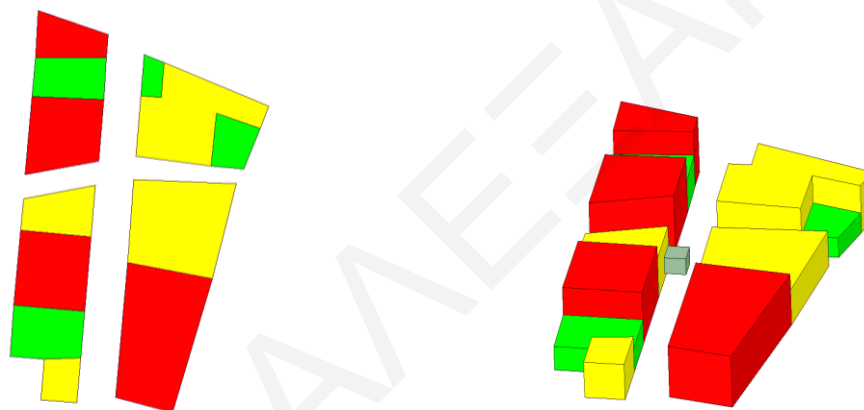
Εικόνα 24: Στην εικόνα παρουσιάζεται ο υπολογιστικός τομέας. Στο εσωτερικό του βρίσκεται η τριών διαστάσεων απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Ο υπολογιστικός τομέας έχει διαστάσεις 461x515x78m.

7.1.2 Κτήρια

Η γεωμετρία αποτελείται συνολικά από 12 μπλοκ κτηρίων τα οποία έχουν υψομετρικές διαφορές βασισμένες στην πραγματική γεωμετρία. Με σκοπό να γίνει ο υψομετρικός διαχωρισμός των κτηρίων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.3 που ακολουθεί η κατηγοριοποίηση των κτηρίων σε τρεις υψομετρικές κατηγορίες. Η πρώτη αποτελεί τα χαμηλά κτήρια όπου το ύψος κυμαίνεται από 5-8m (Πράσινο χρώμα), στα μέτρου ύψους κτήρια με ύψος από 9m-12m (κίτρινο) και στα ψηλά κτήρια με ύψος 13-15m (κόκκινο χρώμα).

Ύψος Κτηρίων εντός του υπολογιστικού τομέα			
Ύψος	5-8m	9-12m	13-15m
Αριθμός κτηρίων	4	4	4

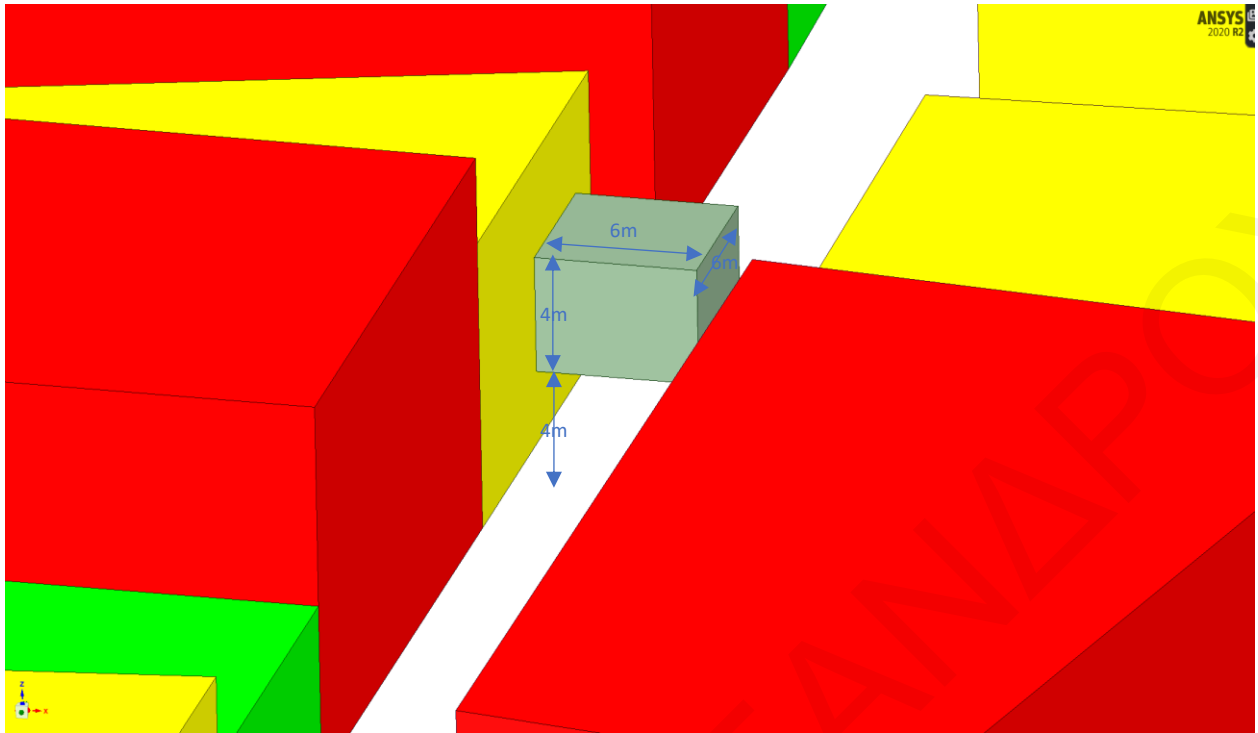
Πίνακας 7.1: Πίνακας με τον διαχωρισμό των κτηρίων σε τρεις κατηγορίες βάσει το ύψος τους.



Εικόνα 25: Στην εικόνα παρουσιάζεται η 3D απεικόνιση της γεωμετρίας διαχωρισμένη σε κατηγορίες κτηρίων βάσει το ύψος. Με πράσινο παρουσιάζονται τα κτήρια με ύψος 5-8m, με κίτρινο τα κτήρια με 9-12m, ενώ με κόκκινο τα κτήρια που έχουν ύψος 12-15m.

7.1.3 Βλάστηση

Το δέντρο αναπαρίσταται εντός της γεωμετρίας ως ένα κυβοειδές σχήμα με μήκος πλάτος και ύψος 6x6x4m το οποίο αντιπροσωπεύει την “κορόνα” του δέντρου (βλάστηση). Ο κύβος βρίσκεται σε ύψος 4m από την επιφάνεια του εδάφους. Ο κορμός του δέντρου δεν παρουσιάζεται εντός του υπολογιστικού τομέα καθώς θεωρείτε πως η επιρροή του είναι αμελητέα.



Εικόνα 26: Απεικόνιση του δέντρου (“κορώνα”) εντός του υπολογιστικού τομέα. Το δέντρο έχει διαστάσεις $6\text{m} \times 4\text{m}$ και βρίσκεται σε απόσταση 4m από την επιφάνεια του εδάφους

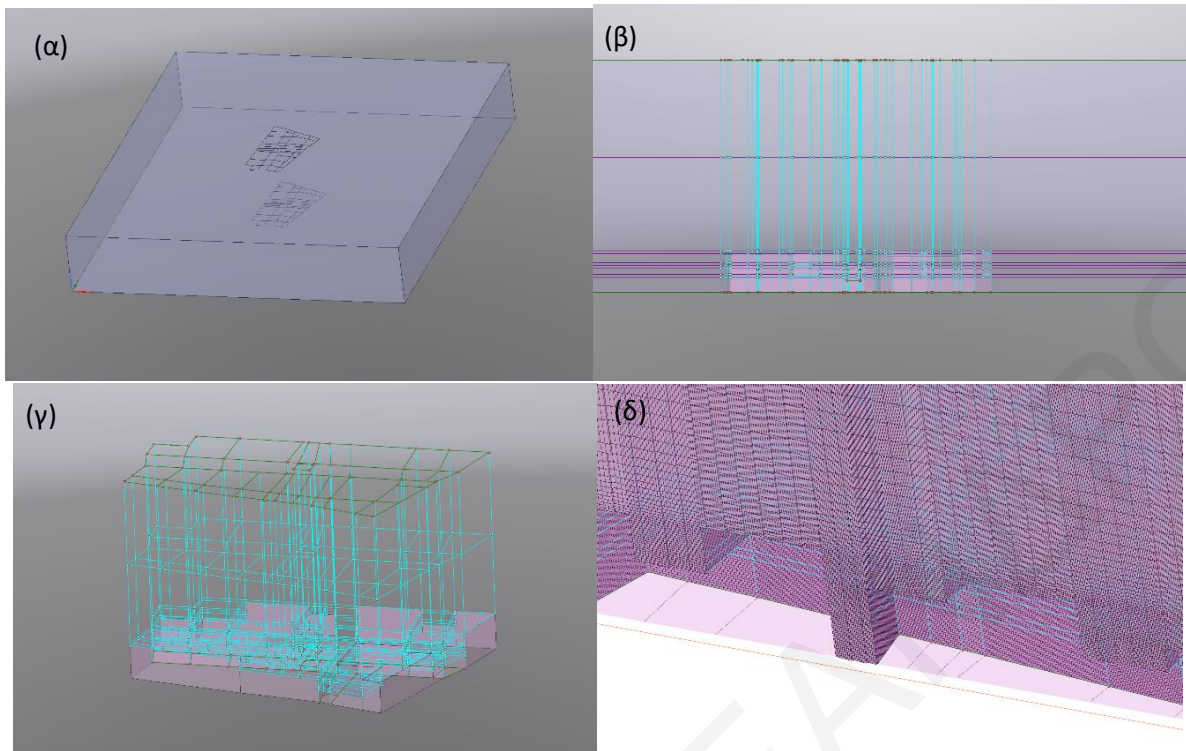
7.2 Computational Grid

Για την κατασκευή του πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά SPACECLAIM για το εξαεδρικό πλέγμα και του ANSYS Fluent Meshing για το πολυεδρικό πλέγμα.

7.2.1 Δημιουργία Εξαεδρικό πλέγμα

Η μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του εξαεδρικού πλέγματος βασίζεται στην δημιουργία μπλοκ και είναι η εξής:

1. Προβολή των επιφανειών του κτηρίου στην πάνω και κάτω επιφάνεια του τομέα (Εικόνα 7.5α)
2. Δημιουργία των μπλοκ χρησιμοποιώντας ως βάση τις προβολές της κάτω επιφάνειας του τομέα και ως κορυφές τις προβολές της πάνω επιφάνειας του τομέα.
3. Δημιουργία τομών καθ' ύψος του τομέα στο επίπεδο των κορυφών των κτηρίων ούτως ώστε να δημιουργηθούν μπλοκ μέσα στο εσωτερικό των κτηρίων. (Εικόνα 7.5β)
4. Αφαιρέθηκαν τα μπλοκ στο εσωτερικό των κτηρίων ούτως ώστε να είναι κενός χώρος χωρίς πλέγμα. (Εικόνα 7.5γ)
5. Προσαρμογή στο μέγεθος των κελιών στις γωνίες των κτηρίων. (Εικόνα 7.5δ)



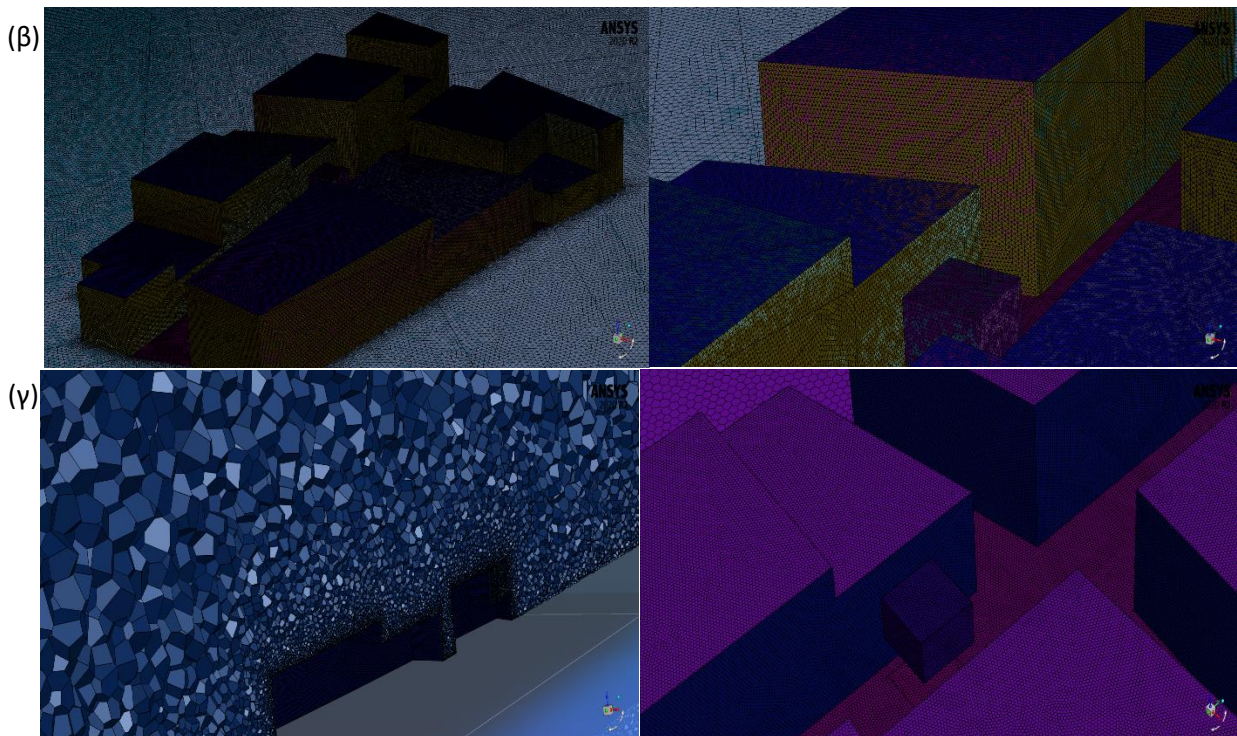
Εικόνα 27: Διαδικασία δημιουργίας εξαεδρικού πλέγματος με την χρήση του λογισμικού SPACECLAIM, (α) προβολή επιφανειών, (β) δημιουργία μπλοκ, (γ) αφαίρεση των μπλοκ στο εσωτερικό των κτηρίων, (δ) προσαρμογή στο μέγεθος των κελίων.

7.2.2 Δημιουργία Πολυεδρικό Πλέγμα

Η διαδικασία με την οποία δημιουργείται το πολυεδρικό πλέγμα είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και απαιτεί τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός των επιφανειών.
2. Καθορισμός του τοπικού μεγέθους των κελίων στις επιφάνειες. (Εικόνα 7.6α)
3. Δημιουργία επιφανειακού τετραεδρικού πλέγματος. (Εικόνα 7.6β)
4. Περιγραφή του είδους της γεωμετρίας και το είδος των οριακών συνθηκών.
5. Δημιουργία Πολυεδρικού πλέγματος με βάση τα προηγούμενα. (Εικόνα 7.6γ)



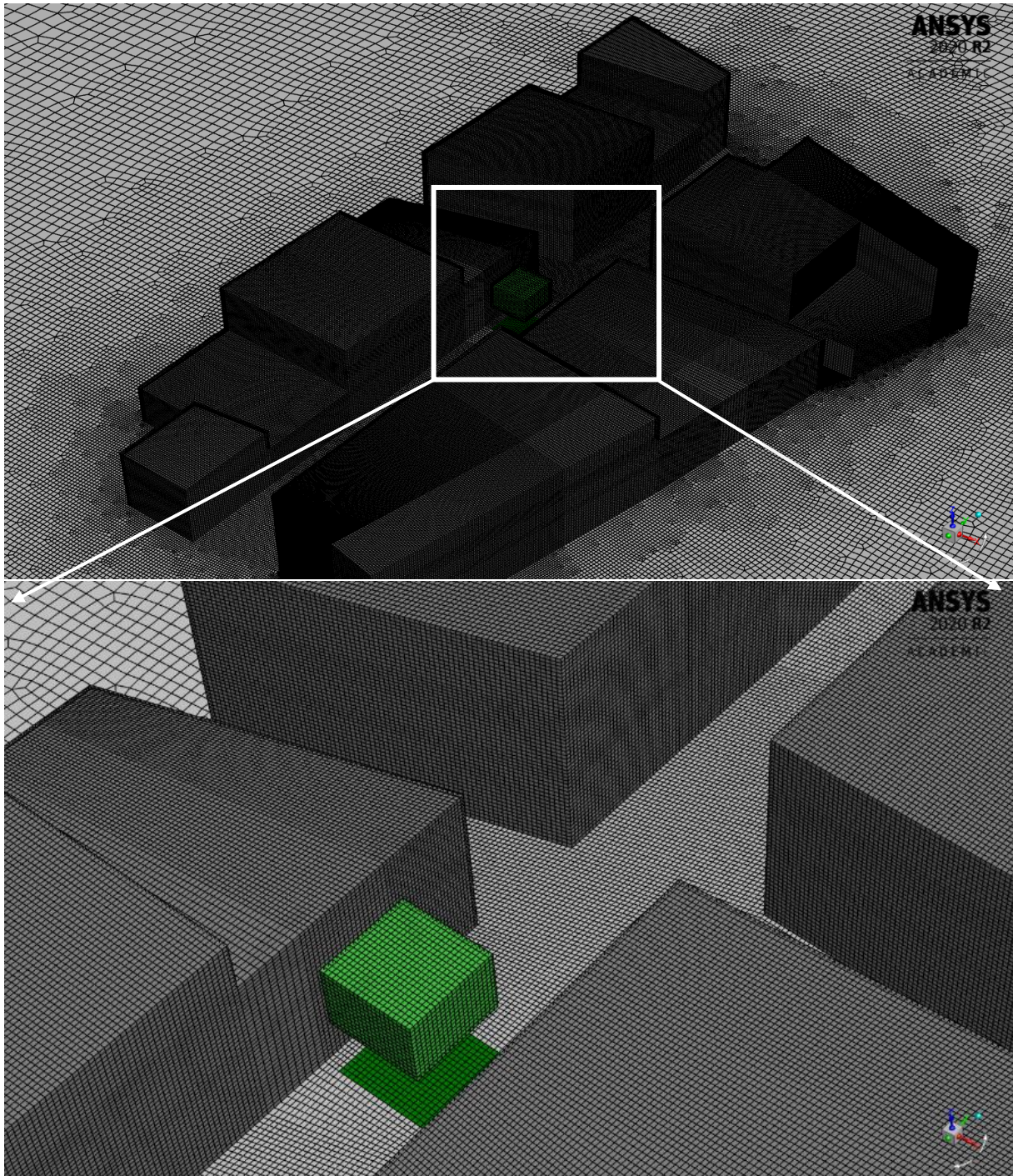


Εικόνα 28: Διαδικασία δημιουργίας πολυεδρικού πλέγματος με την χρήση του λογισμικού ANSYS FLUENT MESHING, (α) καθορισμός του τοπικού μεγέθους των κελίων, (β) δημιουργία επιφανειακού τετραεδρικού πλέγματος, (γ) μετατροπή του τετραεδρικού πλέγματος σε πολυεδρικό πλέγμα

Το πλέγμα για την γεωμετρία δημιουργήθηκε βάση του υποκεφαλαίου 7.2.1. Ο συνολικός όγκος της γεωμετρίας είναι $1.85 \times 10^7 m^3$ οποίος αποτελείται από 12 467 074 εξαεδρικά κελιά. Το πλέγμα έχει ελάχιστη ποιότητα ορθογωνιότητας ίση με 0.68 το οποίο χαρακτηρίζεται ως καλής ποιότητας πλέγμα, με την τιμή 1 να αποτελεί τον τέλειο κύβο. Κοντά στη περιοχή μελέτης όπως το δέντρο τα οδικά φαράγγια και τις επιφάνειες των κτηρίων τα κελιά έχουν μέγεθος κοντά στα 0.3m ενώ μακριά από την περιοχή αυτή τα κελιά φτάνουν μέχρι και το μήκος των 5m. Κάθε κτήριο αποτελείται με περισσότερα από 10 κελιά στο πλάτος μήκος και ύψος, που θεωρείται το ελάχιστο επιτρεπτό σύμφωνα με τους [69]. Σε αυτή την εργασία δεν θα γίνει χρήση του πολυεδρικού πλέγματος, αλλά αποτελεί ένα μελλοντικό βήμα για την μελέτη της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και του υπολογιστικού χρόνου που μπορεί να εξοικονομεί ένα τέτοιου είδους πλέγμα.

