



Ευφυής Ερευνητική Υποδομή στη Ναυτιλία, την Εφοδιαστική Αλυσίδα, και τις Μεταφορές +
Intelligent Research Infrastructure, Shipping, Supply Chain, Transport and Logistics +
(EN.I.R.I.S.S.T.+)

Μοντέλα και τεχνικές προσομοίωσης πεδίων ροής σε πόλεις-λιμάνια (UoP)



enirisstplus



ENIRISSTplus



ENIRISSTplus



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας
και Οικονομικών
Ειδική Γραμματεία Διαχείρισης
Προγραμματισμού ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας
και Οικονομικών
Ειδική Γραμματεία Διαχείρισης
Προγραμμάτων ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
1.1	Δομή της μελέτης.....	11
1.2	Το πρόβλημα.....	11
1.3	Σκοπός της μελέτης.....	13
2	Δεδομένα	15
2.1	Μετρήσεις συγκέντρωσης Μικροσωματιδίων	15
2.1.1	PurpleAir δίκτυο	15
2.1.2	Καθαρισμός και Βαθμονόμηση των μετρήσεων	17
2.2	Μετεωρολογικά δεδομένα	20
2.3	Τρισδιάστατα μοντέλα πόλεων	24
2.3.1	OpenStreetMap	24
2.3.2	Blender/blender-osm	25
3	Μοντελοποίηση/προσομοίωση πεδίων ροής σε πόλεις – λιμάνια	26
3.1	Στοιχεία ρευστοδυναμικής	26
3.1.1	Βασικές εξισώσεις και παραδοχές	26
3.1.2	Μοντέλα Τύρβης	27
3.2	Μεθοδολογία.....	31
3.2.1	Γενικά.....	31
3.2.2	Κατασκευή πλέγματος και Συνοριακές Συνθήκες	33
3.2.3	Επίλυση των Navier-Stokes.....	35
3.3	Αποτελέσματα και Συζήτηση	38
3.3.1	Προφίλ της ροής	38
3.3.2	Ισοδυναμικές επιφάνειες της ροής	41
3.3.3	Φαινόμενα οδικού φαραγγιού.....	43

4	Μοντέλα Μηχανικής Μάθησης για την πρόγνωση αιωρούμενων σωματιδίων σε πόλεις – λιμάνια	50
4.1	Γενικά.....	50
4.2	Μεθοδολογία.....	50
4.2.1	Το μοντέλο πρόγνωσης	50
4.2.2	Δικτύα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM).....	51
4.2.3	Κατασκευή και Επιλογή χαρακτηριστικών	54
4.2.4	Εκπαίδευση, Επικύρωση και Έλεγχος του μοντέλου	56
4.2.5	Περιοχή μελέτης.....	57
4.3	Αποτελέσματα	59
4.3.1	Σύγκριση μεταξύ των δύο υλοποιήσεων IMV-LSTM	59
4.3.2	Μοντέλο ημερήσιων προγνώσεων	61
4.3.3	Μοντέλο ωριαίων προβλέψεων.....	64
4.3.4	Γενικές επισημάνσεις	67
5	Συμπεράσματα και προεκτάσεις.....	71
5.1	Μοντελοποίηση/προσομοίωση πεδίων ροής σε πόλεις – λιμάνια.....	71
5.2	Μοντέλο πρόβλεψης συγκεντρώσεων ρύπων μέσω Μηχανικής Μάθησης	72
6	Παράρτημα.....	74
6.1	Αρχεία εισόδου εργαλείων του OpenFoam.....	74
6.1.1	blockMeshDict	74
6.1.2	surfaceFeaturesDict	78
6.1.3	snappyHexMeshDict	79
6.1.4	controlDict	83
6.2	Μακροεντολή σε python για εξαγωγή δεδομένων απο το paraview.....	84
7	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	88

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διαγράμματα διασποράς για τα δύο κανάλια των αισθητήρων PurpleAir στην Πάτρα με id ∈ {56113, 56229, 56453, 57523, 101589, 101597, 101609, 101611, 146920} που ικανοποιούν το κριτήριο ???. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων, με τις αντίστοιχες παραμέτρους να βρίσκονται στον πίνακα.	22
Εικόνα 2: Διαγράμματα διασποράς για τα δύο κανάλια των αισθητήρων PurpleAir στην Πάτρα με id ∈ {741, 749, 1030, 1566, 1672, 1712, 5078, 5092, 14857, 14877, 23759, 30765} που ικανοποιούν το κριτήριο $\lfloor \text{quality-cut} \rfloor$. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων, όπου οι αντίστοιχες παράμετροι βρίσκονται στον Πίνακα 2.	23
Εικόνα 3: Στιγμιότυπο οθόνης όπου απεικονίζεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου πλησίον του αισθητήρα εγκατεστημένου στο κέντρο της Χίου (οδός Κουντουριώτου) με χρήση του FOSS προγράμματος Blender.	26
Εικόνα 4: Διάγραμμα ροής για την διαδικασία της παραγωγής του πλέγματος (mesh) επι του οποίου θα γίνει η αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων.	34
Εικόνα 5: Προτεινόμενα σημεία δειγματοληψίας επι της περιοχής μελέτης για την επιβεβαίωση των προσομοιώσεων. Οι συντεταγμένες τους ως προς το τοπικό συστημα αναφοράς καθώς και η περιγραφή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.	38
Εικόνα 6: Προφίλ της ροής για τα σημεία του Πίνακα 5. Στον x άξονα έχουμε την αδιαστατικοποιημένη ταχύτητα και στον y το αδιαστατικοποιημένο ύψος.	42
Εικόνα 7: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 9m για το LES Smagorinsky μοντέλο γυρω απο τα σημεια 1, 3, 7, 6.	45
Εικόνα 8: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 1.65m για το LES Smagorinsky μοντέλο γυρω απο τα σημεια 1,3,7,6.	46
Εικόνα 9: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 9m για το RANS k-ε μοντέλο γύρω απο τα σημεία 1, 3, 7, 6.	47
Εικόνα 10: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 1.65 m για το RANS k-ε μοντέλο γύρω απο τα σημεία 1, 3, 7, 6.	48
Εικόνα 11: Σκιαγράφιση των ροϊκών γραμμών για το LES μοντέλο με έμφαση σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος και για ένα υποσύνολο του υπολογιστικού χωρίου.	49
Εικόνα 12: Ισοδυναμικές επιφάνειες της ροής κατα μήκος των οδών Κουντουριώτου (κάτω) και Πολεμίδα (πάνω).	50

- Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση ενός γενικού ANN, το οποίο "ξετυλίγεται" στο χρόνο, όπου x_t και h_t είναι το διάνυσμα χαρακτηριστικών εισόδου και το διάνυσμα κρυφής κατάστασης στο χρονικό βήμα t , αντίστοιχα. 54
- Εικόνα 14: Μέση ποσοστιαία συνεισφορά χαρακτηριστικών σε 60 εκτελέσεις εκπαίδευσης για τις δύο εκδόσεις IMV-LSTM LSTM, δηλαδή την "tensor" και την "full". Χρησιμοποιήθηκε παράθυρο πρόβλεψης 24 ωρών και χρονικό παράθυρο αναδρομής 48 ωρών. Οι παράμετροι εκπαίδευσης και τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στη γραμμή 4 του Πίνακα 8. 61
- Εικόνα 15: Αξιολόγηση μοντέλου για ημερήσιες προβλέψεις. Το παράθυρο πρόβλεψης είναι 7 ημέρες και τα δεδομένα "auto-regression" αντιστοιχούν στις προηγούμενες 7 ημέρες. Το ΜΤΡΣ είναι $\sim 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και το ΜΑΣ είναι $\sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι προβλέψεις του μοντέλου παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι παρατηρήσιμες τιμές με μπλε. 62
- Εικόνα 16: Αξιολόγηση του μοντέλου που αντιστοιχεί στην 3η γραμμή του Πίνακα 8, το οποίο αφορά ωριαίες προβλέψεις. Το παράθυρο πρόβλεψης είναι 24 ώρες και τα δεδομένα "Auto-regressive" αντιστοιχούν στις προηγούμενες 24 ώρες. Τα σφάλματα ΡΤΜΣ και ΜΑΣ είναι $\sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $\sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι προγνώσεις παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι παρατηρήσεις με μπλε. 64
- Εικόνα 17: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ημερήσιας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 5 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί. 64
- Εικόνα 18: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ημερήσιας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 6 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί. 65
- Εικόνα 19: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ωριαίας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 3 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί. 65
- Εικόνα 20: Το ΜΑΣ ανά μήνα και ανά συγκεκριμένο αισθητήρα, κανονικοποιημένο με το συνολικό μέσο σφάλμα, για το μοντέλο με αριθμό 3 του Πίνακα 8. 66

Κατάλογος Πινάκων

Γενικές ιδιότητες του συνόλου δεδομένων μας. Η στήλη "id" αντιστοιχεί στο id του αισθητήρα στο δίκτυο purpleAir, a, b είναι οι συντελεστές της γραμμικής προσαρμογής μεταξύ των καναλιών, μ , σ , (και τα ίδια με δίσωση) είναι η μέση διασπορά με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, τη διάμεσο τιμή και η αντίστοιχη απόκλιση. Η διασπορά ορίζεται ως η ορθογώνια απόσταση μεταξύ κάθε τιμής PM2.5, κανάλι A, PM2.5, κανάλι B) και της προσαρμοσμένης γραμμής. Τα τ και οι αντίστοιχες ρ τιμές είναι μέτρα συσχέτισης, είτε "Pearson" είτε "Spearman". Λεπτομερής περιγραφή μπορεί να βρεθεί στο κείμενο.	16
Ονόματα, κωδικοί (id) και συντεταγμένες των εγκατεστημένων αισθητήρων μικροσωματιδίων στην πόλη της Πάτρας και τα περίχωρα αυτής.	18
Διαθέσιμα μετεωρολογικά παρατηρήσιμα απο το Weather Underground.	24
Τιμές ελεύθερων παραμέτρων για το RANS μοντέλο κ-ε.	30
Θέσεις προτεινόμενων σημείων δειγματοληψίας επι της περιοχής μελέτης.	37
Προφίλ ταχύτητας για ορισμένα σημεία του υπολογιστικού χωρίου για το RANS μοντέλο τύρβης κ-ε. .	40
Προφίλ ταχύτητας για ορισμένα σημεία του υπολογιστικού χωρίου για το LES μοντέλο τύρβης Smagorinsky.	41
Αποτελέσματα μετά την εκπαίδευση για διαφορετικά μοντέλα και παραμέτρους εκπαίδευσης. Κάθε γραμμή αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο και ρύθμιση εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε για 10 εκτελέσεις εκπαίδευσης. Έχουμε χρησιμοποιήσει 600 εποχές εκπαίδευσης και η παράμετρος "patience" του μηχανισμού διακοπής έχει τιμή 30. Τα σύνολα χαρακτηριστικών ορίζονται στην προηγούμενη ενότητα. Παρουσιάζουμε τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις (τ.α.) για τη PMTΣ και το ΜΑΣ. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνεται το καλύτερο μοντέλο για τις ωριαίες προβλέψεις. .	59

Κατάλογος Ακρωνυμίων

Αγγλικά ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Περιγραφή
FOSS	Free & Open Source Software
MFR	Mean Floor Ratio
MPD	Mean Population Density
OSM	OpenStreetMap
PM	Particulate Matter

Ελληνικά Ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Περιγραφή
ΑΣ	Αιωρούμενα Σωματίδια
ΜΣΔ	Μέσος Συντελεστής Δόμησης
ΜΠΠ	Μέση Πυκνότητα Πληθυσμού
ΠΟΣ	Πλανητικό Οριακό Στρώμα



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Περίληψη

Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια συνεισφορά στο πρόβλημα της μοντελοποίησης του πεδίου ροής σε πόλεις-λιμάνια, με τελικό σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την χρονοεξέλιξη της συγκέντρωσης Αιωρούμενων Σωματιδίων στο αστικό περιβάλλον, δίνοντας έμφαση στις πόλεις – λιμάνια. Να σημειωθεί ότι η μελέτη βασίζεται εξ'ολοκλήρου σε ανοικτό λογισμικό και δεδομένα, ενώ όλα τα προϊόντα δεδομένων και οι κώδικες που παρήχθησαν διατίθενται ελεύθερα με CC άδεια.

Στο πλαίσιο κλασικών μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, μελετήθηκε μια περιοχή πλησίον του λιμένα της Χίου. Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα τύρβης RAS και LES με το εργαλείο ανοικτού κώδικα OpenFoam. Οι αρχικές συνθήκες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις πιο συχνές/επιδραστικές μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ επιλέχθηκαν κυκλικές συνοριακές συνθήκες σε αντιστοιχία με τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιήθηκαν τα εξαχθέντα προφίλ ταχύτητας καθ' ύψος για συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντας για τη προσαρμογή ενός τυπικού προφίλ ταχύτητας με σκοπό την διευκόλυνση μελλοντικών εργασιών ως προς ρεαλιστικότερες αρχικές συνθήκες. Παράλληλα, τα εν λόγω προφίλ αποτελούν τη βάση για την παρατηρησιακή επικύρωση των προσομοιώσεων που παράχθηκαν. Βρέθηκε επίσης ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του πεδίου ροής και συγκεκριμένα περιοχές εκτόξευσης (eject) και συζητήθηκε ο ρόλος τους υπο το πρίσμα της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων. Ένα σημαντικό αποτελέσματα από πλευράς φυσικής αφορά τη σημασία των φαινομένων οδικών φαραγγιών ακόμα και για αστικά περιβάλλοντα στα οποία κυριαρχούν σχετικά χαμηλά κτήρια. Ακόμη, βρέθηκε ότι ο βαθμός εισχώρησης της ροής εκ των άνω εντός ενός οδικού φαραγγιού δεν εξαρτάται τόσο από την διεύθυνση του φαραγγιού ως προς τη μέση ροή αλλά από τις παρακείμενες ανομοιομορφίες της αστικής δομής.

Στο πλαίσιο των μεθόδων βαθιάς μάθησης, μελετήθηκε ένα νέο νευρωνικό δίκτυο τύπου μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM), με στοιχεία διερμηνευσιμότητας, για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικά περιβάλλοντα. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από ένα δίκτυο αισθητήρων χαμηλού κόστους και εισήχθησαν νέα χαρακτηριστικά που αποτυπώνουν πληρέστερα τους υποκείμενους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν το φαινόμενο. Εν προκειμένω, ο Μέσος Συντελεστής Δόμησης, η Μέση Πυκνότητα Πληθυσμού και η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου. Το μοντέλο προσέφερε εξαιρετική ακρίβεια πρόβλεψης, με σφάλμα πρόβλεψης συγκρίσιμο της ακρίβειας των αισθητήρων. Παράλληλα, μπορεί να ενσωματώσει διαφορετικούς τύπους αισθητήρων, δοθέντων κατάλληλων καμπύλων βαθμονόμησης, όπως και κινούμενους αισθητήρες. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο πρόβλεψης ρύπανσης σε αστικά περιβάλλοντα, με δυναμική εφαρμογή σε πολλές πόλεις-λιμάνια σε παγκόσμιο επίπεδο.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

1 Εισαγωγή

1.1 Δομή της μελέτης

Η παρούσα μελέτη αποτελείται από επτά (7) κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 δίνεται μια εισαγωγή αναφορικά με τις διάφορες αρχές των ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων μοντελοποίησης του πεδίου ροής εντός αστικού περιβάλλοντος. Παραπέρα συζητούνται οι ιδιαιτερότητες των πόλεων-λιμανιών, ενώ παρατίθενται ο σκοπός και η μεθοδολογία της μελέτης. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν όπως και αναλυτικά η διαδικασία επεξεργασίας τους. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η μεθοδολογία της Υπολογιστικής Μηχανικής Ρευστών, με έμφαση στην κατασκευή του πλέγματος και στις αρχικές/συνοριακές συνθήκες, ενώ παρουσιάζονται επίσης τα σχετικά αποτελέσματα. Στο Κεφάλαιο 4 εφαρμόζονται μέθοδοι Μηχανικής Μάθησης και πιο συγκεκριμένα βαθιάς μάθησης, ως προς την υλοποίηση ενός μοντέλου πρόγνωσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικό περιβάλλον. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα από το παρόν έργο, ενώ αναλύονται γενικεύσεις και επεκτάσεις. Στο Κεφάλαιο 6 (Παράρτημα), δίνονται αρχεία εισόδου του OpenFoam όπως και άλλα βοηθητικά scripts, για λόγους πληρότητας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές του παρόντος.

1.2 Το πρόβλημα

Η ρύπανση από Αιωρούμενα Σωματίδια (Particulate Matter, PM), ΑΣ, αποτελεί σημαντική παγκόσμια απειλή για την υγεία, όπως επισημαίνεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας Weltgesundheitsorganisation, Organization and for Environment [2021]. Αυτός ο τύπος ρύπανσης επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργικότητα τόσο του αναπνευστικού όσο και του καρδιαγγειακού συστήματος. Μεταξύ των πιο επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία Goldberg [2008] είναι τα σωματίδια $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ και PM_{10} , με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 1 μm , 2.5 μm και 10 μm , αντίστοιχα [Khaniabadi, Goudarzi, Daryanoosh, Borgini, Tittarelli and De Marco [2017]]. Αυτοί οι τύποι σωματιδίων συνδέονται επίσης με αυξημένο κίνδυνο καρκίνου Kamra and Castanas [2008] Brunekreef and Holgate [2002]).

Καθώς ο αστικός πληθυσμός στον κόσμο αυξήθηκε ραγδαία από 751 εκατομμύρια το 1950 σε 4,2 δισεκατομμύρια το 2018 United Nations [2018], η κατανομή των συγκεντρώσεων σωματιδίων σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ειδικότερα, το 2018, το 55% του παγκόσμιου πληθυσμού ζούσε σε πόλεις ενώ το αντίστοιχο ποσοστό αναμένεται να φθάσει το 68% έως το 2050 σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών [United Nations 2018]. Ταυτόχρονα, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει την ατμοσφαιρική ρύπανση τόσο μέσω επιδρώντας στους μηχανισμούς μεταφοράς και ανάμιξης των ρύπων, όσο και επηρεάζοντας τις εκπομπές φυσικής προέλευσης. Για παράδειγμα, αλλαγές στη μέση θερμοκρασία, στην ξηρασία και στην συχνότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων επηρεάζουν επίσης τη συχνότητα και την ένταση των πυρκαγιών στην ύπαιθρο Lozano et al. [2017].

Συνεπώς αναμένεται επιδείνωση την ποιότητας του αέρα στις πόλεις Im et al. [2022]. Με στόχο να διασφαλιστούν συνθήκες υγιούς διαβίωσης για τους κατοίκους των αστικών περιοχών, είναι αναγκαίο να εξεταστεί το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο αστικό περιβάλλον. Παράλληλα, γίνονται διεθνείς προσπάθειες προς την υλοποίηση μοντέλων πρόβλεψης της ρύπανσης απο μικροσωματίδια προκειμένου να υπάρχουν δυνατότητες έγκαιρης προειδοποίησης για υψηλές συγκεντρώσεις προκειμένου να αποφευχθούν επεισόδια υψηλής θνησιμότητας, τα οποία συνδέονται με υψηλές συγκεντρώσεις Kelly, Fuller, Walton and Fussell [2012].

Σε αυτήν την κατεύθυνση, είναι απαραίτητο να συνδέσουμε τις ατμοσφαιρικές διεργασίες σε επίπεδο οδού με αυτές σε επίπεδο γειτονιάς, πόλης και τοπικής κλίμακας. Η κατανόηση των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, όπως της ροής του αέρα σε πολύ χαμηλά ύψη εντός του αστικού περιβάλλοντος, έχει μεγάλη σημασία για τη κατανόηση της μεταφοράς και της διάχυσης των ρύπων μέσα στην πόλη. Σε αυτά τα περιβάλλοντα εμφανίζονται φαινόμενα που εξαρτώνται από την κλίμακα, για παράδειγμα το φαινόμενο των αστικών φαραγγιών (urban canopies). Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή αεροδυναμική τραχύτητα της δομημένης περιοχής η οποία επάγει πλειάδα τυρβώδων φαινομένων, η πολυπλοκότητα της ροής αυξάνεται σημαντικά. Φαινόμενα κυκλοφορίας μπορούν επίσης να προκληθούν από τοπικές απότομες κλίσεις θερμοκρασίας Pearlmutter, Bitan and Berliner [1999]. Ταυτόχρονα, η συνεισφορά τοπικών πηγών ΑΣ όπως η κυκλοφορία των οχημάτων, η θέρμανση των οικιών και κοντινές βιομηχανικές μονάδες πρέπει να ληφθεί υπόψη, συνεπώς να κατασκευαστεί ένα μοντέλο εκπομπών (emission inventory), πχ Fameli and Assimakopoulos [2016]. Ωστόσο ένα τέτοιο μοντέλο εξ ορισμού έχει τοπικό χαρακτήρα και άρα δεν είναι εύκολα γενικεύσιμο από μια πόλη σε μια άλλη.

Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την πρόβλεψη της ρύπανσης από ΑΣ, τα μοντέλα μεταφοράς (όπως για παράδειγμα τα εργαλεία CALPUFF [Toscano, Marro, Mele, Murena & Salizzoni 2021], ADMS-5 [Merico, Dinoi & Contini 2019; Progiou, Bakeas, Evangelidou, Kontogiorgi, Lagkadinou & Sebos 2021], CAMx [Wang et al. 2017] και η χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) [Jeanjean, Monks & Leigh 2016; Hao, Xie, Huang & Huang 2019; Lauriks et al. 2021]. Σε γενικές γραμμές, τα μοντέλα μεταφοράς επιτρέπουν αδρή μοντελοποίηση μεγάλων χωρικών κλιμάκων, από 100m (ADMS-5) έως και ολοκληρω ημισφαιριο (CAMx), ενώ τα μοντέλα CFD επιτρέπουν πολύ λεπτομερή μοντελοποίηση, αν και επικεντρωμένα σε μικρές κλίμακες. Στην εργασία των Toscano et al. [2021] αποδεικνύεται ότι τα μοντέλα μεταφοράς είναι λιγότερο ακριβή εντός του πολύπλοκου οικισμού μιας πόλης, επομένως μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση θα ήταν η χρήση ενός πλαισίου CFD σε τέτοια περιβάλλοντα. Από την άλλη πλευρά, αν θεωρηθούν οι εμπλεκόμενες χωρικές κλίμακες, η χρήση CFD μεθόδων καθίσταται πολύ δαπανηρή. Πράγματι, οι Toscano et al. [2021] μελέτησαν μια περιοχή περίπου 1.2 km², η οποία είναι πολύ μικρότερη από την περιοχή μιας μεσαίου μεγέθους πόλης, δηλαδή της τάξης των 10 km². Ένας τρόπος για να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες είναι η χρήση μιας τρίτης προσέγγισης, άμεσα βασισμένης στα παρατηρησιακά δεδομένα, μέσω της οποίας η λεπτομερής φυσική μοντελοποίηση όλων των μηχανισμών εκπομπής όπως και των μετεωρολογικών φαινομένων καθίσταται μη αναγκαία. Μια πολύ δημοφιλής κατηγορία τέτοιων αλγορίθμων αποτελούν οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

(Machine Learning, MM), και συγκεκριμένα τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks), ΤΝΔ.

Η δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων ΤΝ απαιτεί την ύπαρξη μεγάλων συνόλων δεδομένων ρύπανσης. Η διαθεσιμότητα αισθητήρων χαμηλού κόστους στο εμπόριο ωθεί τόσο πρωτοβουλίες πολιτών (citizen science) όσο και τις δημόσιες αρχές Kumar et al. [2015] προς τη δημιουργία δικτύων αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Επιπλέον, υπάρχουν επίσης πρωτοβουλίες επιστήμης των πολιτών που δεν βασίζονται σε εμπορικούς αισθητήρες, π.χ. CanAirIO [2023] CanAirIO [2023], επιτρέποντας μεγαλύτερη προσβασιμότητα στο θέμα ελέγχου της ποιότητας του αέρα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των αισθητήρων χαμηλού κόστους είναι ότι λειτουργούν αυτόνομα, επιτρέποντας σε μη ειδικούς χρήστες να συμμετέχουν στην παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές γνώσεις όσον αφορά την απόκτηση, την επεξεργασία και τη μετάδοση των δεδομένων. Πράγματι, τέτοια δίκτυα λειτουργούν σε πολλές πόλεις σε όλο τον κόσμο (π.χ. PurpleAir [2023]) τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση ανοικτών συνόλων δεδομένων. Το τελευταίο καθιστά ιδεώδη την χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και ειδικότερα, μεθόδων βαθιάς μάθησης (deep learning).

1.3 Σκοπός της μελέτης

Ο σκοπός της μελέτης είναι η υλοποίηση διαδικασιών (pipelines) προσομοίωσης /μοντελοποίησης του πεδίου ροής με τελικό σκοπό την πρόγνωση των συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων στο αστικό περιβάλλον, δίνοντας έμφαση στις πόλεις-λιμάνια. Η παρούσα μελέτη αποτελεί μέρος των εργασιών για την ανάπτυξη της υπηρεσίας 6 “Μετρήσεις ατμοσφαιρικών ρύπων με αισθητήρες χαμηλού κόστους και μοντελοποίηση/προσομοίωση πεδίων ροής σε πόλεις-λιμάνια”. Ως περιοχή μελέτης έχει οριστεί η πόλη-λιμάνι της Χίου, καθώς και η πόλη - λιμάνι της Πάτρας. Στην πόλη της Χίου βρίσκονται δύο (2) αισθητήρες χαμηλού κόστους της εταιρείας Purpleair, οι οποίοι εγκαταστάθηκαν και βαθμονομήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος ENIRISST+. Οι λόγοι για την επιλογή της πόλης της Πάτρας είναι οι ακόλουθοι:

1. Υπάρχει δίκτυο PurpleAir αισθητήρων χαμηλού κόστους αποτελούμενο από εικοσιδύο (22) αισθητήρες, το οποίο λειτουργεί επι σειρά ετών, με αποτέλεσμα την επισυσώρευση ανοικτών δεδομένων.
2. Υπάρχει πανσπερμία πηγών ρύπανσης με συγκρίσιμες κατά μέτρο συνεισφορές στην ολική ποσότητα ρύπων.
3. Οι μικρομετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν παρουσιάζουν μεγάλη χωρική μεταβλητότητα λόγω της πολυπλοκότητας του υποβάθρου (αστικός ιστός και επιπλέον υψομετρικές διαφορές), συνεπώς το πρόβλημα της πρόγνωσης παρουσιάζει σημαντική δυσκολία.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης έχουν υλοποιηθεί:



- Προσομοίωση του πεδίου ροής εντός του αστικού ιστού της πόλης της Χίου.
- Διερμηνεύσιμο μοντέλο Τεχνητής Νοημοσύνης για την συγκέντρωση των μικροσωματιδίων.

Εκτός των άνω, ως υποπροϊόντα έχουν προκύψει τα ακόλουθα:

- Αναλυτής (parser) για ανοικτά δεδομένα καιρού και μικροσωματιδίων απο αισθητήρες χαμηλού κόστους.
- Μεθοδολογία καθαρισμού και επεξεργασίας πρωτογενών δεδομένων απο αισθητήρες μικροσωματιδίων και μετεωρολογικούς σταθμούς χαμηλού κόστους.
- Σύνολο δεδομένων συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων και μετεωρολογικών δεδομένων για την πόλη της Πατρας.
- Τυπικά προφίλ ανέμου για την περιοχή της πόλης της Χίου.

2 Δεδομένα

Ακολούθως παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι μεθοδολογίες επεξεργασίας τους.

2.1 Μετρήσεις συγκέντρωσης Μικροσωματιδίων

Το σύνολο δεδομένων μας αποτελείται από μετρήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων σε μονάδες μικρογραμμαρίων (μg) ανά κυβικό μέτρο (m^3), τα οποία μετρήθηκαν από αισθητήρες PurpleAir PA - II, PurpleAir [2022]. Τα ιστορικά δεδομένα είναι δημόσια διαθέσιμα PurpleAir API PurpleAir [2023]

2.1.1 PurpleAir δίκτυο

Οι συσκευές PurpleAir PA - II περιέχουν δύο μετρητές σωματιδίων λέιζερ PMS5003, ένα μετεωρολογικό αισθητήρα BME280, και έναν μικροελεγκτή ESP8266 που χρησιμοποιείται ως συλλογέας (collector). Η αρχή στην οποία βασιζονται οι αισθητήρες PMS5003 αποτελεί η διαμόρφωση της έντασης του φωτός καθώς τα σωματίδια διέρχονται από την κοιλότητα μέτρησης. Η τελευταία διαμόρφωση, η λεγόμενη νεφελομετρική απόκριση, είναι ευθέως ανάλογη της συγκέντρωσης των σωματιδίων τόσο ως προς τη μάζα όσο και ως προς τον αριθμό τους. Τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά από το PurpleAir API PurpleAir [2023] είναι τα εξής

- Απαριθμήσεις σωματιδίων (Particle counts), με τις ακόλουθες ονομασίες: 0.3_um_count_i, 0.5_um_count_i, 1.0um_count_i, 2.5_um_count_i, 5.0_um_count_i, 10.0_um_count_i, σε μονάδες αριθμού σωματιδίων ανά 0.1 dm^3 . Ουσιαστικά πρόκειται για τον αριθμό των σωματιδίων στο εύρος των διαμέτρων μικρότερων από τη αναφερομενη τιμή.
- Υπολογισμένες τιμές συγκέντρωσης, οι οποίες είναι "pm1.0_cf_1_i", "pm1.0_atm_i", "pm2.5_atm_i", "pm2.5_cf_1_i", "pm10.0_atm_i", "pm10.0_cf_1_i", σε μονάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

όπου $i \in \{a, b\}$ αντιστοιχεί σε κάθε έναν από τους δύο αισθητήρες PMS5003, εφεξής κανάλια. Ο αλγόριθμος μετασχηματισμού από τις μετρήσεις σωματιδίων σε τιμές συγκέντρωσης δεν ανήκει, οπότε ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί ως μέρος της διαδικασίας μέτρησης. Σε παρόμοιο πλαίσιο με τη βιβλιογραφία [Kosmopoulos, Salamalikis, Pandis, Yannopoulos, Bloutsos & Kazantzidis 2020], χρησιμοποιούμε χαρακτηριστικά με την ετικέτα CF=1.

Πίνακας 1: Γενικές ιδιότητες του συνόλου δεδομένων μας. Η στήλη "id" αντιστοιχεί στο id του αισθητήρα στο δίκτυο purpleAir, a, b είναι οι συντελεστές της γραμμικής προσαρμογής μεταξύ των καναλιών, μ , σ , (και τα ίδια με δίσωση) είναι η μέση διασπορά με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση, τη διάμεσο τιμή και η αντίστοιχη απόκλιση. Η διασπορά ορίζεται ως η ορθογώνια απόσταση μεταξύ κάθε τιμής PM2.5, κανάλι A, PM2.5, κανάλι B) και της προσαρμοσμένης γραμμής. Τα r και οι αντίστοιχες p τιμές είναι μέτρα συσχέτισης, είτε "Pearson" είτε "Spearman". Λεπτομερής περιγραφή μπορεί να βρεθεί στο κείμενο.

