



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη ροών διοξειδίου του άνθρακα από την πόλη
του Ηρακλείου σε τοπική κλίμακα για διάστημα δύο ετών**

του φοιτητή:

Κωνσταντίνου Πολιτάκου (Α.Μ. 4499)

Επιβλέπων:

Δρ. Νεκτάριος Χρυσουλάκης

Συνεπιβλέπων:

Δρ. Σταύρος Σταγάκης

Πανεπιστήμιο Βασιλείας, Ελβετία

Ηράκλειο, Νοέμβριος 2019

Περιεχόμενα

Πρόλογος	4
Περίληψη	5
Σκοπός.....	7
Εισαγωγή	8
Η αύξηση του CO ₂ σε παγκόσμια κλίμακα	8
Ο κύκλος του CO ₂	10
Πηγές εκπομπής CO ₂	11
Η επίδραση της αστικοποίησης στην κλιματική αλλαγή.....	12
Μεθοδολογίες υπολογισμού εκπομπών CO ₂	12
Η μέθοδος Eddy Covariance.....	16
Μικρομετεωρολογία & Χαρακτηριστικά Ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.....	16
Τυρβώδεις ροές	21
Μεθοδολογία.....	29
Περιοχή Μελέτης	29
Τεχνικά χαρακτηριστικά μικρομετεωρολογικού πύργου.....	29
Επεξεργασία δεδομένων EC	31
Χρονική συνάθροιση χρονοσειρών F _c	32
Ανάλυση προτύπων ανέμων και ορισμός τόξων.....	33
Προϊόντα υπολογισμού μορφολογίας	33
Υπολογισμός ετήσιου αποτυπώματος.....	34
Αποτελέσματα.....	35
Ετήσιες Μετρήσεις.....	35
Μηνιαίες Μετρήσεις	36
Μετρήσεις ανά γωνία	38
Wind Roses	41
Αποτελέσματα FFP	43
Συζήτηση.....	44
Συμπεράσματα	49
Βιβλιογραφία	50

Πρόλογος

Η παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη των ροών διοξειδίου του άνθρακα για χρονικό διάστημα δύο ετών σε αστικό περιβάλλον και την σύγκριση των ετήσιων εκπομπών. Η περιοχή μελέτης είναι το κέντρο του Ηρακλείου, όπου έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί σύστημα μέτρησης Eddy Covariance από το φθινόπωρο του 2016. Οι στόχοι που προσπαθεί η εργασία να επιτύχει είναι σε πρώτο επίπεδο η δημιουργία ιστορικού εκπομπών CO₂ στην πόλη του Ηρακλείου, καθώς και η λεπτομερής ανάλυση τους χωρικά. Η κατανόηση και εφαρμογή της θεωρίας του Eddy Covariance σε αστικό περιβάλλον, η μελέτη σε βάθος του ισοζυγίου CO₂ και η επιτυχής προσαρμογή του στην περιοχή του Ηρακλείου αποτελούν επίσης βασικές πτυχές της εργασίας.

Το κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας δόθηκε μετά την παρακολούθηση του μαθήματος Φ-338 «Αρχές & Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης» στο εαρινό εξάμηνο την περίοδο 2017-2018. Σημαντικός παράγοντας στην εκπόνηση αυτής της εργασίας αποτέλεσε ο Δρ. Χρυσουλάκης Νεκτάριος, Διευθυντής ερευνών και επικεφαλής του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης και Εφαρμογών σε Αστικό και Φυσικό Περιβάλλον (www.rslab.gr), Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ), ο οποίος ανέλαβε την επίβλεψη της πτυχιακής μου εργασίας αναθέτοντας μου αυτό το σύγχρονο και καίριο θέμα. Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω βαθιές ευχαριστίες στο Δρ. Σταύρο Σταγάκη, μεταδιδακτορικό ερευνητή (MSCA-IF) στην ομάδα Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Τηλεπισκόπησης του Τμήματος Περιβαλλοντικών Επιστημών στο Πανεπιστήμιο της Βασιλείας, ο οποίος με κατάλληλη καθοδήγηση και την ανάλογη εμπειρία με βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Η εξεταστική επιτροπή συνίσταται από τον Δρ. Νεκτάριο Χρυσουλάκη, τον Δρ. Σταύρο Σταγάκη και τον Δρ. Βασίλειο Χαρμανδάρη, καθηγητή του Τμήματος Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Τέλος, θα ήθελα να αποδώσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για τη διαρκή της στήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ηράκλειο, Νοέμβριος 2019

Περίληψη

Η μέθοδος Eddy Covariance είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να προσφέρει *in-situ* μετρήσεις ροών αερίων (όπως το CO_2) και ενέργειας μεταξύ μια περιοχής του εδάφους (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης) και της ατμόσφαιρας σε τοπική κλίμακα. Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια επεκτείνεται η εφαρμογή της στις πόλεις ως η πιο αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης των εκπομπών CO_2 . Η μέθοδος χρησιμοποιεί την θεωρία τυρβωδών ροών στο επιφανειακό στρώμα της ατμόσφαιρας για την εκτίμηση των ροών αερίων και ενέργειας. Τα όργανα μέτρησης τοποθετούνται σε μεγάλο ύψος πάνω από το ύψος κτηρίων ώστε η ροή του αέρα να μην παρεμποδίζεται από τον αστικό θόλο και οι μετρήσεις να είναι αντιπροσωπευτικές μιας μεγάλης επιφάνειας του υποκείμενου εδάφους (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης). Οι μετρήσεις κάθε στιγμή αφορούν μια περιοχή εδάφους κατά την διεύθυνση του ανέμου.

Η ανάλυση των πρωτογενών δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω σειράς υπολογιστικών αλγορίθμων και φίλτρων αναγνώρισης και διόρθωσης προβληματικών τιμών ώστε να υπολογιστούν οι εκπομπές CO_2 με χρονικό βήμα μισής ώρας, συνοδευόμενες από δείκτες ποιότητας κάθε μέτρησης. Στη συνέχεια έγινε κατηγοριοποίηση των μετρήσεων και κατασκευή χρονοσειρών (Νοέμβριος 2016 – Οκτώβριος 2017 & Νοέμβριος 2017 – Οκτώβριος 2018). Οι ετήσιες μετρήσεις υπολογίστηκαν σε $19,6 \text{ kg } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ για την πρώτη περίοδο ενώ $18,7 \text{ kg } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ για τη δεύτερη.

Οι παραπάνω μετρήσεις συντέλεσαν και στην δημιουργία ημερήσιων προτύπων ροών CO_2 και για τις δύο χρονοσειρές, πρότυπα τα οποία ποικίλουν ποιοτικά και ποσοτικά ανάλογα την περιοχή λήψεων και την περίοδο.

Έπειτα, οι μετρήσεις διαχωρίστηκαν ανά τόξα κατευθύνσεων ανέμου. Αυτή η τεχνική εφαρμόστηκε ώστε να προσδιοριστεί ποια τόξα συνεισφέρουν σημαντικά στις ροές CO_2 . Βρέθηκε ότι οι βορειοανατολικοί άνεμοι έχουν σχεδόν διπλάσια συνεισφορά από τις υπόλοιπες κατευθύνσεις.

Σε επόμενο βήμα έγινε διαχωρισμός σε ημέρες χαρακτηριζόμενες ως καθημερινές (Δευτέρα – Παρασκευή) και σε Σαββατοκύριακα ανά μήνα, καθώς διαφέρουν αρκετά οι ροές σε αυτά τα διαστήματα, λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην πόλη του Ηρακλείου. Από τα πρώτα διαγράμματα γίνεται φανερό η διαφορά της συνεισφοράς των καθημερινών, όπου αποτελούν τις βασικές εργάσιμες μέρες. Άρα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε τουλάχιστον για το κέντρο της πόλης τις ώρες αιχμής και τα μοντέλα κυκλοφορίας. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η μεγαλύτερη μεταφορά CO_2 γίνεται κατά κύριο λόγο στις 11:00 – 13:00 τις καθημερινές (τοπική ώρα) αλλά και 16:00 - 18:00, ώρες δηλαδή που τα εμπορικά καταστήματα είναι ανοικτά και χαρακτηρίζονται εργάσιμες ώρες. Παρακάτω θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα και τα Σαββατοκύριακα, όπου το Σάββατο αν και δεν είναι αποτελεί καθιερωμένη εργάσιμη μέρα έχει παρόμοιο μοτίβο F_c με τις καθημερινές σε αντίθεση με την Κυριακή όπου οι τιμές διαφέρουν εξαιρετικά με όλες τις προηγούμενες μέρες.

Η παρατήρηση συνεχίζεται στα ημερήσια πρότυπα του κάθε μήνα όπου γίνονται εμφανείς οι διαφορές και μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Προφανώς, αλλαγές γίνονται αισθητές και σε μεγαλύτερη κλίμακα μελέτης, ιδίως τους χειμερινούς μήνες, όπου τις απογευματινές και βραδινές ώρες γίνεται εντονότερη χρήση σωμάτων θέρμανσης που χρησιμοποιούν είτε ηλεκτρικό ρεύμα, είτε ορυκτά καύσιμα. Τα τελευταία επηρεάζουν σε ένα βαθμό τις μελετώμενες ροές. Σε αυτή τη λογική μελετήθηκαν και οι μηνιαίες ροές CO_2 σε σύγκριση με την διακύμανση της θερμοκρασίας. Καθώς, διαφαίνεται η σημαντική διαφορά των συστημάτων κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων για θέρμανση στον αστικό ιστό.

Ακόμα, αναλύθηκαν τα δεδομένα κατεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου και κατασκευάστηκαν εποχιακά wind roses (γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να δώσει μια συνοπτική εικόνα του τρόπου με τον οποίο η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου κατανέμονται συνήθως σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία) ώστε να γίνουν ευκρινέστερα τα πρότυπα ανέμου στην περιοχή και να αναγνωριστούν τα τόξα με τη μεγαλύτερη συχνότητα μετρήσεων. Για τα πρότυπα ανέμου βρέθηκε ότι τους καλοκαιρινούς μήνες κυριαρχούν οι βορειοδυτικοί άνεμοι ενώ για τους χειμερινούς οι νοτιοδυτικοί.

Τελικό στάδιο αποτελεί, η εκτίμηση του αποτυπώματος ροής των λήψεων του μικρομετεωρολογικού πύργου (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης) μέσω του μοντέλου FFP (Flux Footprint Prediction). Συγκρίνοντας τα Wind Roses και τα FFP μπορούμε να αποφανθούμε ποιες από τις περιοχές λήψεων έπαιξαν κρίσιμο ρόλο στις μετρήσεις μας, όπως τη συνεισφορά των κύριων κυκλοφοριακών αρτηριών του Ηρακλείου, κατά πόσο οι μετρήσεις έρχονται από αμιγείς οικιστικές ή εμπορικές περιοχές.

Σκοπός

Το κέντρο του Ηρακλείου αποτελεί μία πολύτιμη περιοχή μελέτης στο παγκόσμιο δίκτυο αστικών σταθμών EC λόγω της ιδιαιτερότητας της αστικής μορφολογίας, τύπων κάλυψης και κλίματος. Αποτελεί τον μόνο ενεργό σταθμό EC που λειτουργεί σε παραλιακή πόλη με τυπικό Μεσογειακό κλίμα. Εγκαταστάθηκε το φθινόπωρο του 2016, ενώ τον Ιανουάριο του 2018, μετά από απόφαση των αρμόδιων αρχών, ξεκίνησαν οι κυκλοφορικές ρυθμίσεις στο κέντρο του Ηρακλείου και τα έργα ανάπλασης κεντρικών δρόμων.

Οι κύριοι στόχοι:

- Δημιουργία ιστορικού εκπομπών CO_2 για το Ηράκλειο και συνεισφορά στην παγκόσμια καταγραφή εκπομπών από αστικές περιοχές.
- Αναγνώριση των χρονικών και χωρικών προτύπων ανέμου και ημερήσιων ροών CO_2 .
- Μελέτη της συνεισφοράς των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα πρότυπα εκπομπών.
- Εξέταση βέλτιστων τακτικών για την ανάλυση μακρών χρονοσειρών αστικών εκπομπών CO_2 .
- Μοντελοποίηση των περιοχών μέτρησης (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης), λαμβάνοντας υπ' όψιν την αστική μορφολογία.
- Συνδυασμός δεδομένων τηλεπισκόπησης με δεδομένα EC για την αναλυτική έρευνα των χωρικών προτύπων εκπομπών.
- Μελέτη των επιδράσεων που μπορεί να έχουν οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις του κέντρου του Ηρακλείου στις εκπομπές CO_2 .

Απώτεροι στόχοι της μελέτης είναι η εξεύρεση βέλτιστων λύσεων πολεοδόμησης των πόλεων αλλά και κατάλληλη ανάπτυξη πράσινων περιοχών στον αστικό ιστό. Επίσης, η συνεισφορά στη χάραξη τοπική και παγκόσμιας πολιτικής για την σταδιακή καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής με διαρκή ενημέρωση των αρμόδιων αρχών και των πολιτικών υπευθύνων.

Εισαγωγή

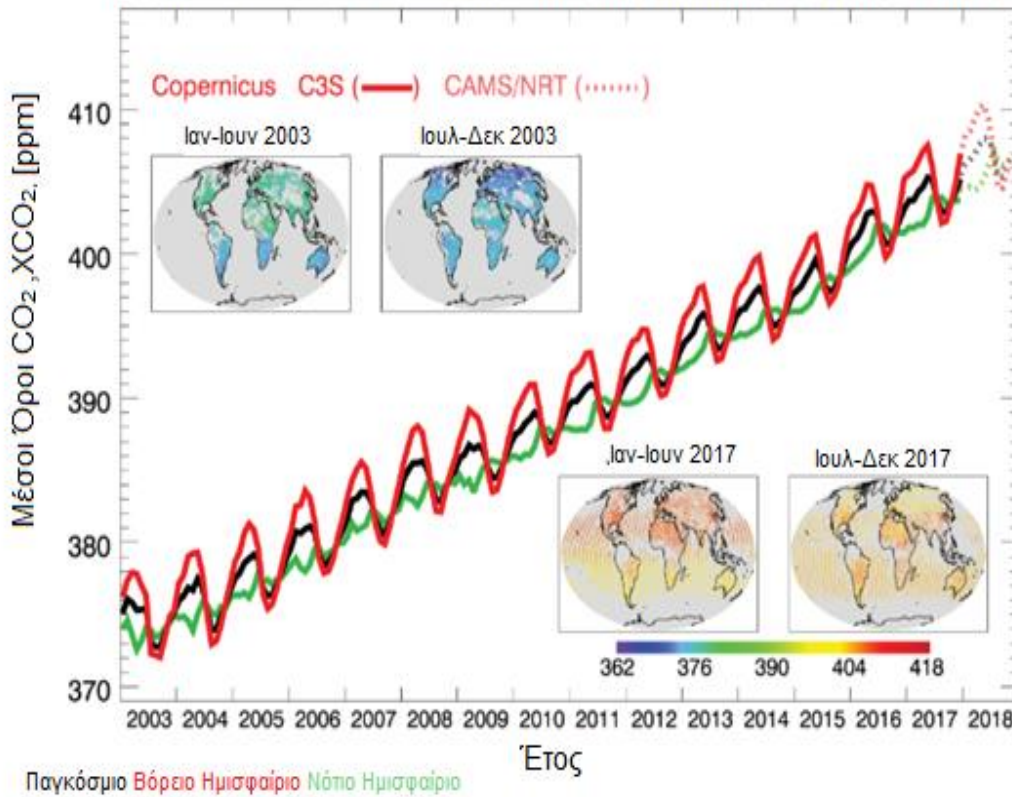
Τις τελευταίες δεκαετίες οι επιστήμονες έχουν εναποθέσει έντονη προσπάθεια ώστε να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που υφίστανται και καθορίζουν τη σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα μείγμα διαφόρων αερίων σε διαφορετικές ποσότητες. Τα μόνιμα αέρια των οποίων τα ποσοστά δεν αλλάζουν από μέρα σε μέρα είναι το άζωτο, το οξυγόνο και το αργό. Το άζωτο (N) αντιπροσωπεύει το 78% της ατμόσφαιρας, το οξυγόνο (O_2) 21% και το αργό (Ar) 0,9%. Αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το μεθάνιο (CH_4) και το όζον (O_3) είναι ιχνοστοιχεία που αντιπροσωπεύουν περίπου το 0.1% της ατμόσφαιρας.