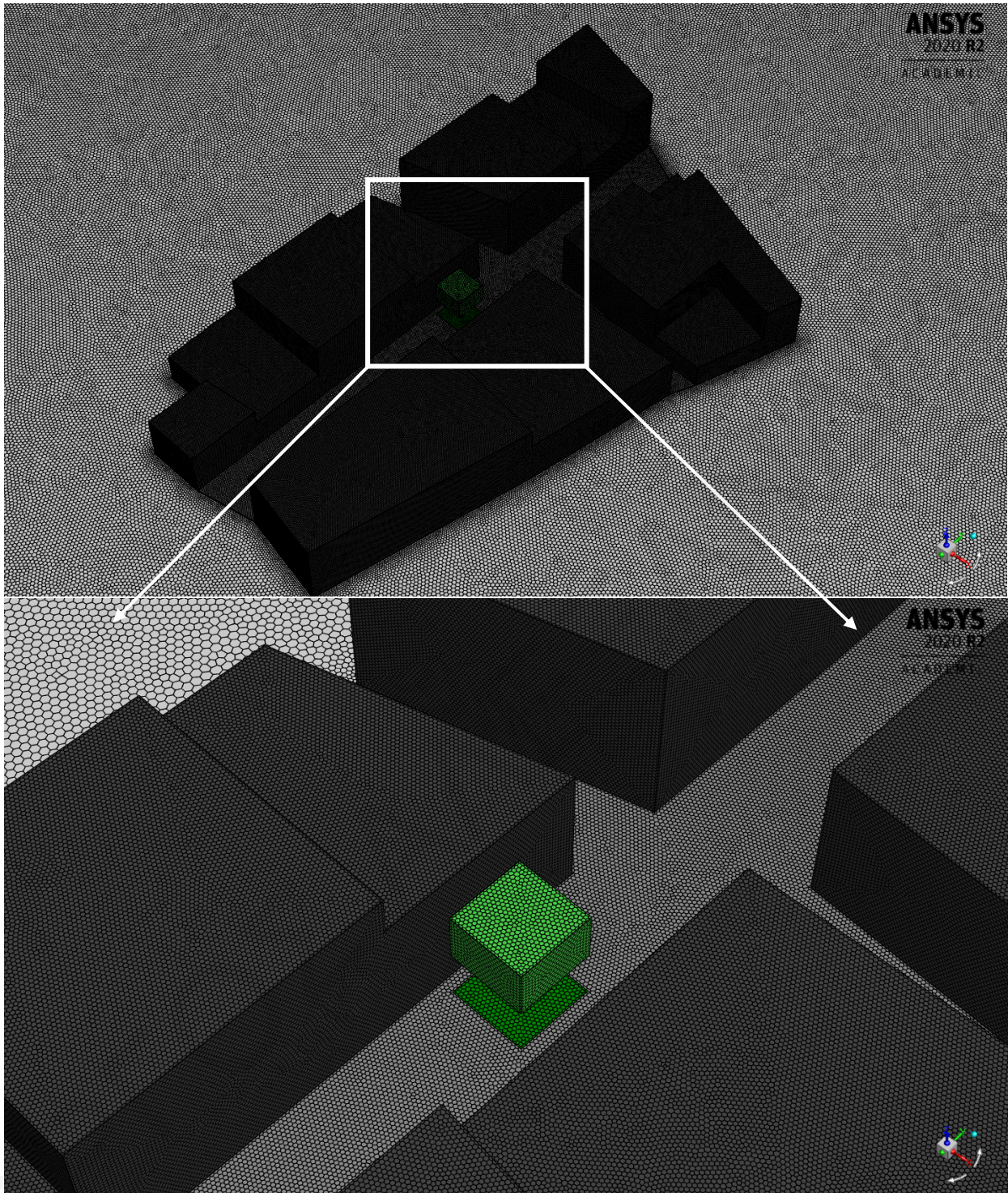
7.2.3 Πλέγμα

Το εξαεδρικό πλέγμα δημιουργήθηκε μέσω του ANSYS SPACECLAIM και αποτελείται από 12 467 074 εξαεδρικά καλής ποιότητας κελιά. Το πλέγμα κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος (κτήρια και οδικά φαράγγια και δέντρο) είναι πλήρως δομημένο. Οι επιφάνειες των κτηρίων έχουν μέγεθος κελιών κοντά στα 0,3m ενώ μακριά από τα κτήρια το μέγεθος των κελιών φτάνει μέχρι τα 5m.

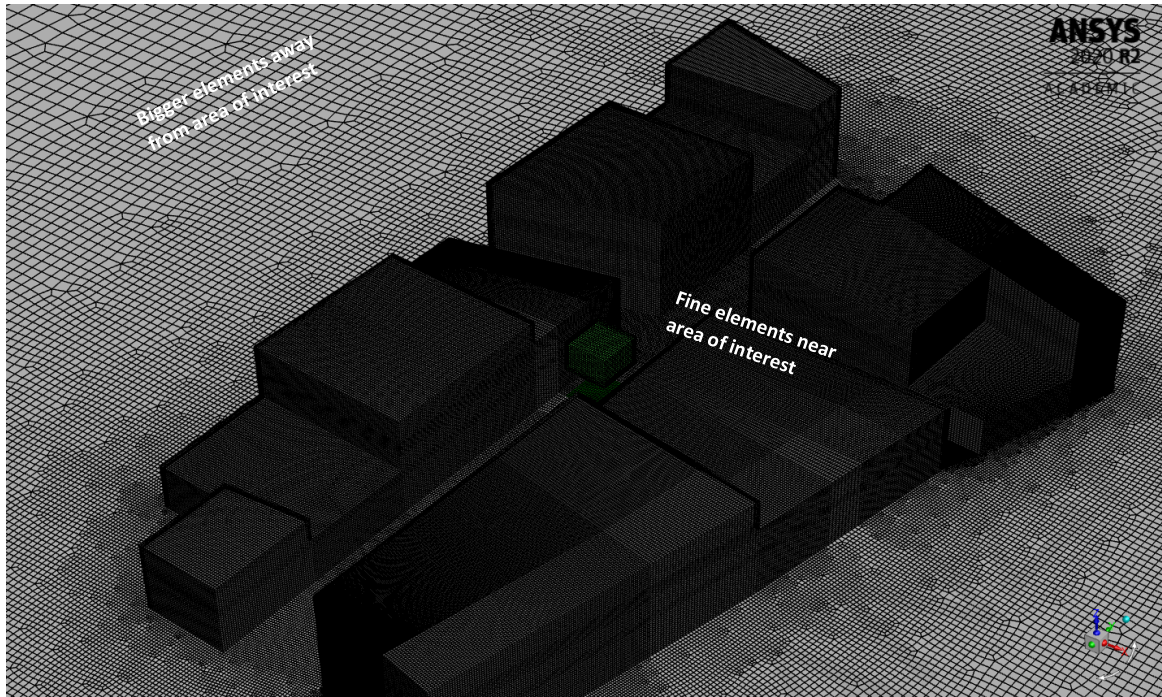


Εικόνα 29: Εξαεδρικό πλέγμα αποτελούμενο από 12 εκατομμύρια εξαεδρικά κελιά μέσω του ANSYS SpaceClaim

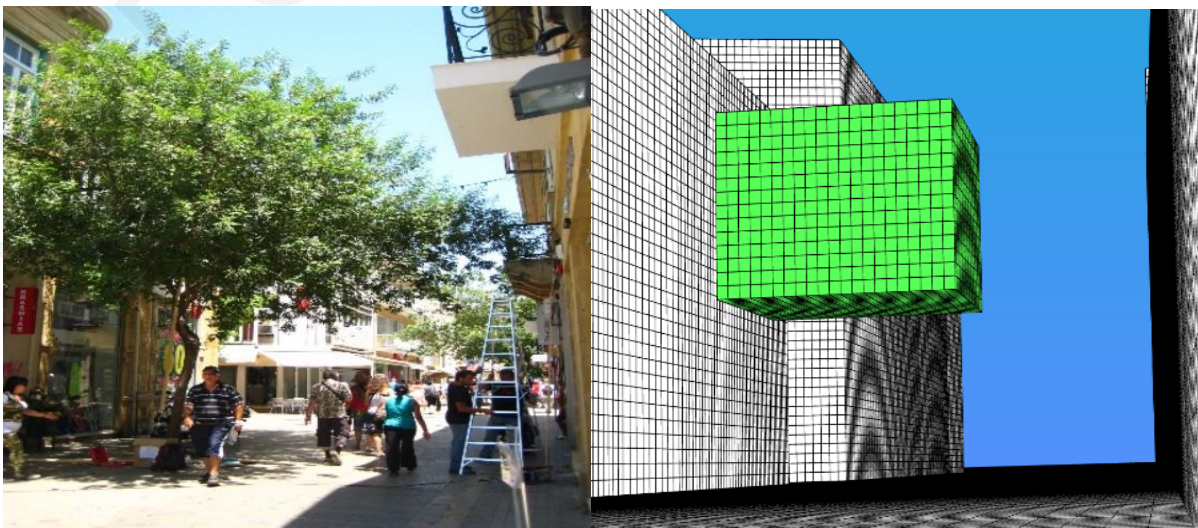
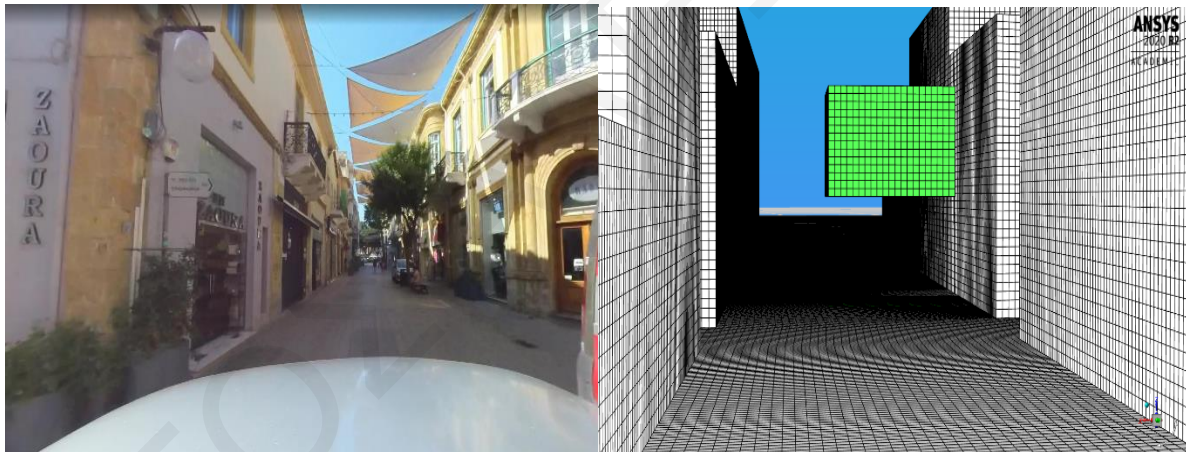
Το πολυεδρικό πλέγμα δημιουργήθηκε στο ANSYS Fluent Meshing και αποτελείται από 5 191 175 πολυεδρικά κελιά. Το μέγεθος των κελίων κοντά στις περιοχές μελέτης (κτίρια, δρόμοι, δέντρα) είναι στα 0,3 ενώ το μέγιστο μέγεθος των κελίων μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος φτάνει τα 5m.

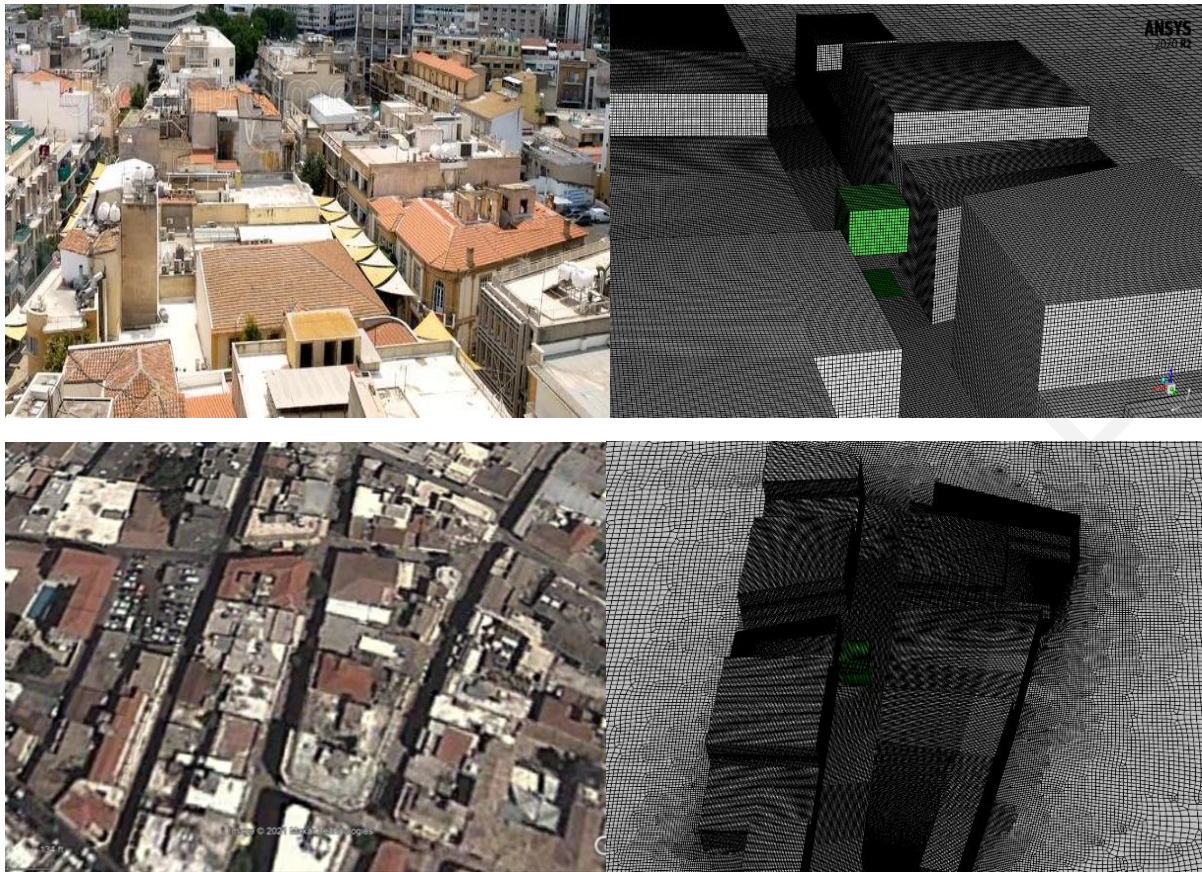


Εικόνα 30: Πολυεδρικό πλέγμα αποτελούμενο από 5.2 εκατομμύρια πολυεδρικά κελιά μέσω του ANSYS Fluent Meshing



Εικόνα 31: Στην εικόνα παρουσιάζεται το πλέγμα του υπολογιστικού τομέα. Κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος τα κελιά έχουν μικρότερο μέγεθος ενώ μακριά από αυτή το μέγεθος των κελίων αυξάνεται σταδιακά.





Εικόνα 32: Στο αριστερό μέρος των εικόνων παρουσιάζονται οι πραγματικές εικόνες της περιοχής μελέτης, ενώ στο δεξί μέρος των εικόνων παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες με το πλέγμα της γεωμετρίας.

7.3 Οριακές Συνθήκες

Η περίοδος μελέτης αφορά τις 15 Ιουλίου 2010 όπου έγιναν οι μετρήσεις πεδίου στην περιοχή κάτω από το έργο TOPEUM. Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του εθνικού μετεωρολογικού σταθμού Αθαλάσσας ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση 5km από την περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου (WS, WD) και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (AT).