α/α	id	N	a	b	r_{pears}	ρ_{pears}	r_{spear}	ρ_{spear}	$\mu_{scatter}$	$\sigma_{scatter}$	$\mu_{scatter}$
1	1030	5389	0.81	-1.2	0.9752	0.0	0.9714	0.0286	7.71	17.93	3.31
2	101609	4927	1.08	0.11	0.9994	0.0	0.9989	0.0011	1.62	6.11	0.48
3	14877	23250	0.97	-0.42	0.9991	0.0	0.9979	0.0021	1.12	2.84	0.43
4	146920	1154	0.91	-0.33	0.9956	0.0	0.9957	0.0043	0.60	0.93	0.29
5	5092	22542	0.94	0.37	0.9985	0.0	0.9970	0.0030	2.33	10.03	0.53
6	1672	30835	1.08	0.06	0.9980	0.0	0.9955	0.0045	1.33	4.25	0.49
7	1566	29080	0.96	-0.28	0.9970	0.0	0.9970	0.0030	0.69	4.38	0.36
8	56229	8001	1.05	0.45	0.9982	0.0	0.9945	0.0055	1.87	13.43	0.72
9	57523	5367	0.99	-0.49	0.9997	0.0	0.9991	0.0009	0.82	4.84	0.35
10	5078	26040	1.00	0.15	0.9984	0.0	0.9965	0.0035	1.45	7.88	0.57
11	23759	22756	1.03	0.21	0.9975	0.0	0.9943	0.0057	2.00	9.38	0.49
12	749	25857	0.94	-0.79	0.9970	0.0	0.9947	0.0053	1.23	3.36	0.59
13	101589	5248	1.01	-1.02	0.9997	0.0	0.9988	0.0012	1.25	3.05	0.58
14	101597	5791	1.11	0.02	0.9980	0.0	0.9980	0.0020	1.32	7.72	0.48
15	56113	10647	0.98	0.69	0.9958	0.0	0.9942	0.0058	1.66	4.91	0.56
16	741	17467	0.93	-0.77	0.9980	0.0	0.9949	0.0051	2.25	6.19	0.70
17	101611	7516	0.91	0.74	0.9956	0.0	0.9978	0.0022	2.98	37.17	0.56
18	1712	29580	1.04	0.52	0.9968	0.0	0.9959	0.0041	2.08	11.48	0.65
19	56453	10632	0.86	-0.54	0.9992	0.0	0.9951	0.0049	2.18	11.71	0.44

20	30765	18232	0.99	-0.44	0.9971	0.0	0.9970	0.0030	0.89	8.33	0.33
21	14857	25990	1.05	-0.61	0.9986	0.0	0.9976	0.0024	1.68	7.57	0.59

2.1.2 Καθαρισμός και Βαθμονόμηση των μετρήσεων

Θέτουμε ένα κατώτερο όριο στην ευαισθησία των αισθητήρων απαιτώντας μια συνθήκη συνέπειας μεταξύ των δύο καναλιών του αισθητήρα, δηλαδή των καναλιών Α και Β, σύμφωνα με το κριτήριο

$$\frac{|PM_{A,2.5} - PM_{B,2.5}|}{PM_{A,2.5} + PM_{B,2.5}} \leq a\% \quad (1)$$

Από τα χαρακτηριστικά εξόδου του αισθητήρα PA-II που παρουσιάστηκαν παραπάνω, επιλέγουμε “*pm2.5_cf_1*”, ακολουθώντας τη βιβλιογραφία (πχ Kosmopoulos et al. [2020] και Stavroulas et al. [2020]), οπότε $PM_{A,2.5} \equiv pm2.5_cf_1.a$ $PM_{B,2.5} \equiv pm2.5_cf_1.b$.

Σύμφωνα με τους Barkjohn, Gantt and Clements [2021] χρησιμοποιήσαμε $a = 30.5$.

Πίνακας 2: Ονόματα, κωδικοί (id) και συντεταγμένες των εγκατεστημένων αισθητήρων μικροσωματιδίων στην πόλη της Πάτρας και τα περίχωρα αυτής.

α/α	id	Επωνυμία	Γεωγρ. πλάτος	Γεωγρ. Μήκος	ΜΣΔ	ΜΠΠ
1	749	Agia	38.26301	21.748409	1.6	103
2	105810	Agia Sofia	38.257416	21.741704	2.0	161
3	14877	Agios Andreas	38.243164	21.728973	2.0	165
4	57521	Aktaio	38.304337	21.794404	0.6	78
5	14857	Demenika	38.200115	21.743774	0.8	47
6	23759	Germanou	38.241175	21.741581	1.6	134
7	56229	Germanou_Test	38.280672	21.730143	--	--

8	23837	ICE/ FORTH	38.297788	21.809603	--	--
9	1672	Kastelokampos	38.289343	21.773867	0.8	49
10	56113	Kato Sichena	38.265163	21.756953	1.4	98
11	1712	Koukouli	38.219372	21.756045	0.8	6
12	56453	Kritika	38.24307	21.744676	1.2	102
13	5092	Kypseli	38.224145	21.735792	1.2	96
14	30673	LapUpRoof	38.256114	21.624067	--	--
15	101589	Lefka	38.206588	21.727134	0.8	62
16	741	New Port of Patras	38.22473	21.719874	0.8	43
17	101609	Paralia	38.199439	21.699193	0.8	52.89
18	89247	Pl. Drosopoulou (FORTH)	38.253145	21.738148	--	--
19	47413	Pl. Georgiou (FORTH)	38.246023	21.735675	2.1	116
20	1006	Platani	38.297756	21.822891	--	--
21	5078	Psila Alonia	38.23952	21.734823	2.1	168
22	1592	Rio 3	38.304512	21.794697	0.6	78
23	101611	Trion Navarchon	38.242232	21.731614	2.0	165
24	1030	Trion Navarchon Old	38.24231	21.731447	2.0	165
25	1566	University of Patras	38.289431	21.785513	0.7	49

26	146920	Upatras Araxo	38.292018	21.791743	0.7	49
27	30765	Upatras Ps	38.288548	21.785856	0.7	49
28	101597	Vlatero	38.247806	21.741767	1.4	97

Οι μετρήσεις από κάθε αισθητήρα μετά την εφαρμογή της προαναφερθείσας περικοπής (εξίσωση 2.1) παρουσιάζονται στις Εικόνες 16 και 32. Προκειμένου να αξιολογήσουμε τη γραμμικότητα μεταξύ δύο καναλιών, χρησιμοποιούμε τους συντελεστές συσχέτισης τάξης Spearman και Pearson, όπως υλοποιούνται στη δωρεάν και ανοικτού κώδικα βιβλιοθήκη Python *scipy* [Virtanen et al. 2020a]. Και τα δύο κριτήρια είναι μη παραμετρικά μέτρα της μονοτονίας της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών και $r_k \in -1, +1$ όπου $k \in \{\text{Pearson, Spearman}\}$ και 0 υποδηλώνει μηδενική συσχέτιση, +1 θετική συσχέτιση και -1 αρνητική συσχέτιση. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών συσχέτισης Spearman και Pearson έγκειται στις υποκείμενες παραδοχές με την πιο αξιοσημείωτη να είναι η κανονικότητα για την περίπτωση του Pearson (βλ. Kowalski [1972]). Η αντίστοιχη τιμή ρ ποσοτικοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης της ίδιας ή περισσότερων ακραίων τιμών r λόγω τυχαίων διακυμάνσεων μεταξύ μη συσχετιζόμενων συνόλων δεδομένων. Παρατηρώντας τις προαναφερθείσες τιμές στον Πίνακα 1 συμπεραίνουμε ότι και τα δύο κριτήρια υποστηρίζουν ισχυρά τη γραμμικότητα μεταξύ των δύο καναλιών τουλάχιστον στην περιοχή όπου βρίσκεται η συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων. Ως επόμενο βήμα, πραγματοποιούμε γραμμική προσαρμογή μεταξύ των δύο καναλιών και υπολογίζουμε τις ορθογώνιες αποστάσεις μεταξύ κάθε σημείου ($PM_{2.5A}$, $PM_{2.5B}$) και της προσαρμοσμένης γραμμής.

$$PM_{2.5B} = a \cdot PM_{2.5A} + b$$

Οι παράμετροι της προσαρμογής δίνονται στον Πίνακα 1 για όλους τους αισθητήρες. Στον τελευταίο πίνακα παρουσιάζονται επίσης ορισμένα στατιστικά μέτρα, δηλαδή η μέση τιμή ανά αισθητήρα, η αντίστοιχη τυπική απόκλιση και η διάμεσος με το μέτρο διασποράς της. Για την κατασκευή της τελικής $PM_{2.5}$ συγκέντρωσης που θα χρησιμοποιηθεί από το μοντέλο μας, λαμβάνουμε τον σταθμισμένο μέσο όρο εντός 1h, όπου για τα βάρη χρησιμοποιούμε την αντίστροφη της ορθογώνιας απόστασης που αναφέρθηκε προηγουμένως, αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα το γεγονός ότι η κανονικότητα των μετρήσεων PM εντός του διαστήματος 1h, δεν αποτελεί ασφαλή υπόθεση Alolayan, Brown, Evans, Bouhamra and Koutrakis [2013]. Ακολουθως, αποκλείουμε τις μετρήσεις όπου η διασπορά είναι μεγαλύτερη από $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Μετά από αυτό το βήμα, κατασκευάζουμε τις μετρήσεις $PM_{2.5}$, $chan. Avg$ ως τη μέση τιμή μεταξύ των δύο καναλιών,

$$PM_{2.5chan.avg} = (PM_{B,2.5} + PM_{A,2.5})/2. \quad (2)$$

Τέλος, καθώς η ευαισθησία των αισθητήρων γενικά διαπιστώνεται ότι σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με μετεωρολογικές ιδιότητες όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, [Stavroulas et al. 2020], [Ardon-

Dryer, Dryer, Williams & Moghimi 2020; Holder et al. 2020; Barkjohn et al. 2021] εφαρμόζουμε μια διαδικασία βαθμονόμησης. Ανάμεσα στις διάφορες γραμμικές και μη γραμμικές καμπύλες βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία (βλ. π.χ. [Barkjohn, Gantt & Clements 2021]), επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε την καμπύλη βαθμονόμησης που προτείνεται από τους Barkjohn et al. [2021], η οποία έχει ως εξής

$$PM_{2.5,final} = 0.524 \cdot PM_{2.5,chan,avg} - 0.0862 \cdot RH + 5.75 \quad (3)$$

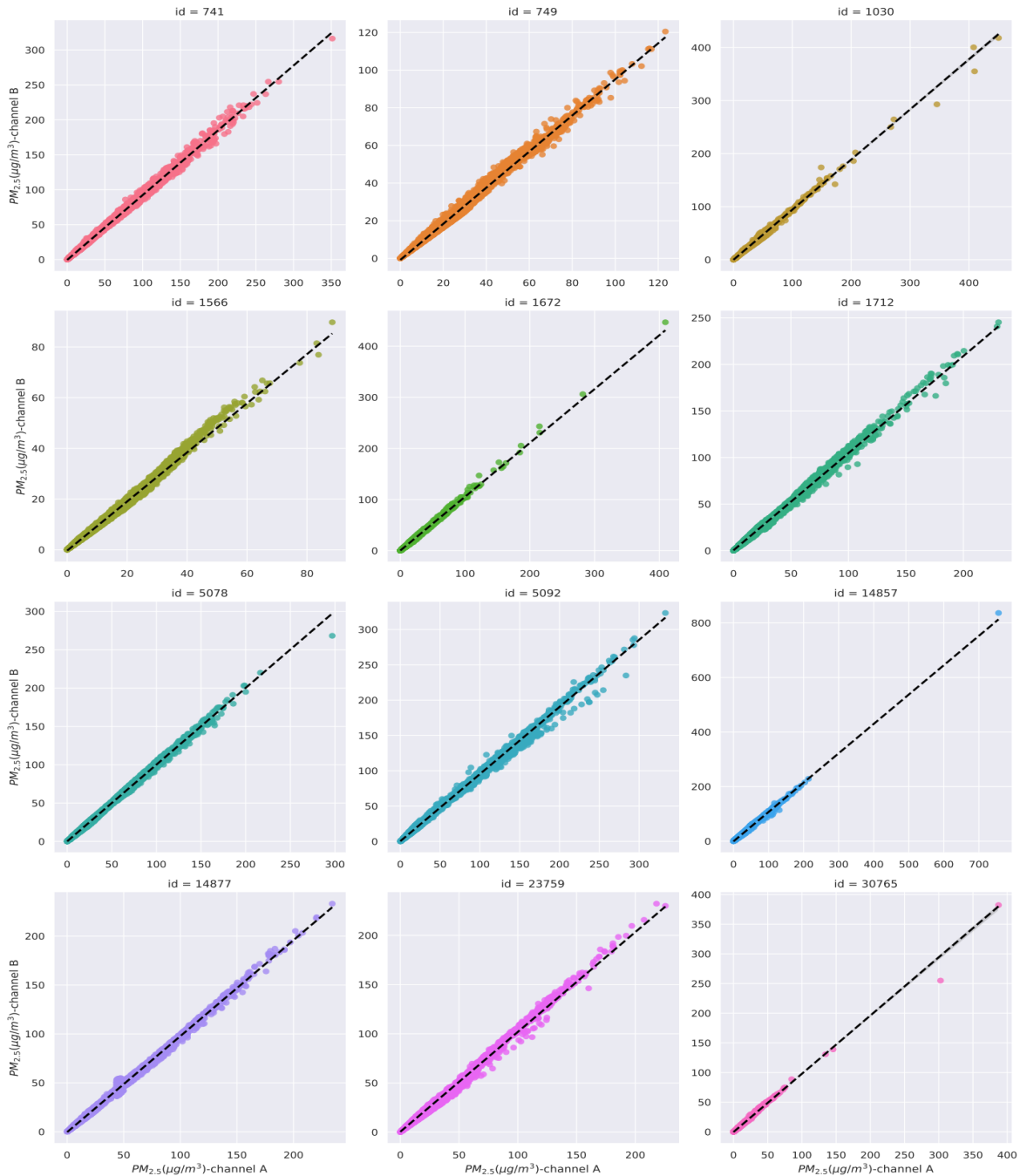
όπου RH είναι η Σχετική Υγρασία σε %, η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση, Buck [1981]

$$RH = \exp \left\{ \frac{ab(T_{DTP,avg} - T_{avg})}{(T_{avg} + b)(T_{DTP,avg} + b)} \right\} \cdot 100 \quad (4)$$

όπου $a = 17.368$, $b = 238.88^\circ\text{C}$ και T_{avg} , $T_{DTP,avg}$ είναι οι μέσοι όροι της θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας σημείου δρόσου εντός 1h. Τα τελευταία δεδομένα αποτελούν μετρήσιμα (observables) από τους μετεωρολογικούς σταθμούς.

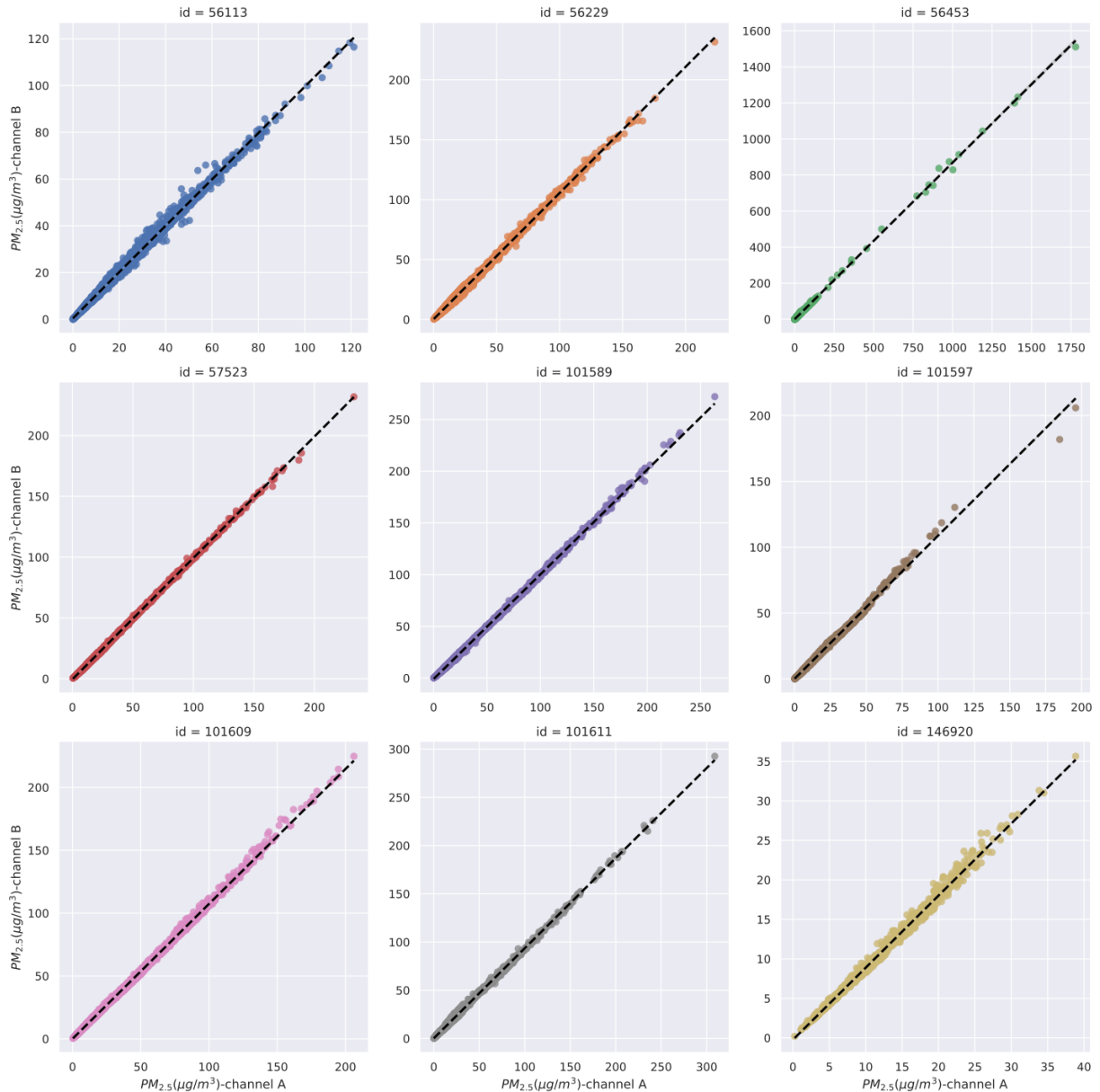
2.2 Μετεωρολογικά δεδομένα

Οι μετεωρολογικές μεταβλητές και συγκεκριμένα η πίεση, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία μετρώνται μέσω του αισθητήρα BME280. Ωστόσο, ο τελευταίος αισθητήρας βρίσκεται ακριβώς πάνω από τους αισθητήρες PMS5003, επομένως η απαγωγή θερμότητας από τους αισθητήρες αυξάνει τις μετρούμενες θερμοκρασίες (από 2.7°C μέχρι και 5.3°C) και παρέχει μια ξηρότερη RH, (από 9.7% έως και +24.3%) Holder et al. [2020]. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι μια σταθερή μετατόπιση αλλά μια χρονικά μεταβαλλόμενη διακύμανση, επομένως θα μπορούσε κανείς να προβλέψει ότι θα μπορούσε να ενισχύσει ή να μετριάσει τα αποτελέσματα των φυσικών μηχανισμών στα δεδομένα. Επιπλέον, όπως διαπίστωσαν οι Barkjohn et al. [2021], υπάρχουν μη φυσικά μέγιστα και ελάχιστα της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας τα οποία εμφανίζονται στο σύνολο δεδομένων, σε συχνότητα 1 ανά 10^7 μετρήσεις. Τα τελευταία αποδίδονται είτε σε ηλεκτρονικό θόρυβο είτε σε απώλεια πληροφορίας κατά την επικοινωνία μεταξύ του BME280 αισθητήρα και του μικροελεγκτή. Ως αποτέλεσμα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, Ardon-Dryer et al. [2020], οι μετεωρολογικές μετρήσεις του αισθητήρα BME280 δεν χρησιμοποιούνται στην ανάλυσή μας. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούμε ανοικτά δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς WeatherUnderground [wunderground 2023]. Τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά απεικονίζονται στον Πίνακα 23.



Εικόνα 1:

Διαγράμματα διασποράς για τα δύο κανάλια των αισθητήρων PurpleAir στην Πάτρα με $id \in \{56113, 56229, 56453, 57523, 101589, 101597, 101609, 101611, 146920\}$ που ικανοποιούν το κριτήριο των Barkjohn et al. [2021]. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων, με τις αντίστοιχες παραμέτρους να βρίσκονται στον πίνακα.



Εικόνα 17: Διαγράμματα διασποράς για τα δύο κανάλια των αισθητήρων PurpleAir στην Πάτρα με $id \in \{741, 749, 1030, 1566, 1672, 1712, 5078, 5092, 14857, 14877, 23759, 30765\}$ που ικανοποιούν το κριτήριο Barkjohn et al. [2021]. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων, όπου οι αντίστοιχες παραμέτροι βρίσκονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 3: Διαθέσιμα μετεωρολογικά παρατηρήσιμα απο το Weather Underground.

α/α	Μετρήσιμο	Μονάδα	Περιγραφή
1	Solar Radiation High	W/m ²	Μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
2	Uv-High	αδιάστατο	Μέγιστο επίπεδο υπεριώδους ακτινοβολίας (UV).
3	Humidity Low	αδιάστατο	Ελάχιστο επίπεδο απόλυτης υγρασίας.
4	Humidity High	αδιάστατο	Μέγιστο επίπεδο απόλυτης υγρασίας.
5	Humidity Average	αδιάστατο	Μέσο επίπεδο απόλυτης υγρασίας.
6	Temperature High	°C	Μέγιστο θερμοκρασίας.
7	Temperature Low	°C	Ελάχιστο θερμοκρασίας.
8	Temperature Average	°C	Μέση θερμοκρασία.
9	Wind Speed High	m/s	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου.
10	Wind Speed Low	m/s	Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου.
11	Wind Speed Average	m/s	Μέση ταχύτητα ανέμου.
12	Wind Direction	deg	Διεύθυνση Ανέμου
13	Wind Gust High	m/s	Μέγιστη ριπή ανέμου.
14	Wind Gust Low	m/s	Ελάχιστη ριπή ανέμου.
15	Wind Gust Average	m/s	Μέση ριπή ανέμου.
16	Dew Point High	°C	Μέγιστη θερμοκρασία σημείου δρόσου.
17	Dew Point Low	°C	Ελάχιστη θερμοκρασία σημείου δρόσου.

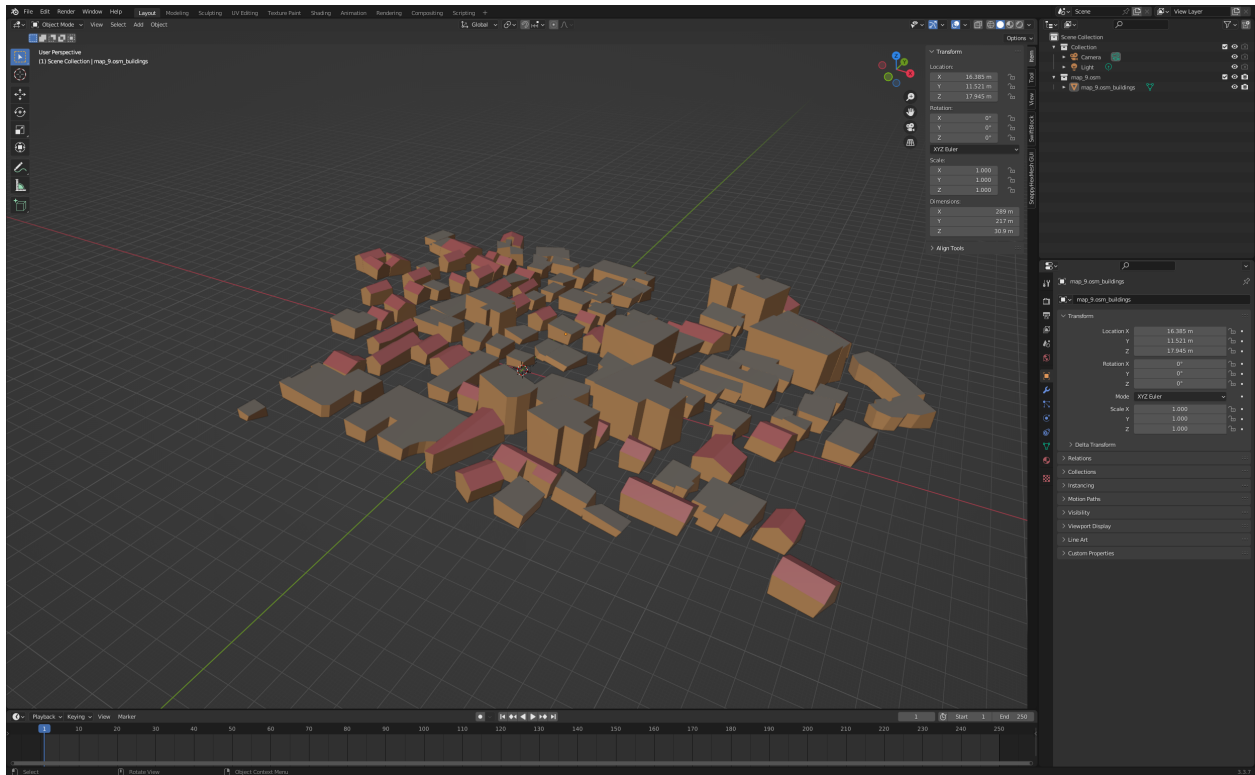
18	Dew Point Average	°C	Μέση θερμοκρασία σημείου δρόσου.
19	Wind Chill High	°C	Μέγιστη θερμοκρασία ψύχους ανέμου.
20	Wind Chill Low	°C	Ελάχιστη θερμοκρασία ψύχους ανέμου.
21	Wind Chill Average	°C	Μέση θερμοκρασία ψύχους ανέμου.
22	Heat Index High	°C	Μέγιστη θερμοκρασία θερμικού δείκτη.
23	Heat Index Low	°C	Ελάχιστη θερμοκρασία θερμικού δείκτη.

2.3 Τρισδιάστατα μοντέλα πόλεων

Για την αριθμητική ανακατασκευή του πεδίου ροής εντός των πόλεων-λιμανιών χρειαζόμαστε τρισδιάστατες (3D) αναπαραστάσεις του αστικού ιστού. Εν γένει τέτοιου είδους αναπαραστάσεις υπάρχουν για ορισμένες μόνο ελληνικές πόλεις-λιμάνια. Παράλληλα διατίθενται κατόπιν αίτησης στην εκάστοτε διεύθυνση πολεοδομίας. Στο βαθμό που γνωρίζουμε, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν ελεύθερα διαθέσιμες 3D απεικονίσεις για τα σημεία ενδιαφέροντος στα νησιά Χίο, Ρόδο, Σύρο. Μυτιλήνη και Σάμο. Καθώς επιθυμούμε η παρούσα εργασία είναι αναπαράξιμη και γενικεύσιμη, τόσο από μεθοδολογικής πλευράς όσο και αναφορικά με τα αποτελέσματα της, επιλέξαμε να βασιστούμε σε ανοιχτά δεδομένα. Εν προκειμένω, χρησιμοποιήσαμε δεδομένα από το OpenStreetMap (OSM).

2.3.1 OpenStreetMap

Το OSM είναι μια δωρεάν, ανοικτή γεωγραφική βάση δεδομένων που ενημερώνεται και συντηρείται από μια κοινότητα εθελοντών. Τα δεδομένα προέρχονται από άμεση συλλογή μέσω μονάδων γεωεντοπισμού GPS χειρός, από αεροφωτογραφίες, όπως και από άλλες ελεύθερα αδειοδοτημένες πηγές γεωδεδομένων. Το OpenStreetMap έχει άδεια χρήσης βάσει της Open Database License. Η καθαυτό μορφή των δεδομένων είναι τα .osm αρχεία, ενώ παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής τους στις περισσότερες χρησιμοποιούμενες μορφές αρχείων GIS. Επιπλέον, στον διαδικτυακό τόπο OpenStreetMap παρέχεται ένας διαδραστικός χάρτης και μηχανή αναζήτησης γεωδεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διαδικτυακός, διαδραστικός χάρτης της purpleAir χρησιμοποιεί το χαρτογραφικό υπόβαθρο του OSM.



Εικόνα 33: Στιγμιότυπο οθόνης όπου απεικονίζεται η τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου πλησίον του αισθητήρα εγκατεστημένου στο κέντρο της Χίου (οδός Κουντουριώτου) με χρήση του FOSS προγράμματος Blender.

2.3.2 Blender/blender-osm

Το blender είναι ένα δωρεάν και ανοικτού κώδικα, σύνολο εργαλείων λογισμικού τρισδιάστατων γραφικών. Χρησιμοποιείται σε πλειάδα εφαρμογών, απο τη δημιουργία ταινιών κινουμένων σχεδίων και οπτικών εφέ μέχρι τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοντέλων και γραφικών παιχνιδιών. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του αποτελεί η πλαισίωση του απο μια σειρά επεκτάσεων (addons) με την αδιάλειπτη υποστήριξη της κοινότητας. Εν προκειμένω για την εξαγωγή των τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η επέκταση *blender-osm* ννοσον [2023]. Δίνοντας ως είσοδο 4 ζεύγη συντεταγμένων τα οποία προφανώς ορίζουν ένα παραλληλόγραμο, το *blender-osm* επιστρέφει το 3D μοντέλο της περιοχής. Ακολούθως, μέσω του blender μπορούμε να το εξαγάγουμε σε μορφή συμβατή με το OpenFoam, όπως για παράδειγμα .obj ή .stl αρχείο. Ένα παράδειγμα για το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 48. Η ακρίβεια της αναπαράστασης είναι της τάξης των μερικών μέτρων, ενώ απουσιάζουν παράθυρα, εξώστες, όπως και υπερκατασκευές επι των δωματίων.

3 Μοντελοποίηση/προσομοίωση πεδίων ροής σε πόλεις – λιμάνια

Το αντικείμενο μελέτης μας αποτελούν οι εξισώσεις Navier-Stokes, για τις οποίες δεν έχει βρεθεί γενική αναλυτική λύση εδώ και περίπου 200 ετη. Παρότι υπάρχουν σήμερα υπολογιστικά εργαλεία που επιτρέπουν την αριθμητική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, η διαδικασία είναι πολύ απαιτητική από πλευράς υπολογιστικών πόρων και παρουσιάζει πολλές δυσχέρειες. Για παράδειγμα, υπάρχει εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το πλέγμα υπολογισμού (grid), όπως και εξάρτηση από τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρους των διαφόρων μοντέλων τύρβης, οι οποίες δεν είναι άμεσα μετρήσιμες. Ο λόγος για τα παραπάνω οφείλεται στην μη-γραμμικότητα των εξισώσεων Navier-Stokes που συνεπάγεται ότι σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί κάποιος να απομονώσει κλίμακες ενδιαφέροντος από το γίνεσθαι του φαινομένου. Πιο απλά, οι τυρβώδεις δομές αλληλεπιδρούν από την πιο μικρή κλίμακα στην πιο μεγάλη, ωστόσο είμαστε υποχρεωμένοι για λογους υπολογιστικού κόστους να επιβάλλουμε μια κλίμακα αποκοπής (cut-off scale). Για συγκεκριμένες κλίμακες αποκοπής και χρόνους προσομοίωσης, οι αγνοημένες κλίμακες κερδίζουν ενέργεια και ξεπερνούν το οριο αποκοπής, παύουν να είναι ασήμαντες και η προσομοίωση αποτυγχάνει να περιγράψει το φαινόμενο. Εν προκειμένω, ως μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιούμε μια γειτονιά της πόλης της Χίου, πλησίον του εγκατεστημένου αισθητήρα μικροσωματιδίων επι της οδού Κουντουριώτου (βλ. Εικόνα 48). Σκοπός είναι από τη μια πλευρά τα αποτελέσματα μας να καταστούν αξιολογήσιμα μέσω άμεσων μετρήσεων στο πεδίο και από την άλλη να υπάρξει η δυνατότητα για άμεσα αξιοποιήσιμα συμπεράσματα. Καθώς χρησιμοποιούμε ανοιχτά δεδομένα και λογισμικό ανοιχτού κώδικα (FOSS), η μελέτη μας είναι άμεσα αναπαράξιμη όπως και γενικεύσιμη για οποιαδήποτε περιοχή.