Τα αέρια θερμοκηπίου - H_2O , CO_2 , CH_4 , NO_x , O_3 - τα ποσοστά των οποίων ποικίλουν καθημερινά, εποχιακά αλληλεπιδρούν στην ατμόσφαιρα επηρεάζοντας την ενεργειακή ισορροπία του πλανήτη. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι επιστήμονες παρακολουθούν προσεκτικά την παρατηρούμενη αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου, όπως το CO_2 και το CH_4 , επειδή, αν και είναι μικρά σε ποσότητα, μπορούν να επηρεάσουν έντονα το παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο και τη θερμοκρασία με την πάροδο του χρόνου [1]. Οι ροές αερίων θερμοκηπίου και η συνεχής αύξηση τους είναι ένα γεγονός που απασχολεί την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα από την οποία γίνονται δράσεις μελέτης και καταγραφής τους, όπως άλλωστε λαμβάνει χώρα σήμερα σε πολλές χώρες παγκοσμίως [2]. Το CO_2 υπήρξε το πρώτο αέριο του θερμοκηπίου για το οποίο έγιναν εκτενείς έρευνες, προσπάθεια η οποία ξεκίνησε στην Mauna Loa, Hawaii το 1958 [3]. Μία πρόσφατη απεικόνιση της αύξησης του ατμοσφαιρικού CO_2 που βασίζεται σε δορυφορικά δεδομένα φαίνεται στην εικόνα 1.1. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να μελετηθούν οι επιπτώσεις αυτών των αερίων ξεχωριστά ώστε να εκτιμηθεί η πραγματική επιρροή τους στην θέρμανση που προκαλούν σε συγκεκριμένο χρόνο, ώστε να αναπτυχθούν και να ακολουθηθούν ανάλογες στρατηγικές από τα κράτη και τους διεθνείς οργανισμούς.

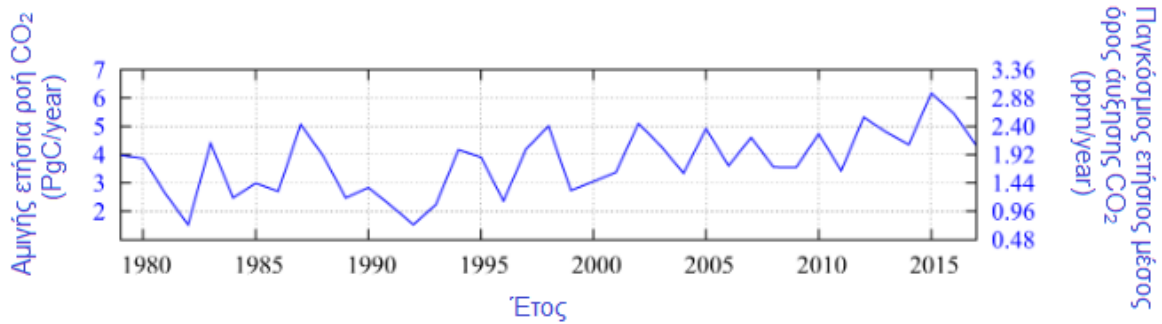
Η αύξηση του CO_2 σε παγκόσμια κλίμακα

Οι συγκεντρώσεις CO_2 έχουν αυξηθεί από τα 280 ppmv (parts per million per volume- μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο) στα προβιομηχανικά χρόνια, στα 406 ppm τον Νοέμβριο του 2018[4]. Αδιαμφισβήτητα, αυτό οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα, με την καύση ορυκτών καυσίμων αλλά και με τη κατάχρηση της χέρσας Γης. Η ατμοσφαιρική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται κατά μέσο όρο 0,5% ετησίως, ειδικότερα η αύξηση έγκειται σε $2,5 \text{ ppm } y^{-1}$ [5], αύξηση η οποία ξεκινά από την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης και συνεχίζεται έως σήμερα. Η διαρκής παρακολούθηση και καταγραφή των εκπομπών CO_2 , αποτελεί σύγχρονο αντικείμενο μελέτης καθώς συναντάται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται ο ρυθμός εκπομπών CO_2 σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και η μεταβολή του σε βάθος χρόνου. Ακόμα, σημαντική πρόοδος αποτελεί και ο εντοπισμός του τρόπου κατανομής των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα αλλά και των κύριων παραγόντων που επιδρούν στην κλιματική αλλαγή.

Διοξείδιο του Άνθρακα CO₂ ατμόσφαιρας μέσω παρατήρησης δορυφόρων



Εικόνα 1.1 Χρονοσειρές και διάγραμμα μέσων όρων ανάμειξης ξηρού αέρα και CO₂ που προέρχονται από δορυφόρο, και εκφράζεται σε XCO₂, μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Οι χρονολογικές σειρές εμφανίζονται για τρεις ζώνες γεωγραφικού πλάτους: Παγκόσμιο (μαύρο), Βόρειο ημισφαίριο (κόκκινο) και Νότιο ημισφαίριο (πράσινο). Πηγή δεδομένων: 2003-2017 C3S / Obs4MIPs (v3.1) και αρχικά δεδομένα για το 2018 από CAMS. Υπηρεσία Copernicus για την κλιματική αλλαγή (C3S) / Υπηρεσία παρακολούθησης της ατμόσφαιρας Copernicus (CAMS) / ECMWF / Πανεπιστήμιο της Βρέμης. Οι δορυφόροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των παραπάνω είναι για την C3S από τα δορυφορικά όργανα SCIAMACHY στον ENVISAT και Tanso-FTS που βρίσκεται επί του ιαπωνικού δορυφόρου GOSAT, ενώ για το CAMS το προϊόν έχει ανακτηθεί σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (NRT) από τον δορυφόρο GOSAT.[5]



Εικόνα 1.2 Αμείγρη ετήσια παγκόσμια ροή CO₂ στην ατμόσφαιρα τα οποία έχουν εκτιμηθεί από την Υπηρεσία Ατμοσφαιρικής Παρακολούθησης Copernicus (CAMS: Copernicus Atmosphere Monitoring Service). Οι μονάδες μέτρησης αριστερά του γραφήματος αποτελούν την συνολική μάζα του CO₂ ανά έτος, ενώ στα δεξιά αποτελούν τα συνολικά μέρη ανά εκατομμύριο ανά έτος. [5]

Ο κύκλος του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα παίζει έναν αναπόσπαστο ρόλο στον κύκλο άνθρακα της Γης, οπότε οι τρόποι με τους οποίους απορροφάται και εκπέμπεται, και γενικότερα η μεταφορά του στο περιβάλλον, αποτελεί το πρωταρχικό ερώτημα σε τέτοιες μελέτες. Μετά από παρατηρήσεις βλέπουμε ότι το διοξείδιο του άνθρακα αρχικά αλληλεπιδρά άμεσα μεταξύ ζωντανών οργανισμών και περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα έχουμε τη μετακίνηση του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, του εδάφους κ.α. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα κύρια μέρη που εναποτίθεται και εκπέμπεται εντονότερα το διοξείδιο του άνθρακα.

Δεξαμενές εκπομπών CO₂

Μία δεξαμενή άνθρακα είναι μια φυσική ή τεχνητή δεξαμενή που απορροφά και αποθηκεύει τον άνθρακα της ατμόσφαιρας με φυσικούς και βιολογικούς μηχανισμούς. Μετά από μακρές διεργασίες και κάτω από ορισμένες συνθήκες, αυτές οι δεξαμενές έχουν αποθηκεύσει άνθρακα για χιλιετίες. Οι σπουδαιότεροι μηχανισμοί άντλησης του CO₂ αποτελούν οι ωκεανοί, τα ιζηματογενή ανθρακικά πετρώματα, η βίοςφαιρα, τα δάση και φυσικά η ατμόσφαιρα. Ανάμεσα στα παραπάνω υπάρχουν υπάρχουν κύκλοι σχηματισμού και καταστροφής CO₂.

Ωκεανοί

Οι ωκεανοί διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη ρύθμιση του κλίματος, απορροφώντας περίπου το 40% του άνθρακα μέσω των ψυχρών υδάτων του Νότιου Ωκεανού, γύρω από την Ανταρκτική. Από εκεί, τα ρεύματα μεταφέρουν τον άνθρακα προς Βορρά. Φυσικά, οι θαλάσσιοι βιότοποι επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη μείωση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO₂. Έχει αναφερθεί ότι η ανάπτυξη φυτοπλαγκτόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του CO₂.

Ατμόσφαιρα

Το CO_2 εισέρχεται στην ατμόσφαιρα κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), τις μεταβολικές διεργασίες της βιόσφαιρας, τις αναθυμιάσεις ηφαιστείων και από την αποψίλωση των δασών. Στην ατμόσφαιρα επίσης παρατηρείται το φαινόμενο της απομάκρυνσης του CO_2 που γίνεται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Έδαφος

Τα εδάφη του πλανήτη περιέχουν περισσότερο άνθρακα από τα συνδυασμένα συνολικά ποσά που εμφανίζονται στη βλάστηση και στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, τα εδάφη είναι μεγάλη δεξαμενή άνθρακα. Οι αλλαγές στην χρήση της γης και η προβλεπόμενη υπερθέρμανση του πλανήτη, λόγω των επιπτώσεών τους στην καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα, στην φυτική κοινότητα και στις εδαφολογικές συνθήκες, μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο μέγεθος της δεξαμενής οργανικών υλών στο έδαφος.

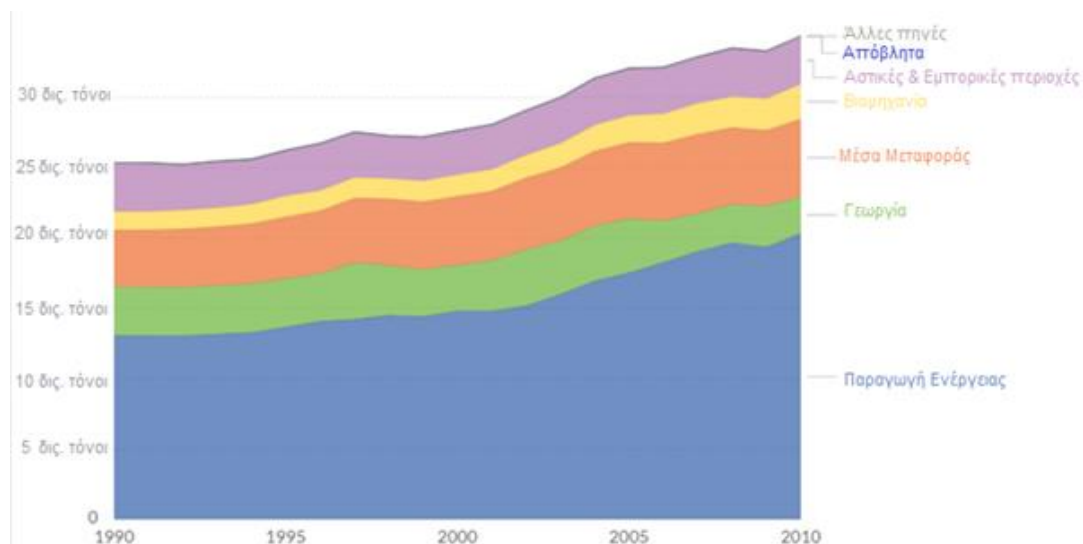
Δάση

Τα δάση λειτουργούν ως αποθετήρια [6] άνθρακα όταν αυξάνονται σε πυκνότητα ή έκταση. Σε ορισμένα δάση, ο άνθρακας μπορεί να αποθηκευτεί για αιώνες.

Πηγές εκπομπής CO_2

Σε παγκόσμια κλίμακα γίνεται καταγραφή και κατανομή των πηγών που συμβάλλουν στην αύξηση των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τα δεδομένα που ακολουθούν βασίζονται σε στοιχεία του ΟΗΕ που προέρχονται από τη βάση δεδομένων EDGAR[7].

- **Ενέργεια (βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας)** : συμπεριλαμβάνουν τη δημόσια παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, ενεργειακές βιομηχανίες και ανεξέλεγκτες εκπομπές από στερεά καύσιμα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο κ.α.
- **Μεταφορές**: Πτήσεις εσωτερικού, οδικές μεταφορές, σιδηροδρομικές μεταφορές, ναυσιπλοΐα εσωτερικού, άλλες μεταφορές.
- **Πτήσεις εξωτερικού**. διεθνής ναυσιπλοΐα
- **Κατοικίες, εμπορικές, θεσμικές**: Οικιστικοί και άλλοι τομείς.
- **Βιομηχανία (βιομηχανικές διεργασίες και χρήση προϊόντων)**: παραγωγή ορυκτών, χημικών, μετάλλων, χαρτοπολτού / χαρτιού / τροφίμων / ποτών, αλογονούχων αλάτων, ψύξης και κλιματισμού. αερολύματα και διαλύτες. παραγωγή ημιαγωγών / ηλεκτρονικών ειδών. ηλεκτρολογικός εξοπλισμός.
- **Απόβλητα**: διάθεση στερεών αποβλήτων. διαχείριση λυμάτων · αποτέφρωση αποβλήτων · άλλοι χειρισμοί αποβλήτων.
- **Γεωργία**: Καλλιεργήσιμη γη, λιβάδια και καύση βιομάζας για γεωργικές ή άλλες χρήσεις.
- **Άλλες πηγές**: Καύση ορυκτών καυσίμων, άλλες ανθρωπογενείς πηγές.



Εικόνα 1.3 Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα ανά πηγή, σε παγκόσμια κλίμακα [8].

Η επίδραση της αστικοποίησης στην κλιματική αλλαγή

Οι εκπομπές CO_2 σχετίζονται με την οικονομική ανάπτυξη, την ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου, την αστικοποίηση καθώς και με την εκβιομηχάνιση. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της ραγδαίας αύξησης της κατανάλωσης αγαθών και χρήσεως υπηρεσιών, όπως η άντληση πόρων για την παραγωγή, τη διανομή, την πώληση αλλά ακόμα και τη χρήση, υπάρχει η αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Σε δεύτερη ανάγνωση, οι δημογραφικές αλλαγές έχουν και αυτές σημαντικό ρόλο στην παραπάνω αύξηση, όχι μόνο λόγω της αύξησης του πληθυσμού της Γης, αλλά και λόγω της διάρθρωσης των πόλεων και των εκπομπών που αυτές δημιουργούν. Επίσης, η αστική επέκταση στις τροπικές περιοχές είναι υπεύθυνη για το 5% των ετήσιων εκπομπών από την αλλαγή χρήσης γης. Οι κάτοικοι αστικών περιοχών ελέγχουν επί του παρόντος το ~ 22 (12-40)% της πρόσληψης άνθρακα από την γη (112 PgC / έτος) και ~ 24 (15-39)% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (117 PgC / έτος) από τη γη παγκοσμίως [9].

Μεθοδολογίες υπολογισμού εκπομπών CO_2

Σε πιο σύγχρονες μελέτες η εκτίμηση ροών διοξειδίου του άνθρακα επιτυγχάνεται μέσω απομακρυσμένης παρακολούθησης από δορυφόρους, από συστηματική καταγραφή δεδομένων CO_2 από αρτηρίες κυκλοφορίας εντός πόλεως, βάσει μοντέλων εκτιμήσεων σε τοπική κλίμακα των εκπομπών [10], ακόμα και από την χρήση GPS και της παρατήρησης της τροχιάς των αυτοκινήτων.

Η επίτευξη εκτιμήσεων-παρακολούθησης της αύξησης του CO_2 είναι στόχος της παγκόσμιας κοινότητας τις τελευταίες δεκαετίες. Αρκετές προσπάθειες έχουν λάβει χώρα και ένα σύνολο μεθόδων συγκεντρώνονται. Σε παγκόσμια κλίμακα γίνεται προσπάθεια δημιουργίας ιστορικού βασισμένου στις εκπομπές CO_2 με γνώμονα να παραχθούν στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής τακτικές επιστημονικές εκτιμήσεις

σχετικά με την αλλαγή του κλίματος, τις επιπτώσεις και τους δυνητικούς μελλοντικούς κινδύνους, καθώς και να προτείνει επιλογές προσαρμογής και μετριασμού.

Επιπλέον, πραγματοποιούνται μέσω δικτύου συμβαλλόμενων Χωρών του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (Ο.Η.Ε.) Εθνικές Εκθέσεις Απογραφής (NIR) που περιέχουν λεπτομερείς Πίνακες που περιέχουν όλες τις εκπομπές και απορροφήσεις αερίων του θερμοκηπίου. Κάθε χρόνο δημοσιεύονται στον ιστότοπο της ετήσιες καταστάσεις απογραφής που συνίστανται από την εθνική έκθεση απογραφής (NIR).

Όσον αφορά στην ανάπτυξη, η προτεραιότητα στην ενεργειακή πολιτική είναι να υποστηριχθούν πολιτικές που υποστηρίζουν την οικολογική συνείδηση, μειώνοντας την ενεργειακή ανάγκη και κάνοντας χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πολλές από τις βασικές τεχνολογίες για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες και τα αυτοκίνητα με πολύ μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος Copernicus έχει δημιουργήσει μοντέλα παρακολούθησης και εκτίμησης του CO₂ με σκοπό τη δημιουργία και διαθέση δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση και μελέτη. Ακόμα, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), η οποία αριθμεί 195 χώρες μέλη, αξιολογεί επιστημονικές, τεχνικές και κοινωνικοοικονομικές πληροφορίες σχετικές με την κατανόηση οι κλιματικές αλλαγές που προκαλούνται από τον άνθρωπο, οι δυνητικές επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος και οι επιλογές για μετριασμό και προσαρμογή. Η IPCC έχει ολοκληρώσει τέσσερις εκθέσεις αξιολόγησης, έχει αναπτύξει μεθοδολογικές κατευθυντήριες γραμμές για τις εθνικές απογραφές αερίων θερμοκηπίου, ειδικές εκθέσεις και τεχνικές εργασίες.