7.3.1 Είσοδος Υπολογιστικού Τομέα (Inlet)

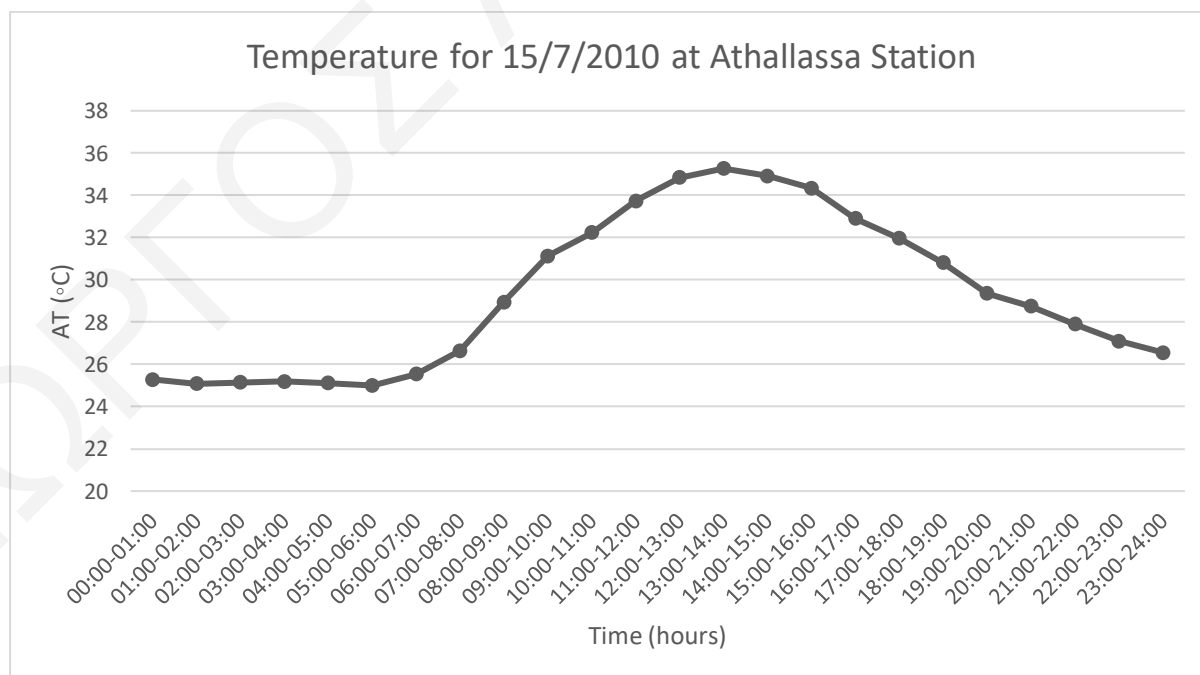
Για την είσοδο του υπολογιστικού τομέα είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν οι πραγματικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Έτσι, τα δεδομένα συλλέχτηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας που βρίσκεται σε απόσταση 5km από την περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα για την δυναμική της ατμόσφαιρας που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την διεύθυνση και ένταση του ανέμου. Τα δεδομένα για τις 15 Ιουλίου 2010 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2, και αναπαρίστανται γραφικά στις Εικόνες 7.11 – 7.14.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 7.2 και από τα διαγράμματα που ακολουθούν για τις 15/07/2010 στην περιοχή της Λευκωσίας εμφανίζονται θερμοκρασίες από 25-35°C. Οι άνεμοι έχουν ένταση 0.7-3.6m/s και διεύθυνση βορειοανατολική - νοτιοανατολική ενώ το βράδυ στρέφεται σε δυτική. Σύμφωνα με το ροδόγραμμα μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης έχουν οι ανατολικοί

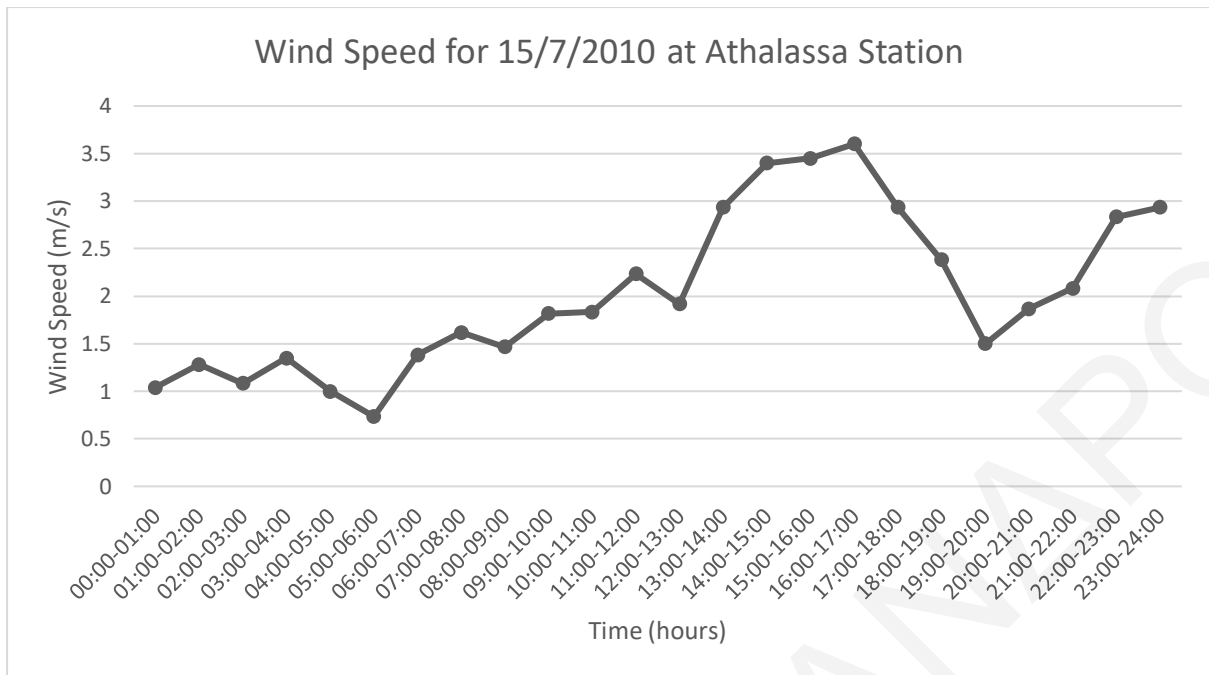
και βορειοανατολικοί άνεμοι με ποσοστό 60% και ταχύτητες 1-2m/s, ενώ το βράδυ κυριαρχούν Δυτικοί άνεμοι με ταχύτητα 2-3m/s.

Οριακές Συνθήκες Εισόδου ανά ώρα για τις 15/07/2010				
Ωρα	Διεύθυνση X του ανέμου	Διεύθυνση Y του ανέμου	AT(°C)	U _{ref} (m/s)
00:00	-0,94	-0,33	25,3	0,322
01:00	-0,85	-0,51	25,1	0,398
02:00	-0,91	-0,39	25,2	0,336
03:00	-0,93	-0,34	25,2	0,418
04:00	-0,98	-0,15	25,1	0,310
05:00	-0,99	0,07	25	0,227
06:00	-0,99	-0,13	25,5	0,429
07:00	-0,99	-0,11	26,7	0,501
08:00	-0,93	-0,34	29	0,455
09:00	-0,96	-0,24	31,1	0,563
10:00	-0,62	-0,78	32,2	0,568
11:00	-0,86	-0,50	33,7	0,692
12:00	-0,99	-0,11	34,8	0,594
13:00	-0,93	-0,36	35,3	0,909
14:00	-0,96	0,25	34,9	1,054
15:00	-0,89	0,45	34,3	1,069
16:00	-0,83	0,55	32,9	1,116
17:00	-0,75	0,65	32	0,909
18:00	-0,62	0,78	30,8	0,739
19:00	-0,45	0,88	29,4	0,465
20:00	0,98	0,17	28,8	0,579
21:00	0,99	0,01	27,9	0,646
22:00	0,99	-0,04	27,1	0,878
23:00	0,99	0,10	26,6	0,909

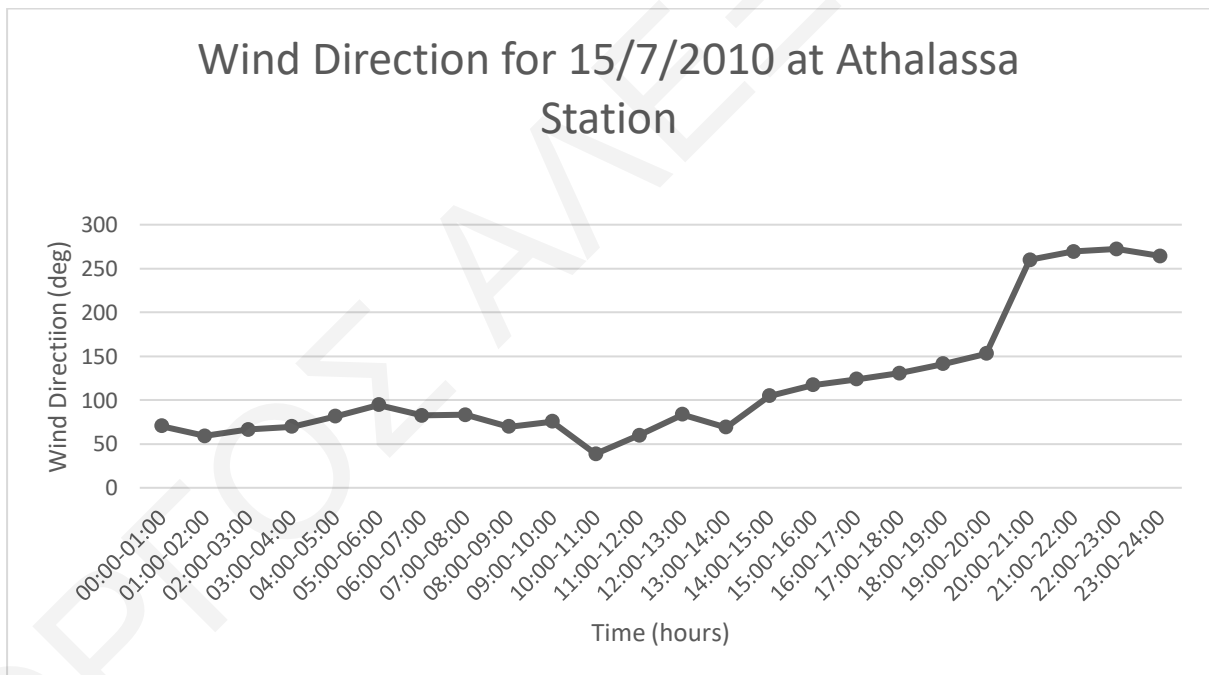
Πίνακας 7.2: Πίνακας με τις μέσες ωριαίες τιμές που καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσης για τις 15/07/2010. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες εισόδου για την προσομοίωση.



Εικόνα 33: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσης για τις 15/07/2010.

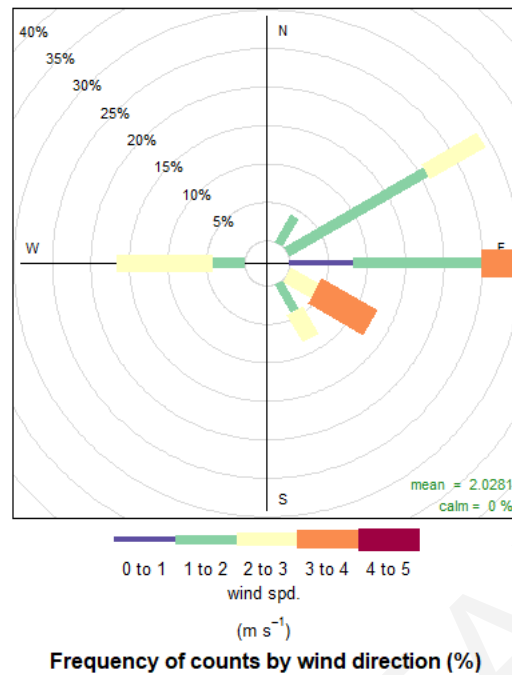


Εικόνα 34: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.



Εικόνα 35: Διάγραμμα με τις μέσες ωριαίες τιμές της διεύθυνσης του ανέμου περιβάλλοντος όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.

Windrose for Athalassas Station at 15/07/2010



Εικόνα 36: Ροδόγραμμα ανέμου από τον σταθμό Αθαλάσσας για τις 15/07/2010.

Επιπλέον για την είσοδο του υπολογιστικού τομέα, το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου καθώς επίσης το k και το ε πρέπει να καθοριστούν. Αυτό γίνεται μέσω αρχείων “user defined functions” (UDF) όπου γίνεται χρήση των εξισώσεων για κάθε χρονικό βήμα:

$$U(y) = \frac{U_{ABL}}{k} \ln\left(\frac{z+z_0}{z}\right) \quad k = \frac{U_{ABL}^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon(z) = \frac{U_{ABL}^3}{k(z+z_0)}$$

Για τον καθορισμό της τραχύτητας εδάφους z_0 χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που συζητήθηκαν στο υποκεφάλαιο 6.2.

7.3.2 Έδαφος

Το ύψος τραχύτητας (k_s) διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς του τομέα. Η τιμή του k_s υπολογίζεται με τη βοήθεια του z_0 και της σταθεράς τραχύτητας C_s μέσω της σχέσης που ακολουθεί. Αυτή η παράμετρος είναι μια αντιπροσωπευτική απόσταση από τον τοίχο. Επομένως, μια τιμή 0 έχει ως αποτέλεσμα λείες επιφάνειες.

$$k_s = \frac{9.793 z_0}{C_s}$$

7.4 Μοντέλο Ρευστότητας

Στην παρούσα μελέτη έγινε χρήση του μοντέλου Unsteady RANS (URANS) το οποίο έχει μεγάλη υπολογιστική δύναμη ενώ επιπλέον έχει το σημαντικό πλεονέκτημα του μειωμένου υπολογιστικού χρόνου. Επιπλέον το μοντέλο realizable k-ε με τα standard Wall Functions χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο τυρβώδους ροής.

Viscous Model	
Model	k-epsilon (2 eqn)
k-ε model	Realizable
Near wall Treatment	Standard Wall Functions
C_{mu}	0.09
C_{1ε}	1.44
C_{2ε}	1,92
TKE Prandtl Number	1
TDR Prandtl Number	1.3
Energy Prandtl Number	0.85
Wall Prandtl Number	0.85

Πίνακας 7.3: Δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου ρευστότητας στο Ansys Fluent

7.5 Μοντέλο Ηλιακής Ακτινοβολίας

Με σκοπό την ρεαλιστική προσομοίωση της επιρροής της ηλιακής ακτινοβολίας στην θερμοκρασία μέσα στον υπολογιστικό τομέα γίνεται χρήση του μοντέλου ακτινοβολίας P1. Το μοντέλο έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει την πραγματική γεωγραφική θέση της υπό μελέτη περιοχής καθώς επίσης και την ημερομηνία και ώρα. Οι παράμετροι του μοντέλου P1 οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 7.4 που ακολουθεί

Radiation Model	
Model	P1
Solar Load	Solar Ray Tracking
Longitude	33,203 deg
Latitude	35,095 deg
Time zone	+3GMT
Date and Time	15-7 12:00
Sunshine Factor	1
Direct Solar Irradiation	Solar Ray Tracking
Diffuse Solar Irradiation	Solar Ray Tracking

Πίνακας 7.4: Δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου ηλιακής ακτινοβολίας στο Ansys Fluent.

7.6 Θερμικές Ιδιότητες Υλικών

Με σκοπό να προσομοιωθεί σωστά η θερμοκρασία θα πρέπει να οριστούν οι θερμικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται η περιοχή μελέτης πέρα από τον αέρα της ατμόσφαιρας. Τα τρία κύρια στερεά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το χόμα, το τσιμέντο και το τούβλο των οποίων οι θερμικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6 που ακολουθεί.

Υλικό	Πυκνότητα ($\frac{kg}{m^3}$)	Ειδική Θερμοχωρητικότητα ($\frac{kJ}{kg K}$)	Αγωγιμότητα ($\frac{W}{mK}$)	Απορρόφηση	Εκπομπή
Χώμα	1200	0.65	0.6	0.6	0.85
Τσιμέντο	1500	0.88	0.75	0.6	0.85
Τούβλο	1400	0.84	1	0.6	0.85
Αέρας	1.225	1.006	0.024	-	-

Πίνακας 7.5: Θερμικές Ιδιότητες υλικών που αποτελούν την περιοχή.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης των τοίχων εντός του υπολογιστικού τομέα χρησιμοποιείται το μοντέλο “Shell Conduction”. Η θερμική αντίσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των υλικών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5 σε συνδυασμό με το πάχος του τοιχώματος το οποίο ορίζουμε. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 7.6 που ακολουθεί φαίνονται τα στοιχεία για την χρήση του μοντέλου. Το έδαφος και οι δρόμοι αναπαρίσταται ως στρώμα δύο επιπέδων συνολικού πάχους 10m. Το πάνω στρώμα είναι επίπεδο τσιμέντου με πάχος 0,35m ενώ το κάτω επίπεδο αποτελείται από χώμα με πάχος 9.65m και σταθερή θερμοκρασία 10°C στα 10m κάτω από το έδαφος. Οι ταράτσες προσομοιώνονται ως ένα επίπεδο πάχους 0.25m το οποίο αποτελείται από τσιμέντο και έχει θερμοκρασία 28°C ενώ αντίστοιχα οι περιμετρικοί τοίχοι των κτηρίων αποτελούνται από μια στρώση τσιμέντου με θερμοκρασία 28°C. Η σκιασμένη περιοχή κάτω από το δέντρο θεωρείται ως ένα επίπεδο με πάχος 10m το οποίο αποτελείται από χώμα.

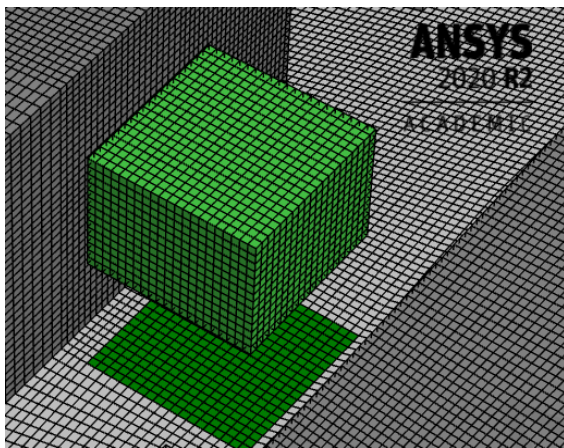
	Επίπεδα	Πάχος <i>m</i>	Θερμοκρασία °C	Υλικό
Έδαφος	2	10	10	Τσιμέντο
		9.65	10	Χώμα
Ταράτσες	1	0.25	28	Τσιμέντο
Τοίχοι κτηρίων	1	0.25	28	Τούβλο
Δρόμοι	2	10	10	Τσιμέντο
		9.65	10	Χώμα
Βάση Δέντρου	1	10	10	Χώμα

Πίνακας 7.6: Πάχος και θερμοκρασία κάθε επιφάνειας για το μοντέλο Shell Conduction

7.7 Βλάστηση

Οι “κορόνες” των δέντρων διαμορφώνονται ως ογκομετρικές πορώδεις ζώνες ($\phi=0.85$) και κάθετα κάτω από τις κορόνες, το επίπεδο εδάφους διαμορφώνεται ως σκιασμένες ζώνες. Για τα υπολογιστικά κελιά αυτών των ογκομετρικών ζωνών, οι όροι πηγής/καταβόθρας προστίθενται στις εξισώσεις μεταφοράς ορμής ($S_{u_x}, S_{u_y}, S_{u_z}$), τυρβώδους κινητικής ενέργειας (S_k) και στο ρυθμό σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας (S_ϵ) μέσω αρχείων UDF.

Για τον ποσοτικό υπολογισμό των όρων πηγής για τα κελιά του δέντρου χρειάζεται να οριστούν οι τιμές C_d , LAD, β_p , β_d , $C_{\varepsilon 4}$ και $C_{\varepsilon 5}$ όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.4. Η αδιάστατη σταθερά C_d οριστική ως 0.2 σύμφωνα με την μελέτη των Liang et al. (2005) [70]. Η τιμή του LAD τέθηκε ως $2 \frac{m^2}{m^3}$ η οποία αντιστοιχεί στον τύπο δέντρου “Tirupana Tyru” [71]. Τα αδιάστατα β_p και β_d ορίστηκαν ως 1 και 5.1 όπως και σε άλλες μελέτες [72]. Τέλος οι τιμές των $C_{\varepsilon 4}$ και $C_{\varepsilon 5}$ οι οποίες σε πολλές μελέτες ορίζονται ως ισότιμες, ισούνται με 0.9 σύμφωνα με την μελέτη του Sanz (2002) [60]. Σύμφωνα με τους Jian et al, 2018 [73] οι τιμές του πορώδους συσχετίζεται με τον συντελεστή C_d . Η τιμή $C_d = 0.2$ αντιστοιχεί σε πορώδες (~85% ή 0.85). Στον Πίνακα 7.7 που ακολουθεί συνοψίζονται οι τιμές για τον υπολογισμό των όρων πηγής και καταβύθισης που προκαλούνται από την “κορόνα” του δέντρου.