3.1 Στοιχεία ρευστοδυναμικής

Ακολούθως, για λόγους πληρότητας, θα παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις με τις παραδοχές από τις οποίες προέκυψαν καθώς και οι αναγκαίες προσεγγίσεις προκειμένου το γενικό πρόβλημα να καταστεί πρακτικά επιλύσιμο.

3.1.1 Βασικές εξισώσεις και παραδοχές

Θεωρώντας ισόθερμη ροή ιδανικού ρευστού, η διατήρηση της μάζας συνεπάγεται την εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα και \mathbf{V} η ταχύτητα.

Η διατήρηση της ορμής συνεπάγεται την ακόλουθη σχέση, αποκαλούμενη και εξίσωση Cauchy:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla(\rho \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

όπου \mathbf{V} είναι το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, P είναι η πίεση, $\mathbf{g} = g\hat{z}$ (όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας) και $\boldsymbol{\tau}$ είναι ο τανυστής τάσεων του Cauchy.

Υποθέτοντας ασυμπίεστο ρευστό και ισοτροπία των τάσεων, προκύπτει

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

και

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g} \quad (8)$$

όπου

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (9)$$

και μ το δυναμικό ιξώδες.

3.1.2 Μοντέλα Τύρβης

Οι δυο βασικότερες οικογένειες μοντέλων τύρβης είναι οι Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) και Large-Eddy Simulations (LES). Στο άρθρο ανασκόπησης Torralbar, Blocken, Maiheu and Van Heijst [2017], με βάση πλήθος σχετικών εργασιών υπογραμμίζουν το γεγονός ότι οι περισσότερες εργασίες χρησιμοποιούν το μοντέλο RANS, παρόλο που το LES παρέχει θεμελιωδώς μεγαλύτερη ακρίβεια. Ταυτόχρονα, στο ίδιο τονίζεται η ανάγκη να καλυφθούν περισσότερα μοντέλα τύρβης προκειμένου να γίνει πληρέστερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους. Ακολούθως θα παρουσιαστούν οι βασικές ιδέες γύρω από τις RANS και LES οικογένειες.

Η κεντρική ιδέα πίσω από την προσέγγιση RANS βασίζεται στον διαχωρισμό όλων των φυσικών ποσοτήτων ως άθροισμα της χρονικής μέσης τιμής και της χρονοεξαρτώμενης, στιγμιαίας τιμής όπως παρακάτω (Reynolds decomposition).

$$\mathbf{V} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (10)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (11)$$

Πλέον κάθε πεδίο στις εξισώσεις [7, 8] γράφεται ως άθροισμα της μέσης τιμής και της διακύμανσης του, δηλαδή κάθε συνάρτηση χώρου/χρόνου έχει γραφτεί ως άθροισμα χωρικού και χρονικού μέρους. Παραπέρα, λαμβάνεται η μέση τιμή ως προς τον χρόνο και καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}) + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x^j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (13)$$

Σε αυτή την εξίσωση, \bar{u}_i αντιπροσωπεύει τις συνιστώσες της μέσης ταχύτητας, \bar{p} είναι η μέση πίεση, ν είναι το κινηματικό ιξώδες και ο όρος $\overline{u'_i u'_j}$ αντιστοιχεί στις τάσεις Reynolds, οι οποίες αποτυπώνουν τις τυρβώδεις διακυμάνσεις της ροής. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η σύμβαση Einstein. Παραπέρα είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιήσουμε μια παραμετροποίηση των τάσεων Reynolds. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα παραμετροποιήσεων [Alfonsi 2009], με καθεμία να έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της. Επιγραμματικά αναφέρουμε τις οικογένειες k-ε και k-ω. Τα κυριότερα μέλη της οικογένειας k-ε είναι το απλό k-ε και το (Renormalization Group Flow (RNG) k-ε [Kim & Baik 2004]. Ξεκινώντας από την εξίσωση

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (14)$$

Ακολούθως, παραμετροποιούμε το τυρβώδες ιξώδες ν_t με διαστατικά επιχειρήματα [Launder & Spalding 1983] ως

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

Το μοντέλο τύρβης $k-\varepsilon$ είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης στην υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD). Είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που παρέχει ένα κλείσιμο για τις εξισώσεις Reynolds - Averaged Navier-Stokes (RANS) επιλύοντας δύο πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς. Το μοντέλο αποτυπώνει τις επιπτώσεις της τύρβης στην μέση ροή μέσω δυο νέων βαθμωτών πεδίων, συγκεκριμένα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k [m^2/s^2], και του ρυθμού τυρβώδους διάχυσης (ε) [m^2/s^3], η χωρική και χρονική εξέλιξη των οποίων περιγράφονται από δυο νέες εξισώσεις. Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (advection-diffusion) της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) δίνεται από

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - k\varepsilon + P_k \quad (16)$$

Στην εξίσωση αυτή, το ν_t αντιπροσωπεύει το ιξώδες λόγω τύρβης (turbulent viscosity), το σ_k είναι ο αριθμός Prandtl για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το P_k είναι ο ρυθμός παραγωγής τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ίσος με

$$P_k = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (17)$$

Στο αριστερό μέλος βλέπουμε τους τυπικούς όρους (χρονική μεταβολή και χωρική μεταφορά) ενώ στο δεξί έχουμε κατα σειρά τον όρο χωρικής διάχυσης, όρο καταβόθρας και όρο πηγής. Παραπέρα, η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης για το ρυθμό τυρβώδους διάχυσης (ε) δίνεται από την ακόλουθη έκφραση

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (18)$$

Εδώ, σ_ε είναι ο αριθμός Prandtl για τον τυρβώδη ρυθμό διάχυσης, C_1 και C_2 είναι σταθερές του μοντέλου και οι δυο τελευταίοι όροι στη δεξιά πλευρά αντιπροσωπεύουν την πηγή και την καταβόθρα για τον τυρβώδη ρυθμό διάχυσης, αντίστοιχα. Οι εκφράσεις για τους όρους πηγής και καταβόθρας και στις δυο παραπάνω εξισώσεις έχουν καθαρά φαινομενολογική προέλευση [Launder & Spalding 1983]. Συνολικά οι εξισώσεις 12, 13, 16, 18 αποτελούν κλειστό σύστημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά, με τις τιμές των ελεύθερων παραμέτρων να παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Το μοντέλο k-ε είναι υπολογιστικά αποτελεσματικό σε σύγκριση με πιο πολύπλοκα μοντέλα τύρβης όπως τα μοντέλα τάσης Reynolds (RSM). Είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις σε μηχανολογικές εφαρμογές καθώς απαιτεί λιγότερους υπολογισμούς. Επίσης, είναι ευέλικτο και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα καθεστώτα ροής. Ωστόσο, έχει μειονεκτήματα όπως την περιορισμένη ακρίβεια στην μοντελοποίηση πολύπλοκων φαινομένων τύρβης, είναι ευαίσθητο στις επιδράσεις κοντά στο τοίχωμα και απαιτεί την καθορισμό σταθερών του μοντέλου. Επίσης, δεν είναι πάντα κατάλληλο για ροές με έντονο στροβιλισμό, περιστροφή ή ανισοτροπική τύρβη.

Πίνακας 4: Τιμές ελεύθερων παραμέτρων για το RANS μοντέλο k-ε.

α/α	Παράμετρος	Τιμή
1	C_μ	0.09
2	C_1	1.44
3	C_2	1.92
4	σ_k	1

5	σ_z	1.3
---	------------	-----

Η LES μοντελοποίηση της τύρβης αποσκοπεί στη μείωση της εξάρτησης από το μοντέλο και τις παραμέτρους της τύρβης. Ως εκ τούτου, το μεγαλύτερο μέρος της ροής προσομοιώνεται χωρίς κανένα μοντέλο και πρέπει να επιλυθεί από το πλέγμα. Μολοταύτα, για κλίμακες μικρότερες από την ανάλυση του πλέγματος χρειάζεται μοντέλο. Κατά συνέπεια, η LES προσέγγιση είναι υπολογιστικά πιο απαιτητική από την RANS. Μάλιστα, τα μοντέλα RANS έχουν υπολογιστικό χρόνο μόνο το 5% περίπου του χρόνου LES. Η βασική ιδέα πίσω από το LES είναι η θεώρηση μιας τυρβώδης ροής ως αποτελούμενης από ένα συνεχές στροβίλων (eddies), με καθέναν στρόβιλο να προσδιορίζεται από μια κλίμακα μήκους. Στόχος είναι η μείωση του υπολογιστικού κόστους, αγνοώντας τις κλίμακες μήκους από ένα μέγεθος και κάτω, οι οποίες ενώ είναι οι πιο δαπανηρές υπολογιστικά, συνεισφέρουν λιγότερο στο τελικό αποτέλεσμα. Για την παραγωγή των LES εξισώσεων, χρησιμοποιείται ολοκληρωτικός μετασχηματισμός στις εξισώσεις Navier-Stokes. Ουσιαστικά ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως χωρικός μέσος όρος. Ωστόσο, λόγω του χαοτικού χαρακτήρα του φαινομένου, αυτές οι κλίμακες που αφαιρέθηκαν μπορούν σε μελλοντικό χρόνο να μην είναι πλέον αμελητέες, συνεπώς να προκύψουν αστάθειες ή απώλεια ακρίβειας.

Για να προκύψουν οι φιλτραρισμένες εξισώσεις για το LES, εφαρμόζεται μια πράξη χωρικού φιλτραρίσματος σε κάθε μεταβλητή. Τα φιλτραρισμένα μεγέθη συμβολίζονται με άνω γραμμή, όπως $\overline{v^i}$, \overline{p} και \overline{T} . Για παράδειγμα, η φιλτραρισμένη ταχύτητα $\overline{v^i}$ λαμβάνεται με τη χωρική μέση τιμή του πεδίου ταχύτητας για ένα πλάτος φίλτρου Δ σε κάθε σημείο

$$\overline{v^i}(x^j, t) = \frac{1}{\Delta^3} \int_{V(x^j)} v^i(x'^j, t) dV \quad (19)$$

Η φιλτραρισμένη εξίσωση συνέχειας δεν αποκτά επιπλέον όρους,

$$\partial_i \overline{p} + \partial_j (\overline{v_j}) = 0 \quad (20)$$

ενώ η εξίσωση ορμής γίνεται

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\tau_{ij}} \quad (21)$$

Στο σημείο αυτό, προκειμένου να κλείσει το σύστημα, χρειάζεται να επιλέξουμε κάποιο μοντέλο για το $\overline{\tau_{ij}}$. Επιλέγουμε το μοντέλο Smagorinsky, το οποίο υποθέτει ότι υπάρχει ισορροπία μεταξύ της ροής κινητικής ενέργειας κατά μήκος της κλίμακας και των μεγάλων κλιμάκων της τύρβης. Για το μοντέλο αυτό,

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} = -2\nu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3}S_{kl}\delta_{kl}\delta_{ij} \right) \quad (22)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (23)$$

και

$$\nu_t = C_S \left(\bar{S}_{ij} \bar{S}^{ij} \right)^{1/2} \quad (24)$$

Παραπέρα, $C_S = C_k \cdot \Delta$ όπου το Δ είναι το μέγεθος του πλέγματος που ορίζει την κλίμακα μήκους του υποπλέγματος (subgrid) και υπολογίζεται με βάση κάποιο μοντέλο, όπως cubeRootVol και vanDriest (βλ. πχ Cheng and Yang [2023] και εκεί αναφορές). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το τελευταίο.

Η ποσότητα k_{sgs} , που αντιστοιχεί στην τυρβώδη ενέργεια του υποπλέγματος υπολογίζεται ως λύση της εξίσωσης

$$\bar{S}_{ij} \bar{S}^{ij} + C_e \frac{k_{sgs}^{1/2}}{\Delta} = 0 \quad (25)$$

δηλαδή

$$k_{sgs} = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \quad (26)$$

όπου $a = \frac{C_e}{\Delta}$, $b = \frac{2}{3}\bar{S}_{ii}$, $c = 2C_a\Delta \left(S_{ij} - \frac{1}{3}S_{kl}\delta_{kl}\delta_{ij} \right) S^{ij}$, με τον όρο εντός της παρένθεσης να

αντιστοιχεί στο αποκλίνων μέρος του τανυστή S (deviatoric part). Το LES μοντέλο Smagorinsky προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως απλότητα στην χρήση, αποτελεσματικότητα σε ποικίλες ροές, αριθμητική σταθερότητα και έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας προσομοίωσης και υπολογιστικού κόστους. Ωστόσο, έχει μειονεκτήματα όπως τη χρήση σταθερό συντελεστή μοντέλου, που πρέπει να προσαρμοστεί σε συγκεκριμένες συνθήκες ροής, και χαμηλότερη ακρίβεια σε πολύπλοκες ροές που περιλαμβάνουν έντονη ανισοτροπία. Τέλος, ο μοντέλο Smagorinsky είναι λιγότερο αποτελεσματικό στην προσομοίωση των περιοχών κοντά στα τοιχώματα. Μολοταύτα, καθώς τα σημεία δειγματοληψίας μας αφορούν τον όγκο της ροής και η 3d γεωμετρία έχει ακρίβεια τάξης ορισμένων μέτρων, η μειωμένη ακρίβεια του μοντέλου κοντά στα τοιχώματα δεν μας απασχολεί ιδιαίτερα επι του παρόντος.

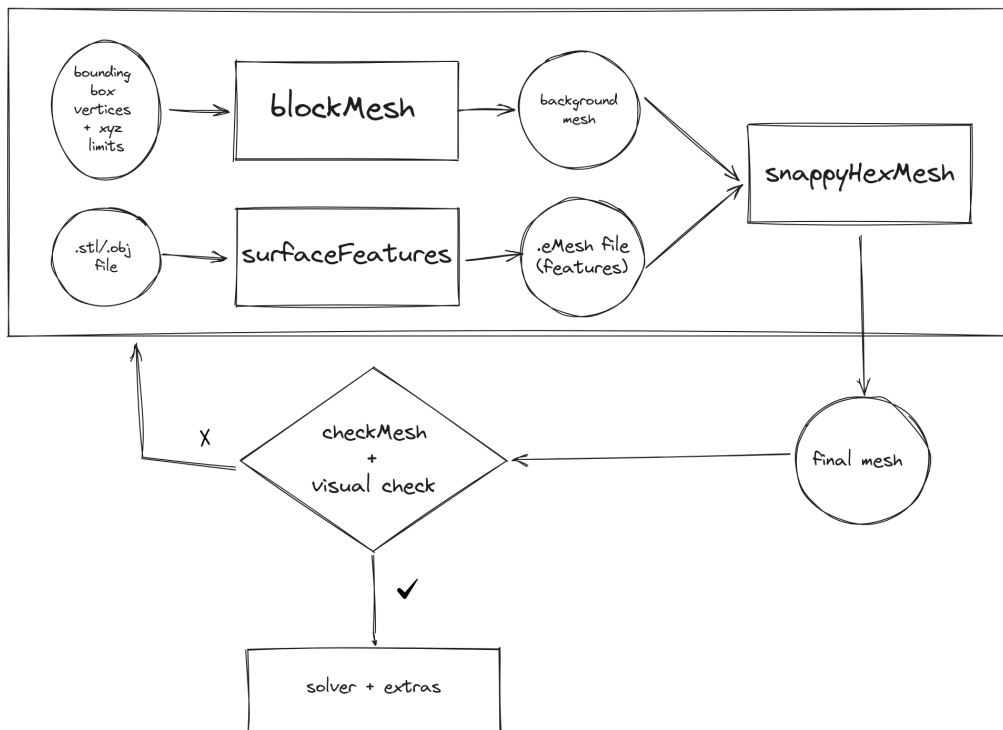
3.2 Μεθοδολογία

3.2.1 Γενικά

Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως χρησιμοποιούμε το OpenFOAM. Το OpenFOAM (Open-source Field Operation And Manipulation) είναι μια C++ εργαλειοθήκη για την ανάπτυξη προσαρμοσμένων αριθμητικών επιλυτών και συναφών βοηθητικών προγραμμάτων με

σκοπό την επίλυση προβλημάτων μηχανικής συνεχούς μέσου και κύριως την υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) Jacobsen, Fuhrman and Fredsøe [2012]. Το λογισμικό OpenFOAM χρησιμοποιείται σε ερευνητικούς οργανισμούς, ακαδημαϊκά ινστιτούτα, όπως και στην βιομηχανία. Το OpenFOAM είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα, το οποίο διατίθεται ελεύθερα και αδειοδοτείται βάσει της Γενικής Άδειας Δημόσιας Χρήσης GNU3 GPL [2007].

Το μεγάλο πλεονέκτημα του OpenFOAM σε σύγκριση με τα αντίστοιχα εμπορικά προγράμματα είναι η ευρύτερη κοινότητα χρηστών που συμμετέχει σε αυτό, παρέχοντας ανοιχτή υποστήριξη μέσω του αντίστοιχου φόρουμ, [CFD-online:OpenFOAM 2023]. Αυτή η κοινότητα αποτελείται από ερευνητές και μηχανικούς από διάφορους τομείς, οι οποίοι εργαζόμενοι ο καθένας στο δικό του επιμέρους πρόβλημα, αναπτύσσουν περαιτέρω το OpenFoam. Η αξία ενός εργαλείου ανοικτού κώδικα όπως το OpenFOAM έγκειται στην ελευθερία της πρόσβασης και της τροποποίησης του λογισμικού, όπως και στην κουλτούρα των χρηστών του. Οι χρήστες μπορούν όχι μόνο να χρησιμοποιήσουν τις υπάρχουσες λειτουργίες, αλλά και να προσαρμόσουν το λογισμικό στις ανάγκες τους. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να αναπτύξουν προσαρμοσμένες λύσεις για συγκεκριμένα προβλήματα, όπως και το συνεχή εμπλουτισμό του οικοσυστήματος με νέα εργαλεία. Ταυτόχρονα, η κοινότητα των χρηστών του OpenFOAM παρέχει μια αξιοσημείωτη πηγή γνώσης και εμπειρίας μέσω της παραγωγής ανοικτού εκπαιδευτικού υλικού αλλά και μέσω του σχετικού φόρουμ. Οι χρήστες μπορούν να συζητούν προβλήματα, να ανταλλάσσουν ιδέες,



Εικόνα 49: Διάγραμμα ροής για την διαδικασία της παραγωγής του πλέγματος (mesh) επι του οποίου θα γίνει η αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων.

να παρέχουν βοήθεια και να λύνουν απορίες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε την έκδοση 2106 του OpenFOAM vrs-2106 [2021].

3.2.2 Κατασκευή πλέγματος και Συνοριακές Συνθήκες

Για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος (grid) στο οικοσύστημα του OpenFoam προτείνονται τα εργαλεία *blockMesh* και *snappyHexMesh*, (βλ. OpenFOAM-Documentation [2023]). Εν γένει η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 64. Πιο αναλυτικά, το βοηθητικό πρόγραμμα *blockMesh* δημιουργεί δομημένα πλεγμάτα με βάση τυπικές μονάδες συγκεκριμένης γεωμετρίας (blocks). Οι χρήστες παρέχουν δεδομένα εισόδου μέσω ενός αρχείου (dictionary file) με όνομα "blockMeshDict", όπου ορίζουν κορυφές αναφοράς, δομικές μονάδες (κελιά) για το πλέγμα (καθένα από τα οποία έχει 8 κορυφές), ορισμούς διαβάθμισης για τη βελτίωση του πλέγματος, αριθμό κελιών στους μεγάλους άξονες και επίσης αναθέτουν ονόματα και ιδιότητες για κάθε συνοριακή επιφάνεια. Προαιρετικά, οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν διαβάθμιση ακμών με βάση άλλους κανόνες, όπως τόξα και γενικές καμπύλες (splines).

Παραπέρα, το βοηθητικό πρόγραμμα *snappyHexMesh* χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σύνθετων, μη δομημένων πλεγμάτων γύρω από αντικείμενα που ορίζονται από επιφάνειες STL, με προφανή

χρησιμότητα σε περίπλοκες γεωμετρίες. Το snappyHexMesh παίρνει ως είσοδο αρχεία δεδομένων επιφάνειας σε κατάλληλη μορφή, συνήθως STL ή OBJ, ένα πλέγμα υποβάθρου αποτελούμενο από εξαέδρα (hex mesh) που ορίζει την έκταση του υπολογιστικού πεδίου και την πυκνότητα του βασικού πλέγματος (συχνά παράγεται από το blockMesh) και ένα αρχείο παραμέτρων το οποίο ονομάζεται "snappyHexMeshDict". Προαιρετικά, οι χρήστες μπορούν να δώσουν επιπλέον επιφανειακά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας, με την μορφή eMESH αρχείων, τα οποία παραγονται από το βοηθητικό πρόγραμμα surfaceFeatures, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω. Οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν συγκεκριμένα επίπεδα βελτίωσης του πλέγματος για διάφορες περιοχές των επιφανειών STL για να ελέγξουν την ανάλυση του πλέγματος. Η δυνατότητα του snappyHexMesh στο να παράγει υψηλής ανάλυσης μη δομημένα πλέγματα, το καθιστά ιδιαίτερα πλεονεκτικό για προσομοιώσεις που απαιτούν ακριβή περιγραφή του οριακού στρώματος, όπως και πολύπλοκες γεωμετρίες. Ένα μειονέκτημα του snappyHexMesh αποτελεί η ισχυρή διαίσθηση που απαιτείται προκειμένου να καταληξεί κάποιος στις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων για το πρόβλημα του. Ακόμη, καθώς ως βάση της διαδικασίας χρησιμοποιείται το αρχικό πλέγμα των stl γεωμετριών που δίνονται ως είσοδος, είναι πολύ σημαντικό να γίνει "καλή" διαμέριση των αρχείων δεδομένων επιφάνειας. Μια προφανής ερώτηση στο σημείο αυτό αφορά την αυστηρή διατύπωση του τι σημαίνει "καλή" διαμέριση. Δυστυχώς μια τέτοια διατύπωση δεν μπορεί να υπάρξει στην γενικότητα, καθώς η άνω διαδικασία έχει να κάνει καίρια με την ανα χείρας γεωμετρία. Σαν εμπειρικός κανόνας, μετά από κάθε αποτυχία της διαδικασίας που απεικονίζεται στην Εικόνα 64, ο χρήστης οφείλει να ελέγξει την ποιότητα της διαμέρισης των αρχείων γεωμετρίας του, πριν εκτελέσει εκ νέου την διαδικασία αλλάζοντας τις παραμέτρους.

Το βοηθητικό πρόγραμμα surfaceFeatures χρησιμεύει ως βήμα προεπεξεργασίας για το snappyHexMesh, εξαγόντας χαρακτηριστικά από αρχεία γεωμετρίας STL/OBJ ως eMESH αρχεία. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν ακμές, γωνίες και πτυχώσεις, τα οποία και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του πλέγματος. Χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά, το snappyHexMesh μπορεί να βελτιώσει πιο αποτελεσματικά τα κελιά γύρω από αυτές τις περιοχές, εξασφαλίζοντας μια πιο ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας. Η διαδικασία αυτή βοηθά στην αποφυγή πιθανών προβλημάτων του πλέγματος γύρω από κρίσιμες λεπτομέρειες της γεωμετρίας.

Το τελικό αποτέλεσμα ελέγχεται με χρήση του εργαλείου checkMesh. Το τελευταίο αποτιμά την ποιότητα του πλέγματος με βάση τις ακόλουθες μετρικές

- **Γεωμετρική ακεραιότητα:** Διασφαλίζεται ότι το πλέγμα αποτελεί έναν κλειστό όγκο
- **Ποιότητα κελιών:** Αξιολογούνται τα τελικά κελιά όσον αφορά το σχήμα, την λοξότητα (skewness) και τον όγκο τους. Εντοπίζονται τα κελιά που απέχουν πολύ από το κανονικό εξαέδρο.
- **Συνοριακές συνθήκες:** Γίνεται έλεγχος των συνοριακών επιφανειών, ως προς τον προσανατολισμό τους, εξασφαλίζοντας ότι το πρόβλημα είναι καλά ορισμένο.
- **Μέγεθος και διαβάθμιση πλέγματος:** Το μέγεθος και η διαβάθμιση των κελιών σε όλο το πλέγμα ελέγχονται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η ανάλυση του πλέγματος είναι αρκούτως ομαλή. Για

παράδειγμα, για τυχαίο κελί, δεν είναι καλό να υπάρχουν γειτονικά κελιά με αναλογία όγκου μικροτερη του 10%.

Χρησιμοποιήθηκε ένα παραλληλεπίπεδο πλέγμα διαστάσεων $L_x, L_y, L_z = (321\text{m}, 320\text{m}, 100\text{m})$. Ισοδύναμα, ως συνάρτηση του μέσου ύψους των κτηρίων ($H_{build} \sim 18\text{m}$), $L_x, L_y, L_z = (17H_{build}, 17H_{build}, 5H_{build})$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, το υπολογιστικό χωρίο περιστρέφεται κατάλληλα, έτσι ώστε η ταχύτητα εισόδου ($\mathbf{U}_{inlet} = (U, V)$) να ανάγεται στη μορφή $\mathbf{U}_{inlet} = \sqrt{U^2 + V^2} \mathbf{x}$, με σκοπό να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης αριθμητικού θορύβου στα άκρα του χωρίου και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των αναγκαίων εκτελέσεων ελέγχου.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι γύρω από την περιοχή μελέτης βρίσκεται η πόλη της Χίου, σε παρόμοιες γραμμές με την βιβλιογραφία, [Sanchez,Santiago,Martilli,Palacios & Kirchner 2016; Wang,Xu,Ng & Raasch 2018] χρησιμοποιήθηκαν κυκλικές συνοριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα, οι συνοριακές συνθήκες για τις επιφάνειες εισροής (inlet) και εκροής (outlet) θεωρήθηκαν κυκλικές, δηλαδή η εκροή επανεισάγεται στην εισροή και το ίδιο γίνεται με τις αριστερά (left) και δεξιά (right) συνοριακές επιφάνειες του πλέγματος. Παράλληλα, για την πάνω επιφάνεια του πλέγματος επιβάλλεται ως οριακή συνθήκη η συνθήκη "ολίσθησης" ("slip"), ενώ για την 3D γεωμετρία των κτηρίων, επιβάλλεται η συνθήκη "μη-ολίσθησης" ("noSlip"). Η συνθήκη ολίσθησης δίνει στο ρευστό μια εφαιπτομενική συνιστώσα ταχύτητας, ενώ η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας παραμένει μηδέν.

3.2.3 Επίλυση των Navier-Stokes

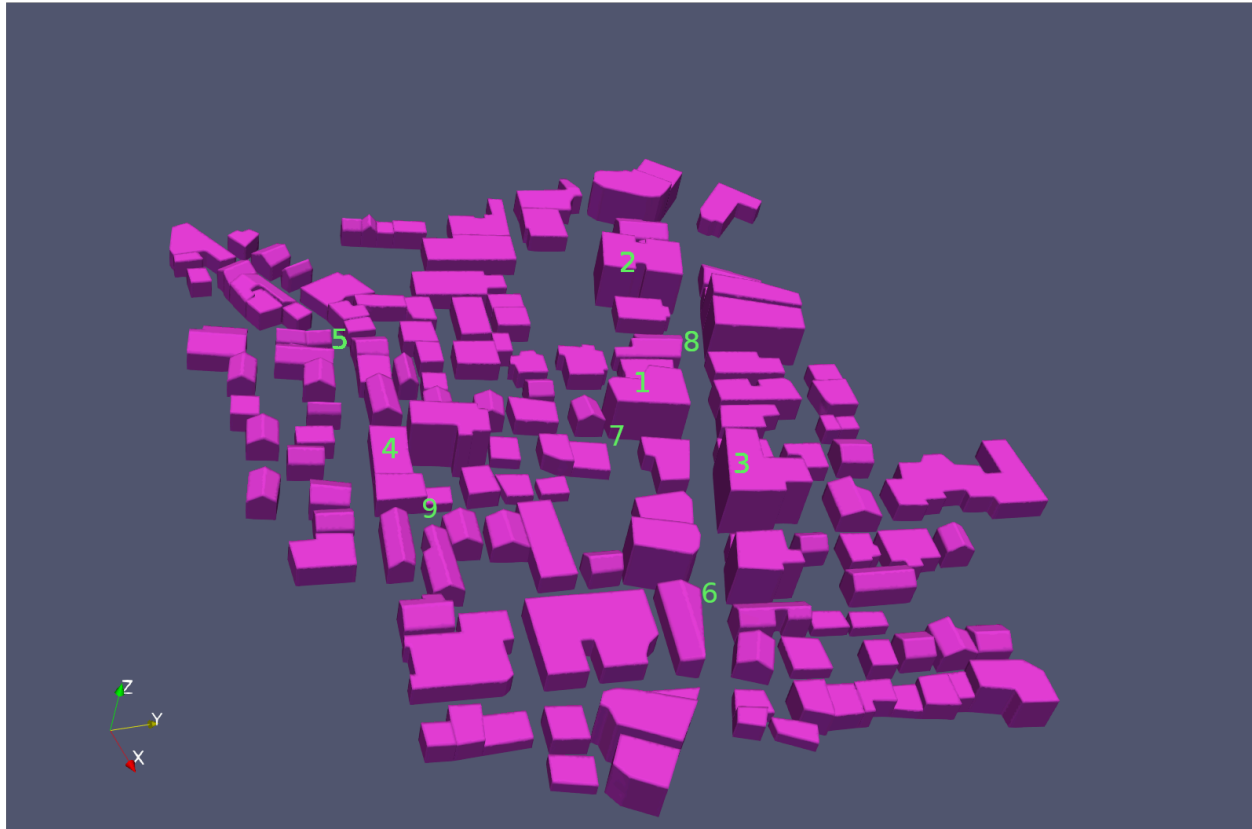
Για το συγκεκριμένο πρόβλημα θα χρησιμοποιηθεί ο επιλυτής *rimpleFoam* του *OpenFoam*, ο οποίος είναι γνωστός για την σταθερότητα και την αποδοτικότητα του και τα μοντέλα τύρβης που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή το κ-ε RANS Li,Xu,Ming,Peng,Huang and Gong [2017a] [Piroozmand,Mussetti,Allegrini,Mohammadi,Akrami & Carmeliet 2020] και το Smagorinsky LES Fernandez,Ikegaya,Ito and Chen [2022] Fernandez et al. [2022], οι βασικές έννοιες και υποθέσεις των οποίων παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα.

Πίνακας 5: Θέσεις προτεινόμενων σημείων δειγματοληψίας επι της περιοχής μελέτης.

α/α	x(m)	y(m)	Περιγραφή
1	1.5	30.0	Δώμα του κτηρίου της Αστυνομίας της Χίου.
2	-70.0	72.0	Κουντουριώτου 15
3	33.0	45.0	Δώμα κτηρίου πανεπιστημίου Αιγαίου κοντά σε θέση αισθητήρα

Επι της διασταύρωσης των οδών Καλαμπόκα και Σταματίου Πρόιου			
4	5.0	-77.0	
5	-72.0	-65.0	Καλαμπόκα 28
Συμβολή οδών Σκίμου και Κουντουριώτου, πλησίον Δημόσιου χώρου πάρκινγκ.			
6	82.5	15.0	
7	2.1	17.2	Πλησίον του κτηρίου της Αστυνομίας επι της οδού Πολεμίδα.
Επί της οδού Κουντουριώτου, πλησίον παρόδου Σταματίου Πρόιου			
8	-50.0	70.0	
9	20.0	-55.0	Επι της οδού Πρόιου, κοντά στην διασταύρωση με την οδό Καλαμπόκα

Αποσκοπώντας στον παρατηρησιακό έλεγχο και επιβεβαίωση των προσομοιώσεων που παρήχθησαν, παρουσιάζουμε εδώ ορισμένα παρατηρήσιμα ως προς το κανονικοποιημένο ύψος απο το έδαφος. Τα σημεία δειγματοληψίας επιλέχθηκαν κατάλληλα ώστε να αποτυπώνουν κατα το δυνατόν το πεδίο της ροής στη περιοχή μελέτης. Τα σημεία αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 80 και στον Πίνακα 5.