Οι δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα από το εξωτερικό χώρο. Η NASA εκμεταλλεύεται σήμερα ένα δορυφόρο που ονομάζεται (OCO-2), ενώ η Ιαπωνία διαθέτει δικό της δορυφόρο, το Satellite Gases Observing Satellite (GOSAT). Αυτοί οι δορυφόροι μπορούν να παράσχουν πολύτιμες πληροφορίες για να καλύψουν τα κενά δεδομένων από τα αποθέματα εκπομπών. Η Κίνα ξεκίνησε πρόσφατα το δικό της δορυφόρο για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στη Γη, το TanSat, τον Δεκέμβριο του 2016.

Ποικίλα ατμοσφαιρικά μοντέλα που διαμορφώνουν την ατμοσφαιρική μεταφορά διοξειδίου του άνθρακα έχουν περιορισμένη ικανότητα να καθορίζουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε πολύ επιλυμένες χωρικές κλίμακες και συνήθως δεν μπορούν να αντιπροσωπεύουν λεπτότερες κλίμακες έτσι πλέον συνδυάζονται με δορυφορικά δεδομένα ώστε να αποδοθεί μία καλύτερη εκτίμηση. Τα μοντέλα δημιουργούνται στην κατεύθυνση να προσδιορίσουν και να καταλήγουν τις ροές του διοξειδίου του άνθρακα από ανθρωπογενείς πηγές όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και από φυσικές αλληλεπιδράσεις.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την συμπλήρωση των παραπάνω εκθέσεων είναι αρχικά από τα Εθνικά Στατιστικά Συστήματα παρέχουν ένα ευρύ φάσμα δεδομένων που μπορεί να σχετίζονται με την κατάρτιση απογραφής GHG. Αυτά τα στατιστικά συστήματα συλλέγουν δεδομένα σε τακτική βάση και θεσπίζουν πρότυπα για την ποιότητα των δεδομένων. Ακόμα, σε εθνικό επίπεδο δημιουργούνται

κατάλογοι απογραφής των αερίων του θερμοκηπίου από πόλεις, πολιτείες, επαρχίες, εδάφη και μητρώα εκπομπών. Άλλες διαδικασίες συλλογής δεδομένων περιλαμβάνουν την αναφορά περιβαλλοντικών δεδομένων και δεδομένων βιωσιμότητας, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών και των απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου (π.χ. για την υποστήριξη δεικτών για τους στόχους αειφόρου ανάπτυξης του ΟΗΕ και τους εθνικούς στατιστικούς περιβαλλοντικούς οικονομικούς λογαριασμούς). Επίσης, διάφορες ερευνητικές εργασίες αλλά και εμπειρογνώμονες καλούνται να καταγράψουν τις μεθόδους και τις μετρήσεις τους ώστε να συνεισφέρουν στην καταγραφή.

Επί του παρόντος, οι περισσότερες κυβερνήσεις, συμπεριλαμβανομένης της κυβέρνησης των ΗΠΑ, εκτιμούν τις εκπομπές άνθρακα χρησιμοποιώντας παράγοντες εκπομπών οι οποίοι δίνουν το ρυθμό εκπομπών άνθρακα ανά μονάδα μιας συγκεκριμένης δραστηριότητας και στοιχεία σχετικά με το πόσο μέρος αυτής της δραστηριότητας. [11]

Με δεδομένα λοιπόν, τα παραπάνω, η μελέτη αερίων του θερμοκηπίου, αποτελεί μείζον ζήτημα στη χάραξη πολιτικής σε διάφορα επίπεδα. Η καταγραφή, όπως θα δούμε επόμενα, όταν έγκειται σε τοπικό επίπεδο μπορεί να χαρακτηρίσει εμφανώς καλύτερα τις ροές και να δώσει πιο συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές για τη στρατηγική που πρέπει να χρησιμοποιήσει π.χ. μία οικιστική περιοχή. Η τοπική συμβολή, σίγουρα, δεν θα φέρει τη λύση σε παγκόσμιο επίπεδο, μα ο χαρακτηρισμός, η καταγραφή και η παρατήρηση περιοχών που ομοιάζουν, μπορούν να ακολουθούν κοινή στρατηγική. Πάνω σε αυτήν την ιδέα είναι βασισμένη και αυτή η εργασία όπως και το πλήθος των μετρήσεων που καταγράφονται παγκοσμίως από οργανισμούς σε διεθνές ερευνητικό επίπεδο.

Χαρακτηριστικά ροής F_c

Η παραπάνω εισαγωγή θα μας κατευθύνει σε μία καλύτερη προσέγγιση της κίνησης του CO_2 στο αστικό περιβάλλον και επομένως στον τελικό υπολογισμό των ροών CO_2 . Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρουν και οι [12][13] και[14], για αστικό περιβάλλον σε τοπική κλίμακα, η ανταλλαγή CO_2 ή ροή F_c μεταξύ της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας εκφράζεται ως:

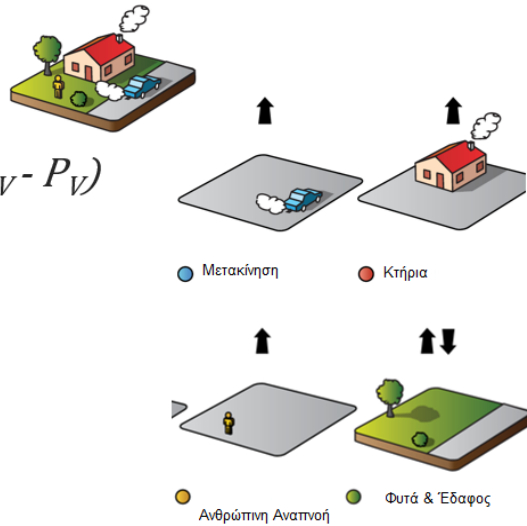
$$F_c = E_V + E_B + R_H + R_S + (R_V - P_V) \quad (1)$$

Ειδικότερα, οι παραπάνω όροι συγκαταλέγουν το πλήθος των παραγόντων που επηρεάζουν τη ροή σε συγκεκριμένο όγκο στην περιοχή μελέτης της αστικής περιοχής. Αναλυτικά, το E_V είναι εκπομπές από οχήματα, E_B από κτίρια, R_H από αναπνοή ανθρώπων και ζώων, R_S από την υπέδαφη αναπνοή σε χώμα, ρίζες ενώ το R_V αναφέρεται στην αναπνοή των φυτών πάνω από το έδαφος, τέλος το P_V αναφέρεται στην πρόσληψη CO_2 από τη φωτοσύνθεση. Η παραπάνω εξίσωση, συγκαταλέγει δηλαδή τις θετικές ροές προς την ατμόσφαιρα (καθαρές εκπομπές) και τις αρνητικές ροές προς την επιφάνεια (καθαρή πρόσληψη).

Ροή Διοξειδίου του Άνθρακα σε αστικό περιβάλλον

$$F_C = E_V + E_B + R_H + R_S + (R_V - P_V)$$

- F_C : Συνολική Ροή CO_2
- E_V : Εκπομπές από την κίνηση αυτοκινήτων
- E_B : Εκπομπές από τα κτήρια
- R_H : Ανθρώπινη Αναπνοή
- R_S : Αναπνοή Φυτών & Εδάφους
- R_V : Αναπνοή Φυτών & Εδάφους
- P_V : Φωτοσύνθεση (Απορρόφηση)



Εικόνα 1.4 Αναπαράσταση ισοζυγίου ροών σε αστικό περιβάλλον [15]

Η μέθοδος Eddy Covariance

Μικρομετεωρολογία & Χαρακτηριστικά Ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος

Οι πρώτες μικρομετεωρολογικές μετρήσεις έγιναν από αισθητήρες σε πύργους με μικρά ύψη και για αυτό το λόγο η μικρομετεωρολογία είναι συχνά συνδεδεμένη με φαινόμενα επιφανειακού στρώματος, όπως εξηγούμε παρακάτω. Η μεγάλη ποικιλία των κλιμάκων που υπεισέρχονται και η μεγάλη μεταβλητότητα στον κατακόρυφο άξονα, απαιτούν μεγάλες σειρές αισθητήρων όπως και επίσης χρήσης μπαλονιών, αεροπλάνων και εργαλείων και μεθόδων τηλεπισκόπησης. Παράλληλα με τις πειραματικές προσεγγίσεις οι μικρομετεωρολόγοι, δεδομένης της παροδικότητας της φύσης και φαινομένων μικρής κλίμακας που δεν επιτρέπει την καθοριστική καταγραφή τους, έχουν αναπτύξει τρεις βασικούς άξονες διερεύνησης του αντικειμένου[16].

- Στοχαστικές μέθοδοι, που ασχολούνται με τις μέσες στατιστικές επιδράσεις στροβίλων.

- Τη θεωρία ομοιότητας που ασχολείται με την εμφανή κοινή συμπεριφορά πολλών φαινομένων που παρατηρούνται εμπειρικά αφού οργανωθούν οι μεταβλητές που τα περιγράφουν σε ομάδες αδιαστατοποιημένων μεγεθών.

- Φαινομενολογικές ταξινομήσεις όπου οι δομές μεγαλύτερου μεγέθους όπως τα θερμικά ανοδικά ρεύματα ταξινομούνται και μερικές φορές περιγράφονται με έναν σχεδόν καθοριστικό τρόπο.

- Αριθμητικές και εργαστηριακές προσομοιώσεις, όπου ένα μεγάλο τμήμα της μελέτης της τυρβώδους κίνησης έχει γίνει εργαστηριακά χρησιμοποιώντας συνήθως νερό σαν ρευστό σε δοχεία. Αριθμητικές προσομοιώσεις γίνονται με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων έχοντας ξεκινήσει από το 1960.

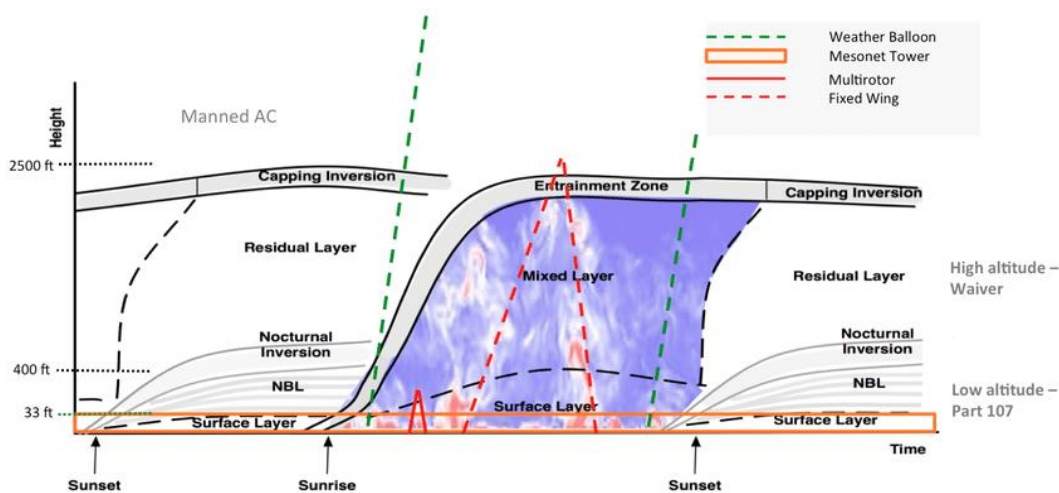
Η τεχνική Eddy Covariance (πλέον θα αναφέρεται ως EC) εφαρμόζεται σε αστικό περιβάλλον [17] για πάνω από μία δεκαετία, προσφέροντας πλήθος αποτελεσμάτων για ποικίλα αστικά κέντρα με διαφορετικούς τύπους δόμησης, κάλυψης, μορφολογίας, κλίματος, πληθυσμιακής κατανομής και γεωγραφικής έκτασης.

Ο βασικός χώρος μελέτης του αντικειμένου εντάσσεται στη φυσική ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, τη μικρομετεωρολογία, και πιο συγκεκριμένα στην κλιματολογία αστικού περιβάλλοντος. Η μικρομετεωρολογία είναι ένα κομμάτι της μετεωρολογίας που ασχολείται με τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και τις διεργασίες στο χαμηλότερο άκρο του φάσματος των ατμοσφαιρικών κλιμάκων που συνήθως χαρακτηρίζονται σαν μικροκλίμακες ή σαν διεργασίες τοπικής κλίμακας. Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (πλέον Α.Ο.Σ.) ορίζεται το στρώμα που έρχεται άμεσα σε επαφή με την επιφάνεια της γης και μέσω αυτού γίνονται σημαντικές ανταλλαγές ορμής, θερμότητας ή μάζας ανάμεσα στην επιφάνεια και το ρευστό [15]. Η επίδραση της επιφανειακής τριβής, της θέρμανσης κ.λ.π. διαδίδεται ταχύτατα και αποτελεσματικά σε όλο το Α.Ο.Σ. μέσω μηχανισμού της τυρβώδους μεταφοράς ή της ανάμειξης. Με τον ίδιο μηχανισμό μεταφέρεται επίσης μέσω του Α.Ο.Σ. προς την επιφάνεια ορμή, θερμότητα και μάζα. Το χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου στρώματος είναι η τυρβώδης κατάσταση η οποία ευρίσκεται καθώς οι διάφορες

μετεωρολογικές παράμετροι (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία κ.λ.π.) έχουν τυχαίες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή τους, συναρτήσει του χρόνου και του χώρου. Οι μηχανισμοί που δρουν για αυτήν την τυρβώδη κατάσταση είναι:

- Η μηχανική ανάμειξη καθώς ο αέρας φυσά πάνω από τραχιές επιφάνειες, οφειλόμενη στη δυναμική αστάθεια των μεγάλων βαθμίδων της ταχύτητας του ανέμου που παρατηρούνται στο χαμηλότερο στρώμα
- Η ανάμειξη οφειλόμενη σε ανωστικές δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω θερμικών αιτιών (buoyancy). Την ημέρα π.χ. λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας η επιφάνεια εδάφους θερμαίνεται με αποτέλεσμα να θερμαίνονται τα κατώτερα στρώματα του αέρα και να δημιουργούνται έντονες ανοδικές κινήσεις. Άρα, η ποσότητα του CO₂ που ίσως συγκεντρώνεται τις βραδινές ώρες στο αστικό περιβάλλον ανεβαίνει σε υψηλότερα στρώματα τις πρώτες πρωινές ώρες.

Πάνω λοιπόν από την ξηρά το Α.Ο.Σ. έχει μία πολύ καλά καθορισμένη δομή που αναπτύσσεται στη διάρκεια μίας μέρας. Το ύψος μεταβάλλεται, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα, και εξαρτάται από το ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης της επιφάνειας, τον άνεμο, την τραχύτητα και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, τις κατακόρυφες κινήσεις μεγάλης κλίμακας, την οριζόντια μεταφορά της θερμότητας κ.α. Η πολυπλοκότητα του αστικού περιβάλλοντος όσον αφορά στην μορφολογία και τους τύπους κάλυψης κάνουν το πρόβλημα πιο περίπλοκο καθώς πρέπει κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά της τύρβης και το πως η δόμηση και οι ανθρώπινες δραστηριότητες της πόλης επηρεάζουν την ροή του ατμοσφαιρικού αέρα και συνεπώς του CO₂. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα επιβραδύνεται ανάλογα με τη μορφολογία του αστικού περιβάλλοντος.

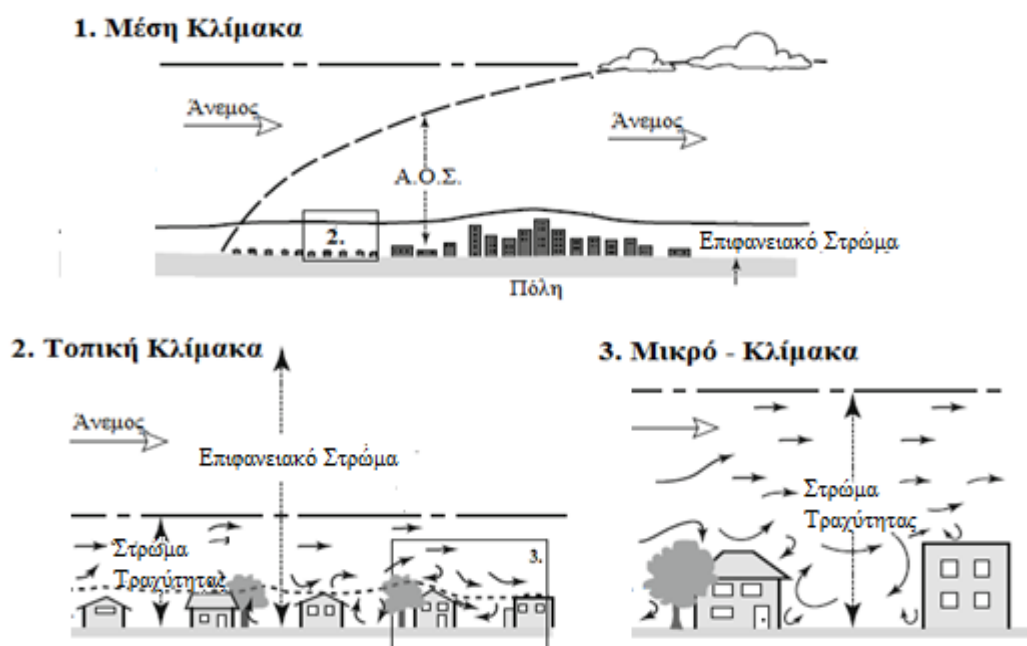


Εικόνα 2.1. Χρονική απεικόνιση ύψους της δομής του αστικού οριακού στρώματος (Α.Ο.Σ.) σε ένα ημερήσιο κύκλο. [18]

Κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά την ανατολή του ηλίου, η συνεχής θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο και η συνεπαγόμενη «θερμική ανάμειξη» στο Α.Ο.Σ. έχει σαν αποτέλεσμα το ύψος του Α.Ο.Σ. να αυξάνει σταθερά κατά τη διάρκεια της μέρας μέχρι και αργά το μεσημέρι που ξεκινά και πέφτει ο ήλιος. Ενώ, από τις απογευματινές ώρες και κατά τη διάρκεια της νύκτας που ελαττώνεται η παρουσία της

ηλιακής ακτινοβολίας έχουμε σαν αποτέλεσμα την συστολή ή την εξασθένηση της τυρβώδους ανάμειξης και κατά συνέπεια της συρρίκνωσης του ύψους του Α.Ο.Σ (Εικόνα 2.1).