Παράμετροι για τους υπολογισμούς των όρων πηγών/καταβύθισης		
Παράμετρος	Τιμή	Εξισώσεις όπου συμμετέχει
C_d	0.2	$S_{u_x}, S_{u_y}, S_{u_z}, S_k, S_\varepsilon$
LAD	$2 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$S_{u_x}, S_{u_y}, S_{u_z}, S_k, S_\varepsilon$
β_p	1	S_k, S_ε
β_d	1.5	S_k, S_ε
$C_{\varepsilon 4}$	0.9	S_ε
$C_{\varepsilon 5}$	0.9	S_ε
Porous	0.85	-

Πίνακας 7.7: Παράμετροι για τους υπολογισμούς των όρων πηγής και καταβύθισης του δέντρου

Η σκίαση η οποία προκαλείται στην περιοχή κάτω από την “κορόνα” του δέντρου προκαλεί μεταβολή στην απορροφητικότητα της επιφάνειας. Για τον υπολογισμό της νέας απορροφητικότητας της σκιασμένης περιοχής γίνεται χρήση του παράγοντα σκίασης (SF) και της απορροφητικότητας της επιφάνειας στην περίπτωση που δεν είχαμε σκίαση. Σύμφωνα με τους McPherson et al 2018 [74] ο παράγοντας σκέδασης τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 70-90%. Σε αυτή την μελέτη ως παράγοντας σκέδασης χρησιμοποιήθηκε η τιμή 88% ή 0.88, η οποία χρησιμοποιήθηκε σε παρόμοιου τύπου μελέτη από τους Torparlar et al., 2017 [62]. Ο παράγοντας σκέδασης 88% δίνει απορροφητικότητα της σκιασμένης περιοχής ίση με $\alpha_{shaded} = 0.072$ σύμφωνα με τη σχέση του κεφαλαίου 5.6.

Στην εξίσωση ενέργειας προστίθεται η πηγή της ογκομετρικής ισχύος ψύξης (P_c) η οποία υπολογίζεται ανά ώρα της ημέρας με την βοήθεια της ωριαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. (Κεφάλαιο 5.5)

Ογκομετρική ισχύς ψύξης (P _c) ανά ώρα για τις 15/07/2010			
Ωρα	AT(°C)	R _h [W/m ²]	P _c [W/m ³]
00:00	25.28	0	0
01:00	25.08	0	0
02:00	25.15	0	0
03:00	25.18	0	0
04:00	25.12	0	0
05:00	25	0	0
06:00	25.53	84	113,35
07:00	26.65	258	349,59
08:00	28.95	474	647,76
09:00	31.13	668	920,22
10:00	32.23	830	1147,98
11:00	33.73	920	1279,42
12:00	34.83	966	1348,74
13:00	35.27	952	1331,31
14:00	34.92	879	1227,67
15:00	34.33	761	1060,60
16:00	32.9	578	801,39
17:00	31.97	382	527,85
18:00	30.81	171	235,28
19:00	29.35	37	50,63
20:00	28.75	0	0
21:00	27.9	0	0
22:00	27.1	0	0
23:00	26.55	0	0

Πίνακας 7.8: Υπολογισμός της ογκομετρικής ισχύς ψύξης ανά ώρα από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία.

7.8 Μέθοδος Επίλυσης (Methods)

Στο τέλος, γίνεται ο καθορισμός της μεθόδου επίλυσης. Για την επίλυση της συγκεκριμένης προσομοίωσης επιλέχθηκε η μέθοδος “SIMPLEC” για την σύζευξη ταχύτητας πίεσης. Παράλληλα έγινε επιλογή των χωρικών διακριτοποιήσεων ως 2^{ης} τάξης για την πίεση, ορμή, κ, ε και ενέργεια. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το ANSYS Fluent 2020 R2. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο επεξεργαστής Intel(R) Core (TM) i7-10700K CPU A 3.80GHz με 32 GB RAM.

7.9 Monitors

Για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται τα “Residuals”. Η σύγκλιση θεωρείται ότι επιτυγχάνεται όταν τα κλιμακωτά και κανονικοποιημένα residuals σταθεροποιηθούν σε πολύ μικρό αριθμό. Όσον αφορά τις εξισώσεις ορμής για το x, y, z το k και το ε φτάνουν μέχρι 10⁻⁵ - 10⁻⁶, για το P1 και την ενέργεια φτάνουν 10⁻⁸

7.10 Υπολογισμός (Calculation)

Για να τρέξει ο υπολογισμός πρέπει να οριστούν ο τύπος και η μέθοδος της χρονικής προόδου, καθώς επίσης και οι παράμετροι όπως το χρονικό βήμα, ο αριθμός των χρονικών βημάτων και ο μέγιστος αριθμός Iterations ανά χρονικό βήμα. Στην παρούσα εργασία η περίοδος μελέτης έχει διάρκεια μιας ημέρας. Το χρονικό βήμα θα οριστεί στα 3600sec όπου αντιστοιχούν σε 1 ώρα και ο αριθμός των χρονικών βημάτων θα οριστεί στο 24 για να συμπεριληφθεί ολόκληρη η χρονική διάρκεια της ημέρας 15/07/2010.

Κεφάλαιο 8

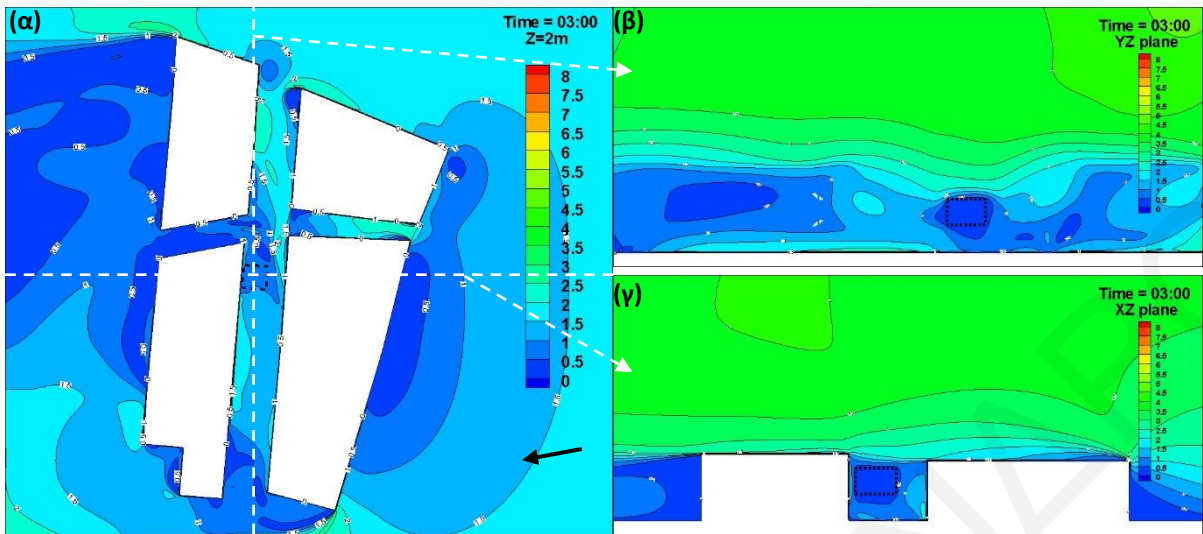
Αποτελέσματα

Για την συγκεκριμένη μελέτη η βλάστηση αναπαρίσταται ως ένα και μόνο δέντρο στο εσωτερικό του οδικού φαραγγιού. Με το πέρας της προσομοίωσής τα δεδομένα συλλέγονται σε 24 αρχεία (ένα για κάθε ώρα της ημέρας), τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το κάθε σημείο του υπολογιστικού τομέα. Αυτά τα αρχεία αποτελούνται από δεδομένα για την θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμοκρασία των επιφανειών, δεδομένα για τον άνεμο, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και την ηλιακή ροή θερμότητας. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα επικεντρωθούν στην αναπνευστικότητα εντός των οδικών φαραγγιών καθώς και στις ενδεχόμενες μεταβολές στις θερμοκρασίες λόγω της παρουσίας του δέντρου. Για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων θα πραγματοποιηθεί σύγκριση με πραγματικές τιμές πεδίου που έγιναν σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής μελέτης. Επιπλέον ως μέτρο σύγκρισης θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην οποία υπάρχει απουσία της βλάστησης και στην οποία χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι παράμετροι.

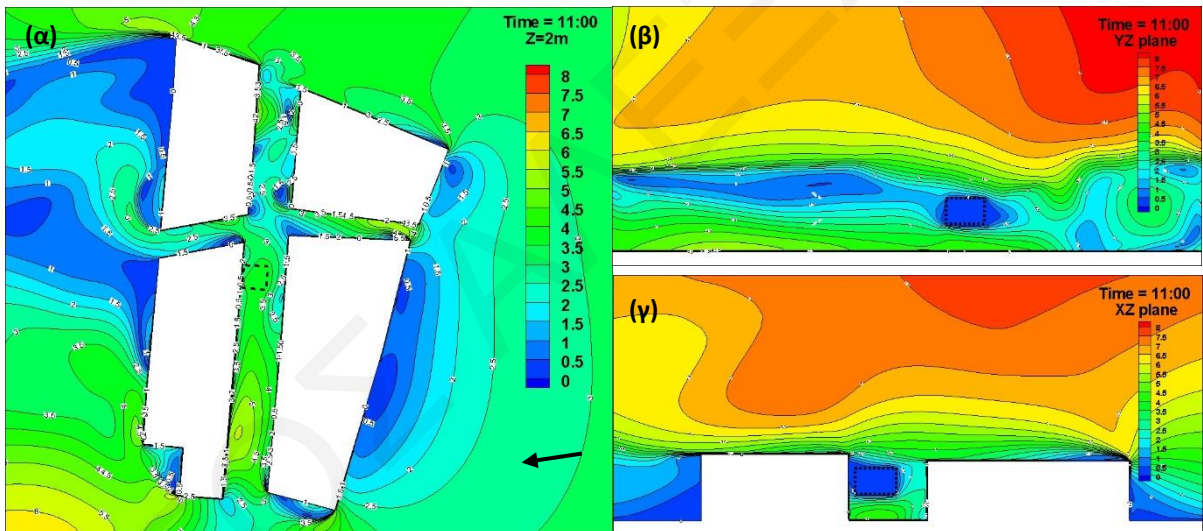
8.1 Αποτελέσματα της Ροής του ανέμου

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του ανέμου για (α) το επίπεδο z με ύψος 2m, (β) για το επίπεδο YZ και (γ) το επίπεδο XZ, που διαπερνούν την κορόνα του δέντρου για τις 03:00 (Εικόνα 8.1), τις 11:00 (Εικόνα 8.2) και τις 15:00 (Εικόνα 8.3) της 15^{ης} Ιουλίου. Το δέντρο αναπαρίσταται με την μαύρη διακεκομμένη γραμμή στο εσωτερικό του οδικού φαραγγιού. Το μαύρο βέλος δείχνει την διεύθυνση του ανέμου για την συγκεκριμένη ώρα της ημέρας. Για την περίοδο μελέτης επικρατούν κυρίως ανατολικοί άνεμοι κατά την διάρκεια της ημέρας ενώ τις απογευματινές ώρες στρέφονται σε νοτιοανατολικούς και το βράδυ σε δυτικούς.

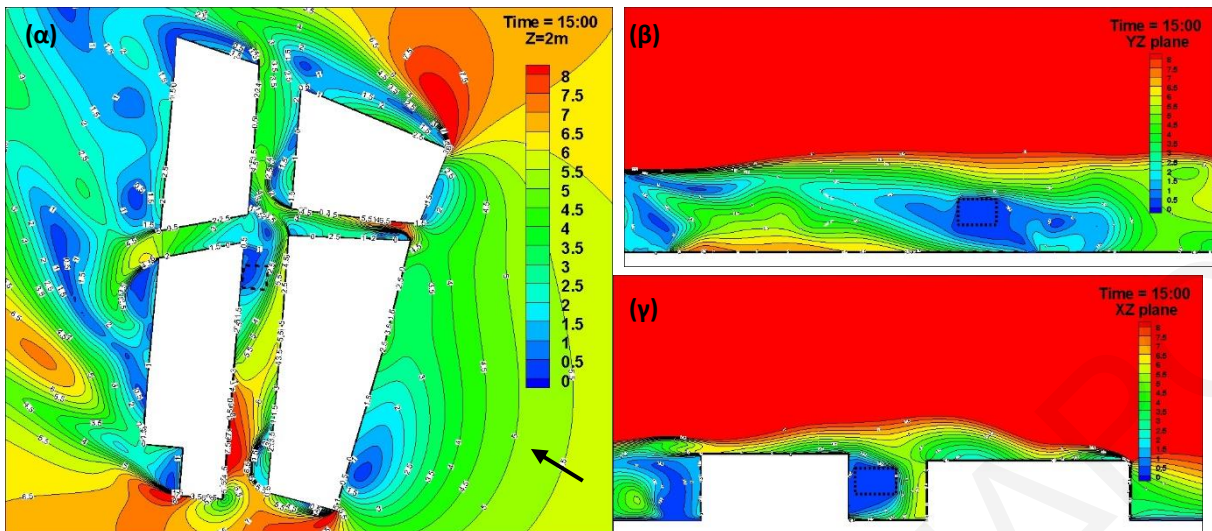
- Από τις εικόνες (α) όπου αναφέρονται στο μέσο ύψος του ανθρώπου (2m) παρατηρείται ότι οι χαμηλότερες τιμές στην ένταση του ανέμου εμφανίζονται στις αμφίεμες πλευρές των κτηρίων και σε μικρότερο βαθμό στις προσήνεμες πλευρές. Αυτό οφείλεται στο ότι τα κτήρια εμφανίζονται ως εμπόδια στην ροή του ανέμου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αναταράξεις στην ροή.
- Κατά την διάρκεια της ημέρας το νότιο τμήμα του φαραγγιού εμφανίζει ψηλότερες ταχύτητες ανέμου σε σχέση με το βόρειο. Πιο συγκεκριμένα για τις ώρες 12:00 μέχρι 16:00 όπου επικρατούν οι ψηλότερες ταχύτητες ανέμου στο υπόβαθρο, εντός του οδικού φαραγγιού παρατηρούνται μεγάλης ταχύτητάς άνεμοι με αποτέλεσμα να επικρατούν καλές συνθήκες αναπνευστικότητας εντός του φαραγγιού.
- Στο σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο εντός του φαραγγιού παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες ανέμου σε σχέση με το υπόλοιπο φάραγγι. Έτσι, το δέντρο, εμφανίζεται ως εμπόδιο στη ροή εντός του οδικού φαραγγιού με αποτέλεσμα να μειώνει την ένταση του ανέμου κοντά στο σημείο της κορόνας.



Εικόνα 37: Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 03:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου

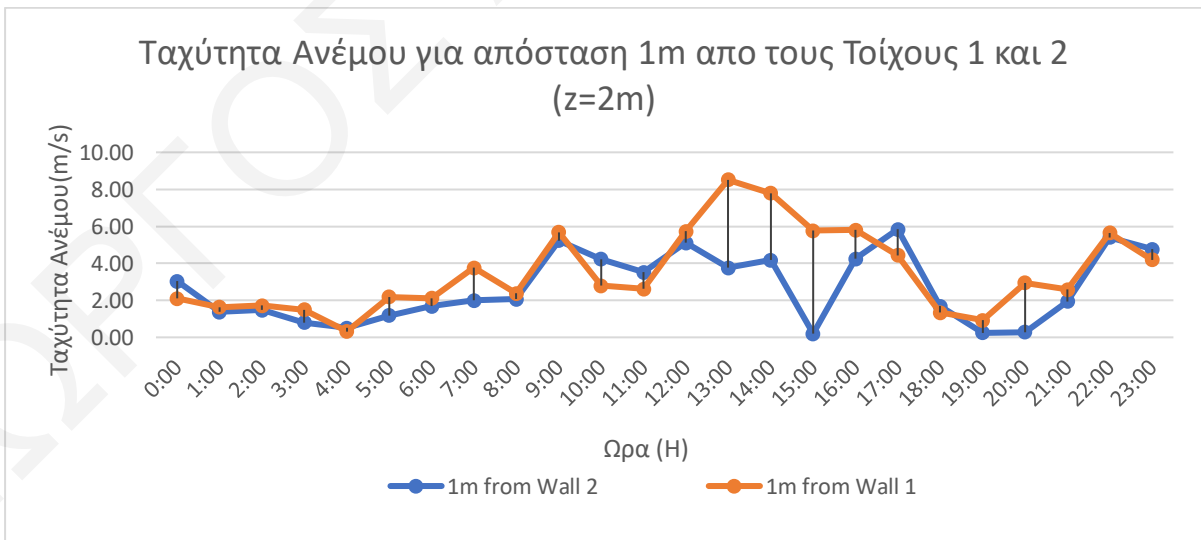


Εικόνα 38 Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 11:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 39: Αποτελέσματα CFD για την ένταση του ανέμου στις 15:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την ένταση του ανέμου ενώ με μαύρο βέλος η διεύθυνση του ανέμου.

Η επίδραση της βλάστησης στις ροές του ανέμου φαίνεται να είναι σημαντική. Στην Εικόνα 8.4 που ακολουθεί εμφανίζονται οι τιμές της έντασης του ανέμου σε απόσταση ένα μέτρο από τους δυο τοίχους για το μέσο ύψος του ανθρώπου. Στις πλείστες ώρες της ημέρας στο σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο παρουσιάζονται μικρότερης έντασης άνεμοι. Όταν η ένταση του ανέμου είναι μικρή τότε η ταχύτητα του ανέμου στα δυο άκρα του φαραγγιού στο σημείο του δέντρου φαίνεται να είναι κοντά. Μεταξύ των ωρών 12:00 και 16:00 όπου η ένταση του ανέμου είναι μεγαλύτερη, μεταξύ των δυο τοίχων εμφανίζεται μεγάλη διαφορά στην ένταση. Η διαφορά στην ένταση του ανέμου ανάμεσα σε σημείο 1m από τον Δυτικό (Τοίχος 2) και Ανατολικό τοίχο (Τοίχος 1) για το ύψος του ανθρώπου (2m) φτάνει μέχρι και τα 5.56m/s στις 15:00.