Εικόνα 65: Προτεινόμενα σημεία δειγματοληψίας επι της περιοχής μελέτης για την επιβεβαίωση των προσομοιώσεων. Οι συντεταγμένες τους ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς καθώς και η περιγραφή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή, μια συχνά εμφανιζόμενη κατάσταση αφορά τις ταχύτητες $V = 4.47 \text{ m/s}$ και $U = 2.76 \text{ m/s}$. Να σημειωθεί ότι ακολουθείται η μετεωρολογική σύμβαση, κατά την οποία θετική ταχύτητα αέρα αντιστοιχεί σε ροή προς τον παρατηρητή, ενώ η μηδενική διεύθυνση αντιστοιχεί στην διεύθυνση $\pi/2$ και η θετική φορά είναι η δεξιόστροφη. Στην υπο μελέτη γεωμετρία ενυπάρχουν διαφορετικές κλίμακες μήκους, για παράδειγμα το μέσο ύψος κτηρίων ($H_{build} \sim 18\text{m}$), το μέσο μήκος δρόμου ($L_{road} \sim 300\text{m}$) και το μέσο πλάτος δρόμου ($W_{road} \sim 6\text{m}$). Υιοθετώντας τυπικές τιμές κινηματικού ιξώδους (ν) και πυκνότητας αέρα (ρ_{air}) προκύπτουν αριθμοί Reynolds της τάξης των $10^5 - 10^8$. Προφανώς, οι αντίστοιχοι αριθμοί Mach είναι της τάξης του 10^{-3} , οπότε η υπόθεση του ασυμπίεστου ρευστού αποτελεί καλή προσέγγιση.

3.3 Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.3.1 Προφίλ της ροής

Ακολούθως παρουσιάζεται το προφίλ ροής καθ' ύψος για τα σημεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και στην Εικόνα 96 για δυο μοντέλα τύρβης και συγκεκριμένα το κ-ε RANS μοντέλο και το Smagorinsky LES μοντέλο. Έχει γίνει αδιαστατικοποίηση του ύψους (z) με το μέσο ύψος των κτηριών, (H) και της ταχύτητας U_x με την ταχύτητα ελεύθερης ροής, U_f . Τα δεδομένα εξήχθησαν από το .foam αρχείο με χρήση προσαρμοσμένης μακροεντολής σε γλώσσα *python*, μέσω του FOSS προγράμματος *paraview*, (βλ. σχετική ενότητα στο Παράρτημα). Για την περίπτωση του LES μοντέλου έχει ληφθεί η μέση τιμή για διάστημα 150 s. Για το σημείο 1 (P1), ευρισκόμενο στο δώμα ενός από τα ψηλότερα κτήρια της περιοχής μελέτης, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν σημαντικά φαινόμενα επανακυκλοφορίας σε ύψος περίπου 18 μέτρων, ενώ το κ-ε μοντέλο έχει ελάχιστες διαφορές με το Smagorinsky, προβλέποντας λίγο μικρότερη ταχύτητα (~ 2-3 %). Στο εύρος από 1 μέχρι 5, παρατηρούμε παρόμοια μορφή με το αναμενόμενο λογαριθμικό προφίλ. Για το σημείο 2 (P2), ευρισκόμενο εντός της οδού Κουντουριώτου, παρατηρούμε κυριαρχία του λογαριθμικού προφίλ από το ύψος αναφοράς και πάνω. Για μικρότερα ύψη, το κ-ε δίνει ταχύτητα περίπου αναλογη του τετραγώνου z/H , ενώ το Smagorinsky δίνει σχεδόν σταθερή ταχύτητα με αυξομειώσεις της τάξης μερικών εκατοστών, οι οποίες ερμηνεύονται ως αποτέλεσμα τυρβώδων φαινομένων εντός του αστικού φαραγγιού. Το σημείο 3 (P3), ευρισκόμενο στο δώμα του κτηρίου του πανεπιστημίου Αιγαίου, έχει πανομοιότυπη συμπεριφορά με το σημείο 1. Το σημείο 4 (P4), ευρισκόμενο στην διασταύρωση των οδών Καλαμπόκα και Πρύου παρουσιάζει αλλαγή στην εικόνα της ροής σε μικρότερο ύψος (της τάξης των 10 μέτρων περίπου) από τα προηγούμενα σημεία, το οποίο έχει να κάνει με το χαμηλότερο ύψος στα κοντινά του κτήρια (βλ. Εικόνα 80). Για το διάστημα πριν από το ύψος αυτό, παρατηρούνται διακυμάνσεις τις ταχύτητας και για τα δυο μοντέλα, με το κ-ε να δίνει ελάχιστα μικρότερες ταχύτητες. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για το σημείο 5 (P5), ευρισκόμενο επί της οδού Καλαμπόκα και απέχοντας μερικές δεκάδες μέτρα από το P4. Για το P6, παρατηρούμε αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των δυο μοντέλων (της τάξης του 10%) και επιπλέον διαφορετική ποιοτικά συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, το μοντέλο κ-ε παρουσιάζει αυξομείωση της ταχύτητας από το ύψος 0 μέχρι περίπου H , ενώ το Smagorinsky παρουσιάζει αύξηση με κάποιο νόμο δύναμης από 0 μέχρι H . Το σημείο 7 (P7), το οποίο βρίσκεται στην οδό Πολεμίδα, ενώ υπάρχουν πλησίον του ψηλά κτήρια ($>H$), παρουσιάζει αντίστοιχη αυξομείωση μέχρι και το ύψος H , όπου όμως υπάρχει συμφωνία μεταξύ των μοντέλων μέχρι τη τάξη εκατοστών. Το σημείο 8 (P8), το οποίο βρίσκεται επί της Κουντουριώτου παρουσιάζει ποιοτικά αντίστοιχη εικόνα με το P6, με τις διαφορές να αφορούν το ύψος όπου γίνεται η ποιοτική αλλαγή της εικόνας της ροής καθώς και την ταχύτητα στο σημείο αυτό. Τέλος, το σημείο 9 (P9) παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα εμφάνισης δυο σημείων αυξομειώσεων της ταχύτητας για το μοντέλο Smagorinsky, ενώ το κ-ε δεν ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά. Παραπέρα, μπορούμε να προβούμε σε μια πρόβλεψη για το προφίλ της ταχύτητας, προσαρμόζοντας ένα τυπικό λογαριθμικό

προφίλ στα προσομοιωμένα δεδομένα. Ακολουθώντας τη βιβλιογραφία [Ricci,Kalkman,Blocken,Burlando,Freda & Repetto 2018], διαλέγουμε το ακόλουθο:

$$U(z) = \frac{U_*}{k} \log(z/z_0) \quad (27)$$

όπου $k = 0.41$ είναι η αδιάστατη σταθερά von Karman και τα U_* , z_0 είναι η ταχύτητα τριβής (friction velocity) και το μήκος αδρότητας (roughness length). Η ταχύτητα τριβής αντιστοιχεί στην κλίμακα ταχύτητας όπου κυριαρχεί η τύρβη λόγω των χαρακτηριστικών του εδάφους. Το μήκος αδρότητας αποτελεί την αντίστοιχη κλίμακα ύψους.

Χρησιμοποιώντας κλασική ανάλυση πιθανοφάνειας και με χρήση της ρουτίνας βελτιστοποίησης *differential_evolution* της FOSS βιβλιοθήκης *scipy Virtanen et al. [2020b]* με το άνω προφίλ, πρόκυπτουν οι Πίνακες 6, 7. Η μέση τιμή και το αντίστοιχο σφάλμα, αποκλείοντας το σημείο P3 το οποίο βρίσκεται επι του δώματος κτηρίου δίνει τα ακόλουθα:

$U_* = (0.9 \pm 0.2) \text{ m/s}$, $z_0 = (6.4 \pm 3.2)$ για το k -ε μοντέλο και $U_* = (0.9 \pm 0.1) \text{ m/s}$, $z_0 = (6.7 \pm 2.9)$ για το Smagorinsky μοντέλο.

Το παραπάνω αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για άμεσο έλεγχο της παρούσας προσομοίωσης, όσο και για επιλογή ρεαλιστικότερων αρχικών συνθηκών σε άλλες σχετικές προσομοιώσεις στην ίδια ή παρόμοια περιοχή.

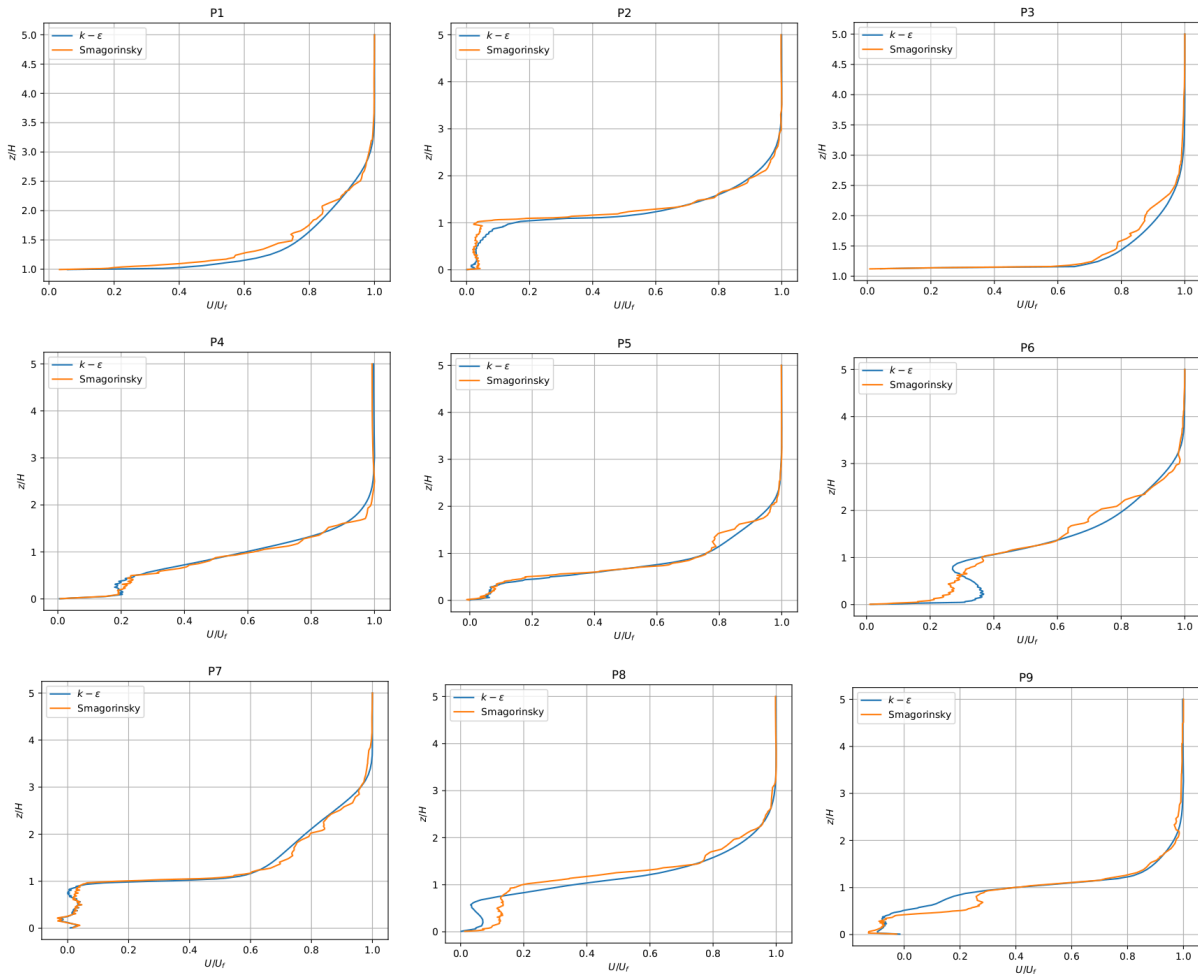
Πίνακας 6: Προφίλ ταχύτητας για ορισμένα σημεία του υπολογιστικού χωρίου για το RANS μοντέλο τύρβης k -ε.

Σημείο	Z_0 (m)	u_* (m/s)	χ^2
P1	2.01	0.60	0.09
P2	9.00	0.99	0.70
P3	0.42	0.42	0.09
P4	3.28	0.72	0.28
P5	2.56	0.66	0.31
P6	7.52	0.91	0.22
P7	9.00	0.96	0.59

P8	9.00	1.01	0.52
P9	9.00	1.04	0.84

Πίνακας 7: Προφίλ ταχύτητας για ορισμένα σημεία του υπολογιστικού χωρίου για το LES μοντέλο τύρβης Smagorinsky.

Σημείο	Z ₀ (m)	u _* (m/s)	χ ² _{min} /N
P1	4.15	0.75	0.14
P2	9.00	0.98	0.79
P3	0.91	0.49	0.09
P4	2.77	0.68	0.26
P5	2.84	0.68	0.29
P6	9.00	0.97	0.11
P7	9.00	0.97	0.56
P8	9.00	0.99	0.46
P9	7.50	0.96	0.57



Εικόνα 81: Προφίλ της ροής για τα σημεία του Πίνακα 5. Στον x άξονα έχουμε την αδιαστατικοποιημένη ταχύτητα και στον y το αδιαστατικοποιημένο ύψος.

3.3.2 Ισοδυναμικές επιφάνειες της ροής

Στις Εικόνες 112, 128 παρουσιάζουμε ισοδυναμικές γραμμές της μέσης ταχύτητας ροής για τα ύψη 9m και 1.65m απο την επιφάνεια του εδάφους για το μοντέλο τύρβης Smagorinsky LES, ενώ στις Εικόνες 144, 160 έχουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το $k-\epsilon$ RANS μοντέλο. Εκτός απο τις ισοδυναμικές επιφάνειες παρουσιάζεται επίσης η διεύθυνση της ταχύτητας, η οποία αναπαρίσταται ως βέλος, όπου το μέγεθος του βελους αναπαριστά το μέτρο της ταχύτητας. Το ύψος 1.65 m αντιστοιχεί στο μέσο ύψος

ενος ανθρώπου, ενώ το ύψος των 9 m αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο μεταξύ μονοκατοικιών/δυόροφων κτηρίων και πολυόροφων, πιο σύγχρονων κατασκευών.

Για το ύψος των 9 μέτρων (Εικόνες 8, 10), μια πρώτη παρατήρηση αφορά την δημιουργία περιοχών ανακυκλούμενης ροής (wakes), με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τα σημεία Β και το σύμπλεγμα απέναντι απο το σημείο D. Η μέση ταχύτητα της ροής παρουσιάζει σημαντικές χωρικές διακυμάνσεις, απο περίπου 1 m/s σε 4 m/s. Παραπέρα, βλέπουμε την ύπαρξη σημείων χαμηλής ταχύτητας πάνω απο κτήρια χαμηλότερου ύψους απο τα γειτονικά τους, για παράδειγμα αριστερά απο το σημείο C. Ακόμη υπάρχουν ισχυρές αναστροφές της ροής στο προαναφερθέν σημείο, πάνω απο το σημείο E, όπως και στο κτήριο ευρισκόμενο δεξιά του σημείου D. Να σημειωθεί ότι με εξαιρεση των περιοχών ανακυκλούμενης ροής, η διεύθυνση κίνησης ακολουθεί την αρχική συνθήκη (προς τα θετικά του x άξονα δηλαδή απο πάνω προς τα κάτω στις προαναφερθείσες εικόνες). Μια ποιοτική σύγκριση ανάμεσα στα δυο μοντέλα τύρβης για το ύψος των 9m αποφέρει μικρές διαφορές, κυριώς στην πολυπλοκότητα της ροής. Συγκεκριμένα, είναι εμφανή περισσότερες ροϊκές δομές για το LES απο ότι για το RANS μοντέλο.

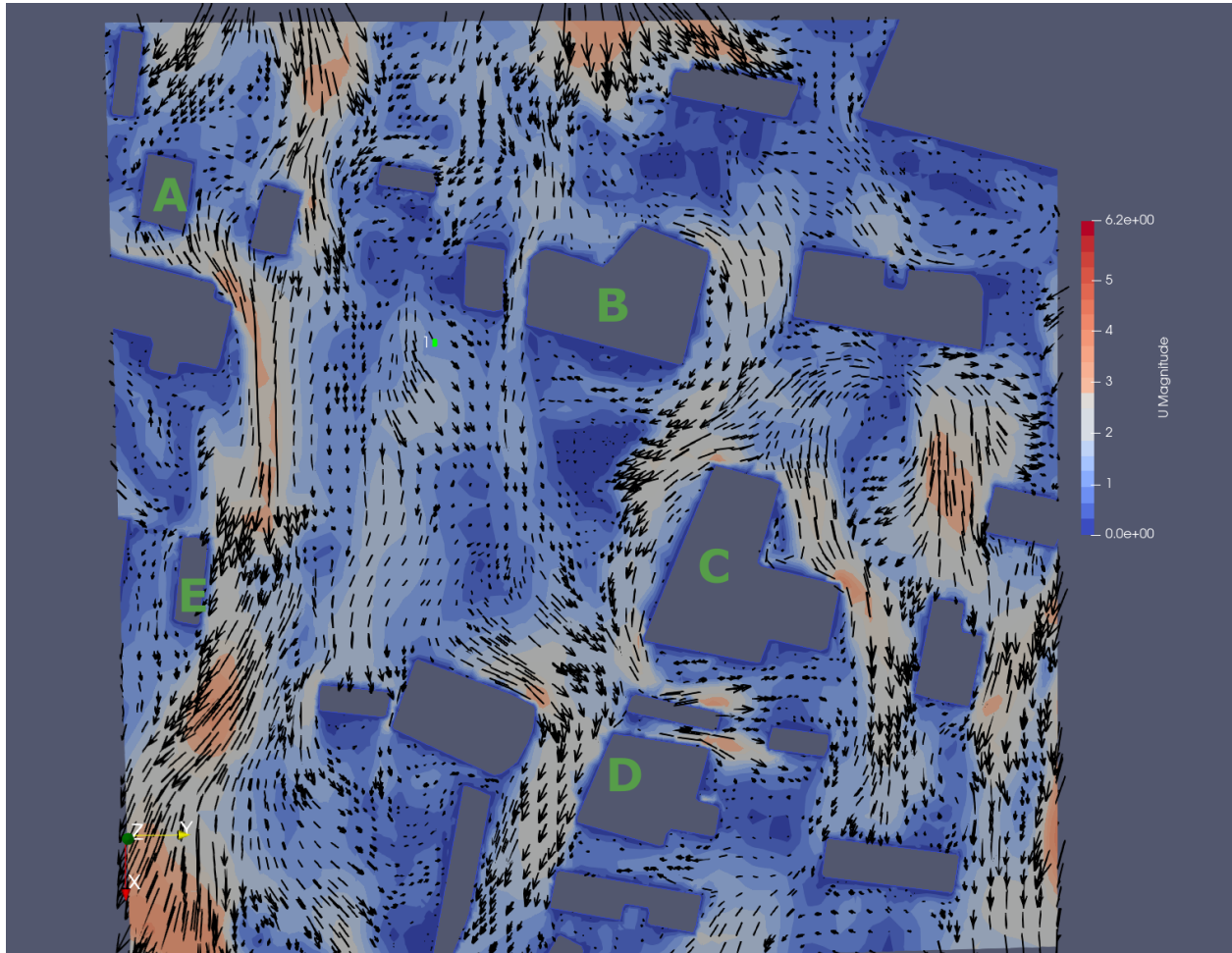
Ακολούθως, για το ύψος των 1.65 μέτρων (Εικόνες 9, 11) έχουμε σημαντικά μικρότερες ταχύτητες, της τάξης κάτω απο 1 m/s, όπως προφανώς αναμενόταν. Ο ακάλυπτος χώρος στη διεύθυνση E - C παρουσιάζει χαμηλή μέση ταχύτητα και παράλληλα αλλαγές της διεύθυνσης της ταχύτητας που αντιστοιχουν σε στροβιλώδη ροή. Πλησίον του σημείου Β έχουμε επίσης την εμφάνιση στροβίλων όπως και πίσω απο το κτήριο οπου βρίσκεται το σημείο C. Εν γένει, στον άξονα C - D που αντιστοιχεί στην οδό Κουντουριώτου παρατηρούμε τις μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, ενώ ενυπάρχουν και σημεία ανάμιξης με ροή απο άλλα στρώματα, όπως για παράδειγμα το άνω τμήμα της οδού. Αν συνθεωρηθεί η εικόνα της ροής απο το ύψος των 9m, η τελευταία παρατήρηση μπορεί να ερμηνευτεί με βάση την είσοδο τμήματος της ροής επι της οδού Κουντουριώτου, με σημείο εισόδου πάνω απο το σημείο Β.

Ένα αξιόλογο χαρακτηριστικό της ροής είναι η παρουσία σημείων εκτόξευσης (eject), για παράδειγμα η περιοχή ανάμεσα στα δυο κτήρια κάτω απο το σημείο Α στις εικόνες 128, 160. Εκεί, μέρος της ροής που εισρέει απο την οδο Πολεμίδα επιταχύνεται και ωθείται προς μεγαλύτερα ύψη. Απο τη σκοπιά των ΑΣ, αυτό μπορεί να συνεπάγεται την “θωράκιση” των στενών δρομίσκων απο μεταφερόμενους ρύπους απο την κατεύθυνση του λιμένα ή/και την δυσχέρεια ανακύκλωσης του αέρα εντός των δρομίσκων. Ένα αντίστοιχο σημείο βρίσκεται στην στενωπό ανάμεσα στα δυο κτήρια επι της ευθείας D – E. Ακόμη, στην ευθεία Α - Β προς το τέλος της εικόνας υπάρχει μια στροβιλώδης δομή που εμφανίζεται και επανεμφανίζεται με περίοδο μερικών δεκάδων δευτερολέπτων και φαίνεται να δημιουργείται ως ανάμιξη στροβίλων τύπου καρφίτσας (hairpin) οι οποιοι έχουν προκύψει απο υψηλά κτήρια εκτός της θεωρούμενης περιοχής. Μια γενική παρατήρηση αφορά το μέγεθος της περιοχής ανακυκλούμενης ροής, η οποία φαίνεται να εξαρτάται απο το μέγεθος του παρακείμενου κτηρίου. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα κτήρια στα σημεία Α και Β για τα δύο μοντέλα, παρατηρούμε ότι το κτήριο επι του σημείου Β παρουσιάζει μεγαλύτερη περιοχή ανακυκλούμενης ροής απο ότι το κτήριο επι του σημείου Α. Τα

παραπάνω χαρακτηριστικά είναι περισσότερο ευδιάκριτα στην σκιαγράφιση των ροϊκών γραμμών που παρουσιάζεται στην Εικόνα 176

3.3.3 Φαινόμενα οδικού φαραγγιού

Στην Εικόνα 192 βλέπουμε ισοδυναμικές γραμμές της ταχύτητας κατα μήκος των οδών Κουντουριώτου και Πολεμίδα. Η μέν οδός Κουντουριώτου μαζί με το πεζοδρόμιο έχει μέσο πλάτος 10 m ενώ η οδός Πολεμίδα έχει λίγο μικρότερο πλάτος, της τάξης των 6 m. Επίσης η οδός Κουντουριώτου βαίνει σε μια μικρή κλίση ως προς την ταχύτητα ελεύθερης ροής, ενώ η οδός Πολεμίδα είναι σχεδόν κάθετη στην ταχύτητα ελεύθερης ροής. Απο ποιοτική σκοπιά, η εικόνα της ροής είναι πανομοιότυπη, με φαινόμενα εκτόξευσης από το επίπεδο της οδού προς μεγαλύτερα ύψη να υπάρχουν και στις δύο εικόνες. Παραπέρα υπάρχουν ομοιότητες στο βαθμό της διείσδυσης του ανέμου από πάνω προς την οδό, με το ελάχιστο ύψος και για τις δύο οδούς να είναι συγκρίσιμο (περίπου 10 m). Αυτό ερμηνεύεται με βάση το γεγονός ότι ο βαθμός διείσδυσης σχετίζεται με την ετερογένεια της αστικής γεωμετρίας, η οποία είναι κοινή και για τις δυο οδούς, το οποίο είναι σε συμφωνία με τους Cheng and Yang [2023]. Ωστόσο, το μέσο ύψος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο για την οδό Κουντουριώτου από ότι την Πολεμίδα και αυτό ερμηνεύεται με βάση τα ψηλότερα παρακείμενα κτήρια. Συνολικά παρατηρούμε την ύπαρξη ποιοτικών και ποσοτικών διαφορών στο πεδίο ροής μεταξύ των χωρίων $z/H > 1$ και $z/H < 1$, το οποίο αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό για στις δυο προαναφερθείσες οδούς. Θεμελιώνεται λοιπόν η ύπαρξη ουσιαστικής διαφοροποίησης του πεδίου ροής επι των οδών, κάτι που συνιστά τον ορισμό του φαινόμενου οδικού φαραγγιού.



Εικόνα 97: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 9m για το LES Smagorinsky μοντέλο γυρω από τα σημεία 1, 3, 7, 6.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης

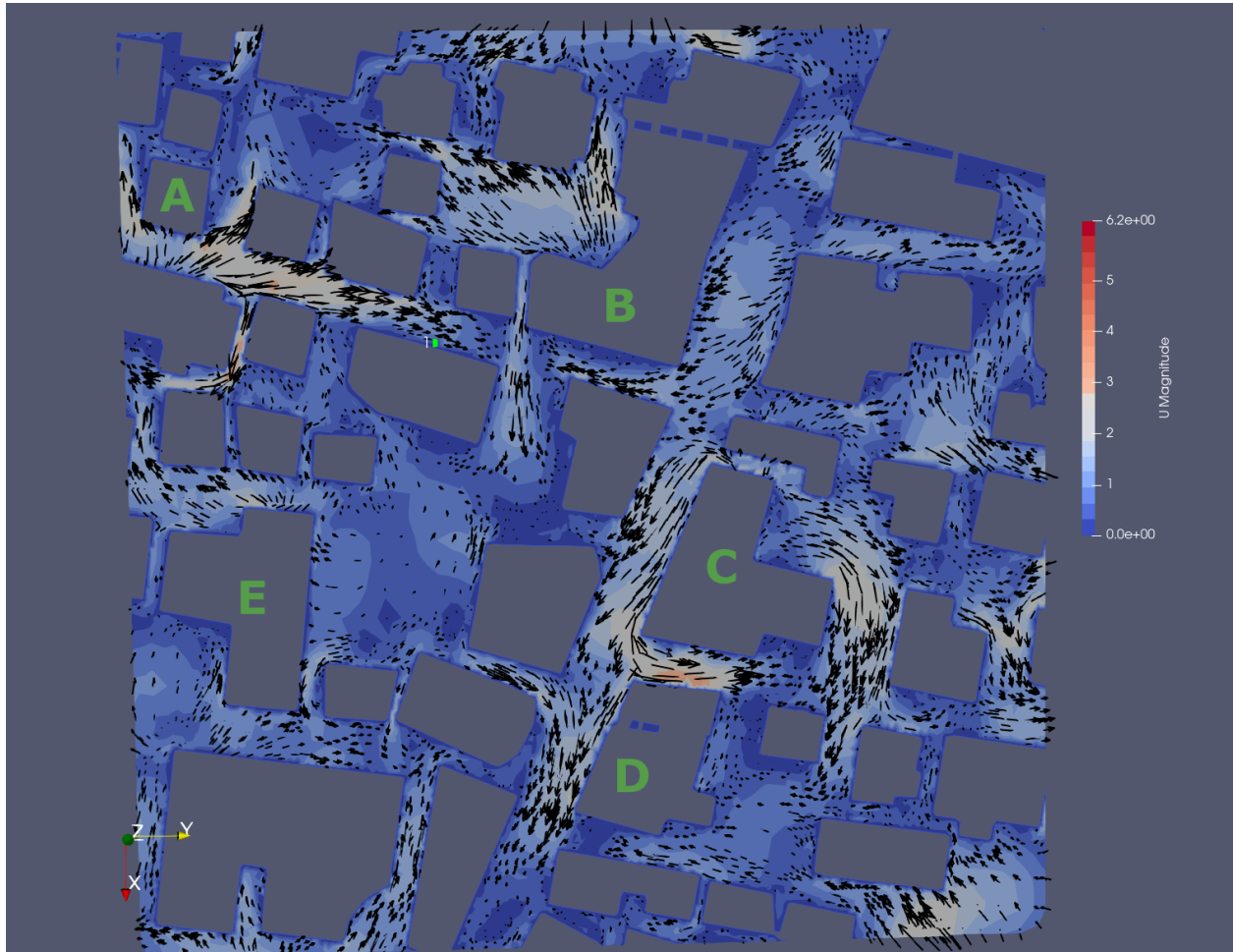


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη



Εικόνα 113: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 1.65m για το LES Sgagorinsky μοντέλο γυρω από τα σημεία 1,3,7,6.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης

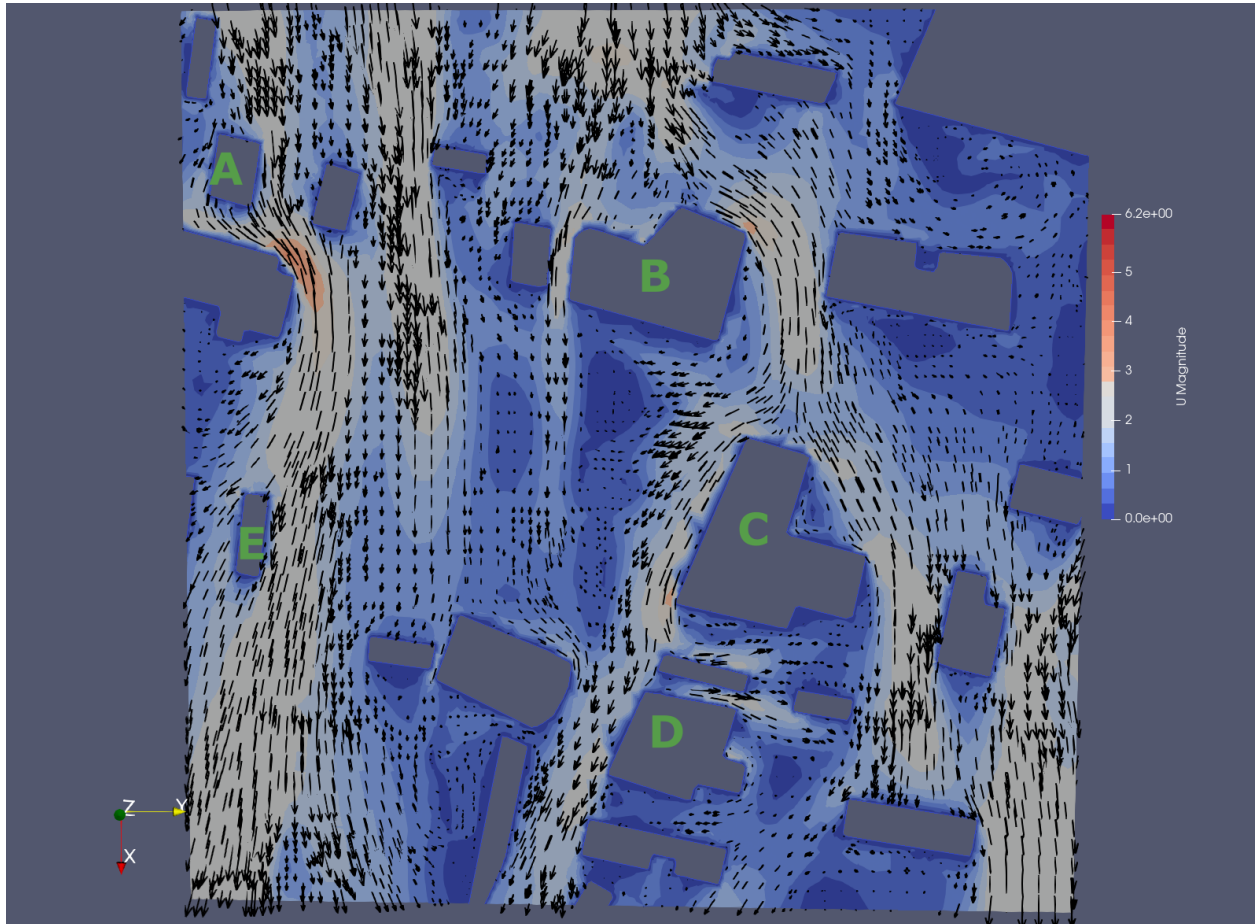


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Εικόνα 129: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 9m για το RANS k-ε μοντέλο γύρω από τα σημεία 1, 3, 7, 6.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης

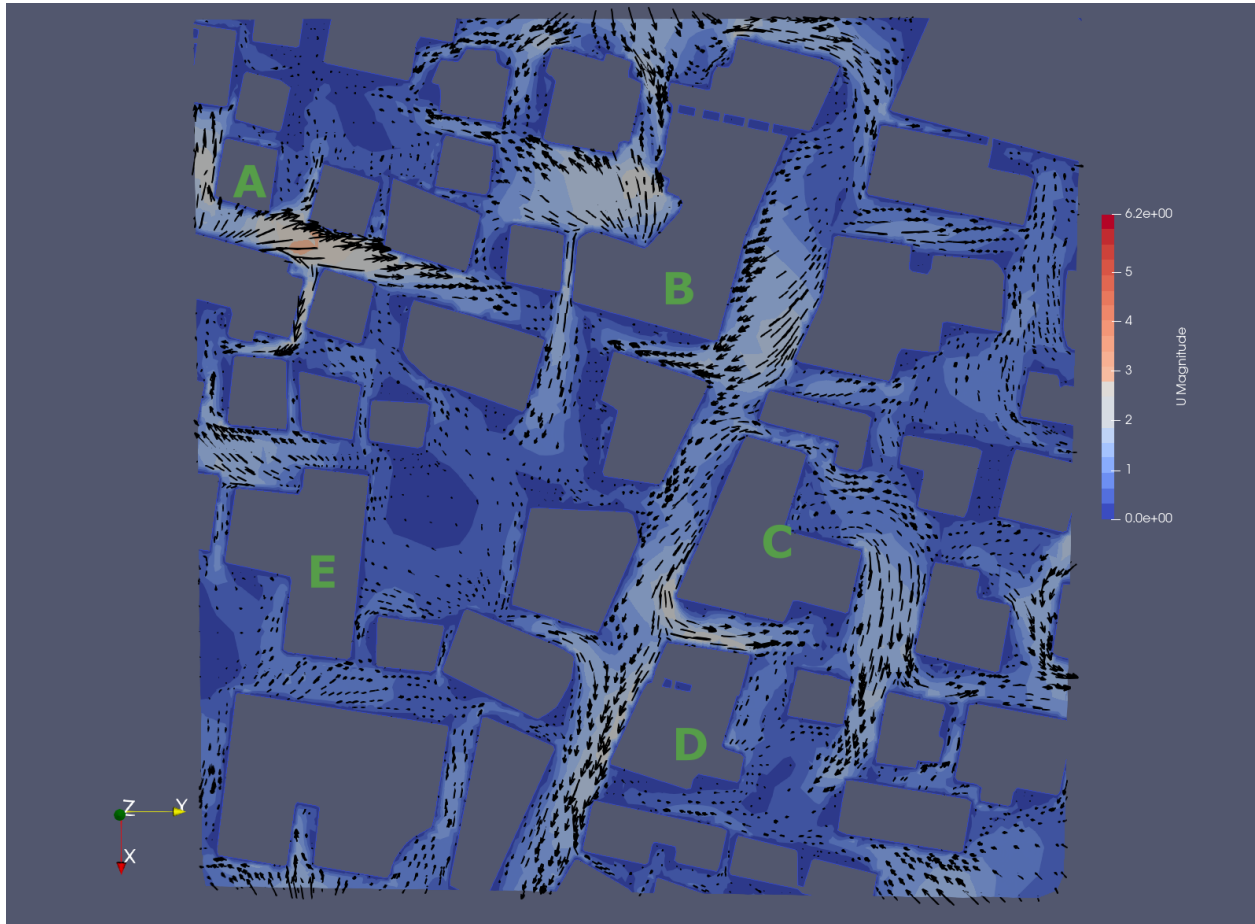


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΛ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Εικόνα 145: Ισοδυναμικές γραμμές και διεύθυνση της ταχύτητας του πεδίου ροής στο ύψος 1.65 m για το RANS k-ε μοντέλο γύρω από τα σημεία 1, 3, 7, 6.