Το Α.Ο.Σ. αποτελείται από το αναμειγμένο στρώμα (mixed layer) - ή συναντάται στη βιβλιογραφία και ως Α.Ο.Σ. κατακόρυφων κινήσεων (Convective Mixed Layer) – επειδή η τύρβη μπορεί να προκαλείται τόσο από θερμικά όσο και από μηχανικά αίτια και το επιφανειακό στρώμα (surface layer) που είναι η περιοχή στο κάτω μέρος του Α.Ο.Σ. και περιλαμβάνει τα πρώτα 20 με 50 μέτρα – γνωστό επίσης ως στρώμα σταθερής ροής (flux layer). Ένα ευσταθές στρώμα στην κορυφή του αναμειγμένου στρώματος περιορίζει την επικράτηση της τύρβης το οποίο καλείται και ζώνη εισροής (entrainment zone) επειδή η εισροή στο αναμειγμένο στρώμα συμβαίνει εκεί. Όταν λειτουργεί περιοριστικά για την τύρβη καλείται και ως στρώμα αναστροφής (inversion layer) ανεξάρτητα από το μέτρο της ευστάθειας. Το επιφανειακό στρώμα ενός αστικού οικοσυστήματος (Εικόνα 2.2) είναι το μόνο στρώμα του Α.Ο.Σ. που μπορούν να εφαρμοσθούν οι προσεγγίσεις ομοιογένειας και στατικότητας, δηλαδή θεωρούμε ότι οι μέσες τιμές των διαφόρων παραμέτρων είναι ανεξάρτητες της οριζόντιας θέσης και εξαρτώνται μόνο από το χρόνο και το ύψος.



Εικόνα 2.2 Κατακόρυφη κατανομή στρωμάτων στο αστικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ.) και οριζόντιες κλίμακες (1. Μέση κλίμακα, 2. τοπική κλίμακα, 3. Μικρό Κλίμακα) [19].

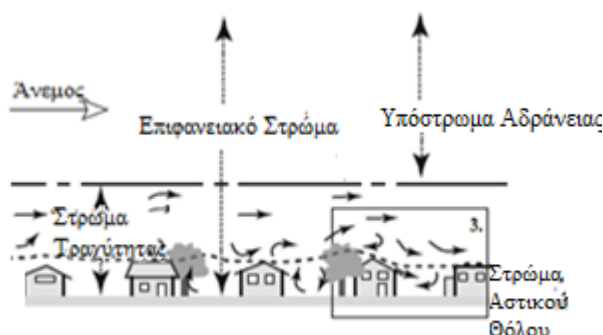
Ένας δεύτερος διαχωρισμός που συναντάται συχνά σε μελέτες με χρήση EC είναι ο εξής[20]:

- **Λεπτόστρωμα στρωτής ροής** το οποίο είναι το στρώμα που είναι σε επαφή με το έδαφος.
- **Στρώμα Τραχύτητας** Τα επόμενα 10-50 μέτρα συνιστούν αυτό το στρώμα, στο οποίο είναι ιδιαίτερος έντονο το φαινόμενο της τύρβης, ενώ επηρεάζεται από την

τοπογραφία. Το άνω όριο αυτού του στρώματος είναι η περιοχή πάνω από το έδαφος, στην οποία δεν αναπτύσσεται πλήρως η τύρβη.

- **Επιφανειακό Στρώμα** το οποίο και εκτείνεται έως τα 200 μέτρα περίπου από την επιφάνεια του εδάφους.
- **Το στρώμα Ekman** εκτείνεται πάνω από τα 200 μέτρα περίπου μέχρι το άνω όριο του οριακού στρώματος.

Το επιφανειακό στρώμα μπορεί να χωριστεί, εννοιολογικά εκ νέου, σε δύο υποστρώματα. Αρχικά το στρώμα τραχύτητας, όπως παραπάνω, και το υπόστρωμα αδράνειας[17].



Εικόνα 2.3 Κατακόρυφη κατανομή στρωμάτων στο αστικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ.) σε τοπική κλίμακα. Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται το ύψος που προσεγγίζει το στρώμα αστικού θόλου.

Εξηγώντας τον παραπάνω ισχυρισμό είναι αναγκαίο να εισάγουμε κάποιες έννοιες, όπως:

Το χαμηλότερο μέρος του αστικού στρώματος τραχύτητας ορίζεται ως το ύψος από την επιφάνεια της Γης έως το μέσο ύψος κτηρίων, και θα αναφέρεται πλέον ως z_H και ονομάζεται στρώμα αστικού θόλου. Οι συνθήκες που περιβάλλουν αυτό το στρώμα, δηλαδή το υπόστρωμα, συντελούν ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να το εξετάζουμε σαν ένα μέρος της ατμόσφαιρας που χαρακτηρίζεται από την δική της συγκεκριμένο κλίμα.

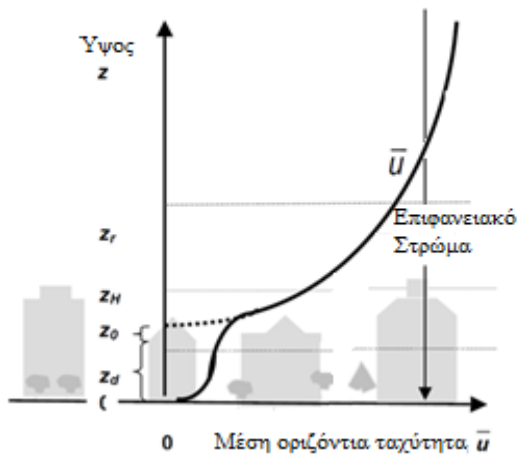
Ακόμα, βασικό ρόλο στη μελέτη έχουν οι κάθετες ροές στο αστικό υπόστρωμα τραχύτητας που ορίζεται από την επιφάνεια της Γης έως και το χώρο που ξεκινά η ανάμειξη των ροών και χαρακτηρίζεται ως z_r . Το z_r έχει εύρος ανάλογα με την δομή της πόλης, δηλαδή είναι χαμηλότερο σε πυκνοδομημένες περιοχές και υψηλότερο όταν η δόμηση είναι πιο αραιή, οπότε σύμφωνα με τη δομή της πόλης του Ηρακλείου εκτείνεται στο εύρος :

$$z_H * 1,5 < z_r < z_H * 5,0 \quad [21]. \quad (2)$$

Οι μετρήσεις EC πάνω από z_r , δηλαδή, στο Inertial Sublayer, δίνουν το χωρικό μέσο σήμα το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό της τοπικής κλίμακας[17].

Στη συνέχεια, θα πρέπει να χαρακτηρίσουμε τα εκάστοτε ύψη στον αστικό ιστό ανάλογα με την ύπαρξη ή μη υπάρξης αντικειμένων τραχύτητας. Πρακτικά, αναφερόμαστε σε επιφάνειες που δεν είναι ομαλές. Τα χαρακτηριστικά των επιφανειών που οδηγούν στην τραχύτητα είναι συνήθως κατανεμημένα πολύ κοντά το ένα στο

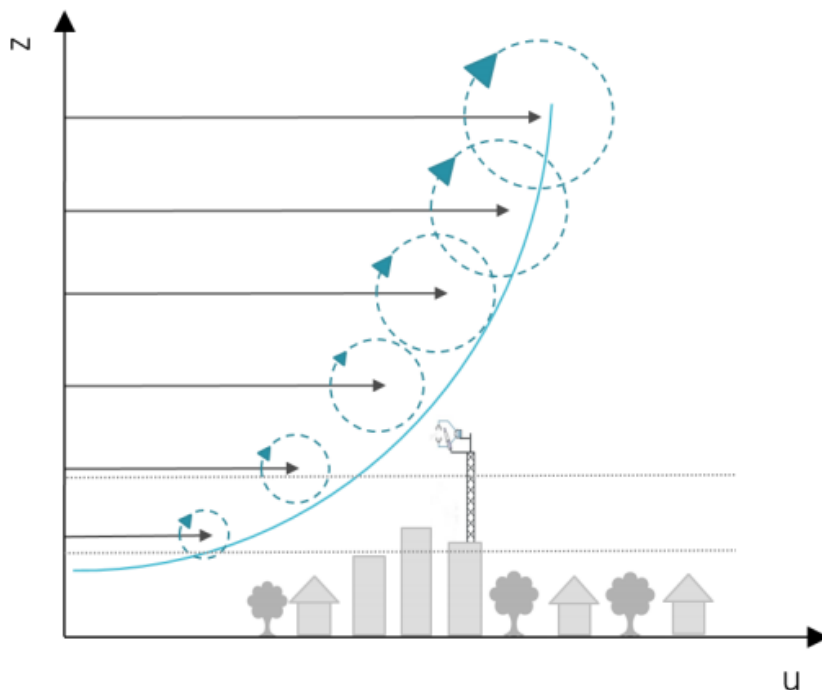
άλλο (θάμνοι, γρασίδι) αλλά σημασία έχει το ύψος των στοιχείων τραχύτητας, όχι η κατανομή στο χώρο. Έτσι, χαρακτηρίζουμε το ύψος από το έδαφος όπου μηδενίζεται η λογαριθμική καμπύλη ελάττωσης της ταχύτητας του ανέμου (Εικόνα . 2,4) σε περίπτωση μη ύπαρξης αντικειμένων τραχύτητας στην οριζόντια επιφάνεια z_0 . Ενώ, ονομάζουμε z_d , το ύψος που μετατοπίζεται προς τα επάνω η καμπύλη ελάττωσης της ταχύτητας του ανέμου λόγω της ύπαρξης αντικειμένων τραχύτητας (κτήρια, δέντρα). [20] Ως z_{om} ορίζουμε το μήκος τραχύτητας. Πρόκειται για ένα θεωρητικό ύψος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδέν.[22]



Εικόνα. 2.4 Χαρακτηρισμός ύψους στον αστικό ιστό.

Τυρβώδεις ροές

Η τύρβη στο Α.Ο.Σ. είναι υπεύθυνη για την ανάμειξη ή διάχυση ορμής, θερμότητας και μάζας. Η μεγάλης κλίμακας διάχυση της τύρβης είναι συνήθως πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη μοριακή διάχυση. Η τυρβώδης διάχυση είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνη για την εξάτμιση στην ατμόσφαιρα καθώς επίσης για τη διασπορά των ρύπων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Ένα περιστρεφόμενο στοιχείο του αερίου μπορεί να διαδοθεί κατ' ευθείαν και να επεκταθεί από το πεδίο μίας ροής μεγαλύτερης κλίμακας που χαρακτηρίζεται από βαθμίδες ταχύτητας όπως στην Εικόνα 2.4. Στη διεργασία της επέκτασης η στροφορμή διατηρείται, αλλά η γωνιακή και η γραμμική ταχύτητα αυξάνονται. Με αυτόν τον τρόπο η τύρβη τροφοδοτείται από τη μέση ροή και η κινητική ενέργεια περνά από τη μέση ροή στην τύρβη. Οι μικροί στρόβιλοι τροφοδοτούνται από την κινητική ενέργεια ελαφρά μεγαλύτερων κινήσεων καθώς επεκτείνονται από τη βαθμίδα της ταχύτητας αυτών των μεγαλύτερων στροβίλων. Το αποτέλεσμα είναι μία συνεχής κλίμακα τύρβης στην ολόενα μικρότερης κλίμακας κίνηση. Η αναλογία του μείγματος ελαττώνεται με το ύψος ακόμη και στο κεντρικό τμήμα του αναμειγμένου στρώματος. Οι περισσότερες πηγές ρύπων είναι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μεταφέρονται με στροβίλους. Οι ταχύτητες του ανέμου ελαττώνονται με το ύψος ακόμη και γίνονται μηδέν, πλησιάζοντας το έδαφος, με αποτέλεσμα να ισχύει στο επιφανειακό στρώμα μία κατανομή του ανέμου σχεδόν λογαριθμική συναρτήσει του ύψους.



Εικόνα 2.5 Συμπεριφορά τύρβης συναρτήσει του ύψους (z) και της ταχύτητας του ανέμου (u) [15].

Η τύρβη συνηθίζεται να περιγράφεται ποιοτικά με στροβίλους (eddies). Το eddy δεν είναι μία καθορισμένη δομή που μπορεί να μελετηθεί απομονωμένα και γενικότερα θεωρείται ότι η τυρβώδης ροή αποτελείται από μία ιεραρχία eddies ενός ευρέως φάσματος μεγεθών (κλιμάκων μήκους). Το εύρος των μεγεθών των στροβίλων

αυξάνει με τον αριθμό Reynolds, όπως θα παρουσιασθεί και στην επόμενη παράγραφο, της όλης μέσης ροής. Η μεταβίβαση της ενέργειας από τη μέση ροή στην τυρβώδη συμβαίνει στις μεγάλες κλίμακες (large eddies) ενώ η μοριακή κατανάλωση της τυρβώδους ενέργειας συμβαίνει στις μικρότερες κλίμακες (small eddies). Απαραίτητες πληροφορίες για το μέγεθος των στροβίλων και τις κλίμακες των κινήσεων στο Α.Ο.Σ. δίνουν οι μετρήσεις σε ένα σημείο του χώρου για μία μεγάλη χρονική περίοδο. Την ίδια ακριβώς δράση διενεργεί και ο μικρομετεωρολογικός πύργος που χρησιμοποιούμε για τη λήψη δεδομένων.

Η στατιστική περιγραφή της τύρβης είναι το βασικό όργανο μελέτης στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της ροής CO₂. Τα βασικά χαρακτηριστικά άπτονται στην ανάλυση Reynolds όπου αναφέρεται για χρονικά διαστήματα για τα οποία θεωρούμε στασιμότητα ή σταθερή κατάσταση των μετρήσεων μας, καταστάσεις οι οποίες περιγράφουν στατιστικές ιδιότητες της ροής ανεξάρτητες του χρόνου. Στην ανάλυση Reynolds θεωρείται η μέση τιμή των μετρήσεων ανέμου για χρονικές περιόδους 30 λεπτών έως και μίας ώρας ώστε να περιορίζονται οι θετικές και οι αρνητικές αποκλίσεις των τυρβώδων ταχυτήτων γύρω από τη μέση τιμή. Για μία λοιπόν μέση τιμή του ανέμου (\bar{u}), για κάθε χρονική περίοδο μπορεί να αφαιρεθεί από την πραγματική στιγμιαία τιμή της ταχύτητας u για να υπολογισθεί το τυρβώδες τμήμα της (u'): $u' = u - \bar{u}$. Δηλαδή, το u' μπορεί να θεωρηθεί σαν τη ριπή του ανέμου που επικάθεται στη μέση τιμή και αντιπροσωπεύει το τμήμα της ροής που μεταβάλλεται σε περίοδο μικρότερη της μισής ώρας. Η μέση τιμή \bar{u} αντιπροσωπεύει το τμήμα που μεταβάλλεται με περίοδο μεγαλύτερη της μισής ώρας.

Η συνδιακύμανση δύο μεταβλητών a και b , σε συνδυασμό με την ανάλυση Reynolds δίνει[16]:

$$covar(a, b) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a' * b' dt = \overline{a' * b'} \quad (3)$$

Η συνδιακύμανση δείχνει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών a και b . Από την σκοπιά της τύρβης, οι συνδιακυμάνσεις έχουν ιδιαίτερο ρόλο στον υπολογισμό των ροών. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση της ροής είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά και συνεπώς για τη ροή. Η κατακόρυφη ροή ενός βαθμωτού μεγέθους σε κάποια διεύθυνση ορίζεται σαν το ποσό του μεγέθους στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα της επιφάνειας της κάθετης σε αυτή τη διεύθυνση, όπως ακριβώς θα μελετήσουμε και για τις ροές διοξειδίου του άνθρακα. Η κατακόρυφη ροή ενός βαθμωτού μεγέθους C (μάζα ανά μονάδα επιφάνειας στην μονάδα του χρόνου) υπολογίζεται ως Cw και η μέση ροή σε ένα χρονικό διάστημα \overline{Cw} (συνιστώσες ταχύτητας u, v, w στους άξονες x, y, z αντίστοιχα). Περαιτέρω, ακολουθώντας τους κανόνες της ανάλυσης Reynolds[16]:

$$\overline{Cw} = \overline{(\bar{C} + C')(\bar{w} + w')} = \bar{C}\bar{w} + \overline{C'w'} \quad (4)$$

Έτσι, η ολική ροή του βαθμωτού C μπορεί να εκφράζεται σαν άθροισμα της μέσης μεταφοράς και της τυρβώδους μεταφοράς. Η τελευταία καλείται και τυρβώδης ροή και είναι συνήθως ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς στο Α.Ο.Σ.