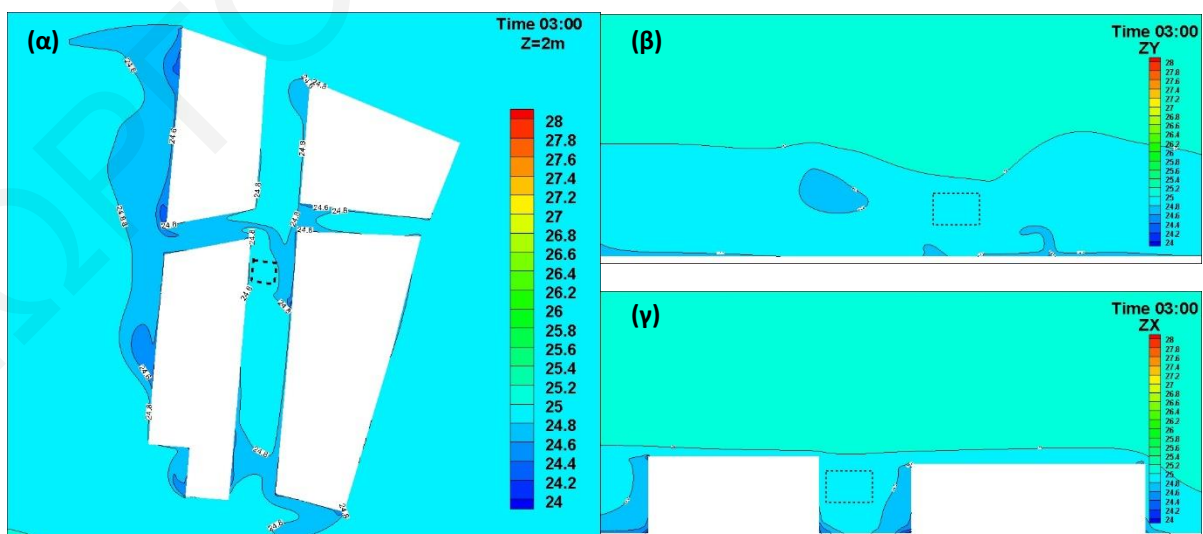
Εικόνα 40: Διάγραμμα με τα αποτελέσματα για την ένταση του ανέμου σε απόσταση 1m από τον Τοίχο 1 (πορτοκαλί γραμμή) και σε απόσταση 1m από τον Τοίχο 2 (μπλε γραμμή).

8.2 Θερμοκρασιακές Μεταβολές

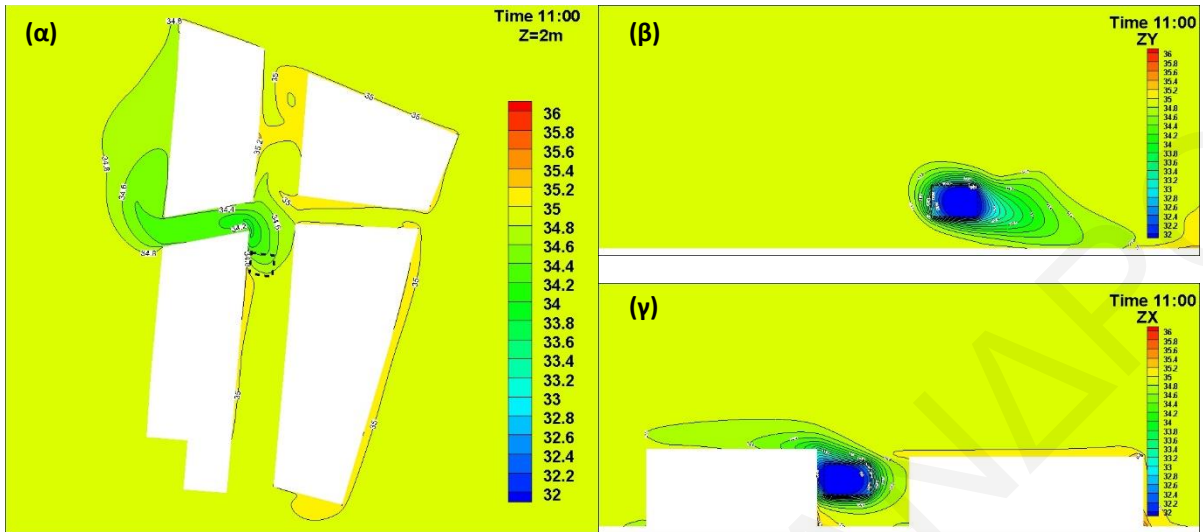
8.2.1 Θερμοκρασία στο μέσο ύψος του ανθρώπου

Μεγάλης σημασίας είναι τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα της προσομοίωσης για την επίδραση της βλάστησης. Στις Εικόνες 8.5-8.8 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσημείωσης για την θερμοκρασία αέρα (α) στο μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) το επίπεδο ZY και (γ) και το επίπεδο (ZX) για τις ώρες 03:00, 11:00, 13:00 και 15:00 . Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείτε ότι:

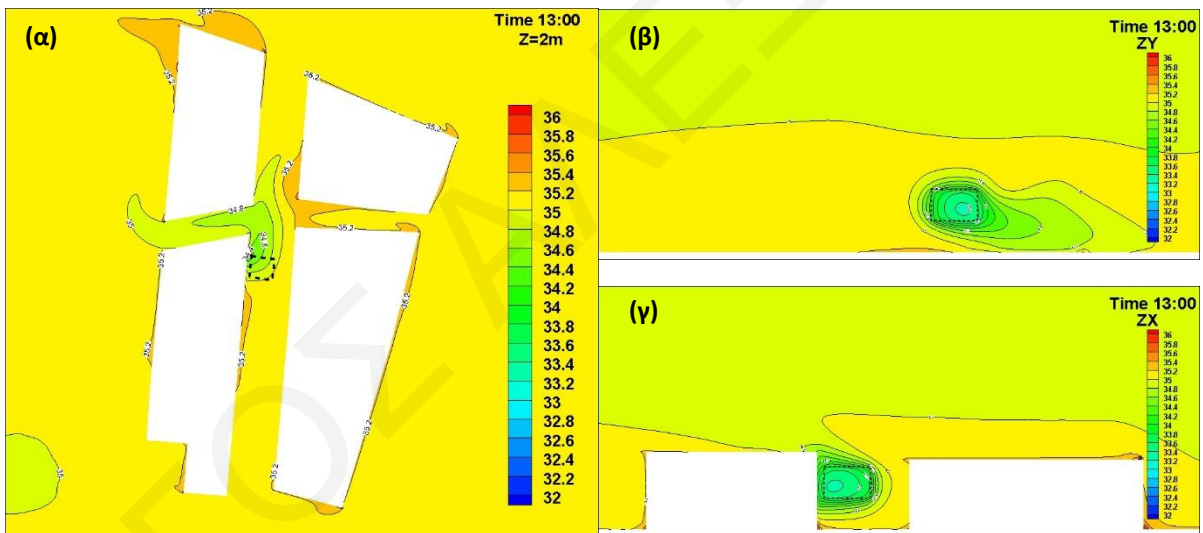
- Για το ύψος των 2m εντός του φαραγγιού μπορούν να παρατηρηθούν τιμές θερμοκρασίας με εύρος μέχρι και $3^{\circ}C$ (16:00 και 17:00) ανάλογα το σημείο και την ώρα της ημέρας.
- Η μεγαλύτερη θερμοκρασία καταγράφεται στις 12:00 και είναι οι $36.10^{\circ}C$ σε σημείο κοντά σε τοίχο στην διασταύρωση των δυο φαραγγιών.
- Η επίδραση της βλάστησης στην θερμοκρασία είναι σημαντική, με την περιοχή κοντά στο δέντρο να παρουσιάζει μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με άλλες περιοχές εντός του οδικού φαραγγιού κατά την διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, την νύχτα δεν παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή στις θερμοκρασίες κοντά στο σημείο του δέντρου. Αυτό οφείλεται στο ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν την βλάστηση εξαρτώνται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία είναι αμελητέα τις βραδινές ώρες.
- Επιπλέον συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα της Εικόνας 8.1-8.3 με τις ταχύτητες του ανέμου παρατηρείται ότι στα σημεία όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλής έντασης, η θερμοκρασία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ενώ στα σημεία όπου η ένταση είναι μεγάλη, η θερμοκρασίες είναι μικρότερες, συνδέοντας έτσι την αναπνευσσιμότητα εντός των οδικών φαραγγιών με την θερμική άνεση που μπορεί να προκαλέσει στον άνθρωπο.
- Επιπρόσθετα, ψηλότερες θερμοκρασίες αέρα εντός των φαραγγιών υπάρχουν στις περιοχές κοντά σε επιφάνειες των κτηρίων. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές θερμικές ιδιότητες από τις οποίες αποτελούνται τα υλικά με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμικής απορρόφησης.



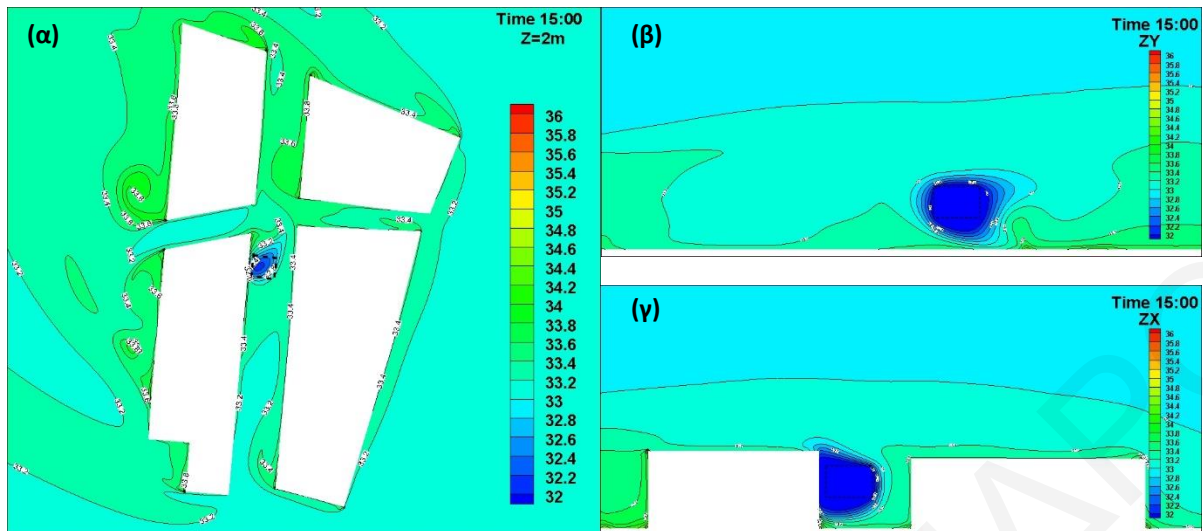
Εικόνα 41: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 03:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.



Εικόνα 42: Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 11:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.



Εικόνα 43 Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 13:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.



Εικόνα 44 Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 16:00 για (α) το μέσο ύψος του ανθρώπου ($z=2m$), (β) του επιπέδου στον άξονα Y που διαπερνά το δέντρο και (γ) του επιπέδου X που διαπερνά το δέντρο. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της θερμοκρασίας αέρα.

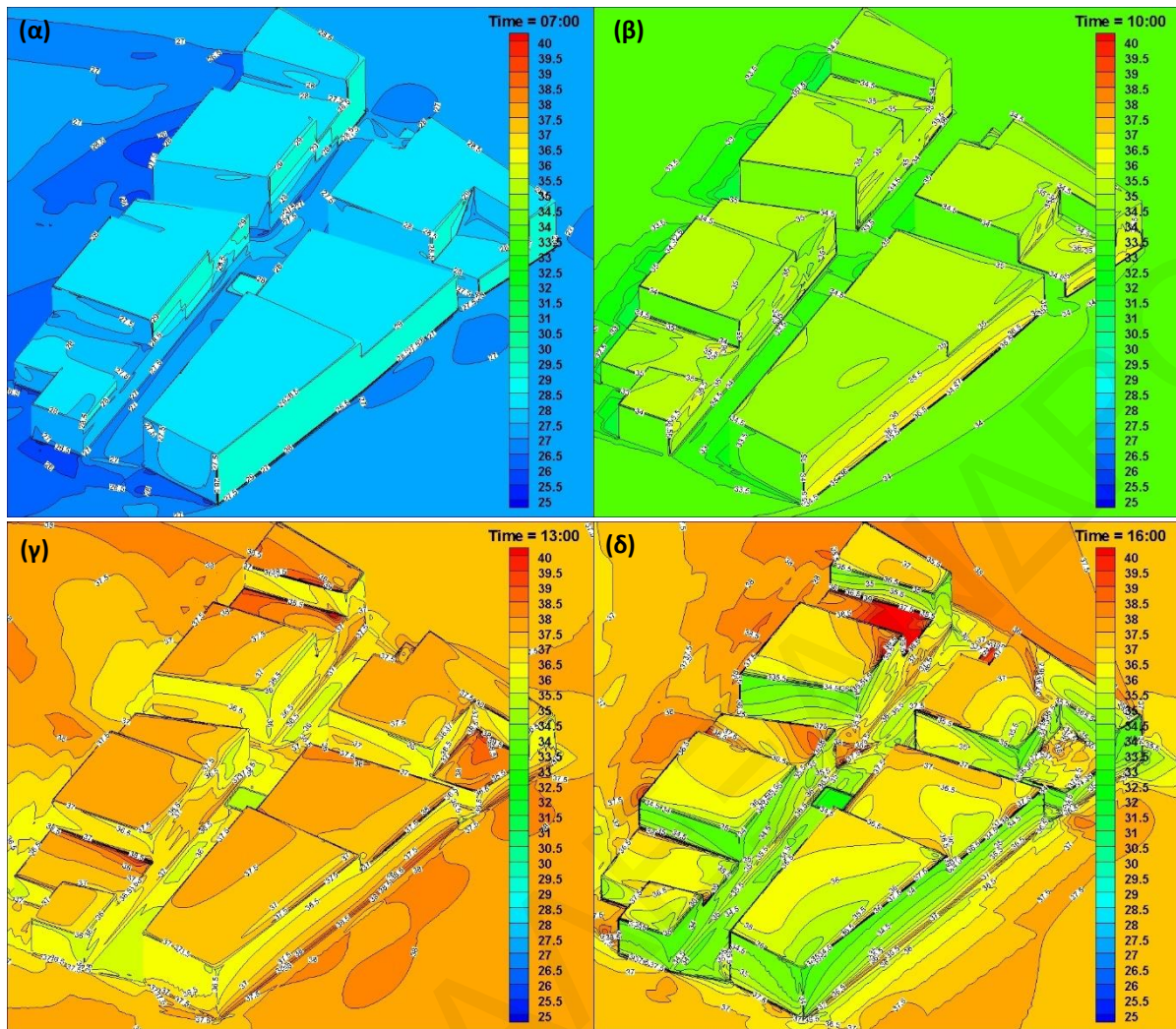
8.2.2 Θερμοκρασία Επιφανειών

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις επιφανειακές θερμοκρασίες των κτηρίων δρόμων ταρατσών κτλ. Η κατανόηση των επιφανειακών θερμοκρασιών μπορούν να οδηγήσουν σε θετικό αντίκτυπο στην εξοικονόμηση ενέργειας και θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτηρίων.

- Κατά τις βραδινές ώρες όπου υπάρχει απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείτε ότι οι περιμετρικοί τοίχοι και οι ταράτσες των κτηρίων έχουν σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας.
- Κατά τις ώρες της ημέρας όπου πλέον η επίδραση της ακτινοβολίας είναι σημαντική, οι επιφανειακές θερμοκρασίες των ταρατσών παρουσιάζουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με τους περιμετρικούς τοίχους, αυτό οφείλεται εν μέρη και στο διαφορετικό δομικό υλικό από το οποίο αποτελούνται οι δυο επιφάνειες.
- Σε αντίθεση με την θερμοκρασία αέρα η μεγαλύτερη επιφανειακή θερμοκρασία καταγράφεται στις 16:00 με $42.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ στην ταράτσα του κτηρίου που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του φαραγγιού (δ).

Υψίστης σημασίας είναι και η περιοχή όπου βρίσκεται κάτω από την κορόνα του δέντρου και η οποία ορίστηκε ως σκιασμένη περιοχή μέσω του συντελεστή απορρόφησης. Σε αυτό το σημείο του δρόμου παρατηρείται ότι:

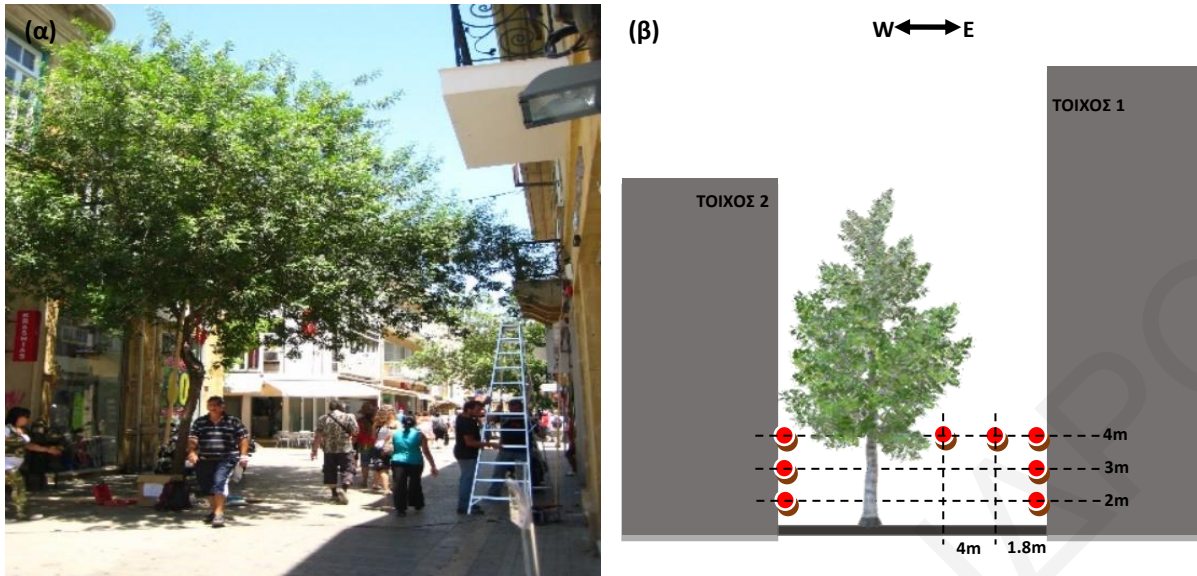
- Καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας παρατηρούνται μικρότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του δρόμου. Ενδεικτικά, στις 15:00 όπου πλέον τα δομικά υλικά έχουν εκτεθεί στις ψηλές θερμοκρασίες και στην ηλιακή ακτινοβολία η σκιασμένη περιοχή κάτω από το δέντρο παρουσιάζει επιφανειακή θερμοκρασία 33.89°C ενώ σε απόσταση περίπου 10m στο κέντρο της διασταύρωσης των οδικών φαραγγιών καταγράφεται επιφανειακή θερμοκρασία 38.86°C με τα δυο σημεία να καταγράφουν διαφορά σχεδόν ίση με 5°C .



Εικόνα 45: Αποτελέσματα CFD για την επιφανειακή θερμοκρασία στις 03:00 για τις (α) 07:00, (β) 10:00, (γ) 13:00 και (δ) 16:00. Η χρωματική κλίμακα αναπαριστά την τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας.