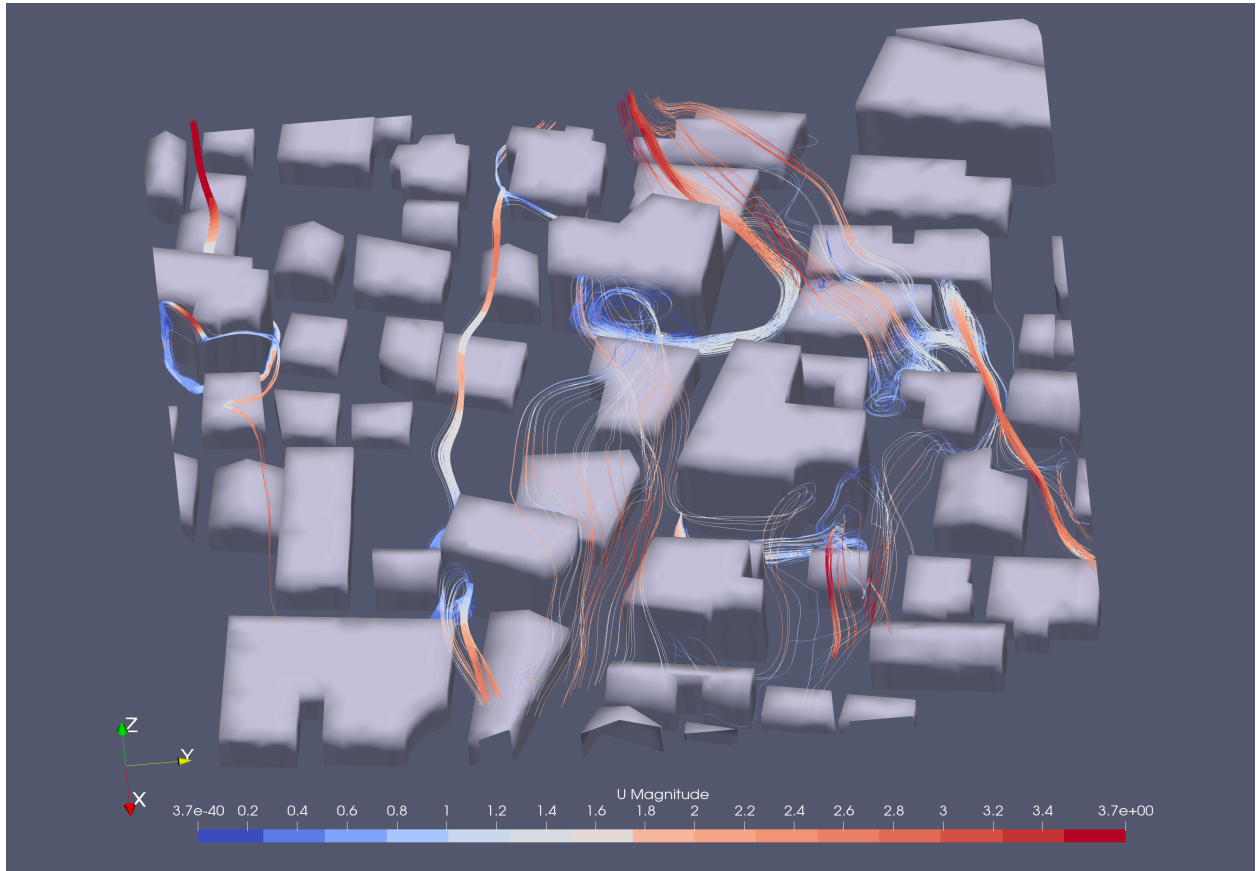
Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ





Εικόνα 161: Σκιαγράφιση των ροϊκών γραμμών για το LES μοντέλο με έμφαση σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος και για ένα υποσύνολο του υπολογιστικού χωρίου.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης

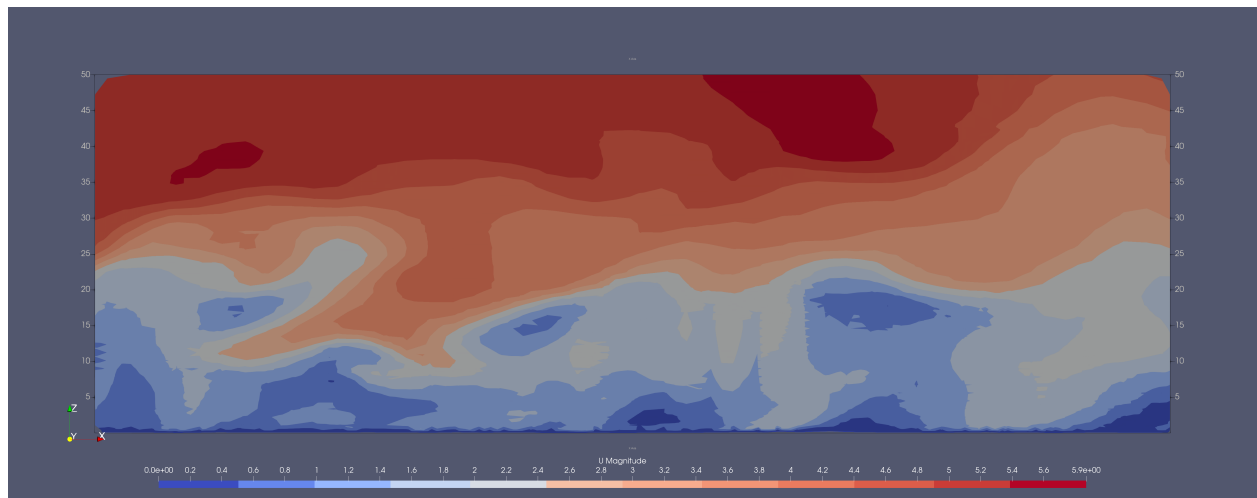
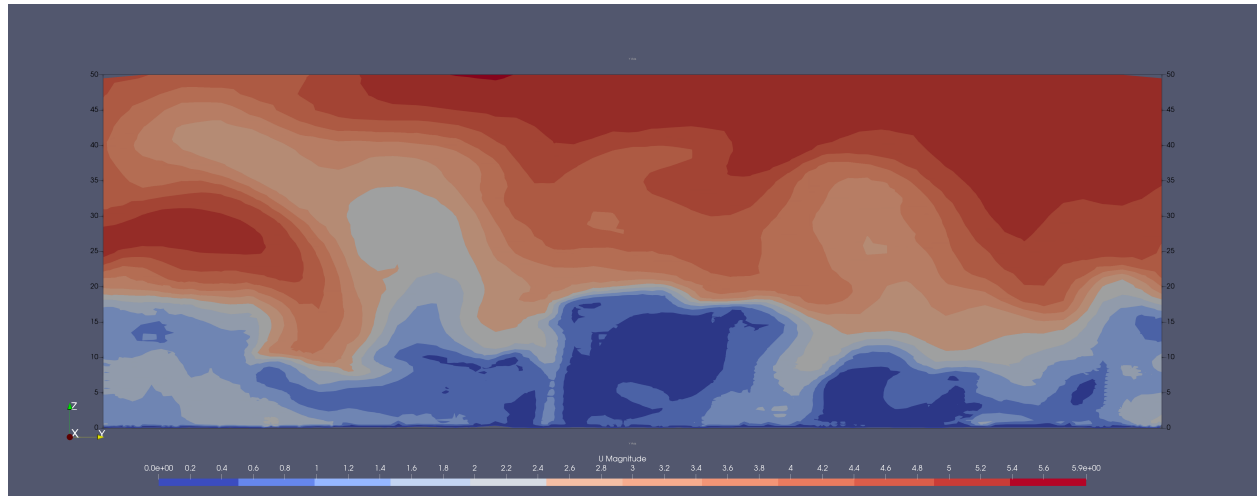


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Εικόνα 177: Ισοδυναμικές επιφάνειες της ροής κατά μήκος των οδών Κουντουριώτου (κάτω) και Πολεμίδα (πάνω).

4 Μοντέλα Μηχανικής Μάθησης για την πρόγνωση αιωρούμενων σωματιδίων σε πόλεις – λιμάνια

4.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η κοινότητα διερευνά ενεργά προσεγγίσεις Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) για την πρόβλεψη των ΑΣ με πολύ καλά αποτελέσματα [Qin, Yu, Zou, Yong, Zhao & Zhang 2019; Zhao, Deng, Cai & Chen 2019; Zhou, Chang, Chang, Kao & Wang 2019; Li, Hua & Wu 2020a; Pak et al. 2020; Wu, Wang, He & Wu 2020; Zhang, Zhang, Zhao & Lian 2020; Mao, Wang, Jiao, Zhao & Liu 2021; Qiao, Wang, Zhang, Tian, Tian & Yang 2021; Yan, Liao, Yang, Sun, Nong & Li 2021; Zhang, Zou, Qin, Lu, Jin & Wang 2021a; Zhang, Na, Zhu, Shi, Zou & Yang 2021b; Du, Chen, Liu & Yin 2022; Hu, Guo, Gong, Wang, Liang & Li 2022] οσον αφορά την ακρίβεια πρόγνωσης.

Ωστόσο, παρά τις ακριβείς προβλέψεις των TNN και το γεγονός ότι συχνά υπερτερούν των κλασικών αλγορίθμων MM, δέχονται συχνά κριτική στο πλαίσιο οτι αποτελούν "μαύρα κουτιά" Castelvocchi [2016]. Με σκοπό απο τη μια πλευρά να διατηρηθεί η υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης και ταυτόχρονα να εξασφαλιστεί η ουσιαστική κατανόηση των αποτελεσμάτων, υπάρχουν προσεγγίσεις που προσφέρουν ένα επίπεδο ερμηνευσιμότητας στο τελικό εκπαιδευμένο δίκτυο. Πέραν των εννοιολογικών προβλημάτων, σε μια πιο πρακτική βάση τίθενται ερωτήματα αναφορικά με την απόκριση του μοντέλου πρόγνωσης στην περίπτωση "out-of-distribution" γεγονότων, ενώ απασχολεί και το κόστος των επανεκπαιδεύσεων.

Μια πρόσφατη εργασία Guo, Lin and Antulov-Fantulin [2019] κατασκευάζει ένα νέο είδος δικτύου TNN μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (Long Short-Term Memory NN) που επιτρέπει τόσο υψηλής ποιότητας προβλέψεις ενώ ταυτόχρονα παρέχεται μια ερμηνεία του τελικού αποτελέσματος. Η τελευταία αφορά την συνεισφορά του κάθε επι μέρους χαρακτηριστικού στην πρόγνωση. Στο παρον κεφάλαιο χρησιμοποιούμε δίκτυα LSTM του τελευταίου είδους για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων ΑΣ και ορίζουμε ένα σύνολο χαρακτηριστικών, ικανών να ποσοτικοποιήσουν αποδοτικά τη χωρική εξάρτηση του φαινομένου, που προέρχεται από την αστική δομή και από τις τοπικές εκπομπές ΑΣ. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ δημοσιεύτηκαν στο Anagnostopoulos et al. [2023]

4.2 Μεθοδολογία

4.2.1 Το μοντέλο πρόγνωσης

Η χωροχρονική μεταβλητότητα της συγκέντρωσης των σωματιδίων περιγράφεται μέσω δικτύων μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (Long Short-Term Memory Network, LSTM). Ειδικότερα, χρησιμοποιούμε ένα LSTM δίκτυο για ολόκληρη την πόλη και όχι ένα διαφορετικό LSTM δίκτυο ανά αισθητήρα, όπως γίνεται π.χ. απο τους [Zhao et al. 2019]. Η χωρική μεταβλητότητα των PM περιγράφεται στο πλαίσιο μοντέλων

βαθείας μάθησης μέσω διαφόρων προσεγγίσεων. Για παραδειγμα, μια σειρά εργασιών στον τομέα χρησιμοποιούν συνδυασμούς CNN με δίκτυα LSTM, όπως η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην [Yan et al. 2021]. Ενώ όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις είναι κατάλληλες για το συγκεκριμένο πρόβλημα και οδηγούν σε αξιοπρεπή μοντέλα πρόγνωσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι εμπεριέχουν αυξημένη πολυπλοκότητα, ειδικά όσον αφορά τη χωρική εξάρτηση. Το τελευταίο γεγονός θα μπορούσε να επηρεάσει σοβαρά την ικανότητα γενίκευσής τους και άρα τη συχνότητα των αναγκαιών επανεκπαιδεύσεων. Παράλληλα, σε ορισμένες από αυτές τις υλοποιήσεις αυξάνεται το σφάλμα αναλογα με την χρονική κλίμακα πρόγνωσης Yan et al. [2021]. Αντίθετα, η προσέγγισή μας αντιμετωπίζει άμεσα τη χωρική εξάρτηση μέσω χαρακτηριστικών προκειμένου να αποτυπώσει απευθείας η φυσική της παραγωγής και της διασποράς της ρύπανσης. Οι Yan et al. [2021] χρησιμοποιούν επίσης γεωχωρικά χαρακτηριστικά, όπως το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος και την απόσταση από το κέντρο της πόλης. Στο σημείο αυτό πρέπει να σχολιαστεί η βλάβη της γενικότητας, καθώς η συμμετρική ως προς σημείο πολεοδομία αποτελεί προσέγγιση, η οποία προφανώς ισχύει σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Γενικά, υπάρχει ένας αριθμός εργασιών που χρησιμοποιούν συνδυασμούς CNN με LSTM δικτύων [Yan et al. 2021].

Τέλος, υπάρχουν λίγες εργασίες στον τομέα που χρησιμοποιούν κάποιο είδος προσέγγισης "ερμηνεύσιμης TN" για τη μοντελοποίηση της ρύπανσης από ΑΣ. Συγκεκριμένα, στο Elbaz,Shaban,Zhou and Shen [2023], πραγματοποιήθηκε κυκλική αφαίρεση χαρακτηριστικών και συζητήθηκε η ακρίβεια του μοντέλου σε συσχέτιση με τα αφαιρεθέντα χαρακτηριστικά. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι παραβλέπει την εγγενή μη γραμμικότητα του φαινομένου και τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους να αποτελούν οι θερμοδυναμικές μεταβλητές. Μια πιο ενδιαφέρουσα προσέγγιση επί του θέματος χρησιμοποιεί τη διάδοση της συνάφειας κατά στρώματα [Mirzavand Borujeni,Arras,Srinivasan & Samek 2023], για να προκύψουν οι αποκαλούμενες απεικονίσεις σημαντικότητας (importance heat-maps). Ωστόσο, στην τελευταία εργασία, εξετάζουν μόνο το εύρος πρόβλεψης έως 48 ώρες μπροστά και δεδομένα από 1 μόνο αισθητήρα, οπότε και δεν χρειάζεται να αντιμετωπίσουν τη χωρική εξάρτηση στο πλαίσιο τους.

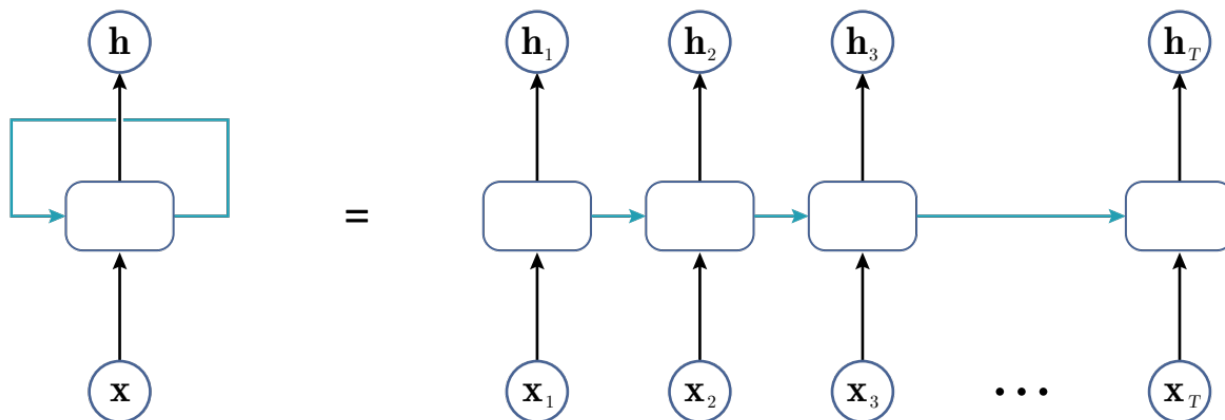
Το κύριο πλεονέκτημα της δικής μας προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί κανείς εύκολα να προσθέσει ή να αφαιρέσει αισθητήρες, ενώ μπορεί επίσης να ενσωματώσει κινούμενους αισθητήρες, για παράδειγμα σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη, Hedworth,Sayahi,Kelly and Saad [2021] ή αστικά λεωφορεία Kaivonen and Ngai [2020]. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι τετριμμένο στο πλαίσιο προηγούμενων εργασιών στον τομέα Li et al. [2017b]. Επιπλέον, η προσέγγισή μας είναι εφαρμόσιμη για κάθε είδους αισθητήρες, με ελάχιστη απαίτηση να εφαρμόζονται διαδικασίες βαθμονόμησης ειδικά για τους αισθητήρες κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων. Μπορεί επίσης να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένες ιδιότητες ενός υποδικτύου αισθητήρων σωματιδίων, για παράδειγμα η ανάλυση τους, και να προστεθούν ως πρόσθετο χαρακτηριστικό.

4.2.2 Δικτύα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM)

Τα LSTMs Hochreiter and Schmidhuber [1997] ανήκουν στην κατηγορία των Αναδρομικών Νευρωνικών Δικτύων (Recurrent Neural Networks, RNNs) (πχ Rumelhart,Hinton,Williams and others [1985] και Jordan

[1997]) και ως εκ τούτου επιδεικνύουν εξαιρετικές επιδόσεις σε εργασίες που απαιτούν την επεξεργασία ακολουθιακών δεδομένων (sequential data), συμπεριλαμβανομένης της γλωσσικής μετάφρασης, της αναγνώρισης ομιλίας και της πρόβλεψης χρονοσειρών [Yu, Si, Hu & Zhang 2019]. Σε πλήρη αναλογία με τα συνήθη RNNs, η επαναλαμβανόμενη δομή των LSTMs μπορεί να απεικονιστεί ως ένα ενιαίο κύτταρο που ξετυλίγεται στο χρόνο, με κάθε στοιχείο της ακολουθίας εισόδου να επεξεργάζεται διαδοχικά. Στο πλαίσιο των χρονοσειρών εισόδου, δεδομένης μιας ακολουθίας T χρονικών βημάτων $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_T\}$, όπου $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^d$ είναι το d -διάστατο διάνυσμα χαρακτηριστικών στο χρονικό βήμα t , αυτό υποδηλώνει ότι η χρονοσειρά επεξεργάζεται με αύξουσα σειρά χρονικών βημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα . Η έξοδος ενός LSTM σε κάθε χρονικό βήμα, t , είναι ένα διάνυσμα γνωστό ως κρυφή κατάσταση, \mathbf{h}_t . Η βασική διαφορά μεταξύ των συνήθων RNNs και των LSTMs είναι ότι η πληροφορία που μεταφέρεται από το χρονικό βήμα $t-1$ στο χρονικό βήμα t δεν περιορίζεται στο διάνυσμα της κρυφής κατάστασης \mathbf{h}_{t-1} , αλλά περιλαμβάνει επίσης ένα πρόσθετο διάνυσμα γνωστό ως κατάσταση των κυττάρων, \mathbf{c}_{t-1} . Η κατάσταση των κυττάρων ουσιαστικά διατηρεί σημαντικές πληροφορίες από παρελθοντικές εισόδους σε διάφορα χρονικά βήματα, επιτρέποντας στο δίκτυο να "θυμάται" και να χρησιμοποιεί σχετικές μακροχρόνιες εξαρτήσεις (εξ' ου και το όνομα LSTM).

Για τον υπολογισμό των διανυσμάτων κρυφής κατάστασης και κατάστασης κυττάρων στο χρονικό βήμα t , το αντίστοιχο διάνυσμα κρυφής κατάστασης στο χρονικό βήμα $t-1$ και το διάνυσμα χαρακτηριστικών εισόδου \mathbf{x}_t υποβάλλονται σε ανεξάρτητο φιλτράρισμα μέσω τριών πυλών: της πύλης λήθης (forget gate), της πύλης εισόδου (input gate) και της πύλης εξόδου (output gate), καθεμία από τις οποίες εφαρμόζει μια μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function). Η πύλη λήθης καθορίζει ποιες πληροφορίες από το διάνυσμα \mathbf{c}_{t-1} θα πρέπει να απορριφθούν, ενώ η πύλη εισόδου καθορίζει τις νέες πληροφορίες από το διάνυσμα χαρακτηριστικών εισόδου \mathbf{x}_t που θα πρέπει να ενσωματωθούν στη νέα κατάσταση του κυττάρου, \mathbf{c}_t . Όσον αφορά την πύλη εξόδου, ρυθμίζει την πληροφορία που κωδικοποιείται στο \mathbf{c}_t , η οποία διαδίδεται στο κύτταρο του επόμενου χρονικού βήματος ως το διάνυσμα κρυφής κατάστασης, \mathbf{h}_t .



Εικόνα 193: Σχηματική αναπαράσταση ενός γενικού ANN, το οποίο "ξετυλίγεται" στο χρόνο, όπου x_t και h_t είναι το διάνυσμα χαρακτηριστικών εισόδου και το διάνυσμα κρυφής κατάστασης στο χρονικό βήμα t , αντίστοιχα.

Στην πρόσφατη μελέτη τους, οι Guo et al. [2019] εισήγαγαν μια νέα παραλλαγή LSTM που ονομάζεται Interpretable Multi-Variable LSTM (IMV-LSTM), με στόχο την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ υψηλής ακρίβειας πρόβλεψης και ερμηνευσιμότητας των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Στα συμβατικά δίκτυα LSTM, το κρυφό διάνυσμα κατάστασης εμπεριέχει πληροφορίες από όλα τα χαρακτηριστικά εισόδου σε κάθε χρονικό βήμα, γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες στη ρητή αποτύπωση της δυναμικής των μεμονωμένων χαρακτηριστικών και των αλληλεπιδράσεών τους. Το IMV-LSTM αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα επεκτείνοντας την έννοια της κρυφής κατάστασης, δημιουργώντας ένα διάνυσμα κρυφής κατάστασης για κάθε χαρακτηριστικό εισόδου και χρησιμοποιώντας έναν νέο μηχανισμό προσοχής (attention mechanism) μίξης (mixture). Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει την εφαρμογή

χρονικής προσοχής στην ακολουθία των διανυσμάτων κρυφής κατάστασης $\{h_1^f, \dots, h_T^f\}$ που αντιστοιχούν στο χαρακτηριστικό f , ώστε να ληφθεί ένα συνοπτικό ιστορικό για το χαρακτηριστικό αυτό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα συνοπτικά ιστορικά για όλα τα χαρακτηριστικά, ένας πρόσθετος μηχανισμός προσοχής εξάγει βαθμολογίες προσοχής ανά χαρακτηριστικό, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τη συμβολή κάθε χαρακτηριστικού στις προβλέψεις του μοντέλου, καθώς και για τις συσχετίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών.

Όσον αφορά την υλοποίηση του μοντέλου IMV-LSTM, δύο εναλλακτικές λύσεις παρουσιάζονται από τους Guo et al. [2019] και ακολουθούνται και οι δύο στην παρούσα εργασία για λόγους πληρότητας. Η προσέγγιση IMV-Full αντιστοιχεί ουσιαστικά στην επέκταση των διανυσμάτων που εμπλέκονται στις παραδοσιακές εξισώσεις LSTM σε πίνακες, όπου κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα μόνο χαρακτηριστικό. Η προσέγγιση IMV-Tensor ισοδυναμεί με ένα σύνολο δικτύων LSTM που εκτελούνται παράλληλα, με κάθε δίκτυο να επεξεργάζεται μόνο την ακολουθία ενός χαρακτηριστικού εισόδου και στη συνέχεια να συγχωνεύει όλα τα αποτελέσματα μέσω του μηχανισμού προσοχής μίξης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο κώδικας που γράφτηκε για την υλοποίηση των μοντέλων σε Python χρησιμοποιεί το

πακέτο *PyTorch* Paszke et al. [2019] και είναι σε μεγάλο βαθμό επηρεασμένος από την υλοποίηση στο Kurochkin [2023].

4.2.3 Κατασκευή και Επιλογή χαρακτηριστικών

Η χωροχρονική μεταβλητότητα του φαινομένου (π.χ. ρυθμός εκπομπής, κατανομή συγκέντρωσης, χρόνος παραμονής) των διαφόρων ειδών σωματιδίων καθορίζονται από πολλές μετεωρολογικές παραμέτρους, μέσω πολύπλοκων θερμοδυναμικών και χημικών διεργασιών. Στη βιβλιογραφία, συνήθως χρησιμοποιούνται όλα τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά που είναι μετρήσιμα από τους εγκατεστημένους αισθητήρες, ενδεικτικά θερμοκρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, σημείο δρόσου (πχ Li et al. [2017b], Li et al. [2020a], Pak et al. [2020]). Όσον αφορά το χωρικό μέρος, χρησιμοποιούνται χωρικά χαρακτηριστικά όπως οι γεωγραφικές συντεταγμένες και η απόσταση από το κέντρο της πόλης, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις όπου επιλέγεται η χρήση του χάρτη της πόλης ως χαρακτηριστικό. Ακολούθως θα παρουσιαστούν και θα συζητηθούν ορισμένοι φυσικοί μηχανισμοί προκειμένου να επιλεγεί το βέλτιστο υποσύνολο χαρακτηριστικών (features) που περιγράφουν το φαινόμενο. Να σημειωθεί εδώ ότι η ακόλουθη συζήτηση δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση μια μονοσήμαντη απάντηση στο πρόβλημα της επιλογής των χαρακτηριστικών.

Σε γενικές γραμμές, η συσχέτιση μεταξύ του σημείου δρόσου και της συγκέντρωσης σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι έμμεση. Όταν μια μάζα αέρα είναι κορεσμένη, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε υγρές σταγόνες νερού, παρέχοντας μια επιφάνεια στην οποία τα σωματίδια μπορούν να προσκολληθούν και να σχηματίσουν μεγαλύτερα σωματίδια Levin and Cotton [2009]. Επιπλέον, πολλά σωματίδια, όπως τα θειικά, τα νιτρικά και οι οργανικές ενώσεις, μπορούν να υποστούν μετατροπή από αέριο σε σωματίδιο μέσω ατμοσφαιρικών αλληλεπιδράσεων. Ως εκ τούτου, η υψηλή περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία είναι ευεργετική για το σχηματισμό αερολυμάτων [Ding,Dai,Zhang,Xu,Huangfu & Feng 2021]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο δρόσου από μόνο του δεν αποτελεί δείκτη της περιεκτικότητας σε υδρατμούς ή για το αν η αέρια μάζα είναι κοντά στον κορεσμό. Το μέσο σημείο δρόσου σχετίζεται επίσης με τις κινήσεις της αέριας μάζας. Για παράδειγμα, μεταβολές στο σημείο δρόσου μπορεί να είναι υποδεικνύουν κίνηση ή/και ανάμιξη αερίων μαζών. Όταν θερμές, υγρές αέρια μάζες συναντούν ψυχρότερες αέρια μάζες ή υφίστανται αδιαβατική ψύξη λόγω ανόδου, είναι πιθανό να πλησιαστεί η θερμοκρασία του σημείου δρόσου, οδηγώντας στο σχηματισμό νεφών και βροχοπτώσεων. Αυτές οι μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να ενισχύσουν την απομάκρυνση των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα, μειώνοντας αποτελεσματικά τη συγκέντρωσή τους Croft et al. [2010].