Αντίστοιχα, η μέση μεταφορά ορμής στη μονάδα του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω εξίσωση, υποθέτοντας την πυκνότητα του αέρα ρ σταθερή και ότι η μάζα έχει ταχύτητα u στην διεύθυνση x :

$$\overline{\rho u w} = \overline{\rho(\bar{u} + u')(\bar{w} + w')} = \rho \bar{u} \bar{w} + \rho u' w' \quad (5)$$

Τα παρακάτω μεγέθη είναι επίσης σημαντικά στον χαρακτηρισμό της τύρβης και της στατικότητας του Α.Ο.Σ.:

- Αριθμός Reynolds: Η τυρβώδης ροή έχει μεγάλο αριθμό Reynolds, ο οποίος ορίζεται[16]:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (6)$$

Όπου U και L είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα και χαρακτηριστικό μήκος αντίστοιχα και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού ($\nu = \mu/\rho$ όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού). Είναι χρήσιμος για να προβλέπει το σημείο μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Για τη χρήση στην Α.Ο.Σ., διασαφηνίζεται ότι αδιαμφισβήτητα η ροή είναι καθαρά τυρβώδης.

- Ταχύτητα τριβής (friction velocity): Όταν η τύρβη ξεκινά από τη βαθμίδα του ανέμου κοντά στο έδαφος, το μέτρο των τάσεων Reynolds (ροή ορμής) στην επιφάνεια είναι μία σημαντική μεταβλητή κλίμακας. Η ολική κατακόρυφη ροή της οριζόντιας ορμής που μετράται κοντά στο έδαφος είναι[16]:

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u'w'} \Big|_0 \text{ και } \tau_{yz} = -\rho \overline{v'w'} \Big|_0 \quad (7)$$

καταλήγοντας σε:

$$|T_{Reynolds}| = [\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2]^{1/2} \quad (8)$$

Με βάση τα παραπάνω μια κλίμακα ταχύτητας που καλείται ταχύτητα τριβής u_* ορίζεται ως :

$$u_*^2 = |T_{Reynolds}| / \bar{\rho} \quad (9)$$

Το σύστημα εξισώσεων που εφαρμόζονται στο Α.Ο.Σ. είναι τόσο πολύπλοκο που οι λύσεις είναι προσεγγιστικές όπως και σε άλλους κλάδους της μετεωρολογίας. Η βάση εφαρμογής όλων των παραπάνω αξιοποιείται στο δικό μας πείραμα, ιδιαίτερα όταν οι βαθμίδες στις διευθύνσεις x και y θεωρούνται αμελητέες σε σύγκριση με αυτές στη διεύθυνση z .

- Μήκος Obukhov: Το μήκος Obukhov (L) με μία πρώτη προσέγγιση μπορούμε να πούμε ότι είναι ανάλογο του ύψους πάνω από την επιφάνεια της γης στο οποίο η θερμική παραγωγή υπερσχύει της μηχανικής παραγωγής τυρβώδους κίνησης.

Στο Α.Ο.Σ. που διέπεται από ανοδικές κινήσεις, οι όροι θερμικής και μηχανικής παραγωγής γίνονται περίπου ίσοι όταν $z = -0,5L$ [16]. Το μήκος Obukhov χρησιμοποιείται ως δείκτης ευστάθειας με την μορφή z/L . Μαθηματικά ορίζεται ως [16]:

$$L = -\frac{u_*^3}{\frac{Kg}{\theta_v} \overline{w'\theta'_v}|_0} \quad (10)$$

Όπου $\overline{w'\theta'_v}|_0$ είναι η επιφανειακή τιμή της ροής της θερμότητας και u_* η ταχύτητα τριβής, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα της τάσης Reynolds στην επιφάνεια, διαιρεμένης με την πυκνότητα ($u_*^2 = \sqrt{\overline{w'\theta'_v}|_0}$), K είναι η σταθερά Von Karman.

- Η μαθηματική έκφραση των μετρήσεων Eddy Covariance:

Η εξίσωση που περιγράφει τη διατήρηση οποιαδήποτε βαθμωτού μεγέθους ή διανυσματικής ποσότητας ζ στην ατμόσφαιρα γράφεται ως [17] :

$$\frac{\partial \rho_d \zeta}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u} \rho_d \zeta) + K_\zeta \Delta(\rho_d \zeta) = S_\zeta \quad (11)$$

Όπου \vec{u} είναι το διάνυσμα ταχύτητας του ανέμου, το ρ_d είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα, το $\vec{\nabla}$ και το Δ αναπαριστούν τις αποκλίσεις ($\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$) και τους λαπλασιανούς τελεστές ($\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2}$), το K_ζ αναπαριστά τη μοριακή διάχυση της ποσότητας ζ και το S_ζ αντιπροσωπεύει την ισχύ της εκάστοτε πηγής/ αποθήκη. Αυτή η εξίσωση είναι στιγμιαία και ισχύει για έναν απειροελάχιστο όγκο αέρα. Δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ποσότητας μπορεί να οφείλεται στην ατμοσφαιρική μεταφορά του, στη μοριακή διάχυση ή στην παραγωγή του από πηγή / αποθήκη σε έναν απειροελάχιστο όγκο. Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε βαθμωτή ή διανυσματική ποσότητα με τους όρους να καθορίζονται αναλόγως. Εάν η ποσότητα είναι μία εκ των συνιστωσών της ταχύτητας σε μία δεδομένη κατεύθυνση, η εξίσωση 11 εκφράζει τη διατήρηση της συνιστώσας της ορμής, αυτής της ποσότητας ως προς αυτήν την κατεύθυνση.

Αντικαθιστώντας την ποσότητα ζ με ένα στην 11 καταλήγουμε στην εξής εξίσωση:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u} \rho_d) = 0 \quad (12)$$

η οποία μας υποδεικνύει την περίπτωση μη ύπαρξης πηγής ή αποθήκης ξηρού αέρα στην ατμόσφαιρα. Η εφαρμογή της για τη μέση τιμή ως προς το χρόνο θα δίνει επομένως:

$$\overline{\frac{\partial \rho_d}{\partial t}} + \vec{\nabla}(\overline{\vec{u} \rho_d}) = 0 \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 11 με την συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε μία δεδομένη κατεύθυνση, u_i , επιτυγχάνεται η εξίσωση διατήρησης της ορμής προς αυτήν την κατεύθυνση:

$$\frac{\partial \rho_a u_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u} \rho_a u_i) = S_i \quad (14)$$

Πλέον οι όροι πηγής/αποθήκευσης της ορμής μεταφράζονται σε όρους δύναμης. Δυνάμεις που μπορούν όπως, οι δυνάμεις Coriolis, οι ιζώδεις δυνάμεις, η δύναμη της άνωση (buoyancy). Οι δυνάμεις θεωρούνται αμελητέες για μια επίπεδη, οριζόντια ομοιογενή στο επιφανειακό οριακό στρώμα πάνω από τα στοιχεία τραχύτητας (δηλαδή δεν περιλαμβάνει βλάστηση). Η οριζόντια συνιστώσα της ορμής είναι παράλληλη με τον μέσο όρο του ανέμου ο οποίος κυριαρχεί στο επιφανειακό στρώμα. Η δύναμη της άνωσης εμφανίζεται μόνο στην εξίσωση για κάθετη ορμή και επομένως ο όρος της δύναμης της άνωσης δε συνυπολογίζεται. Σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) όπου το x αντιστοιχεί στην οριζόντια, παράλληλη με τη μέση ταχύτητα ανέμου, y στην οριζόντια, κατακόρυφη στη μέση ταχύτητα και z στην κάθετη. u, v, w είναι τα συνιστώσες x, y και z της ταχύτητας, αντίστοιχα, και αυτή η εξίσωση είναι γραμμένη ως:

$$\frac{\partial \rho_a u}{\partial t} + \frac{\partial \rho_a u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_a v u}{\partial y} + \frac{\partial \rho_a w u}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

Σε αυτό το σημείο και εφαρμόζοντας Reynolds decomposition στην εξίσωση 15 και τις απλουστεύσεις (Businger 1982, Stull 1988):

$$\begin{aligned} |\rho' / \bar{\rho}| &\ll |\rho'_a / \bar{\rho}'_a| & I \\ |\rho' / \bar{\rho}| &\ll |\theta'_a / \bar{\theta}'_a| & II \\ |\rho' / \bar{\rho}| &\ll 1 & III \\ |\theta' / \bar{\theta}| &\ll 1 & IV \end{aligned} \quad (16)$$

όπου ρ είναι η πίεση και θ η θερμοκρασία του αέρα, που οδηγούν σε:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}'^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}' u'}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Η εξίσωση 16. *III Boussinesq-approximation* αντιστοιχεί στην προσέγγιση η οποία παραμελεί τις διακυμάνσεις της πυκνότητας εκτός από τον όρο που αντιστοιχεί στην άνωση (λόγω βαρύτητας) επειδή η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι σχετικά μεγάλη σε σύγκριση με την άλλη επιταχύνσεις στην εξίσωση της ορμής. Επιλέγοντας ένα σύστημα συντεταγμένων τέτοιο ώστε τα \bar{w} και \bar{v} να είναι μηδέν καθώς υποθέτουμε *οριζόντια ομοιογένεια* (εξουδετερωμένες οριζόντιες κλίσεις) και οι *συνθήκες σταθερής κατάστασης* (ακυρώνοντας την παράγωγο ως προς το χρόνο) καταλήγουμε σε:

$$\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

Όπου $\overline{w'u'}$ είναι ο όρος eddy covariance. Η εξίσωση 18 προτείνει ότι, στο πλαίσιο των προηγούμενων παραδοχών, αυτή η ροή είναι σταθερή ανά ύψος και είναι αντιπροσωπευτική της κάθετης ροής ορμής μέσω ενός οριζόντιου επιπέδου πάνω από τραχείς επιφάνειες. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται μέθοδος Eddy covariance.

Συνοπτικά λοιπόν, δεν παίρνουμε υπόψιν την βαθμίδα της πίεσης, τη μοριακή / ιξώδης μεταφορά, τη βαρύτητα και τους όρους Coriolis για την εξαγωγή της εξίσωσης Η εξίσωση 18 έχει αμελητέες επιπτώσεις στην μέθοδο eddy covariance πάνω σε επίπεδες, ομοιογενείς επιφάνειες.

Για οποιοδήποτε ατμοσφαιρικό αέριο η εξίσωση 14 με αντικατάσταση γίνεται:

$$\frac{\partial \rho_a \chi_s}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u} \rho_a \chi_s) = S_s \quad (19)$$

Με τις παραδοχές που έχουν παρουσιαστεί προηγούμενα έχουμε (εξίσωση 13) γίνεται:

$$\overline{\rho_a} \frac{\partial \chi_s}{\partial t} + (\overline{\rho_a \vec{u}}) \vec{\nabla}(\overline{\chi_s}) + \vec{\nabla}[\overline{\rho_a \vec{u}' \chi'_s}] = \overline{S_s} \quad (20)$$

Αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι ο όρος πηγής $\overline{S_s}$ δίνεται από το άθροισμα του ποσοστού της αλλαγής του λόγου ανάμιξης της ποσότητας χ_s , της οριζόντιας μεταφοράς (advection) λόγω χωρικών διαβαθμίσεων της ποσότητας χ_s και σε αποκλίσεις στις ροές στροβιλισμού.

Η παραπάνω εξίσωση για το σύνολο των χωρικών παραγόντων γίνεται:

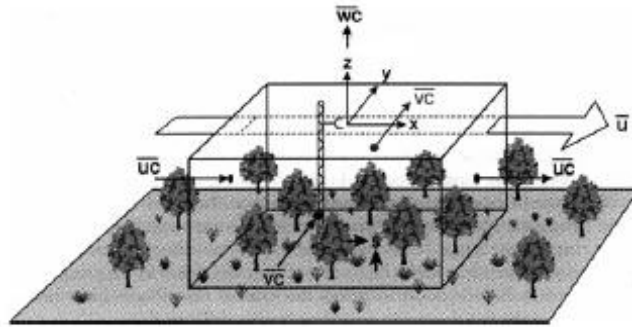
$$\overline{\rho_a} \frac{\partial \chi_s}{\partial t} + \overline{\rho_a u} \frac{\partial \chi_s}{\partial x} + \overline{\rho_a v} \frac{\partial \chi_s}{\partial y} + \overline{\rho_a w} \frac{\partial \chi_s}{\partial z} + \frac{\partial \overline{\rho_a u' \chi'_s}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho_a v' \chi'_s}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho_a w' \chi'_s}}{\partial z} = \overline{S_s} \quad (21)$$

Εργαζόμενοι στις καρτεσιανές συντεταγμένες έχουμε και έχοντας δεχτεί τις παραπάνω παραδοχές (ομογένεια οριζόντιας επιφάνειας, σταθερές συνθήκες) καταλήγουμε σε:

$$\overline{\rho_a} \frac{\partial \overline{\rho_a w' \chi'_s}}{\partial z} = \overline{S_s} \quad (22)$$

Άρα τελικώς εκφράζεται ότι η κατακόρυφη βαθμίδα στη μέθοδο eddy covariance είναι ίση με την αντίστροφη πηγή / αποθήκευσης μίας ποσότητας σε δεδομένο όγκο. Στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα είναι ίση με μηδέν [17].

Οι μετρήσεις Eddy covariance μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για την εκτίμηση των ανταλλάσσιμων ροών από συγκεκριμένους όγκους μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό, οι προηγούμενες εξισώσεις μπορούν να ενσωματωθούν τόσο οριζόντια στην περιοχή ενδιαφέροντος, όσο και κάθετα, από το έδαφος μέχρι τη ένα δεδομένο ύψος.



Εικόνα 2.5 Αναπαράσταση για ένα δεδομένο όγκο σε ένα ομοιογενές πεδίο. [17]

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση 21 καταλήγουμε σε νέα εξίσωση για τον παραπάνω όγκο όπου υποθέτουμε πως:

- i) οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ένα στρώμα με οριζόντια ομοιογενές ισοζύγιο
- ii) όλες οι οριζόντιες κλίσεις είναι αμελητέες

η συχνότητα προσμίξεων και οι τρυβώδεις ροές μετρώνται από έναν πύργο θεωρούνται τελικώς αντιπροσωπευτικές για το σύνολο του όγκου. Άρα κρίνοντας τις οριζόντιες ολοκληρώσεις μη απαραίτητες καταλήγουμε σε μία απλοποιημένη μορφή για μία μόνο διάσταση.

$$\int_0^{\psi_{os}} \overline{\rho_a \frac{\partial \chi_s}{\partial t}} dz + \int_0^{\psi_{os}} \overline{\rho_a w' \chi'_s} dz + \overline{\rho_a w' \chi'_s} \Big|_{\psi_{os}} = F_s \quad (23)$$

Όπου $\overline{w' \chi'_s} \Big|_{\psi_{os}}$ αναπαριστά την κάθετη τρυβώδη ροή στο μέγιστο ύψος του υπό μέτρηση όγκου και το F_s την καθαρή ανταλλαγή για την εκάστοτε ποσότητα s για δεδομένο όγκο. Ο δεύτερος όρος αναπαριστά την οριζόντια μεταφορά (advection) στο μέγιστο ύψος του όγκου το οποίο πρακτικά υπολογίζει τη μεταβολή στην πυκνότητα στον άξονα του χρόνου μέχρι το ύψος της επιφανείας.

Συνήθως, η συνεισφορά του δεύτερου όρου θεωρείται αμελητέα οπότε εξάγουμε τη σχέση:

$$\int_0^{\psi_{os}} \overline{\rho_a \frac{\partial \chi_s}{\partial t}} dz + \overline{\rho_a w' \chi'_s} \Big|_{\psi_{os}} = F_s \quad (24)$$

Η παραπάνω χαρακτηρίζεται ως η βάση για τη γενικευμένη μέθοδο Eddy Covariance. Συνοπτικά αναφέρει πως η ροή ενός βαθμωτού μεγέθους που ανταλλάσσεται σε ένα οικοσύστημα, F_s , μπορεί να εκτιμηθεί ως το άθροισμα των κάθετων eddy covariance

μετρήσεων των $\overline{w'\chi'_s}$ σε δεδομένο ύψος που καθορίζεται από τον δεύτερο όρο της παραπάνω σχέσης (F_s^{EC}) και την μεταβολή της αποθηκευμένης ποσότητας (storage) του βαθμωτού μεγέθους από το έδαφος ως το δεδομένο ύψος που δίνεται από τον πρώτο όρο της εξίσωσης (F_s^{sto}). Αναφορικά έχουμε:

$$F_s^{EC} + F_s^{sto} = F_s \quad (25)$$

Η παραπάνω υπόθεση λειτουργεί αρκετά καλά τη διάρκεια της μέρας καθώς η τύρβη αναπτύσσεται πλήρως, αλλά δυστυχώς δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική για τη διάρκεια της νύχτας όπου η τύρβη ελαττώνεται σημαντικά όπως έχουμε εξηγήσει προηγούμενα. Σε εκείνη την περίπτωση λαμβάνουμε υπόψιν μας και τις οριζόντιες συνιστώσες της εκάστοτε βαθμωτής μετρούμενης ποσότητας.