8.3 Μετρήσεις Πεδίου

Με σκοπό να γίνει η επικύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και να υπολογιστούν τα φυσικά σφάλματα μοντελοποίησης θα χρησιμοποιηθούν πραγματικά δεδομένα από μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή για τις 15/07/2010. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση θερμοστοιχείων (thermocouples) τοποθετημένα επάνω στις επιφάνειες των τοίχων. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν σε τρία επίπεδα σε δυο διαφορετικούς τοίχους. Ως Τοίχος 1 αναφέρεται ο ανατολικός τοίχος ενώ ως Τοίχος 2 αναφέρεται ο δυτικός τοίχος ο οποίος βρίσκεται σχεδόν σε επαφή με την κορόνα του δέντρου. Τα τρία διαφορετικά ύψη όπου τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία είναι τα 2m, 3m και 4m. Επιπλέον, σε απόσταση 1.8m και 4m από τον ανατολικό τοίχο (Τοίχο 1), τοποθετήθηκαν δυο επιπλέον θερμοστοιχεία για το ύψος των 4m από την επιφάνεια του εδάφους. Οι τιμές πεδίου συγκεντρώθηκαν κάτω από την εκστρατεία TOPEUM του 2010 η οποία συμπεριλαμβάνει πολύ-κλιμακωτές και πολύ-θερμικές μετρήσεις πεδίου με υψηλής ποιότητας αποτελέσματα σε διάφορα σημεία της ευρύτερης περιοχής του ιστορικού κέντρου της Λευκωσίας.



Εικόνα 46: (α) Εικόνα από τις μετρήσεις πεδίου στην περιοχή (εκστρατεία TOPEUM) (β) Σχηματική αναπαράσταση των σημείων που τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία εντός του οδικού φαραγγιού.

Στους Πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα ποσοτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις της προσομοίωσης CFD και τις μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή στις διάφορες τοποθεσίες εντός του οδικού φαραγγιού στο σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο. Επιπλέον, με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης του μοντέλου στη θερμοκρασία καταγράφεται η διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της τιμής CFD.

Στον Πίνακα 8.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας από το μοντέλο Unsteady RANS για την κάθε ώρα της ημέρας στον Ανατολικό τοίχο (Τοίχο 1) για τα 2m, 3m και 4m. Η ωριαίες τιμές του μοντέλου συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές πεδίου που μετρήθηκαν στην περιοχή. Στην συνέχεια, στην Εικόνα 8.11 εμφανίζονται τα διαγράμματα με τις τιμές Πεδίου και CFD με σκοπό να παρατηρηθούν οι ωριαίες διαφορές.

Για τον Τοίχο 1:

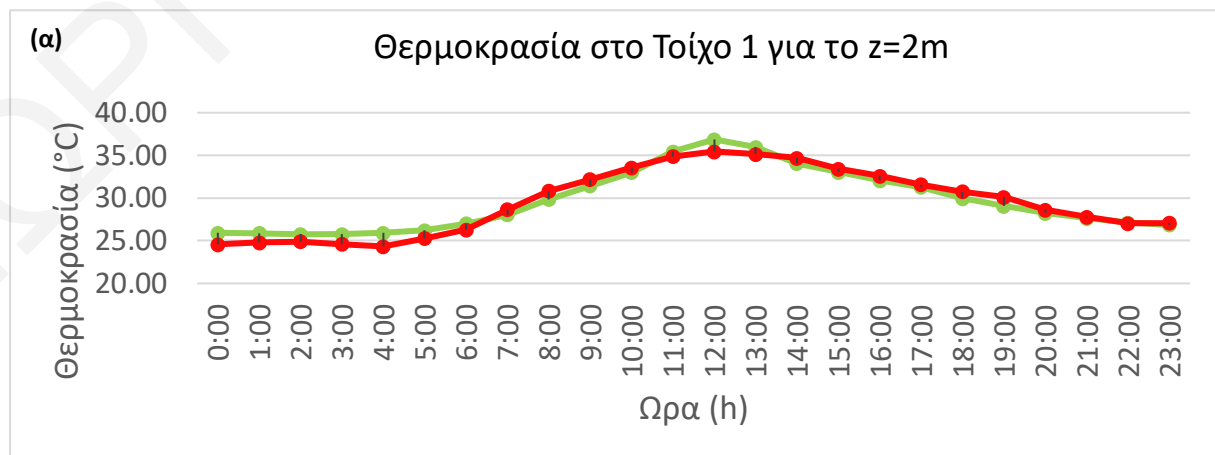
- Η μέση απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ μέτρησης πεδίου και τιμής CFD είναι 0.74°C για τα 2m, 0.82°C για τα 3m και για τα 4m είναι 0.75°C δίνοντας έτσι μια καλή συσχέτιση μεταξύ πραγματικής τιμής και τιμής του μοντέλου.
- Από τα αποτελέσματα παρατηρείτε ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις τιμές για τις πρώτες πρωινές ώρες (00:00 - 06:00) και για τα 3 ύψη. Για τις πρωινές ώρες μετά την ανατολή του ήλιου (07:00 - 10:00) και απογευματινές ώρες (14:00 - 23:00) το μοντέλο παρουσιάζει αξιόπιστες τιμές με τα αποτελέσματα να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές.
- Κατά την διάρκεια όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας, το μοντέλο υποεκτιμά τις τιμές, με το ύψος των 2m να έχει την πλησιέστερη τιμή σε σχέση με την πραγματική.

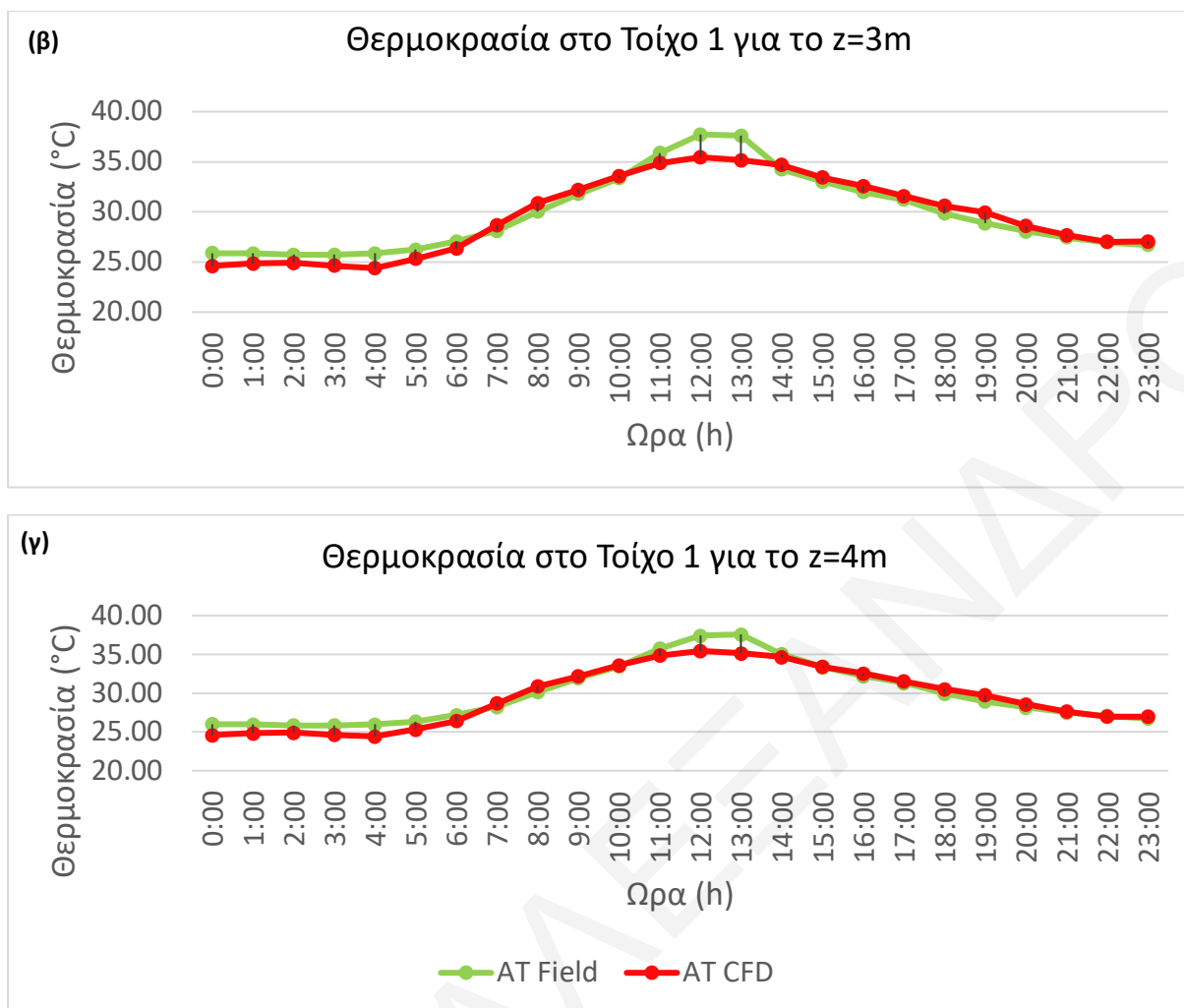
Μια πιθανή εξήγηση στην υποτίμηση των αποτελεσμάτων για την πλευρά του φαραγγιού όπου δεν είναι το δέντρο, ίσως να οφείλεται στην μη λεπτομερή κάλυψη της γεωμετρίας. Για σκοπούς απλοποίησης τα κτήρια αναπαρίστανται ως παραλληλεπίπεδα με την απουσία της λεπτομερής γεωμετρίας όπως μπαλκόνια, πινακίδες πόρτες, παράθυρα κτλ. Επιπλέον, οι επιφάνειες στο μοντέλο χαρακτηρίζονται ως επιφάνειες που αποτελούνται από

ένα και μόνο υλικό. Στην πραγματικότητα οι επιφάνειες αυτές αποτελούν προσόψεις καταστημάτων που αποτελούνται από συνδυασμούς πολλών υλικών όπως γυαλί, πέτρα, σίδηρο, τσιμέντο τούβλο κτλ. Αυτές οι απλοποιήσεις στην γεωμετρία οι οποίες είναι αναγκαίες για την απλότητα του μοντέλου μπορούν να επηρεάσουν κατά κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα.

Θερμοκρασίες Πεδίου και CFD για τον Τοίχο 1 (μακριά από το δέντρο)									
	z=2m			z=3m			z=4m		
Ωρα	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφορ ά	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφορ ά	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφορά
0:00	25.91	24.57	1.34	25.89	24.59	1.30	26.00	24.60	1.40
1:00	25.89	24.80	1.09	25.86	24.83	1.03	25.97	24.85	1.12
2:00	25.76	24.89	0.87	25.72	24.92	0.80	25.84	24.93	0.91
3:00	25.78	24.60	1.18	25.72	24.63	1.09	25.83	24.65	1.18
4:00	25.90	24.34	1.56	25.86	24.38	1.48	25.98	24.43	1.55
5:00	26.20	25.27	0.93	26.22	25.30	0.92	26.35	25.32	1.03
6:00	27.02	26.31	0.71	27.04	26.36	0.68	27.19	26.40	0.79
7:00	28.06	28.67	-0.61	28.12	28.69	-0.57	28.26	28.70	-0.44
8:00	29.87	30.84	-0.97	30.04	30.86	-0.82	30.16	30.88	-0.72
9:00	31.44	32.17	-0.73	31.79	32.18	-0.39	31.93	32.18	-0.25
10:00	33.01	33.57	-0.56	33.35	33.57	-0.22	33.47	33.58	-0.11
11:00	35.45	34.89	0.56	35.87	34.87	1.00	35.75	34.85	0.90
12:00	36.87	35.46	1.41	37.72	35.45	2.27	37.40	35.44	1.96
13:00	35.96	35.14	0.82	37.60	35.14	2.46	37.57	35.13	2.44
14:00	34.05	34.68	-0.63	34.24	34.67	-0.43	35.02	34.66	0.36
15:00	33.04	33.43	-0.39	33.01	33.41	-0.40	33.37	33.41	-0.04
16:00	32.07	32.60	-0.53	31.97	32.57	-0.60	32.23	32.55	-0.32
17:00	31.28	31.59	-0.31	31.23	31.56	-0.33	31.34	31.53	-0.19
18:00	29.98	30.74	-0.76	29.84	30.59	-0.75	29.96	30.51	-0.55
19:00	29.06	30.10	-1.04	28.86	29.92	-1.06	28.94	29.76	-0.82
20:00	28.24	28.61	-0.37	28.04	28.58	-0.54	28.15	28.55	-0.40
21:00	27.63	27.80	-0.17	27.44	27.67	-0.23	27.51	27.63	-0.12
22:00	27.12	27.06	0.06	26.96	27.02	-0.06	27.08	27.00	0.08
23:00	26.86	27.08	-0.22	26.71	27.03	-0.32	26.73	26.99	-0.26

Πίνακας 8.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 1.





Εικόνα 47 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για τον Τοίχο 1 για τα ύψη (α) $z=2m$, (β) $z=3m$, (γ) $z=4m$.

Ο Πίνακας 8.2 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον Δυτικό τοίχο (Τοίχο 2) που βρίσκεται σε πολύ κοντινή απόσταση από το δέντρο. Από τον Πίνακα παρατηρείτε ότι καταγράφονται μικρότερες τιμές για την θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας υποδεικνύοντας έτσι το θετικό αντίκτυπο που έχει η βλάστηση.

Για τον Τοίχο 2:

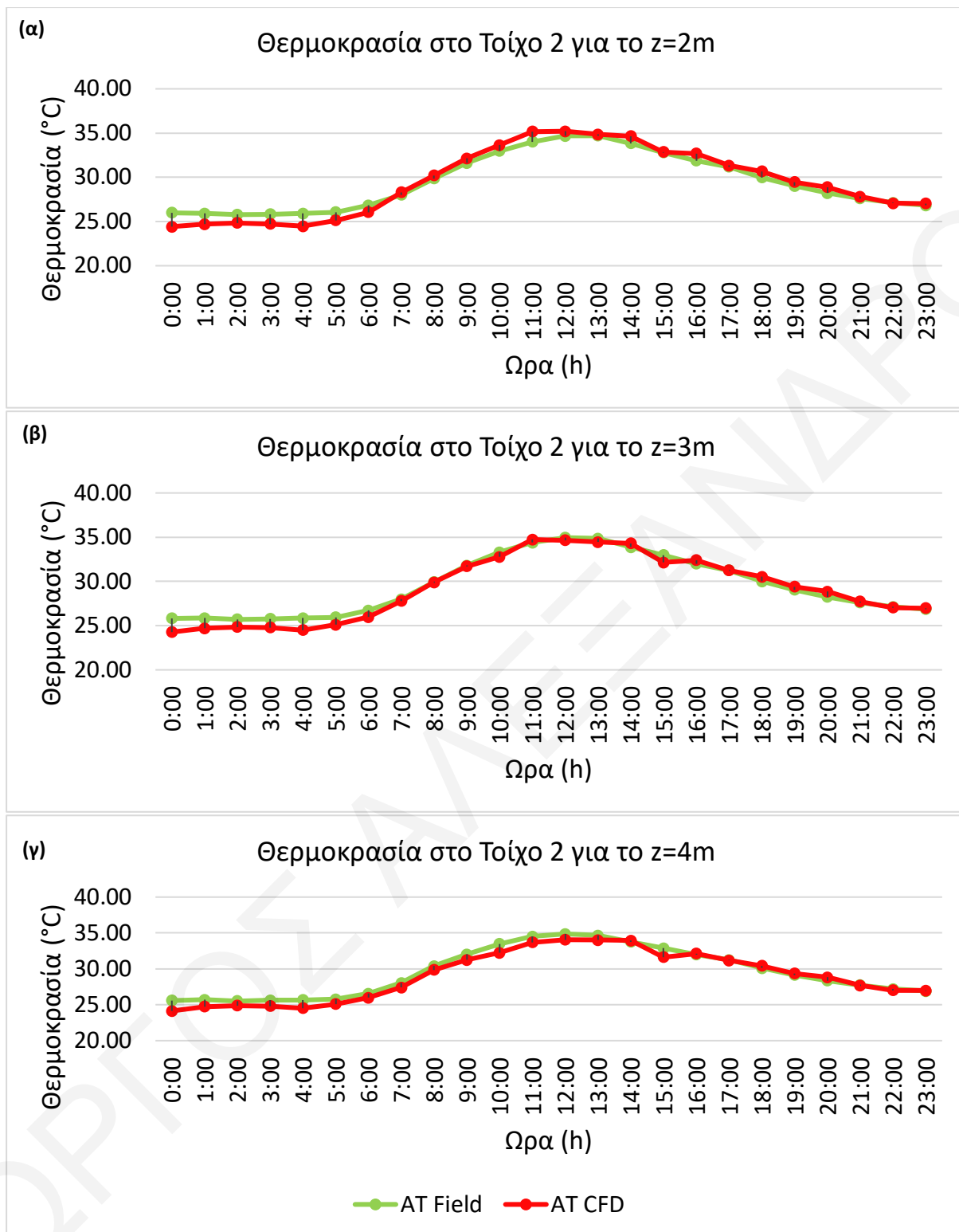
- Η μέση απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ μέτρησης πεδίου και τιμής CFD είναι 0.61°C για τα 2m, 0.53°C για τα 3m και για τα 4m είναι 0.67°C . Διαπιστώνεται ότι, οι τιμές στην δυτική πλευρά του φαραγγιού που βρίσκεται κοντά στο δέντρο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια, με το ύψος των 3m να είναι πιο ακριβείς.
- Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι, κατά τις πρωινές ώρες (00:00 - 06:00) πριν την ανατολή του ήλιου το μοντέλο και πάλι υποεκτιμά τις τιμές της θερμοκρασίας δίνοντας εν μέρη αποτελέσματα κοντά στα πραγματικά.
- Κατά την διάρκεια της ημέρας όπου πλέον συνυπάρχουν η επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας και της εξατμισοδιαπνοής από την βλάστηση, το μοντέλο παρουσιάζει τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές με τα αποτελέσματα στα 3m να έχουν μικρή

απόκλιση σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο ύψος των 2m παρουσιάζεται μια μικρή υπερτίμηση των τιμών ενώ στο 4m μια μικρή υποτίμηση των τιμών.

Οι ενδεχόμενες υπερτιμήσεις και υποτιμήσεις στα αποτελέσματα σε αυτό το σημείο μπορεί να οφείλονται εν μέρη στα χαρακτηριστικά του δέντρου σε συνδυασμό με την απλούστευση της γεωμετρίας. Η κορόνα του δέντρου έχει ένα ακανόνιστο σχήμα το οποίο στην προσομοίωση αναπαρίσταται ως ένα κυβοειδές σχήμα. Επιπλέον, στο μοντέλο ο κορμός και τα κλαδιά του δέντρου δεν συμπεριλήφθηκαν καθώς η επίδραση είναι μικρή σε σχέση με την κορόνα. Το δέντρο χαρακτηρίστηκε στο μοντέλο ως ένας όγκος πηγής/καταβόθρας με ομοιόμορφη επίδραση στην ατμόσφαιρα. Στην πραγματικότητα οι σύνθετες γεωμετρίες των δέντρων περιέχουν περιοχές με πιο έντονο φύλλωμα και πιο αραιό. Τα πιο πάνω μπορούν να αποτελέσουν παράγοντες που επηρεάζουν την απόκλιση από την πραγματική τιμή. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν μια καλή συσχέτιση μεταξύ τιμής CFD και πραγματικής τιμής κοντά στους 0.6°C για τον Τοίχο 2.