Η θερμοκρασία του αέρα τροποποιεί τους ρυθμούς πολλών χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στο σχηματισμό σωματιδιακής ύλης, καθορίζοντας έτσι τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων [Li et al. 2020b]. Επιπλέον, η θερμοκρασία του αέρα έχει σημαντικό αντίκτυπο στις ενεργειακές ανάγκες μιας πόλης. Κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων μηνών, οι αυξημένες απαιτήσεις θέρμανσης οδηγούν σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, συχνά από συστήματα θέρμανσης με καύση. Τα αναποτελεσματικά ή κακώς συντηρούμενα συστήματα θέρμανσης μπορούν να συμβάλουν σε αυξημένες εκπομπές σωματιδίων Moriske et al. [1996]. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η ζήτηση για κλιματισμό και

εξοπλισμό ψύξης αυξάνεται. Αυτά τα συστήματα, που βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια που συχνά παράγεται από ορυκτά καύσιμα, μπορούν έμμεσα να συμβάλουν σε υψηλότερες εκπομπές σωματιδίων [Androniceanu, Căpărescu, Tvaṛonavičiienė & Dobrin 2021]. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παίζει επίσης ρόλο, καθώς τα ακραία θερμοκρασιακά φαινόμενα οδηγούν σε αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη.

Είναι γνωστό ότι τα χαρακτηριστικά του πεδίου του ανέμου, όπως η ταχύτητα, η κατεύθυνση και οι ριπές ανέμου, έχουν βαθύτατο αντίκτυπο στη μεταφορά και την κατανομή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, εάν ο άνεμος πνέει από μια περιοχή με σημαντικές εκπομπές (π.χ. βιομηχανικές ζώνες, γεωργικές περιοχές, τοπικές πηγές) προς μια συγκεκριμένη τοποθεσία, μπορεί να μεταφέρει και να εναποθέσει σωματίδια, οδηγώντας σε υψηλή συγκέντρωση. Αντίθετα, αν η κατεύθυνση του ανέμου είναι μακριά από τις πηγές ρύπανσης, μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων. Τα τοπικά μοτίβα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας [Androniceanu et al. 2021] όπως οι θαλάσσιες αύρες, οι αύρες βουνών-κοιλάδων και τα φαινόμενα της αστικής θερμικής νησίδας, μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη διασπορά των σωματιδίων [Clappier et al. 2000]. Για παράδειγμα, οι θαλάσσιες αύρες μπορούν να μεταφέρουν ρύπους από παράκτιες περιοχές στην ενδοχώρα, ενώ οι αύρες βουνών-κοιλάδων μπορούν να παγιδεύσουν ρύπους στις κοιλάδες. Οι ισχυρές ριπές ανέμου μπορούν να ανυψώσουν και να αιωρήσουν σωματιδιακή ύλη από το έδαφος ή άλλες επιφάνειες, οδηγώντας σε αυξημένες συγκεντρώσεις στον αέρα. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές για τα λεπτά σωματίδια (π.χ. PM_{2.5}) που έχουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα. Σωματίδια που έχουν κατακαθίσει σε δρόμους, εργοτάξια ή άλλες επιφάνειες μπορούν να ανασυρθούν από θυελλώδεις ανέμους, συμβάλλοντας σε βραχυπρόθεσμες αυξήσεις των συγκεντρώσεων σωματιδίων [Yang, Shi, Shi, Marvin, Zheng & Xia 2020]. Από την άλλη πλευρά, εάν οι ριπές ανέμου είναι συνεχείς, συμβάλλουν στη διασπορά των προϋπάρχουσων συγκεντρώσεων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, ο μέσος συντελεστής δόμησης (ΜΣΔ), που αντιπροσωπεύει το επίπεδο αστικοποίησης ή αστικής ανάπτυξης σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί επίσης να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα των συγκεντρώσεων ΑΣ. Ο ΜΣΔ ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής δομημένης επιφάνειας προς την επιφάνεια του υπό μελέτη χωρίου γης Faludi [2013]. Οι αστικές περιοχές έχουν συχνά υψηλότερες συγκεντρώσεις πηγών εκπομπών σε σύγκριση με τις αγροτικές ή λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές. Οι πηγές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν την κυκλοφορία οχημάτων, βιομηχανικές δραστηριότητες, εργοτάξια, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, εμπορικές δραστηριότητες και συνολικά αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Καθώς αυξάνεται ο ΜΣΔ, η πυκνότητα και η ποικιλομορφία των πηγών εκπομπών τείνουν επίσης να αυξάνονται. Κατά συνέπεια, υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να παρατηρηθούν στις αστικές περιοχές λόγω του μεγαλύτερου αριθμού και της έντασης των πηγών ρύπανσης Liang and Gong [2020]. Σημειώνεται ότι υπολογίζεται το συνολικό δομημένο εμβαδόν ενός κτιρίου, πράγμα που σημαίνει ότι για κτίρια με πολλούς ορόφους, ο ΜΣΔ είναι μεγαλύτερος από 1. Ουσιαστικά, ο ΜΣΔ ποσοτικοποιεί την "πυκνότητα" των κτιρίων σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η πυκνότητα των κτηρίων έχει, επιπλέον, καταλυτική επίδραση στη διαμόρφωση του πεδίου ταχύτητας και άρα της ευστάθειας των τυρβώδων δομών εντός των οδών. Η Μέση Πυκνότητα Πληθυσμού (ΜΠΠ) αφορά την ευρύτερη περιοχή όπου βρίσκεται ο εκάστοτε αισθητήρας. Η τελευταία συσχετίζεται επίσης

με την παρουσία ανθρωπογενών πηγών, για παράδειγμα μεγαλύτερη πυκνότητα πληθυσμού σημαίνει μεγαλύτερες αναγκες θέρμανσης ή/και μεγαλύτερη πυκνότητα οχημάτων.

Τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά στο σύνολο δεδομένων μας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα ακόλουθα υποσύνολα

- Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά: Μέση ταχύτητα ανέμου, Πίεση, Μεταβολή Πίεσης, Μέση κατεύθυνση ανέμου, τάση πίεσης, Μέση Ταχ. Ριπών ανέμου, Διασπορά Ταχύτητας Ανέμου.
- Γεωχωρικά χαρακτηριστικά: Μέσος συντελεστής δόμησης (ΜΣΔ), Μέση Πυκνότητα Πληθυσμού (ΜΠΠ).
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το χρόνο: Προκειμένου να ενημερώσουμε το μοντέλο για την περιοδικότητα του φαινομένου, όσον αφορά την ημερήσια (ώρες), εβδομαδιαία (ημέρες) και εποχιακή (μήνες) μεταβλητότητα τόσο των εκπομπών που σχετίζονται με τον άνθρωπο όσο και των μετεωρολογικών συνθηκών, παραμετροποιούμε κάθε χρονοσήμανση (timestamp) μέσω των ακόλουθων χαρακτηριστικών.

$$\cos_time = \cos\left(\frac{2\pi \cdot time}{T}\right), \quad \sin_time = \sin\left(\frac{2\pi \cdot time}{T}\right)$$

όπου $time \in \{\text{hours, days, months}\}$ και $T \in \{24, 7, 12\}$, αντίστοιχα.

4.2.4 Εκπαίδευση, Επικύρωση και Έλεγχος του μοντέλου

Χρησιμοποιούμε το σύνολο δεδομένων που περιγράφεται στην Ενότητα και σύμφωνα με την καθιερωμένη πρακτική, το κλιμακώνουμε με χρήση `minmax` στο χώρο $[-1,1]$, με εξαίρεση τις χρονοσφραγίδες και την κατεύθυνση του ανέμου. Οι τελευταίες μετασχηματίζονται μέσω ημιτόνου/συνημιτόνου προκειμένου να διατηρηθούν οι χρονικές διαφορές και οι γωνιακές αποστάσεις μεταξύ των κατευθύνσεων αντίστοιχα. Ως συνήθης πρακτική, χωρίζουμε το σύνολο δεδομένων σε τρία μέρη, δηλαδή τα δεδομένα "εκπαίδευσης", "επικύρωσης" και "ελέγχου", με ποσοστά 50%, 30% και 20%, αντίστοιχα. Λαμβάνεται μέριμνα ώστε κάθε αισθητήρας να συνεισφέρει αναλογικά σε κάθε υποσύνολο δεδομένων. Χρησιμοποιήσαμε μια συνθήκη διακοπής, η οποία ρυθμίζεται μέσω της παραμέτρου "patience". Η τελευταία αντιστοιχεί στις εποχές εκπαίδευσης που επιτρέπονται μετά από μια αύξηση του σφάλματος επικύρωσης. Σύμφωνα με τις συνήθεις πρακτικές, χρησιμοποιούμε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) ως συνάρτηση κόστους. Χρησιμοποιούμε τον βελτιστοποιητή `adamw`, όπως υλοποιείται στο Python πακέτο `pytorch` [Paszke et al. 2019].

4.2.5 Περιοχή μελέτης

Προκειμένου να γίνει έλεγχος της ακρίβειας πρόγνωσης του μοντέλου, επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή της Πάτρας (το κέντρο της πόλης και τα προάστιά της). Η Πάτρα είναι είναι χτισμένη στη βορειοδυτική Πελοπόννησο (38° 14' N, 21° 4' E), περίπου 220 χλμ. δυτικά της Αθήνας, στις υπώρειες του όρους Παναχαϊκό. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από θερμό-καλοκαιρινό μεσογειακό κλίμα (Csa, κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger), με μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 6.1° C τον Ιανουάριο έως 25.3° C τον Αύγουστο. Ο υγρότερος μήνας είναι ο Νοέμβριος με μέση συσσωρευμένη βροχόπτωση 118 mm, ενώ ο Ιούλιος είναι ο ξηρότερος με 4.2 mm [Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) 2023]. Η μελέτη της ποιότητας του αέρα πάνω από την Πάτρα παρουσιάζει σημαντικό επιστημονικό ενδιαφέρον, καθώς είναι η τρίτη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, στην οποία κατοικούν περισσότεροι από 200.000 κάτοικοι. Η μελέτη της ρύπανσης απο μικροσωματίδια στην περιοχή της Πάτρας έχει αποτελέσει το θέμα σωρείας άρθρων στην επιστημονική βιβλιογραφία, ενδεικτικά Karagiannidis et al. [2014] Florou et al. [2017] Manousakas, Florou and Pandis [2020] Kosmopoulos, Salamalikis, Matrali, Pandis and Kazantzidis [2022]. Ως εκ τούτου, η πόλη της Πάτρας προσφέρεται για την αξιολόγηση (validation) του μοντέλου μας.

Υπάρχουν πολλές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, με συγκρίσιμες συνεισφορές στη συνολική επιβάρυνση των ΑΣ, ενώ χαρακτηρίζονται από αξιοσημείωτες χωροχρονικές διακυμάνσεις Kosmopoulos et al. [2022]. Προφανώς αυτο αποτελεί έναν σημαντικό λόγο για την επιλογή της ως πεδίο ελέγχου του μοντέλου. Ακόμη, ιδιαίτερα ενδιαφέρον απο τη σκοπιά της παρούσας μελέτης είναι το γεγονός οτι στο νότιο τμήμα της πόλης υπάρχει ένα διεθνές λιμάνι, ιδιαίτερα ενεργό κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Παρότι εξυπηρετεί κυρίως επιβατηγά και όχι φορτηγά πλοία, με βάση την μελέτη των Fameli, Kotrikla, Psanis, Biskos and Polydoropoulou [2020] θεωρούμε ότι η συμβολή της ναυτιλιακής δραστηριότητας στη συγκέντρωση των ΑΣ κατά τη διάρκεια της υψηλής περιόδου είναι αξιοσημείωτη. Στα νοτιοδυτικά (16 χλμ. από το κέντρο της πόλης), υπάρχει μια μικρή βιομηχανική ζώνη, όπου ευρίσκονται εγκατεστημένες ορισμένες βιομηχανικές μονάδες (φαρμακευτικές, τροφίμων, ποτών κ.λπ.).

Η συμβολή της καύσης βιομάζας, όπως η καύση γεωργικών αποβλήτων (κλαδιά ελαιόδεντρων), από αγροτικές περιοχές γύρω από την Πάτρα εκτιμάται ότι φτάνει το 7% για PM_{2.5} και το 10% για PM₁₀, Manousakas et al. [2017]. Μελέτες υποδεικνύουν ότι κατά τη διάρκεια ημερών με υψηλή ρύπανση, η συνεισφορά αυτή μπορεί να φτάσει έως και το 50%, λόγω της χαμηλής ανάμιξης [Paradakis, Megaritis & Pandis 2015]. Τα ανθρωπογενή σωματίδια ΑΣ στην Πάτρα αποτελούνται κυρίως από οργανικά αερολύματα (ΟΑ) και θειικά άλατα. Οι κύριες πηγές των ΟΑ είναι τα πολύ οξυγονωμένα ΟΑ (V-ΟΟΑ), τα μέτρια οξυγονωμένα ΟΑ (M-ΟΟΑ), τα βιογενή οξυγονωμένα ΟΑ (b-ΟΟΑ), τα ΟΑ τυπου υδρογονάνθρακα (HOA-1) που σχετίζονται με πηγές κυκλοφορίας και τέλος τα ΟΑ τυπου υδρογονάνθρακα (HOA-2) από άλλες πρωτογενείς εκπομπές (συμπεριλαμβανομένων των ΟΑ λόγω μαγειρέματος) [Kostenidou et al. 2015]. Η κυκλοφορία οχημάτων είναι η κύρια πηγή ανθρωπογενών σωματιδίων PM₁₀ (46.2%) [Manousakas et al. 2018].

Από την άλλη πλευρά, τα πιο συνηθισμένα φυσικά σωματίδια PM₁₀ που παρατηρήθηκαν πάνω από την Πάτρα αποτελούνται από τη μεταφορά σκόνης της Σαχάρας σε μεγάλες αποστάσεις, συμβάλλοντας

κυρίως στο σύνολο των PM₁₀. Τα ακραία φαινόμενα μεταφοράς σκόνης πάνω από την Ελλάδα είναι συχνά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, Matthaios, Triantafyllou and Koutrakis [2017]. Μια μελέτη του 2011 έδειξε ότι τα δευτερογενή θειικά άλατα (34%), οι εκπομπές από την κυκλοφορία (34%), η καύση βιομάζας (11%), η ναυτιλία (10%), το θαλάσσιο αλάτι (11%) και η ορυκτή σκόνη (2%) ήταν οι κυριότεροι PM_{2.5} στο κέντρο της πόλης και για μια προαστιακή περιοχή της Πάτρας, η ίδια μελέτη έδειξε ότι τα δευτερογενή θειικά άλατα (34%), οι εκπομπές από την κυκλοφορία (25%), η καύση βιομάζας (15%), η ορυκτή σκόνη (1%) και το θαλάσσιο αλάτι (5%) ήταν οι κυριότεροι PM_{2.5} παράγοντες, Manousakas et al. [2020]. Η καύση βιομάζας για θέρμανση κατοικιών είναι η σημαντικότερη πηγή οργανικού αερολύματος στην περιοχή κατά τη διάρκεια του χειμώνα [Florou et al. 2017].

Εν γένει μπορούμε να πούμε ότι ποιότητα του αέρα πάνω από την Πάτρα καθορίζεται από τη σταθερότητα του Πλανητικού Οριακού Στρώματος (ΠΟΣ) και την τυρβώδη κατάστασή του. Κατά τη διάρκεια ασταθών συνθηκών, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να αραιωθούν από την κατακόρυφη ανάμιξη εντός του ΠΟΣ, η οποία συχνά φθάνει τα 2km από το έδαφος. Αυτή είναι μια συνηθισμένη περίπτωση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με χαμηλή νεφοκάλυψη και μέτριους ανέμους. Από την άλλη πλευρά, η ατμόσφαιρα είναι πιο σταθερή κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε η ρύπανση δεν μπορεί να αναμιχθεί σε μεγαλύτερα ύψη. Τα τοπικά ρεύματα αέρα, όπως οι θαλάσσιες αύρες ή οι άνεμοι βουνού-κοιλιάδας, επηρεάζουν επίσης την ποιότητα του αέρα της Πάτρας. Επιπλέον, η πολύπλοκη τοπογραφία της περιοχής τροποποιεί τα μοτίβα των ανέμων, παγιδεύοντας τους ρύπους σε ορισμένες περιοχές ή προκαλώντας άνιση διασπορά των πλουμίων ρύπων. Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες αποτελούν μια πρόσθετη πρόκληση για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα με υψηλή αξιοπιστία.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετά την εκπαίδευση για διαφορετικά μοντέλα και παραμέτρους εκπαίδευσης. Κάθε γραμμή αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο και ρύθμιση εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε για 10 εκτελέσεις εκπαίδευσης. Έχουμε χρησιμοποιήσει 600 εποχές εκπαίδευσης και η παράμετρος "patience" του μηχανισμού διακοπής έχει τιμή 30. Τα σύνολα χαρακτηριστικών ορίζονται στην προηγούμενη ενότητα. Παρουσιάζουμε τις μέσες τιμές και τις τυπικές αποκλίσεις (τ.α.) για τη PMTΣ και το ΜΑΣ. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνεται το καλύτερο μοντέλο για τις ωριαίες προβλέψεις.

α/α	Σύν. Χαρακτ.	Εύρος πρ. τιμών	Παρ. Πρόγ.	Ρυθμ. μάθ. (10 ⁻³)	γ	Αρ. Βημάτων	PMTΣ±τ.α (μg/m ³)	ΜΑΣ±τ.α (μg/m ³)
1	Γενικά - ωριαία	24ω	24ω	7	0.5	45	28.0 ± 3.0	3.1 ± 0.4
2	Γενικά - ωριαία	24ω	24ω	5	0.5	45	23.0 ± 3.5	2.8 ± 0.6

3	Γενικά - ωριαία	24ω	24ω	4.5	0.5	65	20.2±1.3	2.6 ± 0.8
4	Βασικά - ωριαία	48ω	24ω	20	0.5	35	24.5 ± 2.3	2.4 ± 0.6
5	Γενικά - ημερήσια	7ημ.	7ημ.	5	0.5	55	17.8 ±1.3	3.0± 0.4
6	Γενικά - ημερήσια	24ημ.	10ημ.	5	0.5	55	12.1±1.7	2.4±0.8

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Σύγκριση μεταξύ των δύο υλοποιήσεων IMV-LSTM

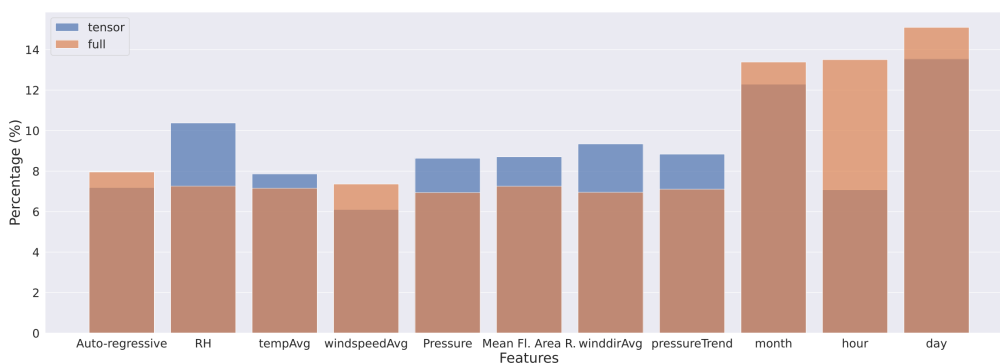
Ως πρώτο βήμα, συγκρίναμε τις δύο υλοποιήσεις των IMV-LSTMs από τους Guo et al. [2019] για 20 εκτελέσεις εκπαίδευσης όσον αφορά την προβλεψιμότητα και τη σημασία των χαρακτηριστικών τους. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη σημασία των χαρακτηριστικών παρουσιάζονται στην Εικόνα 224. Για να κατασκευάσουμε τη "μέση" τιμή σχετικά με τη σημασία των χαρακτηριστικών, ελαχιστοποιήσαμε την ακόλουθη έκφραση

$$\mathcal{L}(f_{mean}) = \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{RMSE_j} \right)^{-1} \sum_{j=1}^N \frac{1}{RMSE_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k (f_{ij} - f_{i,mean})^2} + \left(\sum_{i=1}^k f_{i,mean} - 1 \right) \cdot 10^\lambda \quad (28)$$

όπου k είναι ο αριθμός στοιχείων του διανύσματος σημαντικότητας των χαρακτηριστικών και $RMSE_j$ είναι το $RMSE$ που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη εκτέλεση. Ο πρώτος όρος είναι απλώς ο σταθμισμένος μέσος όρος των ευκλείδειων αποστάσεων στο χώρο των χαρακτηριστικών μεταξύ του διανύσματος j σημαντικότητας χαρακτηριστικών και του "μέσου" και ως βάρη χρησιμοποιούμε τις αντίστροφες τιμές $RMSE$. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στη συνθήκη ότι όλα τα ποσοστά προστίθενται στο 1. Η παράμετρος

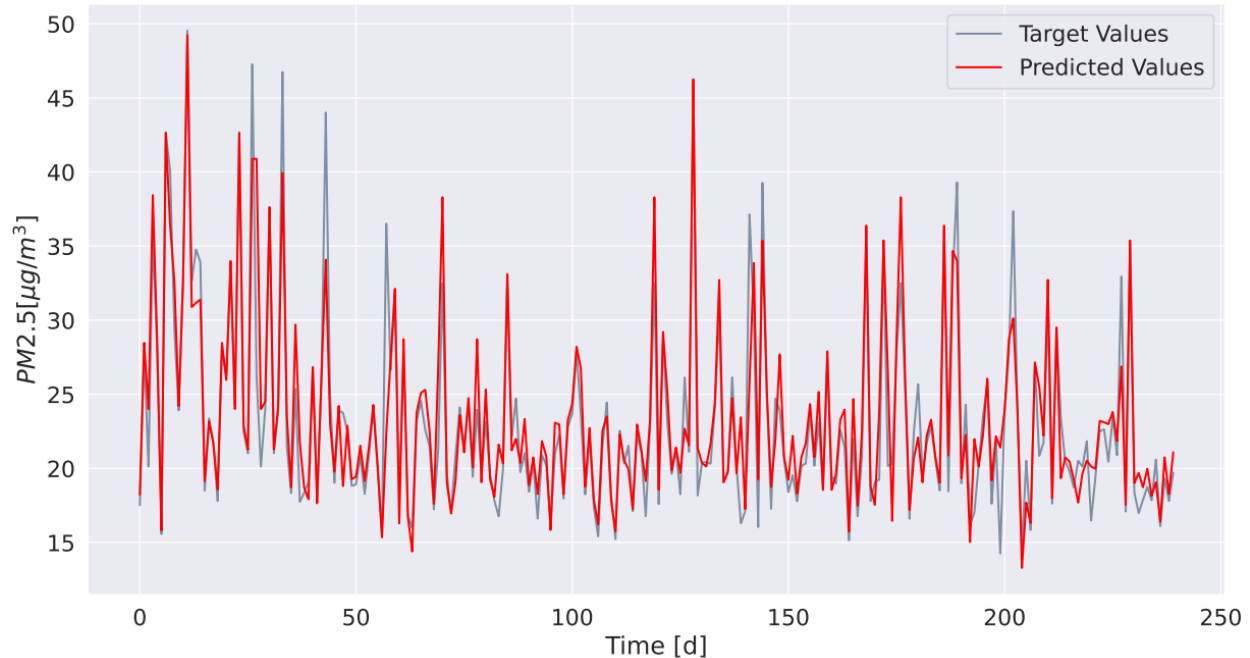
λ είναι ένας αυθαίρετος ακέραιος αριθμός και ορίσαμε $\lambda = 5$. Χρησιμοποιήθηκε το σύνολο χαρακτηριστικών και το παράθυρο πρόβλεψης ορίστηκε στις 48 ώρες.

Η ισοδυναμία της σημαντικότητας των χαρακτηριστικών μεταξύ των δύο υλοποιήσεων γίνεται εμφανής



Εικόνα 209: Μέση ποσοστιαία συνεισφορά χαρακτηριστικών σε 60 εκτελέσεις εκπαίδευσης για τις δύο εκδόσεις IMV-LSTM LSTM, δηλαδή την "tensor" και την "full". Χρησιμοποιήθηκε παράθυρο πρόβλεψης 24 ωρών και χρονικό παράθυρο αναδρομής 48 ωρών. Οι παράμετροι εκπαίδευσης και τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στη γραμμή 4 του Πίνακα 8.

μέσω της εκτίμησης της μέσης τιμής ενός συνόλου εκτελέσεων εκπαίδευσης, Εικόνα 224, όπου οι δύο υλοποιήσεις δίνουν παρόμοιες εκτιμήσεις σημαντικότητας για κάθε χαρακτηριστικό. Ωστόσο, αυτή η ισοδυναμία είναι στατιστικής φύσης λόγω των ισχυρών συσχετίσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών και επίσης της τυχαίας αρχικοποίησης των βαρών των LSTMs. Το τελευταίο οδηγεί σε διαφορετικό ρυθμό σύγκλισης ανά χαρακτηριστικό. Καθώς το σφάλμα RMSE για την υλοποίηση "tensor" είναι ελαφρώς καλύτερο από το αντίστοιχο για την υλοποίηση "full" τις περισσότερες φορές, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το πρώτο ως κύριο μοντέλο πρόβλεψης.

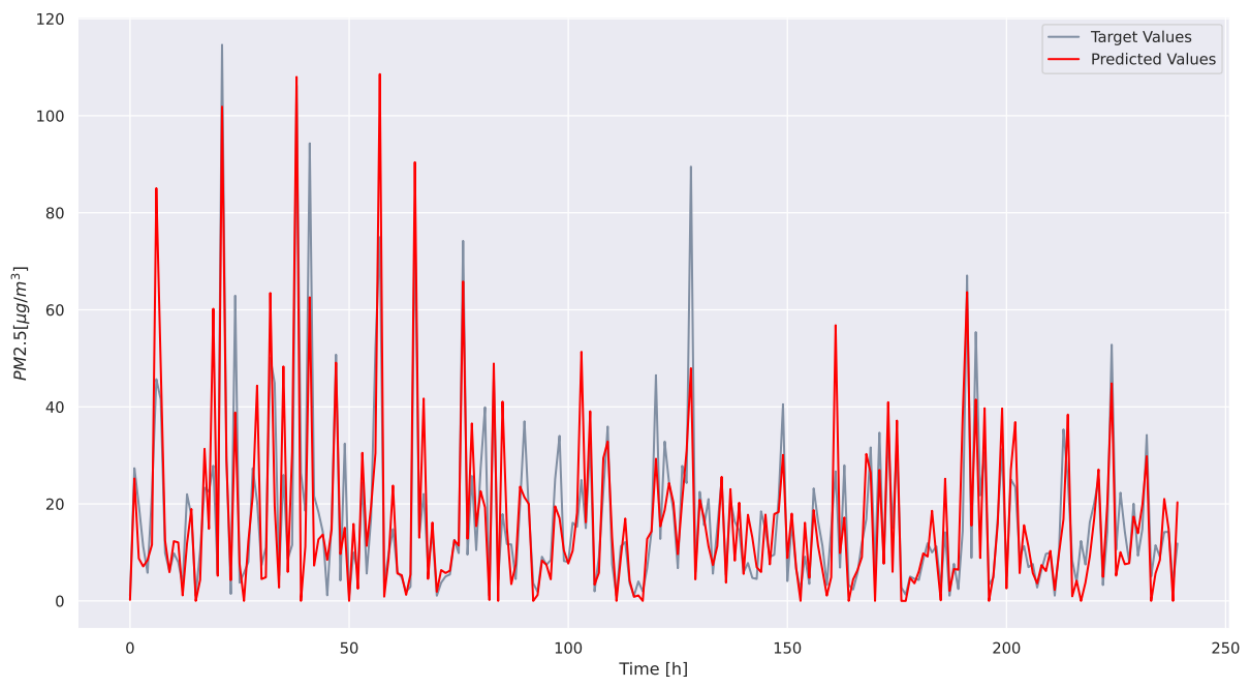


Εικόνα 225: Αξιολόγηση μοντέλου για ημερήσιες προβλέψεις. Το παράθυρο πρόβλεψης είναι 7 ημέρες και τα δεδομένα "auto-regression" αντιστοιχούν στις προηγούμενες 7 ημέρες. Το ΜΤΡΣ είναι $\sim 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και το ΜΑΣ είναι $\sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι προβλέψεις του μοντέλου παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι παρατηρήσιμες τιμές με μπλε.