- Ο καθορισμός της τύρβης:

Η κατακόρυφη τυρβώδης ροή οποιουδήποτε βαθμωτού μεγέθους χ_s μπορεί να υπολογιστεί από την κατακόρυφη συνιστώσα ταχύτητα του ανέμου (w) και της συχνότητας ανάμειξης της βαθμωτής αυτής ποσότητας:

$$F_s = \overline{\rho_d w' \chi'_s} \quad (26)$$

Μεθοδολογία

Περιοχή Μελέτης

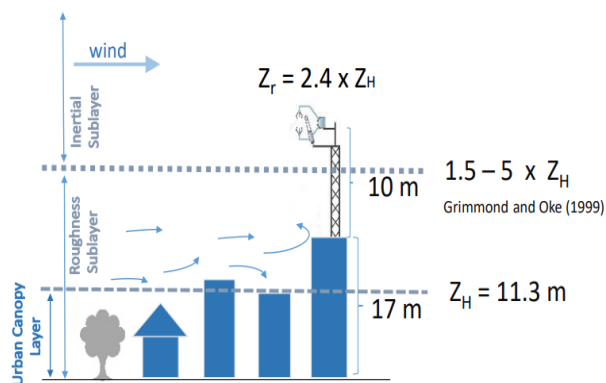
Το σύνολο της εργασίας λαμβάνει χώρα στην πόλη του Ηρακλείου (35° 20' Β, 25° 8' Α), πρωτεύουσα του μεγαλύτερου πληθυσμιακά νομού της Κρήτης. Το Ηράκλειο, μέσω του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης και Εφαρμογών σε Αστικό και Φυσικό Περιβάλλον (www.rslab.gr), του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών του Ιδρύματος Τεχνολογίας Έρευνας (ΙΤΕ), συμμετέχει στην προσπάθεια καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων τυρβωδών ροών σε αστικό περιβάλλον μέσω EC, συνεισφέροντας έτσι στην παγκόσμια επιπέδου έρευνα. Η τοποθεσία του Ηρακλείου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του ιδιαίτερου κλίματος, του χαμηλού πληθυσμού αλλά και του πυκνοκατοικημένου χαρακτήρα που διαθέτει. Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι στο Ηράκλειο επικρατεί σημαντική ανομοιογένεια στην πολεοδόμηση της πόλης, λόγω των διαφόρων πολιτισμών που τη αναδιαμόρφωσαν στο πέρασμά τους [12]. Το κέντρο της πόλης περιλαμβάνει κατοικίες και εμπορικές περιοχές με ένα μεταβλητό μείγμα ύψους κτηρίων. Τα οικιστικά κτίρια στο κέντρο της πόλης είναι κυρίως παλιά, ελάχιστα θερμικά μονωμένα συγκροτήματα διαμερισμάτων που δεν είναι εξοπλισμένα με κεντρική υποδομή θέρμανσης χώρου. Η πυκνότητα των κτηρίων, γενικότερα στην πόλη του Ηρακλείου είναι υψηλή στο κέντρο (40-70%) και χαμηλότερη στα προάστια (10-30%)[12]. Ευρύτερα, η πόλη έχει μόνο λίγους ανοιχτούς χώρους, πάρκα και περιοχές αναψυχής.



Εικόνα 3.1. Οι παραπάνω φωτογραφίες έχουν παρθεί από την εφαρμογή Google Earth Pro. Από αριστερά προς τα δεξιά: Κάτοψη Ελλάδας, Κάτοψη Κρήτης, Κάτοψη Δ. Ηρακλείου, Κάτοψη κέντρου Ηρακλείου, με κόκκινο σημάδι σημαίνεται η τοποθεσία του μετεωρολογικού πύργου.

Τεχνικά χαρακτηριστικά μικρομετεωρολογικού πύργου

Ο μικρομετεωρολογικός πύργος (HECKOR) - έχει εγκατασταθεί στον πυρήνα του κέντρου της πόλης του Ηρακλείου. Όσον αφορά στη θέση του, παίρνει μετρήσεις από τις βασικότερες κυκλοφοριακές αρτηρίες του Ηρακλείου (Εικόνα 3.1). Συγκεκριμένα, στα βόρεια και ανατολικά του βρίσκονται οι κύριοι δρόμοι του κέντρου όπου λαμβάνει χώρα η βασική κυκλοφορία αυτοκινήτων στην περιοχή του κέντρου. Η γύρω περιοχή από τον HECKOR δεν περιέχει σημαντικό ποσοστό βλάστησης.



Εικόνα 3.2 Απεικόνιση των χαρακτηριστικών εγκατάστασης του μικρομετεωρολογικού πύργου στο κέντρο του Ηρακλείου.

Το σύστημα EC αποτελείται από το όργανο IRGASON (Campbell Scientific, Inc., Γιούτα, ΗΠΑ). Το IRGASON συνδυάζει το EC150 CO_2/H_2O αναλυτή αερίων ανοιχτής διαδρομής και CSAT3A 3D ηχητικό ανεμόμετρο σαν ένα ενιαίο ολοκληρωμένο όργανο, τα οποία είναι προσαρτημένα πάνω σε ιστό ύψους 10 μέτρων. Το βασικό πλεονέκτημα του IRGASON είναι η ταυτόχρονη μέτρηση ανέμου και του αερίου στο ακριβώς ίδιο σημείο, χωρίς έτσι να χρειάζονται οι διορθώσεις διαχωρισμού αισθητήρων όπως γίνεται σε άλλα συστήματα. Το σύστημα είναι επίσης εξοπλισμένο με κατάλληλο θερμομέτρο - αισθητήρα για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος ($T_{αέρα}$). Το σύστημα EC καταγράφει μετρήσεις στα 10 Hz χρησιμοποιώντας το μηχάνημα CR6 (Campbell Scientific, Inc., Γιούτα, ΗΠΑ) και αποθηκεύει ακατέργαστα δεδομένα για μετέπειτα ανάλυση.

Το κτήριο που έχει εγκατασταθεί το HECKOR έχει ύψος 17 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του δρόμου άρα αθροιστικά το σύστημα μας λαμβάνει δεδομένα σε ύψος 27 μέτρων. Την τιμή αυτή την ορίζουμε ως ύψος λήψεων και συμβολίζεται ως $z_{receptor}$. Η γειτονική περιοχή χαρακτηρίζεται σχεδόν από ομογένεια, απαραίτητο χαρακτηριστικό όπως δείξαμε και στη θεωρία, και το ύψος που φτάνει το σύστημά μας είναι 2,4 φορές μεγαλύτερο από το μέσο ύψος κτηρίων (z_H) (Εικόνα 2.3).

Η επιλογή της τοποθέτησης του HECKOR και το πρωτόκολλο εγκατάστασης ορίστηκαν προσεκτικά σύμφωνα με το πρόγραμμα FP7 BRIDGE [10][23] καθοδηγούμενη από την κατάλληλη θεωρία [17]. Το $z_{receptor}$ φτάνει περίπου 2,4 φορές το z_H , που εκτείνεται επαρκώς πάνω από το υποστρώμα τραχύτητας για πυκνοκατοικημένες περιοχές [21].

Υπάρχουν λίγα απομονωμένα υψηλά στοιχεία τραχύτητας στη γύρω περιοχή (π.χ. εκκλησιαστικά βήματα, πύργοι ραδιοφώνου) και δεν επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις, ούτε βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το HECKOR (ακτίνα άνω των 200 μέτρων).



Εικόνα 3.3 Φωτογραφία μετεωρολογικού πύργου όπως είναι εγκατεστημένος μέχρι και σήμερα.

Επεξεργασία δεδομένων EC

Το σύνολο των μετρήσεων και ο τρόπος λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων έγιναν βάσει της θεωρίας [17], για δύο έτη EC μετρήσεων. Η ροή CO_2 , F_c , υπολογίστηκε ως τη συνδιακύμανση της πυκνότητας μάζας CO_2 και των κάθετων διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου με χρήση γραμμικής απομάκρυνσης [24] σε χρονικές περιόδους 30 λεπτών.

Πριν την τελική ανάλυση οι μετρήσεις μας φιλτράρονταν. Οι μετρήσεις που προέρχονται από τον μικρο-μετεωρολογικό πύργο, φιλτράρονται μέσω του Eddy Pro, όπου έχοντας δημιουργήσει κατάλληλο διαγνωστικό έλεγχο αναγνώρισης προβληματικών τιμών (flags) στον αναλυτή αερίων, τις αφαιρούμε από την τελική ανάλυση. Τα όρια αυτά δημιουργήθηκαν πρακτικά για να επισημάνουν όλες τις προβληματικές καταγραφές. Κατά κύριο λόγο προβληματικές θεωρούντουσαν τιμές όταν:

- Η ένταση του σήματος του αναλυτή σήματος ήταν ιδιαίτερα χαμηλή.
- Δόθηκαν στο σύστημα φίλτρα με τα μέγιστα / ελάχιστα όρια που αναμένονται για κάθε μετρούμενη ποσότητα [25]
- Η επιτρεπτή απώλεια δεδομένων λόγω έλλειψης δειγμάτων ανά μισάωρο ορίστηκε στο 10%.

Σε περιπτώσεις που το ανεμόμετρο απόκλινε από τη θέση του (π.χ. λόγω ισχυρού ανέμου) εφαρμόστηκαν διορθώσεις στις αναφερόμενες τιμές του με τη μέθοδο Double Rotation και για τις τιμές του F_c έγιναν διορθώσεις για τις διακυμάνσεις όγκου αέρα και πυκνότητας [26]. Φασματικές διορθώσεις επίσης εφαρμόστηκαν για τις

εκτιμήσεις ροής σε απώλειες λόγω χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Αναλυτική διόρθωση έγινε και στις επιδράσεις των φίλτρων υψηλών συχνοτήτων σύμφωνα με [27] ενώ οι επιδράσεις των φίλτρων χαμηλών συχνοτήτων σύμφωνα [28]. Ειδικές σημάνσεις ποιότητας των μετρήσεων εφαρμόστηκαν για τις ανά 30 λεπτά τιμές F_C σύμφωνα με τη δοκιμή σταθερής κατάστασης του συστήματος αλλά και της δοκιμής εφαρμοσμένης σε συνθήκες τύρβης,[29]–[31] όλες οι τιμές που απέκλειαν από τα όρια των σημάνσεων ποιότητας παραλήφθηκαν από την περαιτέρω ανάλυση.

Κατά τη διάρκεια, των δύο χρόνων, υπήρξαν περίοδοι στα οποία είτε η συντήρηση του πύργου είτε κάποια τεχνικά προβλήματα μας οδήγησαν να αφαιρέσουμε και τα εν λόγω διαστήματα. Αθροιστικά για την περίοδο 2016 - 2017 έχουμε αποσύρει μετά από την παραπάνω επεξεργασία το 31,7% των συνολικών ετήσιων μετρήσεων. Όμοια, για το 2017 - 2018 αφαιρέθηκε το 38,3% των συνολικών μετρήσεων. Συνολικά, δηλαδή αποσύρθηκαν 35,0% και για τα δύο έτη.

Χρονική συνάθροιση χρονοσειρών F_C

Η ανάλυση των χρονοσειρών F_C και η χρονική συνάθροιση των μετρήσεων από 30 λεπτά στα επιθυμητά χρονικά διαστήματα, αφορούν ουσιαστικά τον κορμό της παρούσας εργασίας. Πρακτικά, η ανάλυση γίνεται για συγκεκριμένες περιόδους μελέτης (ετησίως και μηνιαίως). Η επίτευξη πραγματοποιήθηκε όταν τα δεδομένα των 30 λεπτών ταξινομήθηκαν ανά ώρα της ημέρας. Η διαδικασία για το παραπάνω ολοκληρώθηκε υπολογίζοντας το μέσο όρο μεταξύ δύο τιμών μισαώρων. Με αυτόν τον τρόπο καλύπτουμε άμεσα τα κενά για τα οποία δεν έχουμε κάποια μέτρηση για τους λόγους που εξηγήσαμε προηγούμενα. Οπότε δημιουργήσαμε μέσους όρους για κάθε ολοκλήρωση μισαώρου μέχρι την επόμενη ώρα. Δηλαδή για τις μετρήσεις στις 14:00 και 14:30 εξήχθη μία μέση τιμή συγκεντρωμένη στο ακριβώς της ώρας για όλες τις μέρες και προφανώς για το σύνολο και των δύο ετών. Σε περίπτωση που μία από τις δύο μετρήσεις ενείχε σφάλμα τότε κρατούσαμε μόνο τη μία τιμή. Αν πάλι και οι δύο τιμές είναι προβληματικές τότε το κενό παραμένει. Άρα καταφέρνουμε να μετριάσουμε τις κενές τιμές μας. Πιο συγκεκριμένα, βάσει της παραπάνω ανάλυσης, αθροιστικά για την περίοδο 2016 - 2017 τα κενά αγγίζουν το 20,3% των συνολικών ετήσιων μετρήσεων. Όμοια, για το 2017 - 2018 το ποσοστό των κενών φτάνει το 26,8% των συνολικών μετρήσεων. Συνολικά, δηλαδή πλέον αποσύρεται το 23,5% και για τα δύο έτη.

Έπειτα, για την κύρια ανάλυση, ο υπολογισμός του συνόλου των εκπομπών CO_2 ανά διαφορετικά χρονικά διαστήματα και ταυτόχρονα η αποφυγή του σφάλματος που υπεισέρχεται λόγω των τυχαίων κενών στην χρονοσειρά μας, επιτεύχθηκε υπολογίζοντας πρώτα τον μέσο όρο κάθε ώρας της ημέρας (h) για κάθε περίοδο συνάθροισης (P):

$$\langle F_C \rangle_{h,P} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N F_{C(t)} * 44,0095 * 10^{-6} \quad (27)$$

Με την παραπάνω μαθηματική έκφραση μεταβάλλονται επίσης οι μονάδες από $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, όπως δηλαδή έρχεται η μέτρηση από τον μικρο-μετεωρολογικό

πύργο, σε $g\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ημερήσιες συνολικές εκπομπές για την αντίστοιχη περίοδο P :

$$\langle F_c \rangle_P = 3600 * \sum_{h=1}^{24} \langle F_c \rangle_{h,P} \quad (28)$$

Άρα, οι νέες τιμές μας εξάγουν $g\ CO_2\ m^{-2}d^{-1}$. Έπειτα και ανάλογα με τη χρονική συσσωμάτωση που θέλαμε να επιτύχουμε χρησιμοποιήσαμε την εξής έκφραση:

$$F_{c,m} = D_P * \langle F_c \rangle_P \quad (29)$$

Όπου ο όρος D_P εκφράζει τον αριθμό των ημερών της περιόδου P , αναλόγως αν η ανάλυση μας άπτεται σε περίοδο ενός χρόνου ή μηνών.

Ανάλυση προτύπων ανέμων και ορισμός τόξων

Τελευταίο κομμάτι της ανάλυσης μας αποτελούν τα Wind Roses. Πρόκειται για τύπους γραφήματος που αποτυπώνουν τη συχνότητα εμφάνισης τόξων κατεύθυνσης και ταχύτητας του ανέμου για ορισμένα χρονικά διαστήματα. Με τη διαδικασία αυτή θα δημιουργήσουμε τα πρότυπα του ανέμου για την περιοχή του Ηρακλείου για το διετές διάστημα της μελέτης μας, χωρίζοντας τα αποτελέσματα σε εποχές και έπειτα σε εποχιακά πρότυπα μέρας και νύχτας. Η πληροφορία που θα αντλήσουμε από την παραπάνω διαδικασία θα μας αποκαλύψει ποιοι είναι οι κύριοι άνεμοι που συνθέτουν τα πρότυπα ανέμων του Ηρακλείου. Σημαντικό στο συγκεκριμένο σημείο είναι να τονίσουμε το εξής: Αναμένουμε ίσως μία εντονότερη απώλεια λήψεως μετρήσεων για τη γωνία των 137° καθώς βρίσκεται αντιδιαμετρικά του IRGASON και ίσως ο ιστός να εμποδίζει τον άνεμο να φτάσει στον αναλυτή αέρα.