Θερμοκρασίες Πεδίου και CFD Τοίχο 2 (κοντά στο δέντρο)									
	z=2m			z=3m			z=4m		
Ωρα	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφ.	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφ.	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφ.
0:00	26.00	24.42	1.58	25.83	24.27	1.56	25.59	24.14	1.45
1:00	25.92	24.71	1.21	25.86	24.71	1.15	25.70	24.75	0.95
2:00	25.78	24.85	0.93	25.70	24.85	0.85	25.51	24.88	0.63
3:00	25.83	24.74	1.09	25.78	24.80	0.98	25.62	24.83	0.79
4:00	25.91	24.47	1.44	25.84	24.51	1.33	25.67	24.53	1.14
5:00	26.05	25.14	0.91	25.94	25.10	0.84	25.76	25.09	0.67
6:00	26.84	26.04	0.80	26.71	25.97	0.74	26.57	25.98	0.59
7:00	28.02	28.30	-0.28	27.99	27.78	0.21	28.06	27.40	0.66
8:00	29.85	30.20	-0.35	29.91	29.90	0.01	30.41	29.86	0.55
9:00	31.61	32.14	-0.53	31.80	31.70	0.10	32.02	31.24	0.78
10:00	32.98	33.65	-0.67	33.29	32.79	0.50	33.48	32.24	1.24
11:00	34.02	35.17	-1.15	34.40	34.74	-0.34	34.51	33.71	0.80
12:00	34.67	35.21	-0.54	34.95	34.66	0.29	34.87	34.06	0.81
13:00	34.70	34.85	-0.15	34.85	34.44	0.41	34.66	34.03	0.63
14:00	33.84	34.64	-0.80	33.88	34.30	-0.42	33.78	33.95	-0.17
15:00	32.81	32.87	-0.06	32.97	32.14	0.83	32.89	31.64	1.25
16:00	31.89	32.70	-0.81	32.00	32.39	-0.39	31.98	32.14	-0.16
17:00	31.18	31.34	-0.16	31.26	31.24	0.02	31.23	31.17	0.06
18:00	29.97	30.66	-0.69	30.01	30.54	-0.53	30.12	30.44	-0.32
19:00	29.02	29.47	-0.45	29.05	29.40	-0.35	29.14	29.37	-0.23
20:00	28.21	28.88	-0.67	28.24	28.84	-0.60	28.37	28.83	-0.46
21:00	27.62	27.80	-0.18	27.61	27.74	-0.13	27.72	27.70	0.02
22:00	27.12	27.07	0.05	27.12	27.04	0.08	27.18	27.01	0.17
23:00	26.85	27.03	-0.19	26.86	26.99	-0.13	26.90	26.98	-0.09

Πίνακας 8.2 Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 2.



Εικόνα 48 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για τον Τοίχο 2 για τα ύψη (α) z=2m, (β) z=3m, (γ) z=4m.

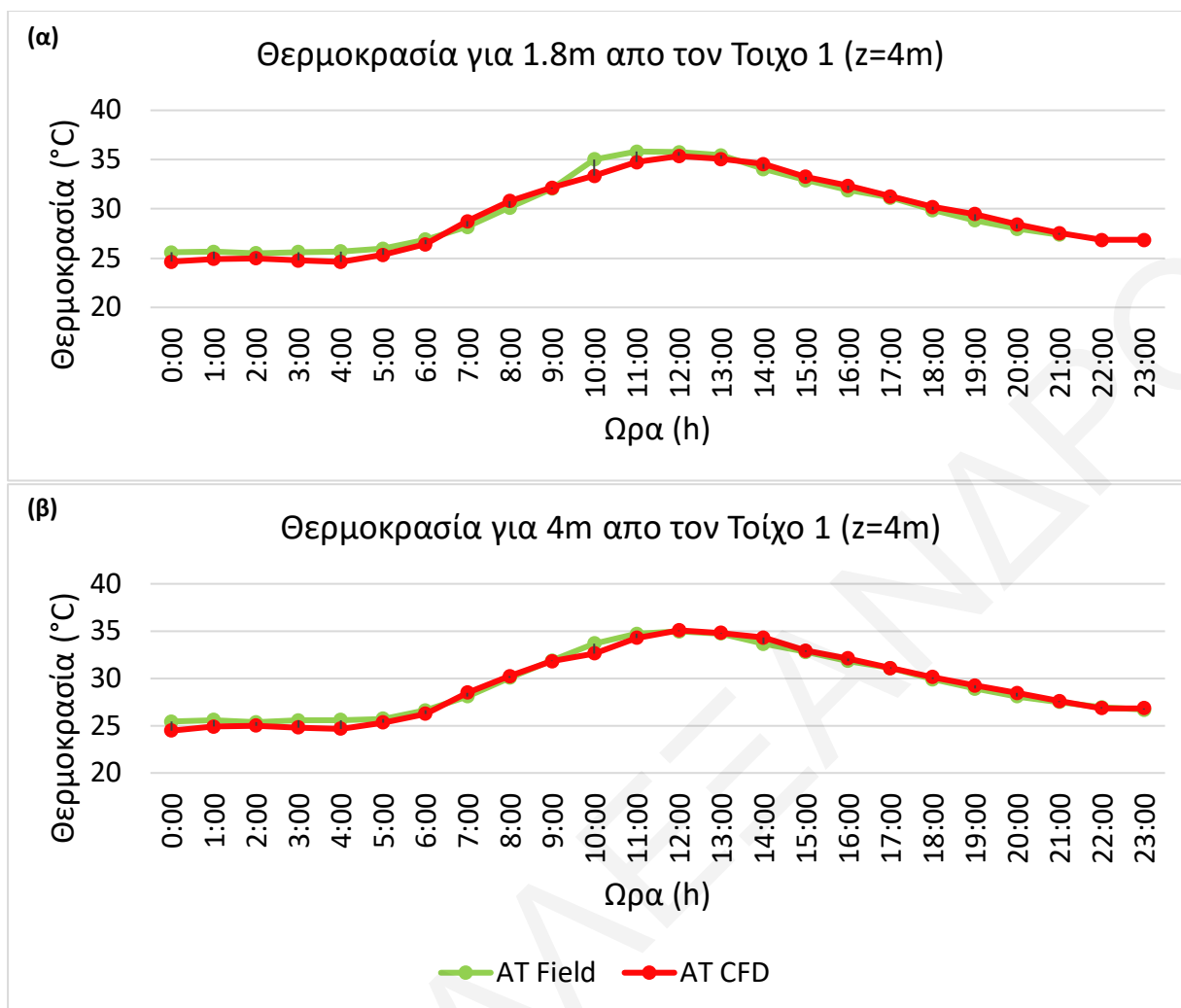
Εστιάζοντας στα σημεία όπου βρίσκονται σε απόσταση 1.8m και 4m από τον Ανατολικό τοίχο (Τοίχο 1) παρατηρείται ότι οι τιμές τείνουν να πλησιάσουν ακόμα περισσότερο στις πραγματικές.

- Το μοντέλο σε αυτά τα σημεία δίνει τιμές με μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ πραγματικής και CFD τιμής ίση με 0.56°C για την απόσταση 1.8m και 0.38°C για την απόσταση των 4m από τον Τοίχο 1.
- Το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά τις τιμές στις 10:00 και 11:00 για την απόσταση 1.8m και στις 10:00 για την απόσταση των 4m κατά την διάρκεια της ημέρας. Παρόλα αυτά το μοντέλο σε αυτά τα σημεία δίνει την ακριβέστερη συσχέτιση πραγματικής και CFD τιμής συγκριτικά με τα υπόλοιπα.

Μια πιθανή εξήγηση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε αυτά τα σημεία είναι το ότι, τα δυο αυτά σημεία δεν βρίσκονται σε κοντινή απόσταση με κάποια από τις επιφάνειες (δρόμος, τοίχος, κτλ.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επίδραση της θερμοκρασίας των υλικών από τα οποία αποτελούνται οι τοίχοι να είναι μικρότερη. Έτσι, η απλούστευση της γεωμετρίας θεωρώντας τους τοίχους ως ένα και μόνο υλικό, επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό το αποτέλεσμα της θερμοκρασίας σε αυτά τα σημεία.

Θερμοκρασίες Πεδίου και CFD σε απόσταση 1.8m και 4m από το Τοίχο 1						
	1.8m από το Τοίχο 1 (z=4m)			4m από το Τοίχο 1 (z=4m)		
Ωρα	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφορά	AT (°C) Μετρήσεις Πεδίου	AT (°C) CFD	Διαφορά
0:00	25.58	24.63	0.95	25.43	24.47	0.96
1:00	25.66	24.91	0.75	25.59	24.91	0.67
2:00	25.49	24.98	0.51	25.37	24.99	0.38
3:00	25.61	24.76	0.84	25.55	24.81	0.74
4:00	25.68	24.62	1.06	25.58	24.66	0.92
5:00	25.97	25.34	0.63	25.72	25.32	0.40
6:00	26.88	26.39	0.48	26.61	26.24	0.37
7:00	28.16	28.74	-0.58	28.08	28.49	-0.41
8:00	30.13	30.78	-0.65	30.05	30.22	-0.17
9:00	32.04	32.16	-0.12	31.88	31.80	0.08
10:00	35.02	33.35	1.67	33.70	32.64	1.06
11:00	35.82	34.75	1.07	34.70	34.29	0.41
12:00	35.74	35.36	0.38	34.97	35.08	-0.11
13:00	35.44	35.06	0.38	34.73	34.82	-0.09
14:00	34.04	34.56	-0.52	33.67	34.31	-0.64
15:00	32.91	33.26	-0.34	32.78	32.92	-0.14
16:00	31.90	32.33	-0.43	31.86	32.12	-0.26
17:00	31.13	31.27	-0.14	31.09	31.10	-0.01
18:00	29.87	30.20	-0.34	29.91	30.12	-0.20
19:00	28.82	29.46	-0.64	28.92	29.24	-0.32
20:00	27.98	28.42	-0.44	28.10	28.44	-0.35
21:00	27.38	27.55	-0.18	27.50	27.59	-0.09
22:00	26.86	26.85	0.01	26.94	26.83	0.11
23:00	26.59	26.86	-0.27	26.68	26.83	-0.15

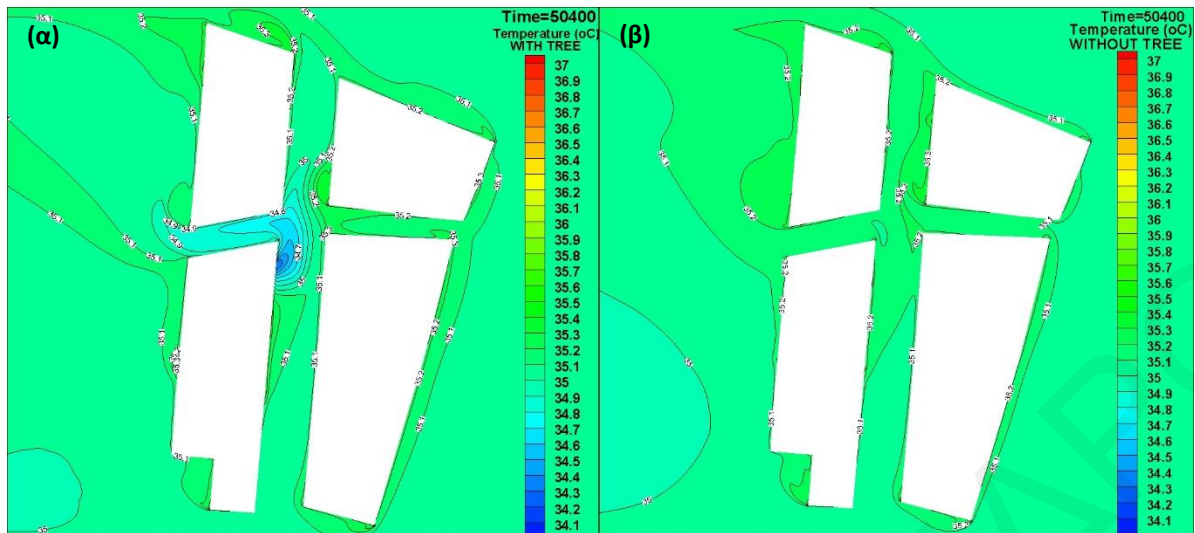
Πίνακας 8.3: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης CFD και μετρήσεων πεδίου και της διαφοράς μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα 1.8m και 4m από τον Τοίχο 1.



Εικόνα 49 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα του μοντέλου CFD (κόκκινο) και των τιμών πεδίου (πράσινο) για ύψος $z=4m$ και απόσταση (α) $z=1.8m$ και (β) $z=4m$, (γ) από τον Τοίχο 1.

8.4 Συγκρίσεις CFD στην παρουσία και απουσία δέντρου

Με σκοπό να μελετηθούν οι μεταβολές υπό την παρουσία του δέντρου πραγματοποιήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά CFD κατά την απουσία της βλάστησης και των όρων πηγής/καταβόθρας που την χαρακτηρίζουν. Στην Εικόνα 8.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα της ίδιας προσομοίωσης (α) στην παρουσία της βλάστησης και (β) στην απουσία της βλάστησης, για το ύψος των 2m στις 13:00. Η θετική επίδραση της βλάστησης εντός των οδικών φαραγγιών είναι ξεκάθαρη. Παρατηρώντας το σημείο όπου βρίσκεται το δέντρο, η επιρροή δεν αναπτύσσεται μόνο στην περιοχή που βρίσκεται κάτω και γύρω από αυτό, αλλά μπορεί να επηρεάσει και σε μεγαλύτερη απόσταση όπως γειτονικά φαράγγια.



Εικόνα 50 Αποτελέσματα CFD για την θερμοκρασία αέρα στις 13:00 (α) για την περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της βλάστησης και (β) για την περίπτωση που δεν συμπεριλαμβάνεται η βλάστηση

Στον Πίνακα 8.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διαφορές στις τιμές των θερμοκρασιών για το ύψος των 2m μεταξύ των προσομοιώσεων στην παρουσία και στην απουσία της βλάστησης.

Παρατηρείται ότι:

- Για τον ανατολικό τοίχο όπου βρίσκεται μακριά από το δέντρο οι διαφορές μεταξύ των τιμών κατά την παρουσία και απουσία της βλάστησης είναι μικρή καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.
- Για τον δυτικό τοίχο τις πρωινές ώρες (00:00 – 6:00) οι διαφορές στις θερμοκρασίες είναι ελάχιστες λόγω της απουσίας της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια του φαινομένου της ψύξης εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής. Από τις 07:00 και έπειτα όπου πλέον υπάρχει η επίδραση της εξατμισοδιαπνοής από το δέντρο, φαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων στην παρουσία και στην απουσία του δέντρου είναι αισθητή.
- Η μεγαλύτερη διαφορά καταγράφεται στις 15:00 και φτάνει μέχρι και τους 1.83°C στο ύψος των 4m και 1.38°C στο ύψος των 3m στην πλευρά που βρίσκεται το δέντρο.

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν το θετικό αντίκτυπο που μπορεί να έχει ένα και μόνο δέντρο εντός του φαραγγιού της Λήδρας. Μια διαφορά στη θερμοκρασία κατά 0.92°C που καταγράφεται στο ύψος των 2m θα έχει ως αποτέλεσμα, σημαντική βελτίωση στην θερμική άνεση των πεζών εντός του φαραγγιού κατά την διάρκεια των θερμών ημερών.

Διαφορές στις Θερμοκρασίες CFD Χωρίς Βλάστηση και με Βλάστηση ($T_{withoutree} - T_{tree}$) (°C)						
Ωρα (h)	Τοίχος 1			Τοίχος 2		
	Z=2m	Z=3m	Z=4m	Z=2m	Z=3m	Z=4m
0:00	0.02	0.01	0.00	0.15	0.31	0.46
1:00	-0.09	-0.09	-0.08	0.04	0.07	0.05
2:00	-0.11	-0.10	-0.08	0.05	0.08	0.07
3:00	0.03	0.03	0.02	0.11	0.07	0.06
4:00	0.16	0.15	0.12	0.21	0.20	0.20
5:00	-0.10	-0.11	-0.11	0.21	0.26	0.28
6:00	0.00	-0.04	-0.07	0.46	0.54	0.55
7:00	0.02	0.02	0.03	0.41	1.00	1.40
8:00	0.12	0.12	0.11	0.92	1.23	1.28
9:00	-0.14	-0.13	-0.12	-0.07	0.40	0.89
10:00	0.06	0.08	0.08	0.16	1.01	1.55
11:00	-0.07	-0.06	-0.02	-0.13	0.32	1.47
12:00	-0.06	-0.05	-0.04	0.27	0.81	1.40
13:00	0.01	0.00	0.01	0.45	0.81	1.19
14:00	0.08	0.07	0.08	0.68	1.10	1.06
15:00	-0.03	-0.02	-0.03	0.72	1.38	1.83
16:00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.07	0.15	0.36
17:00	-0.06	-0.06	-0.05	0.09	0.13	0.17
18:00	-0.30	-0.19	-0.14	-0.09	-0.07	-0.09
19:00	-0.23	-0.13	-0.06	-0.15	-0.08	-0.05
20:00	0.03	-0.02	-0.06	-0.13	-0.12	-0.13
21:00	-0.09	-0.04	-0.05	-0.20	-0.17	-0.14
22:00	0.13	0.10	0.02	-0.06	-0.06	-0.04
23:00	0.13	0.16	0.21	-0.02	-0.01	-0.01

Πίνακας 8.4: Πίνακας με τις διαφορές στα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα της προσομοίωσης CFD συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του δέντρου και της προσομοίωσης CFD χωρίς την συμπερίληψη του δέντρου για τα 2m, 3m και 4m του Τοίχου 1 και του Τοίχου 2

Κεφάλαιο 9

Επίλογος

Αυτή η εργασία είχε ως σκοπό να μελετήσει την επίδραση της βλάστησης στην ροή του ανέμου και στις θερμοκρασίες εντός του οδικού φαραγγιού της Λήδρας. Έγινε χρήση του μοντέλου 3D unsteady RANS ενώ παράλληλα γίνεται χρήση του μοντέλου k-ε για τις τυρβώδεις ροές. Με σκοπό να προσομοιωθεί η επίδραση της βλάστησης, προστέθηκαν στις κυρίαρχες εξισώσεις οι επιπρόσθετοι όροι που αναπαριστούν την επιρροή στην ροή, στην εξατμισοδιαπνοή και στην σκίαση που προκαλεί η κορόνα του δέντρου.