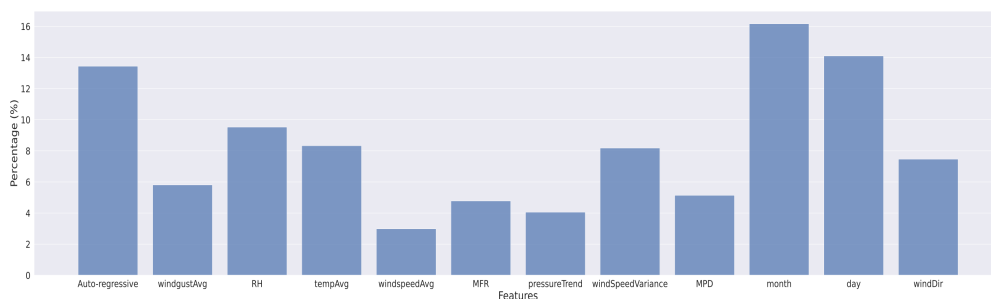
4.3.2 Μοντέλο ημερήσιων προγνώσεων

Εκπαιδύσαμε και επιβεβαιώσαμε δύο μοντέλα για ημερήσιες προβλέψεις, δηλαδή ένα μοντέλο με παράθυρο πρόβλεψης 7 ημερών και ένα άλλο με παράθυρο πρόβλεψης 10 ημερών. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης (validation) για τις ημερήσιες προβλέψεις απεικονίζονται στην Εικόνα 240. Στην Εικόνα 272 παρουσιάζεται η σημασία των χαρακτηριστικών για το μοντέλο που εκπαιδεύτηκε για ημερήσιες προβλέψεις, κατά μέσο όρο για 25 εκτελέσεις. Όλα τα παραμετροποιημένα χαρακτηριστικά με sin/cos (χαρακτηριστικά χρόνου και διεύθυνσης ανέμου) αθροίστηκαν, με αποτέλεσμα να προκύψουν τα χαρακτηριστικά "month", "day" και "windDir", αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι τα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν περισσότερο στην πρόβλεψη, κατά σειρά φθίνουσας σημασίας, είναι τα εξής: 'month', 'day', 'Auto-regressive', 'RH', 'tempAvg', 'windSpeedVariance', 'winddirAvg', 'windgustAvg', 'MPD', 'MFR', 'pressureTrend', 'windSpeedAvg'. Η κύρια συμβολή του χαρακτηριστικού "month" μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορά καλοκαιριού/χειμώνα στις τοπικές εκπομπές λόγω της θέρμανσης των κατοικιών. Η σημασία του χαρακτηριστικού "ημέρα" για την πρόβλεψη υποδεικνύει τη σημαντική μεταβλητότητα των

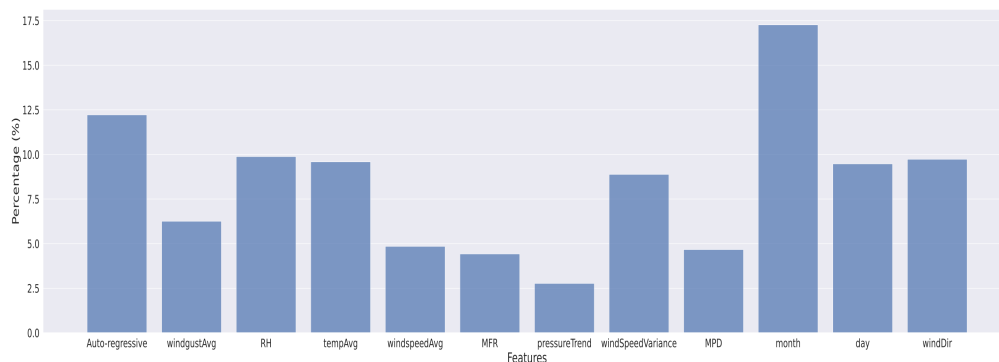
εκπομπών εντός της εβδομάδας, γεγονός που υπογραμμίζει τη σχετική σημασία της μεταβλητότητας των τοπικών πηγών, όπως η κυκλοφορία οχημάτων και τα εστιατόρια. Φυσικά, οι τελευταίες περιοχές θα μπορούσαν να είναι διαφορετικά δυσδιάκριτες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά "MPD" και "MFD". Αυτό θα μπορούσε επίσης να εξηγήσει τη σχετικά μικρή σημασία των χαρακτηριστικών "MPD" και "MFD" σε σύγκριση με την "Auto-regressive". Τα χαρακτηριστικά "RH" και "tempAvg" σχετίζονται γενικά με τη σταθερότητα του ΑΟΣ, ωστόσο υπάρχουν ωστόσο υπάρχουν ορισμένες διαφορές. Συγκεκριμένα, το "tempAvg" συσχετίζεται με τη μεταβλητότητα μεταξύ καλοκαιρινών και χειμερινών μηνών, ενώ το "RH" σχετίζεται επίσης με τη φυσική των αισθητήρων, καθώς η ευαισθησία τους συνδέεται στενά με την υγρασία, π.χ. Barkjohn et al. [2021]. Επιπλέον, η αντίληψη του ψύχους στον άνθρωπο επηρεάζεται από ένα συνδυασμό παραγόντων που περιλαμβάνουν την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και, φυσικά, τη θερμοκρασία. Αυτή η αίσθηση του ψύχους επηρεάζει ενδεχομένως την απόφαση για την ενεργοποίηση των συστημάτων θέρμανσης κατά τους ψυχρότερους μήνες του έτους. Η μεγαλύτερη σημασία των "windSpeedVariance" και "winddir" σε σύγκριση με την απλή "windSpeedAverage" υποδηλώνει την επίδραση της αστικής δομής. Τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά σχετίζονται με το σχηματισμό και τη διάρκεια ζωής συνεκτικών τυρβωδών δομών εντός της περίπλοκης αστικής διάταξης. Επιπλέον, καθώς υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα των εκπομπών εντός της πόλης, όπως αναφέρουν οι Dimitriou et al. [2023], η μεταφορά ρύπων από περιοχές με υψηλότερη ρύπανση προς περιοχές με χαμηλότερη πυκνότητα θα μπορούσε να μεταφράζεται σε αυξημένη σημασία της διεύθυνσης του ανέμου. Μια άλλη πιθανή εξήγηση για την αυξημένη συμβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι λόγω επεισοδίων μεταφερόμενης σκόνης [Matthaios et al. 2017], καθώς τα τελευταία συμβαίνουν συχνά από νότιες/νοτιοδυτικές κατευθύνσεις. Μια διαφορά μεταξύ των προαναφερθέντων μηχανισμών αφορά τη σχετική χρονική κλίμακα, καθώς ο πρώτος μηχανισμός λειτουργεί σε μικρότερες χρονικές κλίμακες, ενώ ο δεύτερος σε μεγαλύτερες.



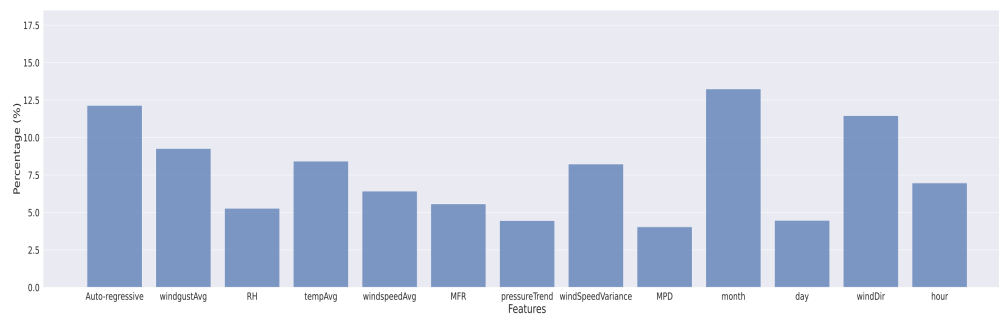
Εικόνα 241: Αξιολόγηση του μοντέλου που αντιστοιχεί στην 3η γραμμή του Πίνακα 8, το οποίο αφορά ωριαίες προβλέψεις. Το παράθυρο πρόβλεψης είναι 24 ώρες και τα δεδομένα "Auto-regressive" αντιστοιχούν στις προηγούμενες 24 ώρες. Τα σφάλματα ΡΤΜΣ και ΜΑΣ είναι $\sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $\sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι προγνώσεις παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι παρατηρήσεις με μπλε.



Εικόνα 257: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ημερήσιας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 5 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί.



Εικόνα 273: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ημερήσιας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 6 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί.

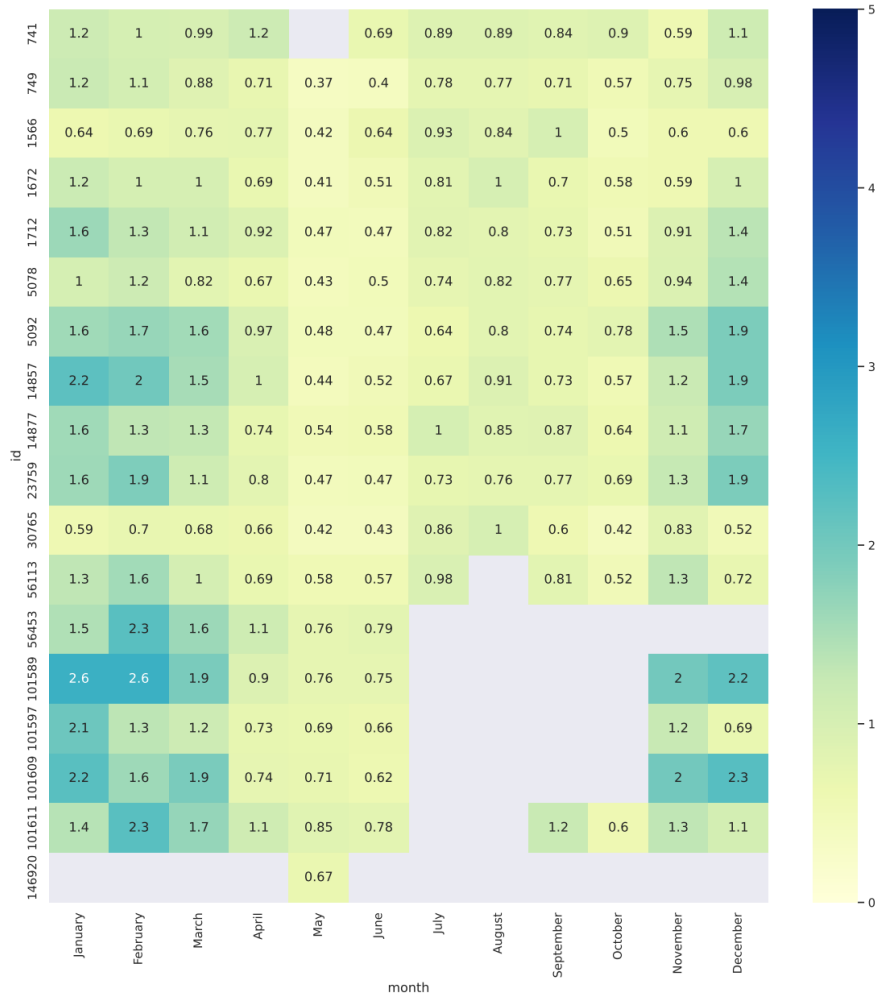


Εικόνα 289: Μέση συνεισφορά χαρακτηριστικών για 25 εκτελέσεις του μοντέλου ωριαίας πρόβλεψης, με τις παραμέτρους που αναφέρονται στη γραμμή 3 του Πίνακα 8. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα έχουν αθροιστεί.

4.3.3 Μοντέλο ωριαίων προβλέψεων

Εκτός από την πρόγνωση του ημερήσιου μέσου όρου, για να είναι δυνατή η αξιοποίηση μιας εφαρμογής πρόγνωσης απο το ευρύ κοινό, ένα μοντέλο ωριαίας πρόβλεψης είναι αναγκαίο. Ενδεικτικό παράδειγμα χρήσης μιας τέτοιας υπηρεσίας απο το κοινό αποτελεί ο προγραμματισμός των υπαίθριων δραστηριοτήτων.

Στην Εικόνα 256 παρουσιάζονται οι προβλέψεις του μοντέλου με είσοδο το μέρος του συνόλου δεδομένων που κρατήθηκε προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση του μοντέλου. Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των ΜΑΣ και ΜΤΡΣ (βλ. Πίνακα 8) οι οποίες είναι $\sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $\sim 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Μια μάλλον ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά τη δυνατότητα πρόβλεψης του ύψους (βάθους) των κορυφών (χαμηλών σημείων). Συγκεκριμένα, ενώ το εκπαιδευμένο μοντέλο προβλέπει σωστά τη θέση κάθε κορυφής (ή χαμηλού σημείου) σχεδόν κάθε φορά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου υπερεκτιμάει ή υποτιμάει το ύψος (βάθος) της κορυφής (χαμηλού σημείου). Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην ισχυρή χρονική μεταβλητότητα των κυκλοφοριακών εκπομπών. Η αύξηση της σημασίας του χαρακτηριστικού "pressureTrend" για το μοντέλο ωριαίων προβλέψεων σε σχέση με τα μοντέλα ημερήσιων προβλέψεων (συγκρίνετε τις Εικόνες 304 και 272 με την Εικόνα 288) υποδεικνύει την αυξημένη επίδραση της ατμοσφαιρικής ανάμιξης στο φαινόμενο. Όσον αφορά τη σημασία των χαρακτηριστικών, παρατηρούμε στην Εικόνα 304 ότι τα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν περισσότερο στην πρόβλεψη, κατά σειρά φθίνουσας σημασίας, είναι: 'month', 'Auto-regressive', 'winddir',



Εικόνα

305: Το ΜΑΣ ανά μήνα και ανά συγκεκριμένο αισθητήρα, κανονικοποιημένο με το συνολικό μέσο σφάλμα, για το μοντέλο με αριθμό 3 του Πίνακα 8.

'windgustAvg', 'tempAvg', 'windSpeedVariance', 'hour', 'windSpeedAvg', 'MFR', 'RH', 'pressureTrend', 'day', 'MPD'.

Η αυξημένη σημασία των χαρακτηριστικών "winddir", "windgustAvg" και "windSpeedVariance" σε σχέση με τα μοντέλα ημερήσιων προγνώσεων που συζητήθηκαν προηγουμένως θα μπορούσε να ερμηνευθεί

ως αποτέλεσμα της αυξημένης σημασίας των τυρβωδών συνεκτικών δομών σε ωριαίες (και χαμηλότερες) χρονικές κλίμακες για τη διασπορά των ΑΣ. Σημειώστε επίσης την αύξηση της σημασίας του χαρακτηριστικού "MFR" σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή από το ημερήσιο μοντέλο πρόβλεψης. Η τελευταία, αν και μικρή (~ 2 %), αποτελεί άλλη μια ένδειξη του παραπάνω μηχανισμού. Μια μάλλον ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά τη μείωση της σημασίας του χαρακτηριστικού "day", όπου παρατηρείται μείωση κατά ~5 %. Το τελευταίο μπορεί να οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ της διακύμανσης της συγκέντρωσης των ΑΣ από την ωριαία στην ημερήσια κλίμακα. Η τελευταία μεταβλητότητα υπερβαίνει κατά πολύ το μέγεθος της εβδομαδιαίας μεταβλητότητας (μιλώντας πάντα υπό το πρίσμα του RMSE) συνεπώς μειώνεται και η επίδραση του χαρακτηριστικού "day" στην προβλεπτική ικανότητα του ωριαίου μοντέλου.

Η κατανομή του ΜΑΣ του μοντέλου ανά μήνα και ανά αισθητήρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 305. Ο χρωματισμός στην τελευταία προκύπτει με βάση την τιμή $\bar{\sigma} = \sigma_{ij} / \sigma_{mean}$, όπου σ_{ij} είναι το σφάλμα πρόγνωσης για τον i-οστό μήνα για το j-οστό αισθητήρα και σ_{mean} το μέσο σφάλμα για όλο το σύνολο επιβεβαίωσης (validation dataset). Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι το μέσο σφάλμα ανά αισθητήρα ανά μήνα είναι μικρότερο από ~3σ, δηλαδή < 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Δεδομένου ότι η ανάλυση των PurpleAir αισθητήρων είναι της τάξης των 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ το μοντέλο μας στη χειρότερη περίπτωση δίνει σφάλμα πρόβλεψης μικρότερο από τα 3σ του αισθητήρα. Επιπλέον, παρατηρούμε υψηλότερα σφάλματα όσον αφορά τους χειμερινούς μήνες, σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς μήνες. Το τελευταίο είναι πλήρως συμβατό με το παρόμοιο αποτέλεσμα που αναφέρθηκε από τους Yan et al. [2021], οι οποίοι μελέτησαν την ευρύτερη περιοχή του Πεκίνου (Beijing, China). Επιπλέον, οι Dimitriou et al. [2023] αναφέρουν υψηλότερη μεταβλητότητα σχετικά με τους χειμερινούς μήνες για την πόλη της Πάτρας και άλλες ελληνικές πόλεις. Ωστόσο, υπάρχουν δύο αισθητήρες, συγκεκριμένα οι 1566 και 30765, που αποκλίνουν από αυτή την τάση. Και οι δύο βρίσκονται στην περιοχή του Πανεπιστημίου Πατρών, η οποία βρίσκεται στα περίχωρα της πόλης της Πάτρας. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η συνεισφορά των εκπομπών ΑΣ λόγω θέρμανσης των κατοικιών στην περιοχή αυτή είναι ελάχιστη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σημαντική αύξηση των σφαλμάτων πρόβλεψης κατά τους χειμερινούς μήνες. Επιπλέον, το υψηλότερο σφάλμα αντιστοιχεί στον αισθητήρα 101589, ο οποίος βρίσκεται στη Λεύκα, μια σχετικά αραιοκατοικημένη περιοχή με γεωργικές δραστηριότητες, και συγκεκριμένα ελαιώνες, περιβόλια εσπεριδοειδών και κτηνοτροφικές μονάδες. Έτσι, το μέγιστο σφάλμα κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο θα μπορούσε να αποδοθεί στις συνδυασμένες επιδράσεις της καύσης γεωργικών αποβλήτων και της θέρμανσης κατοικιών.

4.3.4 Γενικές επισημάνσεις

Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες συνεισφορές των χαρακτηριστικών για τα ημερήσια (γραμμή 5 Πίνακα 8 και το ωριαίο μοντέλο (γραμμή 6 Πίνακα 8), δηλαδή τις Εικόνες 272 και 304 αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι η

ποιοτική αλλαγή μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα στην παραγωγή και τη διασπορά της ρύπανσης περιγράφεται καλύτερα με το χαρακτηριστικό "month" από ό,τι με το χαρακτηριστικό "tempAvg". Στην πραγματικότητα, η συνεισφορά του χαρακτηριστικού "month" είναι σχεδόν δύο φορές μεγαλύτερη από τη συνεισφορά του χαρακτηριστικού "tempAvg" για το ημερήσιο μοντέλο πρόβλεψης, ενώ για το ωριαίο μοντέλο πρόβλεψης είναι περίπου 4% μεγαλύτερη. Ξεκινώντας από το γεγονός ότι το "tempAvg" αντιστοιχεί σε μια θεμελιώδη ποιότητα όσον αφορά τη θέρμανση των κατοικιών, η οποία αποτελεί σημαντική πηγή ρύπανσης, αναμενόταν το αντίθετο. Αυτό το φαινομενικό παράδοξο θα μπορούσε να εξηγηθεί από τη λειτουργία των συστημάτων κεντρικής θέρμανσης για πολυκατοικίες στην πόλη της Πάτρας, τα οποία λειτουργούν για σταθερές ώρες την εβδομάδα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ξεκινώντας από μια ημερομηνία έναρξης Laskari, de Masi, Karatasou, Santamouris and Assimakopoulos [2022]. Έτσι, ο προαναφερόμενος τρόπος θέρμανσης κατοικιών δεν "ενημερώνεται" για τις ημερήσιες και εβδομαδιαίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Δυστυχώς, το ακριβές ποσοστό των κτιρίων που χρησιμοποιούν συστήματα κεντρικής θέρμανσης στην Πάτρα δεν είναι γνωστό. Ωστόσο, μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι ο αριθμός τους είναι περίπου 50% με βάση μια σχετική εργασία για την πόλη της Θεσσαλονίκης Theodoridou, Papadopoulos and Hegger [2011] και το γεγονός ότι οι ελληνικές πόλεις ακολούθησαν παρόμοια πορεία εξέλιξης (δηλαδή έντονη δόμηση σε αντίστοιχες χρονικές περιόδους) [Schaffar, Pavleas & others 2014]. Προφανώς, η λεπτομερής μοντελοποίηση της οικιακής θέρμανσης υπερβαίνει κατά πολύ το πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ένα άλλο σημείο έχει να κάνει με την εμφάνιση κοινωνικοοικονομικών λόγων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν περιοδική μη διαθεσιμότητα της οικιακής θέρμανσης (π.χ. αύξηση του ποσοστού του μισθού που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης) ή/και μη βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του λέβητα (π.χ. κακή συντήρηση) οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία.

Τέλος, είναι σκόπιμο να διεξαχθεί μια συγκριτική ανάλυση του μοντέλου μας ως προς παρόμοιες μελέτες στη βιβλιογραφία, εστιάζοντας στην ακρίβεια της πρόβλεψης. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι άμεση σύγκριση με τη βιβλιογραφία δεν είναι εύκολο να γίνει λόγω παραγόντων όπως μη διαθέσιμότητα κώδικα, μη διαθεσιμότητα συνόλων δεδομένων (ιδίως όσον αφορά τα νέα χαρακτηριστικά προταθέντα από εμάς MFR, MPD κ.λπ.), η χρήση διαφορετικών παραθύρων πρόβλεψης και οι διαφοροποιήσεις στις τοποθεσίες μελέτης που υπόκεινται σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες. Όσον αφορά την ακρίβεια πρόβλεψης, μια μελέτη από τους Pappa and Kioutsioukis [2021], η οποία ασχολήθηκε με την ίδια γεωγραφική περιοχή (αν και χρησιμοποίησε ξεχωριστές περιπτώσεις LSTM για κάθε αισθητήρα και δωρους μέσους όρους), ανέφερε μια τυπική απόκλιση (MAE) που κυμαίνεται από περίπου $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (καλοκαίρι) έως περίπου $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (χειμώνας) για τις προβλέψεις τους. Συγκρίνοντας αυτά τα αποτελέσματα με τα ΜΑΣ για τις ωριαίες (περίπου $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) και ημερήσιες προβλέψεις (περίπου $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), συμπεραίνουμε ότι το πλαίσιο μας επιδεικνύει μια μικρή βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης για εκτεταμένες περιόδους πρόβλεψης και λεπτότερες χρονικές αναλύσεις. Είναι ενδιαφέρον ότι το αντίστοιχο μέσο σφάλμα RMSE για όλες τις περιπτώσεις LSTM που αναφέρεται από

τους Pappa and Kioutsioukis [2021], δηλαδή περίπου $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ είναι 2 έως 4 φορές μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή μας (περίπου $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για ημερήσια και περίπου $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για ωριαία μοντέλα). Μια εύλογη εξήγηση για τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις θα μπορούσε να αποδοθεί στην παρουσία ακραίων τιμών στο σύνολο δεδομένων επικύρωσης (validation). Συγκεκριμένα, οι Pappa and Kioutsioukis [2021] εργάζονται με ένα σημαντικό μικρότερο σύνολο δεδομένων σε σύγκριση με το δικό μας. Ειδικότερα, χρησιμοποιούν περίπου 2 χρόνια ωριαίων μετρήσεων από 8 αισθητήρες, ενώ το δικό μας σύνολο δεδομένων εκτείνεται σε 3,5 χρόνια και περιλαμβάνει μετρήσεις από 18 αισθητήρες. Αν υποθέσουμε ισοκατανομή των ακραίων συμβάντων σε αδρές γραμμές ανα τα έτη, αυτό μεταφράζεται σε περίπου τετραπλάσια ακραία δεδομένα στο δικό μας σύνολο επικύρωσης. Αυτή η απόκλιση στο μέγεθος του συνόλου δεδομένων συνεπάγεται σχετικά μικρότερη εμφάνιση ακραίων τιμών στα δεδομένα επικύρωσής τους, με πιθανό αποτέλεσμα μειωμένο RMSE για τις προβλέψεις τους. Αντίθετα, το μειωμένο MAE στις προβλέψεις μας σημαίνει οριακά ανώτερη ακρίβεια πρόβλεψης για γεγονότα εντός της κατανομής. Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Li et al. [2017b] (που χρησιμοποιεί LSTM για τις χρονικές πτυχές και ένα multi-layer perceptron για τη χωρική μεταβλητότητα), είναι προφανές ότι το αντίστοιχο μοντέλο μας παρουσιάζει τιμές MAE περίπου πέντε φορές χαμηλότερες από τις δικές τους.

Υπάρχει μια άλλη κατηγορία μοντέλων που περιλαμβάνει διάφορους συνδυασμούς LSTM και CNN, όπως αποδεικνύεται σε εργασίες όπως οι Yan et al. [2021] και [Hu et al. 2022]. Στην τελευταία μελέτη, οι τιμές του RMSE κυμαίνονται από περίπου $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (παράθυρο πρόβλεψης 1 ώρας) έως και πάνω από $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (παράθυρο πρόβλεψης 6 ωρών). Στην πρώτη περίπτωση, το MAE για τις προβλέψεις των PM2.5 φτάνει περίπου τα $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Και οι δύο αυτές τιμές ξεπερνούν τις αντίστοιχες για το μοντέλο μας, οι οποίες είναι $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε ότι δεν μπορεί να υποστηριχθεί η γενική υπεροχή του μοντέλου μας έναντι των προαναφερθέντων μοντέλων με βάση αποκλειστικά αυτά τα στοιχεία. Αντίθετα, υποστηρίζουμε ότι το πλαίσιο μας χρήζει βαθύτερης διερεύνησης και περαιτέρω εφαρμογής σε διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές χωρικές κλίμακες και πρότυπα εκπομπών. Όσον αφορά την διερμηνευσιμότητα ως προς τους υποκείμενους φυσικούς μηχανισμούς, εξ όσων γνωρίζουμε, δεν υπάρχει άλλη εργασία που να χρησιμοποιεί ερμηνεύσιμους αλγόριθμους TN για τη μοντελοποίηση της ρύπανσης από ΑΣ. Τελικά, η αποδοτικότητα της προσέγγισής μας βασίζεται στη χρήση ενός συνόλου δεδομένων που συγκεντρώνονται από δίκτυα αισθητήρων χαμηλού κόστους τόσο για τα ΑΣ όσο και για τα μετεωρολογικά παρατηρήσιμα μεγέθη και στην ενσωμάτωση εργαλείων ελεύθερου και ανοικτού κώδικα (FOSS). Χάρη στη σημαντική φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου μας, διαπιστώνουμε ότι το μοντέλο συλλαμβάνει αποτελεσματικά ένα σημαντικό μέρος των υποκείμενων φυσικών μηχανισμών. Με βάση αυτή τη διαπίστωση, υποθέτουμε ότι για την περίπτωση συνεχούς λειτουργίας, ο ρυθμός των απαιτούμενων επανεκπαιδεύσεων θα είναι ελάχιστος.

Ο κύριος περιορισμός αυτής της εργασίας αφορά το γεγονός ότι το μοντέλο μας παρέχει μόνο σημειακές προβλέψεις, καθώς απαιτούνται προηγούμενες τιμές των μετρούμενων ρύπων στην ζητούμενη θέση. Επιπλέον, στην τρέχουσα διάταξη, η ύπαρξη δικτύου αισθητήρων είναι επιβεβλημένη, τόσο για τα σωματίδια όσο και για τα μετεωρολογικά δεδομένα. Επι της αρχής αναμένουμε ότι μέσω μεθόδων μεταφερούμενης μάθησης (transfer learning), τουλάχιστον ένα μέρος των προαναφερθέντων περιορισμών θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Η διερεύνηση αυτή υπερβαίνει τους στόχους του παρόντος και αποτελεί στόχο μελλοντικής εργασίας.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

5 Συμπεράσματα και προεκτάσεις

5.1 Μοντελοποίηση/προσομοίωση πεδίων ροής σε πόλεις – λιμάνια

Χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προκειμένου να προσομοιωθεί το πεδίο ροής εντός του αστικού περιβάλλοντος με έμφαση σε πόλεις – λιμάνια για την περίπτωση της ασυμπίεστης και αδιαβατικής ροής. Ως περίπτωση μελέτης θεωρήθηκε μια περιοχή της πόλης της Χίου πλησίον του λιμένα. Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα τύρβης τόσο απο την RAS όσο και απο την LES οικογένεια στο πλαίσιο του FOSS εργαλείου OpenFoam. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικές συνοριακές συνθήκες προκειμένου να διασφαλιστεί η όσο το δυνατόν λιγότερη αυθαιρεσία των παραμέτρων του μοντέλου, ενώ για τις αρχικές συνθήκες λήφθηκαν υπόψη οι συχνότερες και πιο επιδραστικές μετεωρολογικές συνθήκες. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα πέραν των καθευατό προβλέψεων αναφορικά με την περιοχή μελέτης αφορά την ίδια την διαδικασία (pipeline) της προσομοίωσης. Η τελευταία είναι βασισμένη πλήρως σε FOSS λογισμικό και δεδομένα, συνεπώς είναι άμεσα γενικεύσιμη για οποιαδήποτε περιοχή. Το κυριότερο αποτέλεσμα για τη φυσική του φαινομένου είναι το γεγονός οτι παρόλο το μικρό συγκριτικά ύψος των κτηρίων στην περιοχή μελέτης, φαινόμενα αστικών φαραγγίων ενυπάρχουν στο πεδίο ροής και μάλιστα είναι πολύ σημαντικά.

Ακολούθως επιλέχθηκαν ορισμένα αντιπροσωπευτικά σημεία και εξήχθησαν οι σχετικές προβλέψεις για την ταχύτητα του αέρα καθ' ύψος προκειμένου να διευκολυνθεί η επιβεβαίωση (validation) των προσομοιώσεων. Έγινε προσαρμογή ενός τυπικού λογαριθμικού προφίλ στα παραπάνω αποτελεσματα της ταχύτητας καθ' ύψος με κλασική ανάλυση πιθανοφάνειας. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω απο την κοινότητα ως βάση για την εύρεση ρεαλιστικότερων αρχικών συνθηκών.

Περαιτέρω, τα δυο θεωρηθέντα μοντέλα τύρβης συνηγορούν στην ύπαρξη περιοχών εκτόξευσης (eject) σε σημεία όπου ρευστό με σχετικά υψηλή ταχύτητα ως προς τον τοπικό μέσο όρο συναντά στενώσεις (είτε ανάμεσα στα κτηρια είτε δρομίσκους). Οι τελευταίες περιοχές αποτελούν εμπόδιο στην ανάμιξη της εισερχόμενης ροής με τον τοπικό αέρα, κάτι που απο τη μια αποτρέπει την επισυσώρευση ρύπων απο μεταφορά, ενώ απο την άλλη εμποδίζει την αφαίρεση ρύπων τοπικής προέλευσης. Ένα άμεσα εφαρμόσιμο πρακτικό μέτρο που μπορεί να προταθεί βάση αυτού είναι η επιμήκυνση των καπνοδόχων των μονοόροφων κατοικιών επι των περιοχών αυτών. Ακόμη, το μέγεθος της περιοχής ανάμιξης επι του οδικού φαραγγιού βρέθηκε να σχετίζεται κυρίως με τις ανομοιομορφίες στην αστική γεωμετρία και το πλήθος των ψηλών κτηρίων, παρα με τον προσανατολισμό του οδικού άξονα ως προς την ταχύτητα ελεύθερης ροής. Ο βασικός λόγος για αυτό φαίνεται να έχει να κάνει με τις γενικότερες ιδιότητες της αστικής γεωμετρίας στην περιοχή μελέτης.

Κατευθύνσεις για περαιτέρω μελέτη αποτελούν η συμπερίληψη στην προσομοίωση θερμικών φαινομένων όπως και επιπλέον μοντέλων τύρβης. Η κύρια στόχευση ωστόσο αφορά την λήψη επιτόπιων

μετρήσεων για μια σειρά από μεταβλητές ενδιαφέροντος με έμφαση στην ταχύτητα του αέρα προκειμένου να γίνει επικύρωση (validation) των προσομοιώσεων που παράχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

5.2 Μοντέλο πρόβλεψης συγκεντρώσεων ρύπων μέσω Μηχανικής Μάθησης

Χρησιμοποιήσαμε ένα νέο νευρωνικό δίκτυο μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης (LSTM) για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικά περιβάλλοντα. Η προσέγγισή μας περιλαμβάνει την αξιοποίηση δεδομένων από ένα δίκτυο αισθητήρων χαμηλού κόστους, τους οποίους βαθμονομήσαμε χρησιμοποιώντας κλασικές μεθόδους και καθιερωμένες καμπύλες βαθμονόμησης. Εισάγαμε ορισμένα νέα χαρακτηριστικά, δηλαδή τον Μέσο Συντελεστή Δόμησης και την Πυκνότητα Πληθυσμού, με στόχο να αποτυπώσουμε την επίδραση του αστικού ιστού στο φαινόμενο. Παράλληλα εισάγουμε την χρησιμοποίηση της διακυμάνσης της ταχύτητας του ανέμου. Τα χαρακτηριστικά αυτά, σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία, προσφέρουν αυξημένη ευελιξία, όπως για παράδειγμα τη χρήση μετακινούμενων αισθητήρων και επιτρέπουν την προσθήκη, αντικατάσταση ή αφαίρεση των υφιστάμενων αισθητήρων. Ακόμη, το μοντέλο μας επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων αισθητήρων, μέσω κατάλληλων καμπυλών βαθμονόμησης για κάθε τύπο αισθητήρα.