Προϊόντα υπολογισμού μορφολογίας

Η πραγματική περιοχή κάλυψης που μας παρείχε το HECKOR κρίνεται απαραίτητο να υπολογιστεί και για τις δύο χρονοσειρές ώστε να αποφανθούμε κατά πόσο μεταβλήθηκαν ανά χρονική περίοδο και πόσο επηρέασαν τις μετρήσεις μας. Το παραπάνω θα επιτευχθεί με τη χρήση μοντέλου αποτύπωματος τυρβωδών ροών (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης) και αποτύπωση σε χάρτη μέσω λογισμικού GIS (QGIS). Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν χωρικά δεδομένα DSM (Digital Surface Model) 0,7 μέτρων ανάλυσης και DTM (Digital Terrain Model) 5 μέτρων ανάλυσης τα οποία ήταν διαθέσιμα για το Ηράκλειο (National Cadastre & Mapping Agency S.A.). Στο DTM κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί με την ανύψωση από το επίπεδο της θάλασσας του εκάστοτε υπό μελέτη εδάφους ανεξαρτήτως κτηρίων ή άλλων αντικειμένων που υπάρχουν σε αυτό. Ενώ, το DSM μέσω κατάλληλης επεξεργασίας δείχνει με ακρίβεια το ύψος των κτηρίων και διαχωρίζει την υψηλή σε ύψος βλάστηση από τα κτήρια. Σε επόμενο βήμα διαχωρίζεται και η χαμηλή από την υψηλή σε ύψος βλάστηση μέσω κανονικοποίησης του προϊόντος DSM.

Το εργαλείο λογισμικού περιβάλλοντος (UMEP)[25] χρησιμοποιεί τα προϊόντα DSM και DTM για να απλοποιήσει την αστική επιφάνεια σε τρεις όψεις (δηλαδή οροφή, τοίχοι και επιφάνειες εδάφους) και υπολογίζει διάφορες μορφολογικές παραμέτρους για κάθε δεδομένη περιοχή ή κατεύθυνση. Οι παράμετροι τραχύτητας, όπως είδαμε στη θεωρία z_0 , z_d καθώς και το z_H υπολογίζονται επίσης από το UMEP.

Υπολογισμός ετήσιου αποτυπώματος

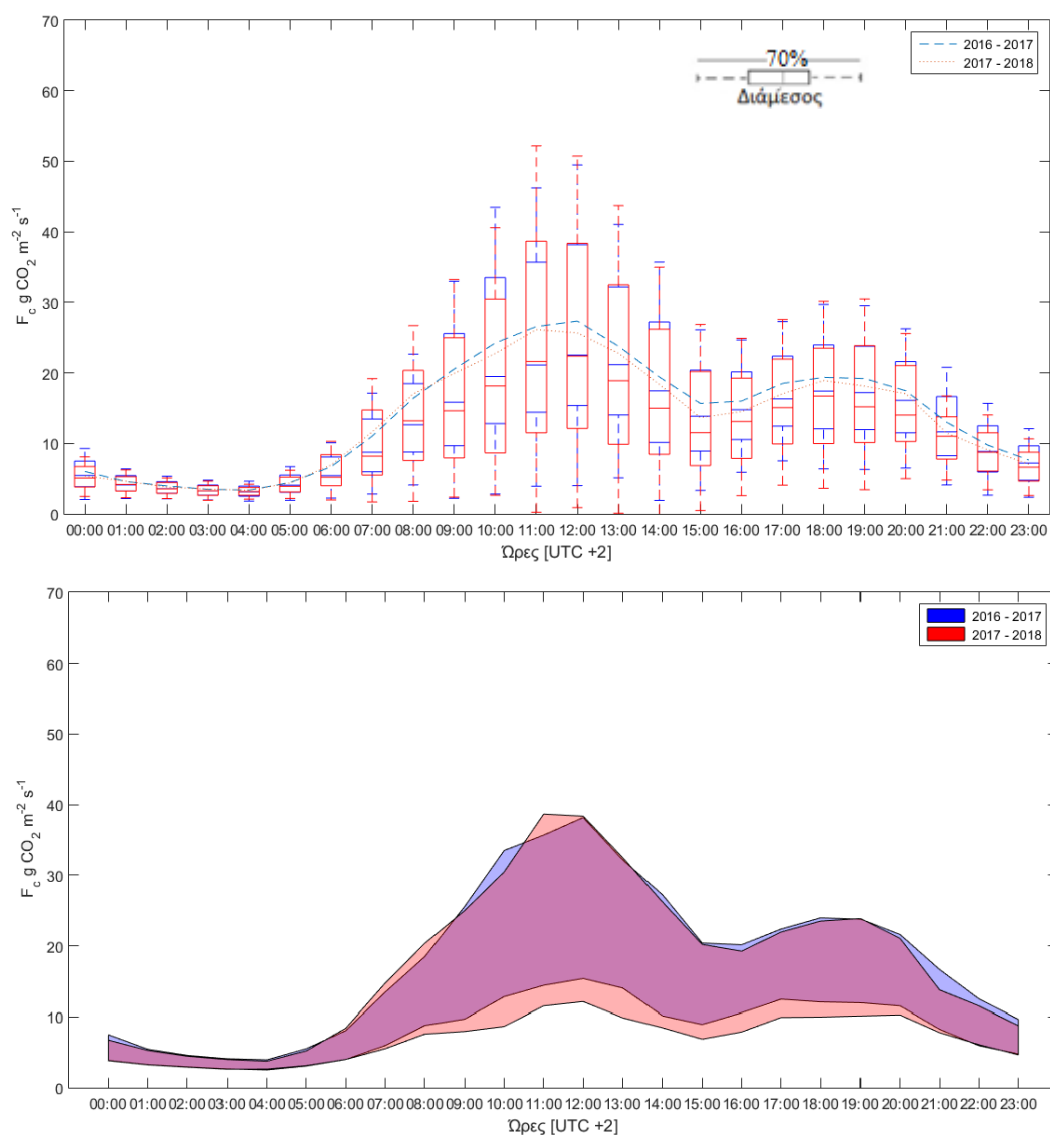
Η ανομοιομορφία στη δόμηση μίας πόλης συνεπάγεται με την ανομοιομορφία στην κατανομή των πηγών εκπομπής. Άρα στους μεγάλους δρόμους κυκλοφορίας στις συγκεντρωμένες οικιστικές ζώνες συναντώνται οι μεγαλύτερες συνεισφορές στις ροές του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτές οι γεωγραφικά περιορισμένες πηγές έχουν εξαιρετικά υψηλό μερίδιο στις αστικές εκπομπές CO_2 . Οι υπολογισμοί του αποτυπώματος περιοχής προέλευσης σε αστικές περιοχές μπορούν να βοηθήσουν στην αναγνώριση σημαντικών συντελεστών και στη διάκριση μεταξύ τύπων επιφανειών με διαφορετικές ιδιότητες εκπομπών (π.χ. θέρμανση, μετακίνηση κ.α.).

Βάσει του μοντέλου που χρησιμοποιούμε [32][33] απαιτείται και η εισαγωγή συμπληρωματικών παραμέτρων για την εξαγωγή του πραγματικού αποτυπώματος της περιοχής από την οποία φτάνουν οι μετρήσεις στον μετεωρολογικό μας πύργο (FFP, Flux Footprint Prediction). Η ανισοτροπική μορφολογία και οι εκτιμήσεις τραχύτητας για την 400 μέτρων ακτίνας γύρω από το HECKOR συνδέθηκαν με τις τιμές μισαώρου όπως λήφθηκαν. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για την τελική εξαγωγή είναι οι εξής: την τυπική απόκλιση των πλευρικών διακυμάνσεων της ταχύτητας, κατεύθυνση ανέμου, η ταχύτητα τριβής, το μήκος Obukhov (L) και το ύψος του Α.Ο.Σ., δηλαδή του κατώτατου μέρους της ατμόσφαιρας [34].

Αποτελέσματα

Ετήσιες Μετρήσεις

Ακολουθώντας τα παραπάνω τεχνικά μέρη και στο σύνολο της τη θεωρία όπως παρουσιάζεται εξαγάγουμε τα ημερήσια πρότυπα F_c για τις δύο χρονοσειρές. Η πληροφορία που θα πάρουμε αφορά το σύνολο των ετήσιων ροών αλλά και τη διακύμανση των ροών του διοξειδίου του άνθρακα σε ημερήσια βάση (Εικ. 4.1).



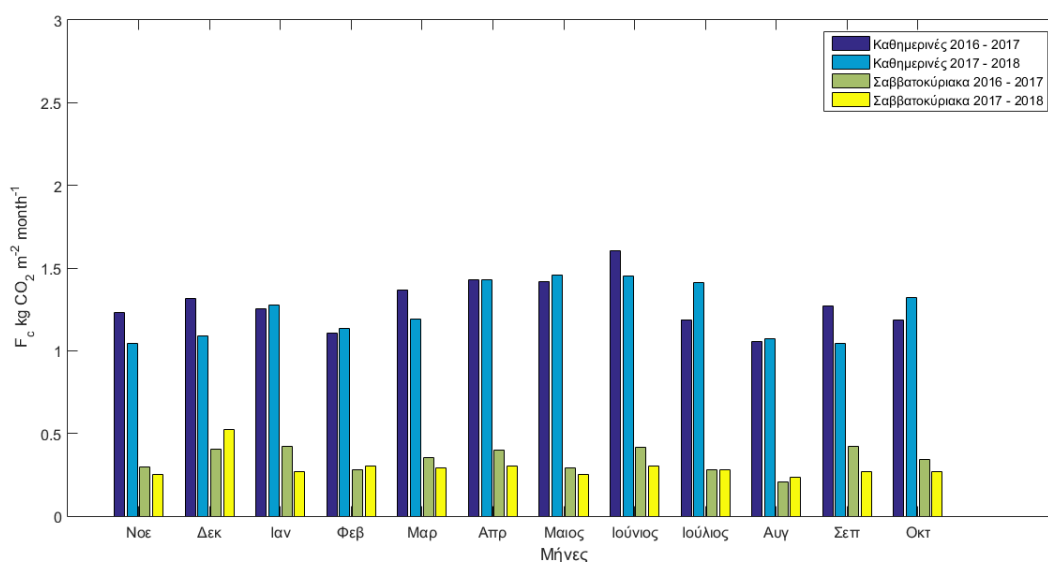
Εικόνα. 4.1(α) Ωριαία πρότυπα F_c για την περίοδο 01/11/16-31/10/18 (boxplots). Πιο συγκεκριμένα με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η περίοδος 01/11/16-31/10/17 ενώ με κόκκινο 01/11/17-31/10/18. Τα boxplots δείχνουν το διάστημα μεταξύ 25^{ου} και 75^{ου} εκατοστημίου των τιμών και διάμεσος (παύλα) για ολόκληρη την περίοδο της μελέτης, ενώ οι διακεκομμένες που εκτείνονται αφορούν το 70% του δείγματος. Οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τους μέσους όρους ανά περίοδο μετρήσεων. **(β)** Χρωματιζούμενα ημερήσια ωριαία πρότυπα F_c για την περίοδο 01/11/16-31/10/18 (Transparent coloured diagram). Με μπλε εμφανίζεται τα προηγούμενα διαστήματα

των τιμών της περιόδου 01/11/16-31/10/17 και αντίστοιχα για 01/11/17-31/10/18, ενώ με μωβ το εύρος των τιμών που συμπίπτουν για τις κοινές περιόδους.

Έπειτα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίαζε η διερεύνηση των παραπάνω διαγραμμάτων από την οπτική για το πόσο συνολικά διέφερε το F_c από το ένα έτος στο άλλο. Για να υπολογίσουμε το παραπάνω ζητούμενο, πήραμε τους μέσους όρους όλων των ωρών για όλες τις μέρες των δύο χρόνων και εξάγαμε τα κάτωθι: Τα πρότυπα F_c όπου για την περίοδο 01/11/16-31/10/17 έχουμε $19,6 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ ενώ για 01/11/17-31/10/18 $18,7 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$

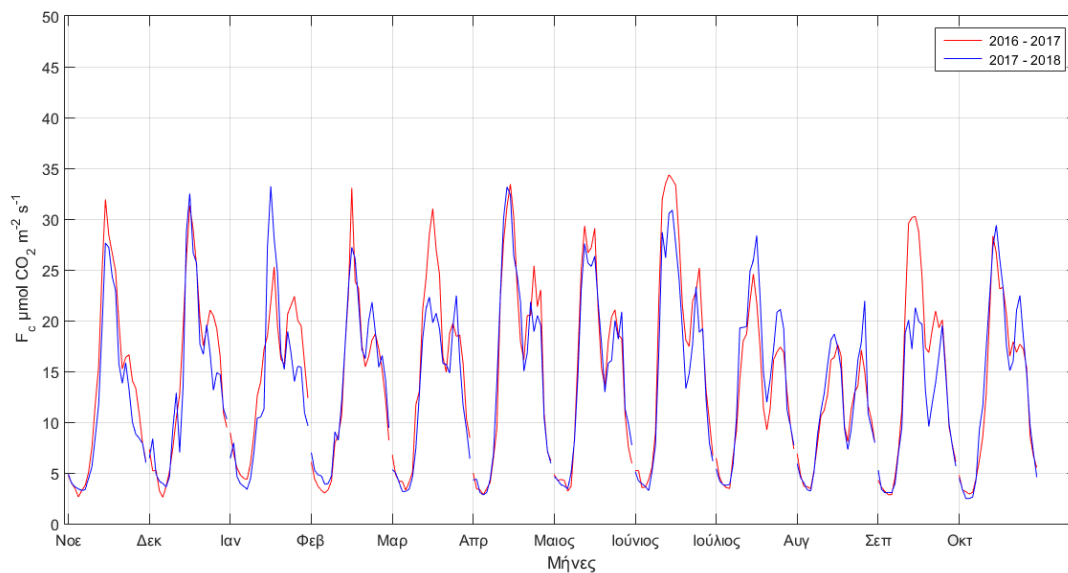
Μηνιαίες Μετρήσεις

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς παραπάνω μελέτη παρουσιάζει και η συνεισφορά του εκάστοτε μήνα και μάλιστα ο διαχωρισμός του σε Καθημερινές αλλά και Σαββατοκύριακα. Άρα, επόμενο ζητούμενο αποτέλεσε ο διαχωρισμός και η ανάπτυξη των δεδομενων σε μηνιαία βάση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ροές διοξειδίου του άνθρακα με βάση το μήνα σε κιλά ώστε να φανούν οι διαφορές όπως ήταν αναμενόμενο των Σαββατοκύριακων και Καθημερινών αλλά και ανά έτος για κάθε μήνα ξεχωριστά.



Εικόνα. 4.2 Αθροίσματα μηνιαίων συνεισφορών F_c για την περίοδο 01/11/16-31/10/18. Πιο συγκεκριμένα, με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι καθημερινές για την περίοδο 01/11/16-31/10/17 ενώ με γαλάζιο για την περίοδο 01/11/17-31/10/18 . Αντίστοιχα, με χακί χρώμα εμφανίζονται τα Σαββατοκύριακα για την περίοδο 01/11/16-31/10/17 ενώ με κίτρινο για την περίοδο 01/11/17-31/10/18 .

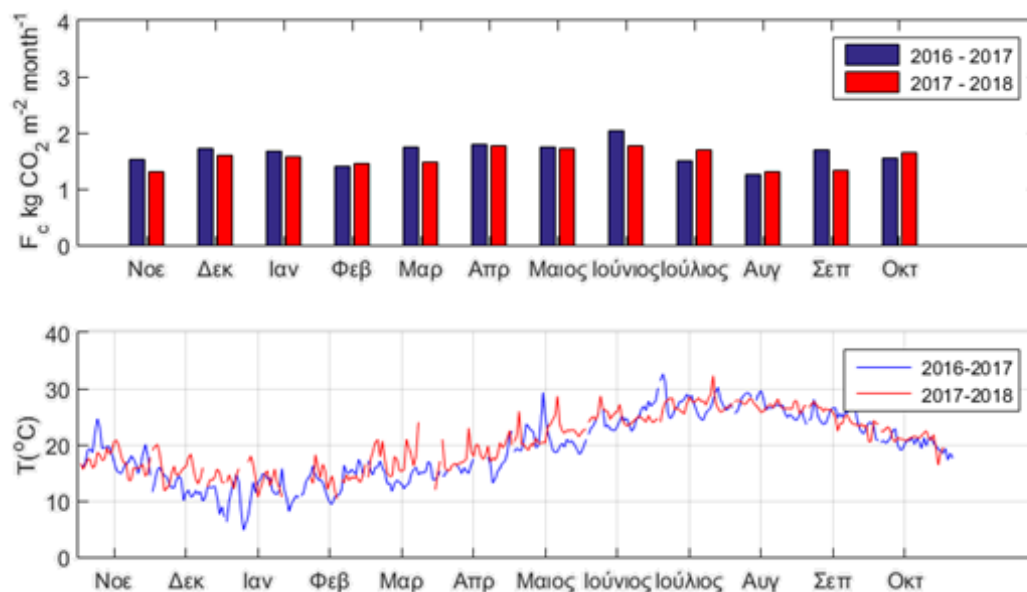
Ενώ, στο παρακάτω διάγραμμα δημιουργούμε τα ημερήσια πρότυπα βάσει των μέσο όρο των ημερήσιων προτύπων κάθε μήνα για το σύνολο των εικοσιτεσσάρων μηνών.