- Τα αποτελέσματα δείχνουν μια καλή συσχέτιση μεταξύ τιμών πεδίου και προσομοίωσης CFD που κυμαίνεται από 0.38-0.75°C. Η μεγαλύτερη ακρίβεια παρατηρείται στο ύψος των 4m και σε απόσταση 4m από τον Ανατολικό τοίχο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου CFD με τις καταγεγραμμένες επικρατούσες συνθήκες είναι αναγκαία. Μοντέλα CFD με αποτελέσματα προσομοιώσεων με υψηλή ακρίβεια θα συγκροτεί ένα εχέγγυο εργαλείο για την μελέτη μελλοντικών υποθέσεων που αφορούν το αστικό μικροκλίμα. Σφάλματα της προσομοίωσης τα οποία δύναται να προκαλέσουν απόκλιση της πραγματικής τιμής με την τιμή CFD μπορεί να οφείλονται α) σε απλοποιήσεις στα υλικά τα οποία απαρτίζονται οι επιφάνειες, β) απλούστευση της γεωμετρίας, γ) απλοποιήσεις στην βλάστηση και δ) υποθέσεις που χρησιμοποιούν τα μοντέλα για να περιγράψουν τις φυσικές διεργασίες.
- Τα αποτελέσματα της έντασης του ανέμου έδειξαν ότι κοντά στις αμφίνεμες και προσήνεμες πλευρές των κτηρίων εμφανίζονται μικρής έντασης άνεμοι. Παράλληλα, κοντά στην κορόνα του δέντρου παρατηρούνται μικρότερης έντασης άνεμοι. Τα κτήρια και τα δέντρα εμφανίζονται ως εμπόδια στην ροή του ανέμου. Η κυρίαρχη διαφορά των δύο είναι ότι η βλάστηση αφήνει ένα πολύ μικρό μέρος της ροής να διατρέξει το εσωτερικό της βλάστησης, ενώ τα κτήρια αποτελούν συμπαγείς δομές στις οποίες δεν διέρχεται η ροή του ανέμου.
- Αξιοσημείωτα είναι τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αέρα, όπου δείχνουν την θετική επίδραση που έχει η παρουσία της βλάστησης. Εντός του οδικού φαραγγιού για το μέσο ύψος του ανθρώπου μπορεί να εμφανιστούν διαφορές στην θερμοκρασία μέχρι και 3°C, ενώ η ψηλότερη θερμοκρασία που καταγράφεται σε αυτό το ύψος είναι οι 36.10°C. Συμπεραίνεται ότι, η παρουσία της βλάστησης εντός των οδικών φαραγγιών δύναται να έχει ένα θετικό αντίκτυπο στην ελάττωση της θερμοκρασίας στο επίπεδο του πεζού. Η παρουσία ενός και μόνο δέντρου προκαλεί αισθητή μείωση της θερμοκρασίας, αφήνοντας ανοικτό το ερώτημα του πως θα επηρεαστεί η θερμοκρασία στην εμφάνιση περισσότερων δέντρων.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων CFD κατά την παρουσία και απουσία του δέντρου έδειξαν την σημαντικότητα της βλάστησης στην παρούσα γεωμετρία. Κατά την απουσία του δέντρου καταγράφονται τιμές μέχρι και 1.83°C περισσότερο, στο ύψος των 4m, ενώ για το μέσο ύψος του ανθρώπου η μέγιστη διαφορά ήταν στους 0.92°C. Η τιμή αυτή

αποτελεί μικρής τάξης διαφορά, παρ' όλα αυτά μπορεί να απαρτίζει ένα σημαντικό παράγοντα στην μεταβολή του δείκτη θερμικής άνεσης για τον άνθρωπο. Ο δείκτης θερμικής άνεσης περιγράφει την θερμοκρασία που αισθάνεται το ανθρώπινο σώμα και εξαρτάται από πολλούς περιβαλλοντικούς και μη παράγοντες. Μια μείωση της θερμοκρασίας αέρα κατά 0.92 °C μπορεί να επηρεάσει θετικά τον δείκτη θερμικής άνεσης.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις CFD μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η ορθή χρήση των αποτελεσμάτων στην λήψη στρατηγικών αποφάσεων που αφορούν το κλίμα μπορεί να έχει ένα θετικό αντίκτυπο. Παρά τα καλά αποτελέσματα που μπορεί να δώσει ένα μοντέλο CFD, τα μοντέλα ενδέχονται μεγαλύτερης βελτίωσης που θα έχουν ως αποτέλεσμα τις ακριβέστερες προσομοιώσεις με μικρότερη απόκλιση από την πραγματική τιμή. Επιπλέον, η εφαρμογή των μοντέλων σε πιο σύνθετες γεωμετρίες όπου εμπεριέχονται μπαλκόνια, κουφώματα αλλά και οποιαδήποτε λεπτομέρεια υπάρχει στην πραγματική γεωμετρία θα έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένες τιμές στα αποτελέσματα του CFD. Σημαντικό επίσης θα ήταν και η λεπτομερέστερη περιγραφή των επιφανειών, καθώς στις ρεαλιστικές γεωμετρίες οι επιφάνειες εμφανίζονται ως σύνθεση πολλών υλικών όπως γυαλί, τσιμέντο, ξύλο, μέταλλο, τούβλο κτλ., που θα αντιπροσώπευε τις πραγματικές θερμικές ιδιότητες των επιφανειών. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή του μοντέλου σε μεγαλύτερες γεωμετρίες όπου θα εμπεριείχαν περισσότερα κτήρια εντός του υπολογιστικού τομέα, θα αποτελούσε πλεονέκτημα στο να καταγραφούν αποτελέσματα σε ένα μεγαλύτερο εύρος περιοχής μελέτης, με αποτελέσματα σε γειτονικά φαράγγια της ίδιας περιοχής.

Ως μελλοντικά βήματα σε αυτήν την εργασία αλλά και στον ευρύτερο τομέα της προσομοίωσης της βλάστησης εντός των αστικών περιοχών θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στις εξισώσεις περιγραφής της βλάστησης επιπρόσθετοι όροι που θα έχουν ως αποτέλεσμα την λεπτομερέστερη περιγραφή της βλάστησης. Παράγοντες όπως η φωτοχημεία που προκαλείται από την βλάστηση ή και ακόμα λεπτομερέστερη περιγραφή της γεωμετρίας του δέντρου θα είχαν ως αντίκτυπο βελτιωμένες τιμές των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, σταθερές που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του δέντρου όπως πχ. το LAD αναπαρίστανται σαν μια σταθερή τιμή. Θα μπορούσαν στο μέλλον να αποτελούν μεταβαλλόμενες σταθερές που θα ήταν ανάλογες με τον ετήσιο κύκλο του δέντρου και την εποχή. Μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την χωρική κατανομή των φαινομένων της ψύξης καθώς τα δέντρα δεν αποτελούν ομοιόμορφες περιοχές αλλά, εντός της κορόνας ενός δέντρου υπάρχουν περιοχές με έντονο φύλλωμα και περιοχές με αραιό. Τέλος, ο σημαντικός παράγοντας της σκίασης που έχει μεγάλο θετικό αντίκτυπο στην θερμική άνεση του ανθρώπου θα ήταν σημαντικό να περιέχει παράγοντες που εξαρτώνται από το αζιμουθιακό υπολογισμό του Ήλιου.

Μελλοντικές μελέτες πάνω στην επίδραση της βλάστησης εντός του μικροκλίματος μπορούν επίσης να αξιολογήσουν το φαινόμενο της ψύξης εστιάζοντας σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες ή ακόμα και σε πόλεις με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Οι μελλοντικές μελέτες CFD, μπορούν να επικεντρωθούν στην ενσωμάτωσή μεταφοράς μάζας εκτός από την ροή του ανέμου και την μεταφορά θερμότητας για μια πιο ρεαλιστική και εμπεριστατωμένη αναπαράσταση του αστικού μικροκλίματος. Επιπλέον, αξιόλογες θα ήταν μελλοντικές μελέτες που εστιάζουν στην διάχυση των ρύπων εντός των οδικών φαραγγιών στην παρουσία της βλάστησης και μέσω των εξισώσεων της χημείας. Μελέτες με επίκεντρο την επίδραση της βλάστησης σε ενεργειακά ζητήματα κτιρίων, στην εσωτερική και εξωτερική θερμική άνεση και στον φυσικό αερισμό των κτηρίων θα ήταν επίσης αξιόλογα.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η βλάστηση έχει θετικό αντίκτυπο στο μικροκλίμα εντός των αστικών φαραγγιών και ενδεχομένως θετική επίδραση στο δείκτη θερμικής άνεσης. Ο δρόμος της Λήδρας αποτελεί ένα από τους πολυσύχναστους δρόμους της Λευκωσίας και αντιπροσωπεύει έναν χαρακτηριστικό δρόμο της περιοχής. Τα αποτελέσματα μπορούν να γενικευθούν σε ένα μεγαλύτερο πλαίσιο για την περιοχή βοηθώντας στην λήψη κατάλληλων αποφάσεων για την βελτίωση του μικροκλίματος. Η λήψη αποφάσεων βασισμένη σε επιστημονικά τεκμηριωμένα εργαλεία σαν αυτά του CFD μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια έγκυρη, χαμηλού κόστους και σχετικά γρήγορη μελέτη φαινομένων που συμβαίνουν ή μπορούν να συμβούν εντός του αστικού μικροκλίματος, μελετώντας παράλληλα διαφορετικά σενάρια με σκοπό να εξαχθούν αποτελέσματα που θα βελτιώσουν την ποιότητα ζωής του ανθρώπου εντός των αστικών περιοχών.

References

- [1] J. Rogelj et al., "Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates," *Nature climate change*, APRIL 2012.
- [2] T. McMichael et al., "Health risks, present and future, from global climate change," *BMJ*, 2012.
- [3] A. D. S. e. a. Michelozzi, "High Temperature and Hospitalizations for Cardiovascular and Respiratory Causes in 12 European Cities," *AMERICAN JOURNAL OF RESPIRATORY AND CRITICAL CARE MEDICINE*, 2009.
- [4] H. Tsangari et al., "Human mortality in Cyprus: the role of temperature and particulate air pollution," *Reg Environ Change*, p. 1905–1913, 2016.
- [5] Antoniou et al., "CFD simulation of urban microclimate: Validation using high-resolution field measurements," *Science of the Total Environment*, vol. 695, 2019.
- [6] Mughal et al., "Detailed investigation of vegetation effects on microclimate by means of computational fluid dynamics (CFD) in a tropical urban environment," *Urban Climate*, 2021.
- [7] Hosseinzadeh and Keshmiri, "Computational Simulation of Wind Microclimate in Complex Urban Models and Mitigation Using Trees," *Buildings*, vol. 11, 2021.
- [8] Moradpour and Hosseini, "An investigation into the effects of green space on air quality of an urban area using CFD modeling," *Urban Climate 34 (2020) 100686*, vol. 34, 2020.
- [9] Buccolieri et al., "The impact of trees on street ventilation, NO_x and PM_{2.5} concentrations across heights in Marylebone Rd street canyon, central London," p. 227–241, 2018.
- [10] Hong et al., "Prediction of Wind Environment and Indoor/Outdoor Relationships for PM_{2.5} in Different Building–Tree Grouping Patterns," *Atmosphere*, 2018.
- [11] Moradpour et al., "A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree plantin," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 8, pp. 253-266, 2017.
- [12] Vranckx et al., "Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: A numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium," *Science of the Total Environment*, vol. 532, pp. 474-483, 2015.
- [13] Krayenhoff et al., "Parametrization of Drag and Turbulence for Urban Neighbourhoods with Trees," *Boundary-Layer Meteorol*, pp. 156-189, 2015.
- [14] Gromke et al., "CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem Netherlands," *Building and Environment*, vol. 83, pp. 11-26, 2015.
- [15] Jeanjean et al., "A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale," *Atmospheric Environment*, vol. 120, pp. 1-14, 2015.
- [16] Gromke and Blocken, "Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part I: Quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations," *Environmental Pollution*, vol. 196, pp. 214-223, 2015.

- [17] Salim et al., "Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas: Should we care?," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 84-95, 2005.
- [18] Santiago et al., "A computational fluid dynamic modelling approach to assess the representativeness of urban monitoring stations," *Science of the Total Environment*, vol. 454-455, p. 61-72, 2013.
- [19] Amorim et al., "CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion," *Science of the Total Environment*, Vols. 461-462, p. 541-551, 2013.
- [20] Orlanski, "A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes," *American Meteorological Society*, 1975.
- [21] J. Garratt, "Review: the atmospheric boundary layer," *Earth-Science Reviews*, pp. 89-134, 1994.
- [22] RIZWAN Ahmed Memon et al., "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island," *Journal of Environmental Sciences*, 2008.
- [23] Giridharan et al., "Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong," *Energy and Buildings*, p. 525-534, 2004.
- [24] Nunez and Oke, "The energy balance of an urban canyon," *Journal of Applied Meteorology*, 1997.
- [25] Oke, "Street Design and Urban Canopy Layer Climate," *Energy and Buildings*, vol. 11, pp. 103-113, 1988.
- [26] Blocken et al., "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," *Atmospheric Environment*, vol. 41, p. 238-252, 2007.
- [27] Shih et al., "A new k- ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows," *Computers Fluids*, vol. 24, pp. 227-238, 1995.
- [28] Richards and Hoxey, "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 145-153, 1993.
- [29] ANSYS Inc, "ANSYS FLUENT User's Guide.," ANSYS FLUENT, 2013.
- [30] Zheng et al., "Characteristics of wind flow around a target building with different surrounding building layers predicted by CFD simulation," *Building and Environment*, vol. 201, 2021.
- [31] Antoniou et al., "CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using "air delay"," *Building and Environment*, vol. 126, pp. 355-372, 2017.
- [32] Juan et al., "Optimization procedures for enhancement of city breathability using arcade design in a realistic high-rise urban area," *Building and Environment*, vol. 121, pp. 247-261, 2017.
- [33] Wen et al., "Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons," *Building and Environment*, vol. 112, pp. 322-336, 2017.

- [34] Hang et al., "City breathability in medium density urban-like geometries evaluated through the pollutant transport rate and the net escape velocity," *Building and Environment*, vol. 94, pp. 166-182, 2015.
- [35] Buccolieri et al., "The breathability of compact cities," *Urban Climate*, vol. 13, p. 73–93, 2015.
- [36] Ramponi et al., "CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths," *Building and Environment*, vol. 92, pp. 152-166, 2015.
- [37] Lin et al., "Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density," *Building and Environment*, vol. 79, pp. 152-167, 2014.
- [38] Panagiotou et al., "City breathability as quantified by the exchange velocity and its spatial variation in real inhomogeneous urban geometries: An example from central London urban area," *Science of the Total Environment*, vol. 442, p. 466–477, 2013.
- [39] Hang et al., "Natural ventilation assessment in typical open and semi-open urban environments under various wind directions," *Building and Environment*, vol. 70, pp. 318-333, 2013.
- [40] Hang et al., "On the contribution of mean flow and turbulence to city breathability: The case of long streets with tall buildings," *Science of the Total Environment*, vol. 416, p. 362–373, 2012.
- [41] Hang et al., "The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas," *Building and Environment*, vol. 56, p. 346e360, 2012.
- [42] Stathopoulos and Tominaga, "CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS," *Journal of Wind Engineering*, vol. 99, p. 340–348, 2011.
- [43] Gousseau et al., "CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal," *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 428-438, 2011.
- [44] Moonen et al., "Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES," *Journal of Wind Engineering*, vol. 99, p. 414–423, 2011.
- [45] Kim et al., "A wind tunnel experiment and CFD analysis on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea," *Building and Environment*, vol. 45, p. 1329–1338, 2010.
- [46] Buccolieri et al., "City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries," *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 1894-1903, 2010.
- [47] Hang and Li, "Wind Conditions in Idealized Building Clusters: Macroscopic Simulations Using a Porous Turbulence Model," *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 136, pp. 129-159, 2010.
- [48] Hang and Li, "Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 2754-2767, 2010.
- [49] Hang et al., "Wind conditions and ventilation in high-rise long street models," *Building and Environment*, Vols. 1353-1365, p. 45, 2010.

- [50] Hang et al., "Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models," *Atmospheric Environment*, vol. 43, pp. 869-878, 2009.
- [51] Yim et al., "Air ventilation impacts of the "wall effect" resulting from the alignment of high-rise buildings," *Atmospheric Environment*, vol. 43, pp. 4982-4994, 2009.
- [52] Bu et al., "New criteria for assessing local wind environment at pedestrian level based on exceedance probability analysis," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1501-1508, 2009.
- [53] Cheng et al., "Computational formulation for the evaluation of street canyon ventilation and pollutant removal performance," *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 9041-9051, 2008.
- [54] Blocken et al., "CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, p. 941–962, 2007.
- [55] Yoshie et al., "Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, p. 1551–1578, 2007.
- [56] Skote et al., "Numerical and experimental studies of wind environment in an urban morphology," *Atmospheric Environment*, vol. 39, p. 6147–6158, 2005.
- [57] Buccolieri et al., "Reprint of: Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects," *Urban Forestry & Urban Greening*, pp. 56-64, 2019.
- [58] Kalansuriya et al., "Effect of roadside vegetation on the reduction of traffic noise levels," Sri Lanka, 2009.
- [59] Janhall, "Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition and dispersion," *Atmospheric Environment*, pp. 130-137, 2015.
- [60] SANZ, "A NOTE ON $k - \epsilon$ MODELLING OF VEGETATION CANOPY AIR-FLOWS," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 108, 2002.
- [61] A.M. Endalew et al., "A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 71, p. 128–136, 2010.
- [62] Y. TOPARLAR et al., "The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium," *Int. J. Climatol*, vol. 38, 2018.
- [63] Sanz, "A note on $k - \epsilon$ modeling of vegetation canopy air flows," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 108, pp. 191-197, 2003.
- [64] Katul et al., "One-and two-equation models for canopy turbulence. Bound. Layer Meteorol.," *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 81-109, 2004.
- [65] Liu et al., "E – e modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge," *Boundary Layer Meteorology*, pp. 21-44, 1996.
- [66] Viana et al., "Natural sources of atmospheric aerosols influencing air quality across Europe," *Science of the Total Environment*, p. 825–833, 2014.

- [67] Stewart and Oke, Local climate zones for urban temperature studies, 2012.
- [68] Neophytou et al., "Towards Optimization of Urban Planning and Architectural Parameters for Energy use Minimization in Mediterranean Cities," Sweden, 2011.
- [69] Tominaga et al., "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, p. 1749–1761, 2008.
- [70] L. L. X. L. B. Z. Y. Liang, "Improved k-epsilon two-equation turbulence model for canopy flow," *Atmospheric Environment*, vol. 40, 2005.
- [71] L. P. D. E. E. Shashua-Bar, "The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate," *Landscape and Urban Planning*, vol. 92, 2009.
- [72] A. D. C. R. N. V. J. D. M. R. H. N. B. V. P. Melese Endalew, "A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 72, 2010.
- [73] B. L. W. Jian Z, "Study on windbreak performance of tree canopy by numerical simulation method," *The Journal of Computational Multiphase Flows*, vol. 10, 2018.
- [74] X. Q. D. V. J. N. A. S. P. P. McPherson E.G., "Shade factors for 149 taxa of in-leaf urban trees in the USA," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 31, 2018.
- [75] C. Gromke et al., "CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands," *Building and Environment*, vol. 83, pp. 11-26, 2015.
- [76] M. Moradpour et al., "A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree planting," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 8, pp. 253-266, 2017.