Ως σημείο αναφοράς για την προσέγγισή μας, χρησιμοποιήσαμε την πόλη της Πάτρας. Οι κυριοί λόγοι για αυτό είναι η ύπαρξη ενός ανοικτού δικτύου αισθητήρων ΑΣ όπως και αντίστοιχου δικτύου μετεωρολογικών αισθητήρων. Παράλληλα, οι κυριότερες πηγές ρύπων και η σχετική συνεισφορά καθεμιάς στην ολική συγκέντρωση ΑΣ είναι επαρκώς μελετημένη. Αναφέρουμε μια εξαιρετική ακρίβεια πρόβλεψης, περίπου $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία είναι μικρότερη από την ανάλυση των αισθητήρων. Πραγματοποιήσαμε ανάλυση των πηγών σφάλματος και συζητήσαμε τον πιθανό ρόλο επιπλέον παραγόντων που συμβάλλουν στο φαινόμενο. Παρατηρήσαμε ότι τα πλέον σημαντικά για την πρόβλεψη χαρακτηριστικά είναι συνεπή με ό,τι θα περιμέναμε με βάση γνωστούς φυσικούς μηχανισμούς. Συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το μοντέλο μας μπόρεσε να αποτυπώσει την φυσική του φαινομένου και άρα στην περίπτωση συνεχούς λειτουργίας και έκδοσης δελτίων πρόγνωσης, η συχνότητα των αναγκαιών επανεκπαιδεύσεων θα είναι μικρή. Το τελευταίο έχει προφανή πλεονεκτήματα αναφορικά με το τελικό κόστος χρήσης της υπηρεσίας πρόγνωσης και συνεπώς την γενικότητα της εφαρμογής του. Αναλύοντας το σφάλμα του μοντέλου μας ανά αισθητήρα και ανά μήνα, εξάχθηκε πληροφορία σχετικά με το μέρος της μεταβλητότητας του φαινομένου, το οποίο δεν αποτυπώθηκε πλήρως στα χρησιμοποιούμενα σύνολα χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο εξήχθηκε πληροφορία για τη φύση των πηγών ρύπανσης και τον αντίκτυπό τους στην ακρίβεια της πρόβλεψης. Αναφέρουμε ότι το σφάλμα πρόβλεψης παραμένει κάτω από 3σ σε όλες τις περιπτώσεις.

Για την περαιτέρω ενίσχυση της ακρίβειας πρόβλεψης του μοντέλου μας, οι μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση πρόσθετων πηγών πληροφοριών. Για παράδειγμα, η αξιοποίηση δεδομένων από κοινωνικά δίκτυα και καθημερινές ειδήσεις για την αντιμετώπιση γεγονότων εκτός κατανομής και την καταγραφή διακυμάνσεων στην ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως μεγάλα γεγονότα αναψυχής, πορείες διαμαρτυρίας και οδικά έργα. Μια άλλη προσέγγιση που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ο συνδυασμός του μοντέλου μας με ένα μοντέλο μεταφορών, όπως το CAMx, όπου το τελευταίο πρόκειται να αντιμετωπίσει φαινόμενα μεγάλης κλίμακας, όπως η μεταφορά σκόνης και το μοντέλο μας θα ασχοληθεί με τις αστικές κλίμακες. Μαζί με την ευελιξία να χρησιμοποιούνται άμεσα διαφορετικές διαμορφώσεις αισθητήρων, το μοντέλο μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το βασικό συστατικό ενός ολοκληρωμένου πλαισίου πρόβλεψης. Ακόμα, με βάση την ακρίβειά πρόγνωσης, το μοντέλο μας μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματική λήψη αποφάσεων και σε ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης της ρύπανσης. Καθώς η προσέγγισή μας βασίζεται πλήρως σε λογισμικό ανοικτού κώδικα καθώς και ανοικτά δεδομένα από αισθητήρες χαμηλού κόστους, μπορεί να αποτελέσει την βάση μίας αποτελεσματικής και οικονομικά αποδοτικής λύσης για πολλές πόλεις-λιμάνια στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως.



6 Παράρτημα

6.1 Αρχεία εισόδου εργαλείων του OpenFoam

6.1.1 blockMeshDict

FoamFile

```
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  object blockMeshDict;
}
// ***** //
```

xMin -160;

xMax 161;

yMin -160;

yMax 160;

zMin 0.0;

zMax 70;

xCells 40;

yCells 40;

zCells 20;

backgroundMesh

```
{
```

```

xMin $xMin;
xMax $xMax;
yMin $yMin;
yMax $yMax;
zMin $zMin;
zMax $zMax;
xCells $xCells;
yCells $yCells;
zCells $zCells;

}
scale 1;
vertices
(
($xMin $yMin $zMin)
($xMax $yMin $zMin)
($xMax $yMax $zMin)
($xMin $yMax $zMin)
($xMin $yMin $zMax)
($xMax $yMin $zMax)
($xMax $yMax $zMax)
($xMin $yMax $zMax)
);

blocks
(
hex (0 1 2 3 4 5 6 7)

```

```
(
  $xCells
  $yCells
  $zCells
)
simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);
boundary
(
  inlet
  {
    type cyclic;
    neighbourPatch outlet;
    faces
    (
      (0 4 7 3)
    );
  }
  ground
  {
    type wall;
    faces
    (
```

```

(0 3 2 1)
);
}
top
{
  type patch;
  faces
  (
    (4 5 6 7)
  );
}
left
{
  type cyclic;
  neighbourPatch right;
  faces
  (
    (1 5 4 0)

  );
}
right
{
  type cyclic;
  neighbourPatch left;
  faces
  (

```

```
(3 7 6 2)
);
}
outlet
{
  type cyclic;
  neighbourPatch inlet;
  faces
  (
    (2 6 5 1)
  );
}
);
mergePatchPairs
(
);
// ***** //
```

6.1.2 surfaceFeaturesDict

```
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  object surfaceFeaturesDict;
}
// ***** //
```

```
test
{
  surfaces
  (
    "Chios-Kountouriotou-vrs1.obj"
  );
  // Identify a feature when angle between faces < includedAngle
  includedAngle 60;

  // Do not mark region edges
  geometricTestOnly yes;

  // Write options
  // Write features to obj format for postprocessing
  writeObj yes;
  verboseObj no;
}
```

6.1.3 snappyHexMeshDict

```
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  object snappyHexMeshDict;
}
// ***** //
```

```
#includeEtc "caseDicts/mesh/generation/snappyHexMeshDict.cfg"
```

```
castellatedMesh on;
```

```
snap on;
```

```
addLayers off;
```

```
geometry
```

```
{
```

```
Chios-Kountouriotou-vrs1.obj
```

```
{
```

```
type triSurfaceMesh;
```

```
name ground;
```

```
}
```

```
refinementBox
```

```
{
```

```
type searchableBox;
```

```
min ( -160 -160 0);
```

```
max (160 160 70);
```

```
}
```

```
}
```

```
castellatedMeshControls
```

```
{
```

```
features
```

```
(
```



```
{ file "Chios-Kountouriotou-vrs1.eMesh";level 1; }
);

refinementSurfaces
{
  ground
  {
    level (1 2);
    patchInfo { type wall; }
  }
}

refinementRegions
{
  refinementBox
  {
    mode inside;
    levels ((1E15 3));
  }
}

resolveFeatureAngle 30;

locationInMesh (0 0 0);
}

snapControls
{
  explicitFeatureSnap true;
  implicitFeatureSnap false;
}
```

addLayersControls

```
{
  layers
  {
    ground
    {
      nSurfaceLayers 10;
    }
  }

  relativeSizes true;
  expansionRatio 1.2;
  finalLayerThickness 1.5;
  minThickness 1e-3;
}
```

meshQualityControls

```
{}
```

writeFlags

```
(
  noRefinement
);
```

mergeTolerance 1e-6;

6.1.4 controlDict

FoamFile

```
{
  version 2.0;
  format  ascii;
  class  dictionary;
  object  controlDict;
}

// ***** //

application  pimpleFoam;

startFrom  latestTime;

startTime  0;

stopAt  endTime;

endTime  1800;

deltaT  0.01;

writeControl  timeStep;

writeInterval  20;

purgeWrite  0;
```

```
writeFormat binary;
```

```
writePrecision 6;
```

```
writeCompression off;
```

```
timeFormat general;
```

```
timePrecision 4;
```

```
maxCo 0.5; // Or other Courant number you wish
```

```
adjustTimeStep no;
```

```
runTimeModifiable false;
```

6.2 Μακροεντολή σε ρυθμό για εξαγωγή δεδομένων από το paraview

```
#### import the simple module from the paraview
```

```
from paraview.simple import *
```

```
import numpy as np
```

```
#### disable automatic camera reset on 'Show'
```

```
paraview.simple._DisableFirstRenderCameraReset()
```

```
MAX_HEIGHT = 100
```

```
MIN_TIME = 0
```



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΤΠΑ & ΤΣ
ΕΥΔ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ»

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



MAX_TIME = 350

STEP = 10

create a new 'PVFoamReader'

```
pvf_read_inst          =          PVFoamReader(registrationName='LES-indeed.OpenFOAM',
FileName='/home/fa/OpenFOAM/fotis-v2106/run/tutorials/incompressible/simpleFoam/structAnalysis-
LES/LES-indeed/LES-indeed.OpenFOAM')
```

```
pvf_read_inst.MeshParts = ['internalMesh', 'ground - wall', 'top - patch']
```

```
pvf_read_inst.Fields = ['p', 'U', 'R', 'nuEff', 'devSigma']
```

get animation scene

```
animationScene1 = GetAnimationScene()
```

update animation scene based on data timesteps

```
animationScene1.UpdateAnimationUsingDataTimeSteps()
```

```
UpdatePipeline(time=0.0, proxy=pvf_read_inst)
```

Properties modified on animationScene1

```
# animationScene1.AnimationTime = 420.0
```

get the time-keeper

```
timeKeeper1 = GetTimeKeeper()
```

```
points = [
```

```
[1.5, 30],
```

```
[-70.0858, 72],
```

```
[33.60346299688836, 44.61599282375596],
[5.16354,-76.9396],
[-72.0051072170373,-64.6645],
[82.48954395690663,14.968357412039715],
[2.12, 17.24],
[-50, 70],
[20, -55],
]
```

```
# create a new 'Plot Over Line'
```

```
plotOverLine1 = PlotOverLine(registrationName='PlotOverLine1', Input=pvf_read_inst)
```

```
# Properties modified on plotOverLine1
```

```
times = [elem for elem in range(MIN_TIME,MAX_TIME,STEP)]
```

```
for time in times:
```

```
    timeKeeper1.Time = time
```

```
    for i,point_set in enumerate(points):
```

```
        x1, x2 = point_set[0], point_set[1]
```

```
        #plotOverLine1.Point1 = [1.5, 30.0, 0.0]
```

```
        #plotOverLine1.Point2 = [1.5, 30.0, 70.0]
```

```
        plotOverLine1.Point1 = [x1,x2, 0]
```

```
        plotOverLine1.Point2 = [x1,x2, MAX_HEIGHT]
```

```
    UpdatePipeline(time=time, proxy=plotOverLine1)
```

```
# get active view
```

```
spreadSheetView1 = GetActiveViewOrCreate('SpreadSheetView')
```

```
# show data in view
plotOverLine1Display = Show(plotOverLine1, spreadSheetView1, 'SpreadSheetRepresentation')

# Properties modified on plotOverLine1Display
plotOverLine1Display.Assembly = ''
name = f'P:{i}_time:{time}_timeseries.csv'

# export view
ExportView('/home/fa/OpenFOAM/fotis-
v2106/run/tutorials/incompressible/simpleFoam/structAnalysis-LES/LES-indeed/'+ name,
view=spreadSheetView1)
```

7 Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Alfonsi, G. (2009). *Reynolds-averaged Navier--Stokes equations for turbulence modeling*, .
- Alolayan, M. A.; Brown, K. W.; Evans, J. S.; Bouhamra, W. S. and Koutrakis, P. (2013). *Source apportionment of fine particles in Kuwait City*, Science of the Total Environment 448 : 14-25.
- Anagnostopoulos, F. K.; Rigas, S.; Papachristou, M.; Chaniotis, I.; Anastasiou, I.; Tryfonopoulos, C. and Raftopoulos, P. (2023). *A Novel AI Framework for PM Pollution Prediction Applied to a Greek Port City*, Atmosphere 14 : 1413.
- Androniceanu, A.-M.; Căplescu, R. D.; Tvaronavičienė, M. and Dobrin, C. (2021). *The Interdependencies between Economic Growth, Energy Consumption and Pollution in Europe*, Energies 14.
- Ardon-Dryer, K.; Dryer, Y.; Williams, J. N. and Moghimi, N. (2020). *Measurements of PM 2.5 with PurpleAir under atmospheric conditions*, Atmospheric Measurement Techniques 13 : 5441-5458.
- Barkjohn, K. K.; Gantt, B. and Clements, A. L. (2021). *Development and application of a United States-wide correction for PM_{2.5} data collected with the PurpleAir sensor*, Atmospheric Measurement Techniques 14 : 4617-4637.
- Brunekreef, B. and Holgate, S. T. (2002). *Air pollution and health*, The Lancet 360 : 1233-1242.
- CanAirIO (2023). *CanAirIO*, .
- Castelvecchi, D. (2016). *Can we open the black box of AI?*, Nature News 538 : 20.
- CFD-online:OpenFOAM (2023). , CFD-online:OpenFOAM .
- Cheng, W.-C. and Yang, Y. (2023). *Scaling of flows over realistic urban geometries: A large-eddy simulation study*, Boundary-Layer Meteorology 186 : 125-144.
- Clappier, A.; Martilli, A.; Grossi, P.; Thunis, P.; Pasi, F.; Krueger, B. C.; Calpini, B.; Graziani, G. and van den Bergh, H. (2000). *Effect of Sea Breeze on Air Pollution in the Greater Athens Area. Part I: Numerical Simulations and Field Observations*, Journal of Applied Meteorology 39 : 546 - 562.
- Croft, B.; Lohmann, U.; Martin, R. V.; Stier, P.; Wurzler, S.; Feichter, J.; Hoose, C.; Heikkilä, U.; van Donkelaar, A. and Ferrachat, S. (2010). *Influences of in-cloud aerosol scavenging parameterizations on aerosol concentrations and wet deposition in ECHAM5-HAM*, Atmospheric Chemistry and Physics 10 : 1511-1543.
- Dimitriou, K.; Stavroulas, I.; Grivas, G.; Chatzidiakos, C.; Kosmopoulos, G.; Kazantzidis, A.; Kourtidis, K.; Karagioras, A.; Hatzianastassiou, N.; Pandis, S. N. and others (2023). *Intra-and inter-city variability of*

PM2.5 concentrations in Greece as determined with a low-cost sensor network, Atmospheric Environment 301 : 119713.

Ding, J.; Dai, Q.; Zhang, Y.; Xu, J.; Huangfu, Y. and Feng, Y. (2021). *Air humidity affects secondary aerosol formation in different pathways, Science of The Total Environment* 759 : 143540.

Du, M.; Chen, Y.; Liu, Y. and Yin, H. (2022). *A Novel Hybrid Method to Predict PM2.5 Concentration Based on the SWT-QPSO-LSTM Hybrid Model, Computational Intelligence and Neuroscience* 2022.

Elbaz, K.; Shaban, W. M.; Zhou, A. and Shen, S.-L. (2023). *Real time image-based air quality forecasts using a 3D-CNN approach with an attention mechanism, Chemosphere* 333 : 138867.

Faludi, A., 2013. *A reader in planning theory.* Elsevier, .

Fameli, K.; Kotrikla, A.; Psanis, C.; Biskos, G. and Polydoropoulou, A. (2020). *Estimation of the emissions by transport in two port cities of the northeastern Mediterranean, Greece, Environmental Pollution* 257 : 113598.

Fameli, K.-M. and Assimakopoulos, V. D. (2016). *The new open Flexible Emission Inventory for Greece and the Greater Athens Area (FEI-GREGAA): Account of pollutant sources and their importance from 2006 to 2012, Atmospheric Environment* 137 : 17-37.

Fernandez, K. B.; Ikegaya, N.; Ito, K. and Chen, Q. (2022). *Age of air, purging flow rate, and net escape velocity in a cross-ventilation model sheltered by urban-like blocks using LES, Building and Environment* 226 : 109759.

Florou, K.; Papanastasiou, D. K.; Pikridas, M.; Kaltsonoudis, C.; Louvaris, E.; Gkatzelis, G. I.; Patoulias, D.; Mihalopoulos, N. and Pandis, S. N. (2017). *The contribution of wood burning and other pollution sources to wintertime organic aerosol levels in two Greek cities, Atmospheric Chemistry and Physics* 17 : 3145-3163.

Goldberg, M. (2008). *A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases, Reviews on environmental health* 23 : 243-298.

GPL (2007). *GNU General Public License,* .

Guo, T.; Lin, T. and Antulov-Fantulin, N. (2019). *Exploring interpretable lstm neural networks over multi-variable data,* : 2494-2504.

Hao, C.; Xie, X.; Huang, Y. and Huang, Z. (2019). *Study on influence of viaduct and noise barriers on the particulate matter dispersion in street canyons by CFD modeling, Atmospheric Pollution Research* 10 : 1723-1735.

Hedworth, H. A.; Sayahi, T.; Kelly, K. E. and Saad, T. (2021). *The effectiveness of drones in measuring particulate matter*, Journal of Aerosol Science 152 : 105702.

Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997). *Long Short-Term Memory*, Neural Computation 9 : 1735-1780.

Holder, A. L.; Mebust, A. K.; Maghran, L. A.; McGown, M. R.; Stewart, K. E.; Vallano, D. M.; Elleman, R. A. and Baker, K. R. (2020). *Field evaluation of low-cost particulate matter sensors for measuring wildfire smoke*, Sensors 20 : 4796.

Hu, K.; Guo, X.; Gong, X.; Wang, X.; Liang, J. and Li, D. (2022). *Air quality prediction using spatio-temporal deep learning*, Atmospheric Pollution Research 13 : 101543.

Im, U.; Geels, C.; Hanninen, R.; Kukkonen, J.; Rao, S.; Ruuhela, R.; Sofiev, M.; Schaller, N.; Hodnebrog, Ø.; Sillmann, J. and others (2022). *Reviewing the links and feedbacks between climate change and air pollution in Europe*, Frontiers in Environmental Science 10 : 954045.

Jacobsen, N. G.; Fuhrman, D. R. and Fredsøe, J. (2012). *A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®*, International Journal for numerical methods in fluids 70 : 1073-1088.

Jeanjean, A. P.; Monks, P. S. and Leigh, R. J. (2016). *Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale*, Atmospheric Environment 147 : 1-10.

Jordan, M. I. (1997). *Serial order: A parallel distributed processing approach*. In: (Ed.), *Advances in psychology*, Elsevier.

Kaivonen, S. and Ngai, E. C.-H. (2020). *Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus*, Digital Communications and Networks 6 : 23-30.

Kampa, M. and Castanas, E. (2008). *Human health effects of air pollution*, Environmental Pollution 151 : 362-367.

Karagiannidis, A.; Poupkou, A.; Giannaros, C.; Giannaros, T.; Dimopoulos, S.; Liora, N.; Melas, D. and Argiriou, A. (2014). *Meteorological parameters affecting the air pollution of the city of Patras*, .

Kelly, F. J.; Fuller, G. W.; Walton, H. A. and Fussell, J. C. (2012). *Monitoring air pollution: Use of early warning systems for public health*, Respiriology 17 : 7-19.

Khaniabadi, Y. O.; Goudarzi, G.; Daryanoosh, S. M.; Borgini, A.; Tittarelli, A. and De Marco, A. (2017). *Exposure to PM₁₀, NO₂, and O₃ and impacts on human health*, Environmental science and pollution research 24 : 2781-2789.

Kim, J.-J. and Baik, J.-J. (2004). *A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k- ϵ turbulence model*, Atmospheric Environment 38 : 3039-3048.



Kosmopoulos, G.; Salamalikis, V.; Matrali, A.; Pandis, S. N. and Kazantzidis, A. (2022). *Insights about the Sources of PM_{2.5} in an Urban Area from Measurements of a Low-Cost Sensor Network*, Atmosphere 13.

Kosmopoulos, G.; Salamalikis, V.; Pandis, S.; Yannopoulos, P.; Bloutsos, A. and Kazantzidis, A. (2020). *Low-cost sensors for measuring airborne particulate matter: Field evaluation and calibration at a South-Eastern European site*, Science of The Total Environment 748 : 141396.

Kostenidou, E.; Florou, K.; Kaltsonoudis, C.; Tsiglikiotou, M.; Vratolis, S.; Eleftheriadis, K. and Pandis, S. N. (2015). *Sources and chemical characterization of organic aerosol during the summer in the eastern Mediterranean*, Atmospheric Chemistry and Physics 15 : 11355-11371.

Kowalski, C. J. (1972). *On the effects of non-normality on the distribution of the sample product-moment correlation coefficient*, Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics) 21 : 1-12.

Kumar, P.; Morawska, L.; Martani, C.; Biskos, G.; Neophytou, M.; Di Sabatino, S.; Bell, M.; Norford, L. and Britter, R. (2015). *The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities*, Environment international 75 : 199-205.

Laskari, M.; de Masi, R.-F.; Karatasou, S.; Santamouris, M. and Assimakopoulos, M.-N. (2022). *On the impact of user behaviour on heating energy consumption and indoor temperature in residential buildings*, Energy and Buildings 255 : 111657.

Lauder, B. E. and Spalding, D. B. (1983). *The numerical computation of turbulent flows*. In: (Ed.), *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*, Elsevier.

Lauriks, T.; Longo, R.; Baetens, D.; Derudi, M.; Parente, A.; Bellemans, A.; Van Beeck, J. and Denys, S. (2021). *Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street*, Atmospheric Environment 246 : 118127.

Levin, Z. and Cotton R., W., 2009. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Springer, .

Li, J.; Wang, W.; Li, K.; Zhang, W.; Peng, C.; Zhou, L.; Shi, B.; Chen, Y.; Liu, M.; Li, H. and Ge, M. (2020b). *Temperature effects on optical properties and chemical composition of secondary organic aerosol derived from n-dodecane*, Atmospheric Chemistry and Physics 20 : 8123-8137.

Li, T.; Hua, M. and Wu, X. (2020a). *A hybrid CNN-LSTM model for forecasting particulate matter (PM_{2.5})*, IEEE Access 8 : 26933-26940.

Li, X.; Peng, L.; Yao, X.; Cui, S.; Hu, Y.; You, C. and Chi, T. (2017b). *Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: Method development and evaluation*, Environmental pollution 231 : 997-1004.

Li, Z.; Xu, J.; Ming, T.; Peng, C.; Huang, J. and Gong, T. (2017a). *Numerical simulation on the effect of vehicle movement on pollutant dispersion in urban street*, Procedia Engineering 205 : 2303-2310.

Liang, L. and Gong, P. (2020). *Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends*, Scientific Reports 10 : 18618.

Lozano, O. M.; Salis, M.; Ager, A. A.; Arca, B.; Alcasena, F. J.; Monteiro, A. T.; Finney, M. A.; Del Giudice, L.; Scoccimarro, E. and Spano, D. (2017). *Assessing climate change impacts on wildfire exposure in Mediterranean areas*, Risk Analysis 37 : 1898-1916.

Manousakas, M.; Diapouli, E.; Papaefthymiou, H.; Kantarelou, V.; Zarkadas, C.; Kalogridis, A.-C.; Karydas, A.-G. and Eleftheriadis, K. (2018). *XRF characterization and source apportionment of PM10 samples collected in a coastal city*, X-Ray Spectrometry 47 : 190-200.

Manousakas, M.; Papaefthymiou, H.; Diapouli, E.; Migliori, A.; Karydas, A.; Bogdanovic-Radovic, I. and Eleftheriadis, K. (2017). *Assessment of PM2.5 sources and their corresponding level of uncertainty in a coastal urban area using EPA PMF 5.0 enhanced diagnostics*, Science of the Total Environment 574 : 155-164.

Manousakas, M. I.; Florou, K. and Pandis, S. N. (2020). *Source Apportionment of Fine Organic and Inorganic Atmospheric Aerosol in an Urban Background Area in Greece*, Atmosphere 11.

Mao, W.; Wang, W.; Jiao, L.; Zhao, S. and Liu, A. (2021). *Modeling air quality prediction using a deep learning approach: Method optimization and evaluation*, Sustainable Cities and Society 65 : 102567.

Matthaios, V. N.; Triantafyllou, A. G. and Koutrakis, P. (2017). *PM10 episodes in Greece: Local sources versus long-range transport—observations and model simulations*, Journal of the Air & Waste Management Association 67 : 105-126.

Merico, E.; Dinoi, A. and Contini, D. (2019). *Development of an integrated modelling-measurement system for near-real-time estimates of harbour activity impact to atmospheric pollution in coastal cities*, Transportation Research Part D: Transport and Environment 73 : 108-119.

Mirzavand Borujeni, S.; Arras, L.; Srinivasan, V. and Samek, W. (2023). *Explainable sequence-to-sequence GRU neural network for pollution forecasting*, Scientific Reports 13 : 9940.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (2023). *MERRA-2 instU2dlfoNx: 2d, 2d,diurnal,Instantaneous,Single-Level,Assimilation,Land Surface Forcings V5.12.4*, .

Moriske, H.-J.; Drews, M.; Ebert, G.; Menk, G.; Scheller, C.; Schöndube, M. and Konieczny, L. (1996). *Indoor air pollution by different heating systems: coal burning, open fireplace and central heating*, Toxicology Letters 88 : 349-354.

United Nations (2018). *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN*, .

OpenFOAM-Docummentation (2023). *Chapter 4: mesh generation and conversion*, OpenFOAM .

Pak, U.; Ma, J.; Ryu, U.; Ryom, K.; Juhok, U.; Pak, K. and Pak, C. (2020). *Deep learning-based PM_{2.5} prediction considering the spatiotemporal correlations: A case study of Beijing, China*, Science of The Total Environment 699 : 133561.

Papadakis, G.; Megaritis, A. and Pandis, S. (2015). *Effects of olive tree branches burning emissions on PM_{2.5} concentrations*, Atmospheric Environment 112 : 148-158.

Pappa, A. and Kioutsioukis, I. (2021). *Forecasting particulate pollution in an urban area: From copernicus to sub-km scale*, Atmosphere 12 : 881.

Paszke, A.; Gross, S.; Massa, F.; Lerer, A.; Bradbury, J.; Chanan, G.; Killeen, T.; Lin, Z.; Gimelshein, N.; Antiga, L. and others (2019). *Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library*, Advances in neural information processing systems 32.

Pearlmutter, D.; Bitan, A. and Berliner, P. (1999). *Microclimatic analysis of “compact” urban canyons in an arid zone*, Atmospheric Environment 33 : 4143-4150.

Piroozmand, P.; Mussetti, G.; Allegrini, J.; Mohammadi, M. H.; Akrami, E. and Carmeliet, J. (2020). *Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 197 : 104059.

Progiou, A.; Bakeas, E.; Evangelidou, E.; Kontogiorgi, C.; Lagkadinou, E. and Sebos, I. (2021). *Air pollutant emissions from Piraeus port: External costs and air quality levels*, Transportation Research Part D: Transport and Environment 91 : 102586.

PurpleAir (2022). *Purpleair PA-II*, PurpleAir, Inc. .

PurpleAir (2023). *API - PurpleAir*, PurpleAir .

Qiao, W.; Wang, Y.; Zhang, J.; Tian, W.; Tian, Y. and Yang, Q. (2021). *An innovative coupled model in view of wavelet transform for predicting short-term PM₁₀ concentration*, Journal of Environmental Management 289 : 112438.

Qin, D.; Yu, J.; Zou, G.; Yong, R.; Zhao, Q. and Zhang, B. (2019). *A novel combined prediction scheme based on CNN and LSTM for urban PM_{2.5} concentration*, IEEE Access 7 : 20050-20059.

Ricci, A.; Kalkman, I.; Blocken, B.; Burlando, M.; Freda, A. and Repetto, M. P. (2018). *Large-scale forcing effects on wind flows in the urban canopy: Impact of inflow conditions*, Sustainable cities and Society 42 : 593-610.

Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J. and others (1985). *Learning internal representations by error propagation*, .

Sanchez, B.; Santiago, J.-L.; Martilli, A.; Palacios, M. and Kirchner, F. (2016). *CFD modeling of reactive pollutant dispersion in simplified urban configurations with different chemical mechanisms*, Atmospheric Chemistry and Physics 16 : 12143-12157.

Schaffar, A.; Pavleas, S. and others (2014). *The Evolution Of The Greek Urban Centers: 1951-2011*, Région et Développement 39 : 87-104.

Stavroulas, I.; Grivas, G.; Michalopoulos, P.; Liakakou, E.; Bougiatioti, A.; Kalkavouras, P.; Fameli, K. M.; Hatzianastassiou, N.; Mihalopoulos, N. and Gerasopoulos, E. (2020). *Field evaluation of low-cost PM sensors (Purple Air PA-II) under variable urban air quality conditions, in Greece*, Atmosphere 11 : 926.

Theodoridou, I.; Papadopoulos, A. M. and Hegger, M. (2011). *Statistical analysis of the Greek residential building stock*, Energy and Buildings 43 : 2422-2428.

Toparlar, Y.; Blocken, B.; Maiheu, B. and Van Heijst, G. (2017). *A review on the CFD analysis of urban microclimate*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 : 1613-1640.

Toscano, D.; Marro, M.; Mele, B.; Murena, F. and Salizzoni, P. (2021). *Assessment of the impact of gaseous ship emissions in ports using physical and numerical models: The case of Naples*, Building and Environment 196 : 107812.

Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J. and others (2020b). *SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python*, Nature methods 17 : 261-272.

Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S. J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, K. J.; Mayorov, N.; Nelson, A. R. J.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, İ.; Feng, Y.; Moore, E. W.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C. R.; Archibald, A. M.; Ribeiro, A. H.; Pedregosa, F.; van Mulbregt, P. and SciPy 1.0 Contributors (2020a). *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*, Nature Methods 17 : 261-272.

vrs-2106 (2021). , OpenFOAM .

vvoovv (2023). *Blender OSM*, .

Wang, J.; Xing, J.; Mathur, R.; Pleim, J. E.; Wang, S.; Hogrefe, C.; Gan, C.-M.; Wong, D. C. and Hao, J. (2017). *Historical trends in PM_{2.5}-related premature mortality during 1990--2010 across the northern hemisphere*, Environmental health perspectives 125 : 400-408.

Wang, W.; Xu, Y.; Ng, E. and Raasch, S. (2018). *Evaluation of satellite-derived building height extraction by CFD simulations: A case study of neighborhood-scale ventilation in Hong Kong*, Landscape and Urban Planning 170 : 90-102.

Weltgesundheitsorganisation; Organization, W. H. and for Environment, E. C., **2021.** *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, .

Wu, X.; Wang, Y.; He, S. and Wu, Z. (2020). *PM_{2.5}/PM₁₀ ratio prediction based on a long short-term memory neural network in Wuhan, China*, Geoscientific Model Development 13 : 1499-1511.

wunderground (2023). *Wundermap sensors for Patras, Greece*.

Yan, R.; Liao, J.; Yang, J.; Sun, W.; Nong, M. and Li, F. (2021). *Multi-hour and multi-site air quality index forecasting in Beijing using CNN, LSTM, CNN-LSTM, and spatiotemporal clustering*, Expert Systems with Applications 169 : 114513.

Yang, J.; Shi, B.; Shi, Y.; Marvin, S.; Zheng, Y. and Xia, G. (2020). *Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form*, Sustainable Cities and Society 54 : 101941.

Yu, Y.; Si, X.; Hu, C. and Zhang, J. (2019). *A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures*, Neural Computation 31 : 1235-1270.

Zhang, B.; Zhang, H.; Zhao, G. and Lian, J. (2020). *Constructing a PM_{2.5} concentration prediction model by combining auto-encoder with Bi-LSTM neural networks*, Environmental Modelling & Software 124 : 104600.

Zhang, B.; Zou, G.; Qin, D.; Lu, Y.; Jin, Y. and Wang, H. (2021a). *A novel Encoder-Decoder model based on read-first LSTM for air pollutant prediction*, Science of The Total Environment 765 : 144507.

Zhang, L.; Na, J.; Zhu, J.; Shi, Z.; Zou, C. and Yang, L. (2021b). *Spatiotemporal causal convolutional network for forecasting hourly PM_{2.5} concentrations in Beijing, China*, Computers & Geosciences 155 : 104869.

Zhao, J.; Deng, F.; Cai, Y. and Chen, J. (2019). *Long short-term memory-Fully connected (LSTM-FC) neural network for PM_{2.5} concentration prediction*, Chemosphere 220 : 486-492.

Zhou, Y.; Chang, F.-J.; Chang, L.-C.; Kao, I.-F. and Wang, Y.-S. (2019). *Explore a deep learning multi-output neural network for regional multi-step-ahead air quality forecasts*, Journal of cleaner production 209 : 134-145.