Εικόνα. 4.3 Ημερήσια πρότυπα F_c ανά μήνα για δύο έτη για την περίοδο 01/11/16-31/10/18. Πιο συγκεκριμένα με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η περίοδος 01/11/16-31/10/17 ενώ με κόκκινο για την 01/11/17-31/10/18

Θερμοκρασία συναρτήσει των ροών

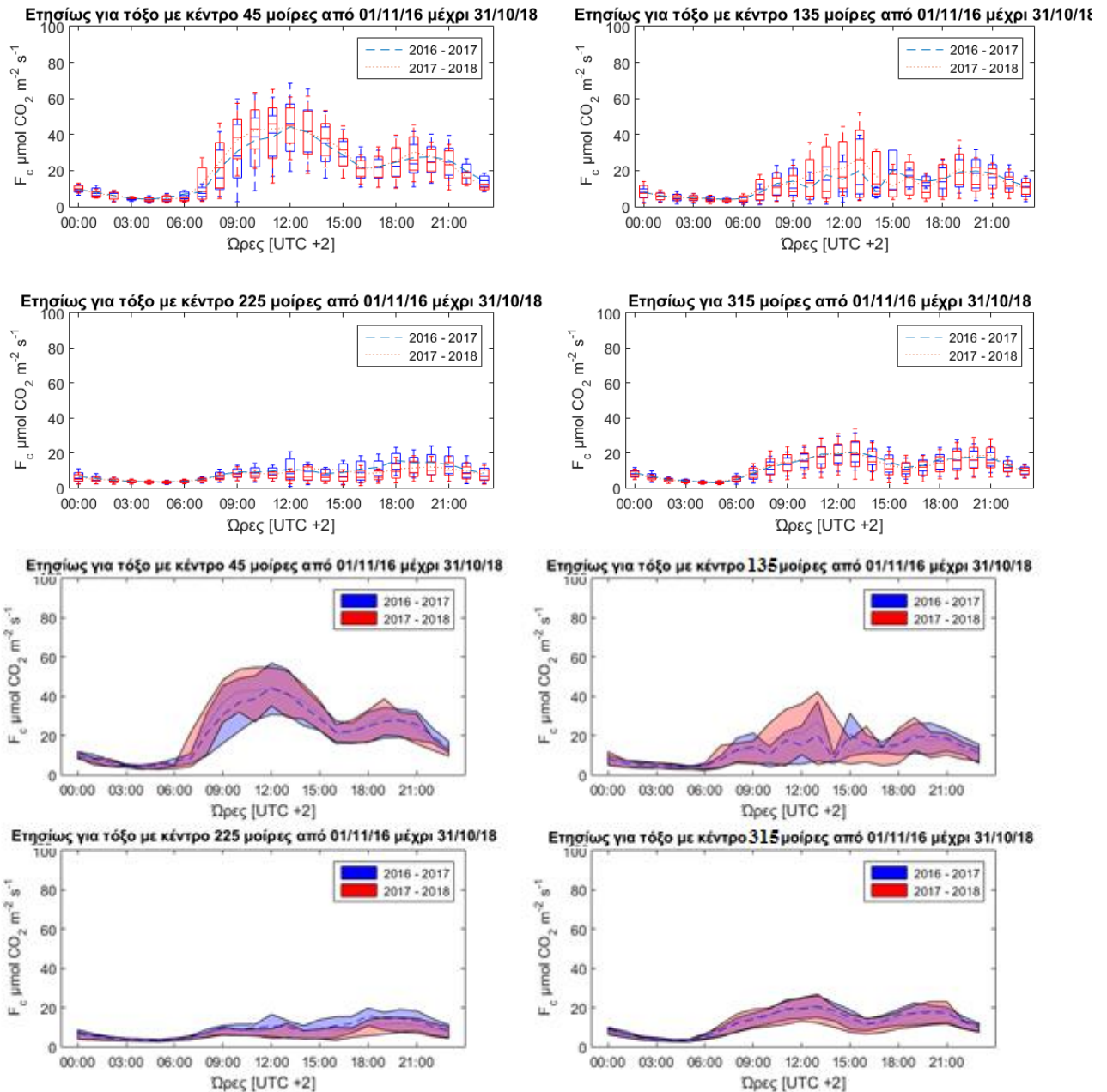
Στη θεωρία έχει αναπτυχθεί σε βάθος η σημαντικότητα που έχει η συνάρτηση της θερμοκρασίας με τις ροές διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτό το μέρος προσπαθούμε πειραματικά να δείξουμε την ιδιαίτερη αυτή σχέση και στη δική μας υπό μελέτη περίπτωση, έχοντας δημιουργήσει δύο διαγράμματα που αναφέρονται για τις ίδιες χρονικές περιόδους και συγκρίνουν τη διακύμανση ροών διοξειδίου του άνθρακα και θερμοκρασίας (Εικ. 4.4).



Εικόνα. 4.4 (α)Μηνιαίοι μέσοι όροι F_c για την περίοδο 01/11/16-31/10/18. Με μπλε εμφανίζεται το διάστημα 01/11/16-31/10/17 και αντίστοιχα με κίτρινο για 01/11/17-31/10/18.(β) Ημερήσιοι μέσοι όροι θερμοκρασίας για την περίοδο 01/11/16-31/10/18. Με μπλε εμφανίζεται το διάστημα 01/11/16-31/10/17 και αντίστοιχα με κίτρινο για 01/11/17-31/10/18.

Μετρήσεις ανά γωνία

Θέλοντας να μελετήσουμε την F_c από διαφορετικές περιοχές γύρω από τον πύργο, κάνουμε νέο διαχωρισμό των μετρήσεων ανάλογα με το τόξο κατεύθυνσης του ανέμου ανά συγκεκριμένη περίοδο μελέτης, δηλαδή το τόξο (σε μοίρες) που παρατηρήθηκε ο άνεμος. Έγινε διαχωρισμός σε τόξα ενενήντα μοιρών. Διευκρινιστικά, για άνεμο που φυσούσε στις 325 μοίρες, τότε αυτός άνηκε στο τόξο 270-360 μοιρών.



Εικόνα. 4.5(α) Ωριαία πρότυπα F_c ανά τόξο 90 μοιρών για την περίοδο 01/11/16-31/10/18 (boxplots). Πιο συγκεκριμένα με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η περίοδος 01/11/16-31/10/17 ενώ με κόκκινο 01/11/17-31/10/18. Τα boxplots δείχνουν το διάστημα μεταξύ 25^{ου} και 75^{ου} εκατοστημρίου των τιμών και διάμεσος (παύλα) για ολόκληρη την περίοδο της μελέτης, ενώ οι διακεκομμένες που εκτείνονται αφορούν την τυπική απόκλιση του δείγματος. Οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τους μέσους όρους ανά περίοδο μετρήσεων. (β) Χρωματιζούμενα ημερήσια ωριαία πρότυπα F_c για την περίοδο 01/11/16-31/10/18 (Transparent coloured diagram). Με μπλε εμφανίζεται τα προηγούμενα διαστήματα των τιμών της περιόδου 01/11/16-31/10/17 και αντίστοιχα για 01/11/17-31/10/18, ενώ με μωβ το εύρος των τιμών που συμπίπτουν για τις κοινές περιόδους.

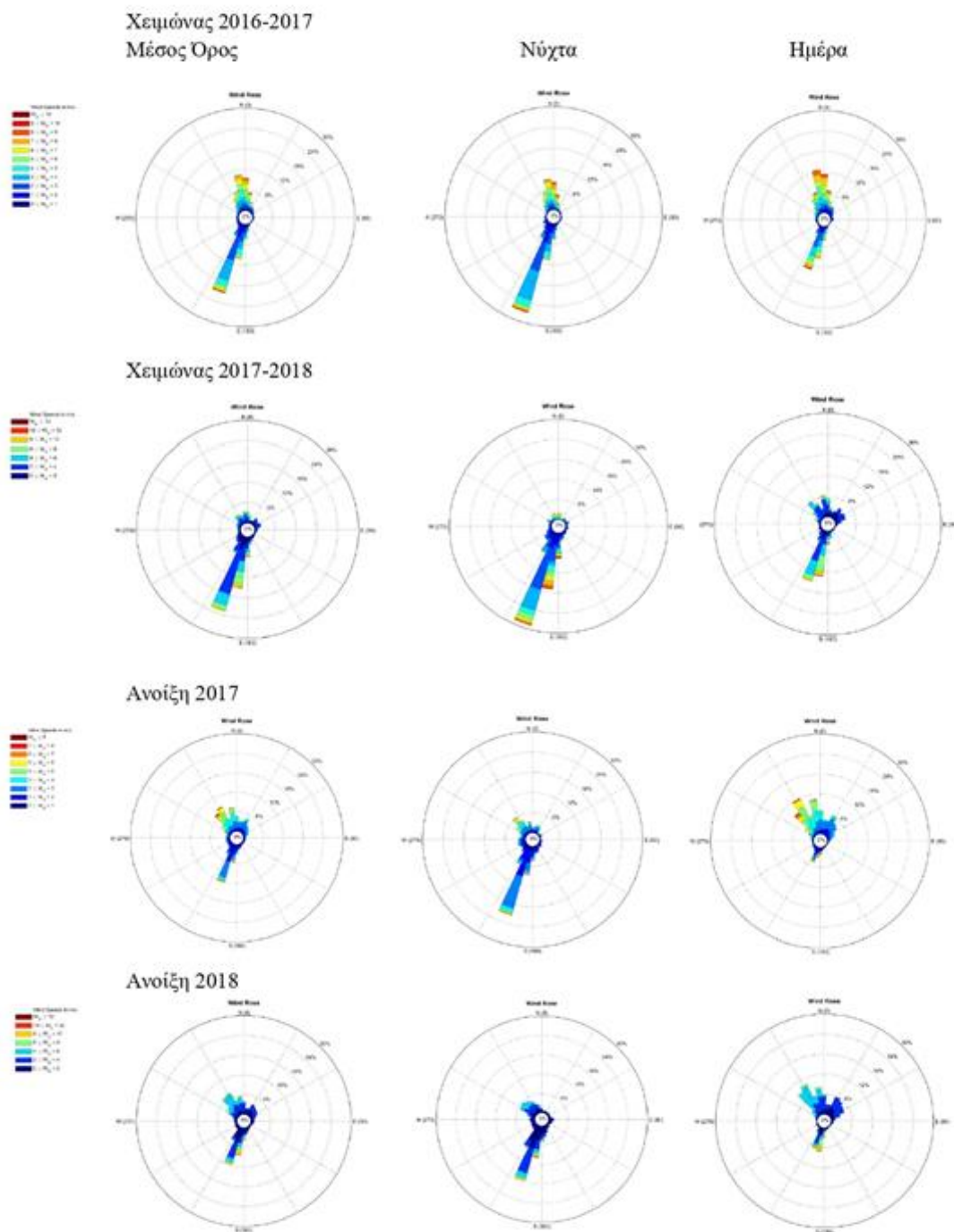
Βασισμένοι, στον προηγούμενο διαχωρισμό υπολογίζουμε και παρουσιάζουμε στον παρακάτω πίνακα. Σε περαιτέρω ανάλυση θα δώσουμε κύρια έμφαση σε όλα τα τόξα πλην αυτού των 90.0-180.0 καθώς πέραν της μικρής εμφάνισης ανέμων, όπως φαίνεται και στα wind roses παρακάτω, από αυτές τις γωνίες για το σύνολο των μετρήσεων αλλά και λόγω του τρόπου με τον οποίο είναι εγκατεστημένος ο πύργος και συγκεκριμένα το όργανο μετρήσεων IRGASON. Το IRGASON μετά από κάθε περίοδο συντήρησης ή καθαρισμού επανεγκαθίσταται προσανατολισμένο στις 315°, στις 135° αναφορικά στον προηγούμενο προσανατολισμό και πίσω από το όργανο βρίσκεται ο ιστός, άρα είναι πιθανό να χάνονται μετρήσεις μέσα στη χρονοσειρά.

Πίνακας 1^{ος}

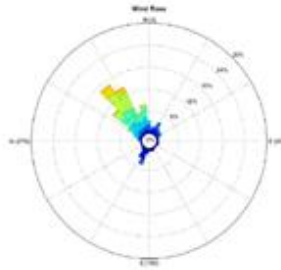
Χρονική Περίοδος	Τόξο 90 μοιρών			
	0.0-90.0	90.0-180.0	180.0- 270.0	270.0- 360.0
$(\overline{F_c}) \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$				
01/11/16- 31/10/17	29.61	16.86	11.99	16.96
01/11/17- 31/10/18	30.78	17.77	10.73	16.74

Wind Roses

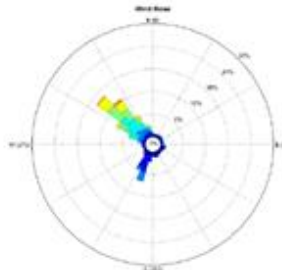
Τα γραφικά εργαλεία απόδοσης της συχνότητας κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου μέσω έτοιμου κώδικα γραφικής απεικόνισης ονομάζονται Wind Roses. Η παραπάνω διαδικασία δηλαδή ο διαχωρισμός κατεύθυνσης και ταχύτητας του ανέμου έγινε για την περίοδο και των δύο ετών ανά εποχή (τρίμηνα). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να παρατηρηθούν τα πρότυπα και σε επίπεδο μέρας και νύκτας καθώς οι διαφορές τους είναι σημαίνουσες και βασικός λόγος για το παραπάνω είναι και η παρουσία ή μη ηλιακής ακτινοβολίας όπως αναφέραμε στη θεωρία.



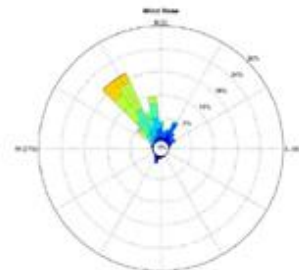
Καλοκαίρι 2017
Μέσος Όρος



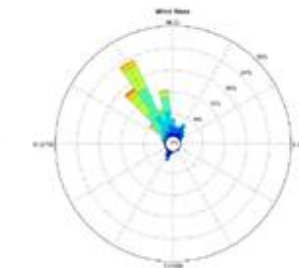
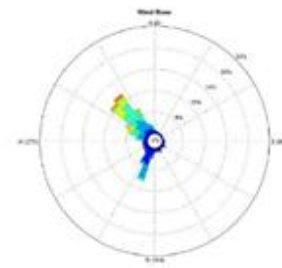
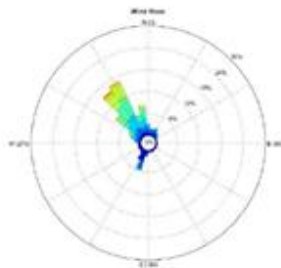
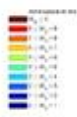
Νύχτα



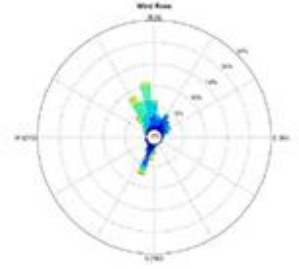
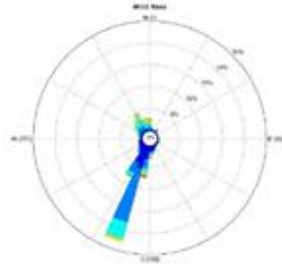
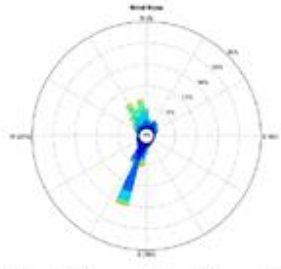
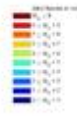
Ημέρα



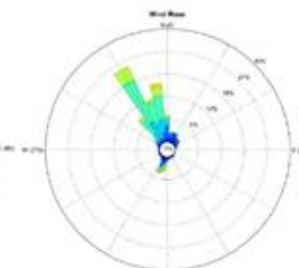
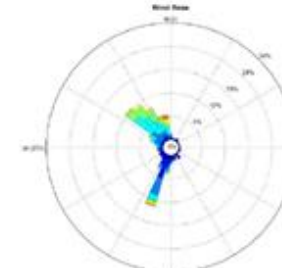
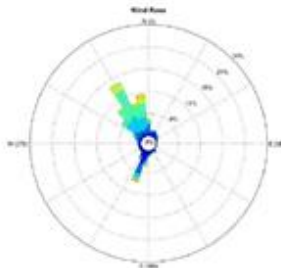
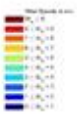
Καλοκαίρι 2018



Φθινόπωρο 2017



Σεπτέμβριος - Οκτώβριος 2018



Αποτελέσματα FFP

Χρησιμοποιώντας τα κομμάτια της θεωρίας και την εφαρμογή QGIS εξάγουμε τα παρακάτω ετήσια αποτυπώματα (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης). Σε αυτό το σημείο κρίνουμε ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα DTM & DSM που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των κάτωθι αποτελούν προϊόν των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιόδου 01/11/16-31/10/17. Θεωρούμε ότι για την επόμενη περίοδο τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτης περιοχής δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα για αυτό χρησιμοποιούμε τα ίδια και για την εξαγωγή του FFP της περιόδου 01/11/17-31/10/18. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι ένα μέσο αποτύπωμα της κατεύθυνσης και της ταχύτητας των ανέμων που έλαβαν χώρα για την κάθε χρονοσειρά ξεχωριστά. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή των αποτυπωμάτων τα DSM & DTM χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια και στις δύο περιπτώσεις καθώς η μορφολογία των αποτυπωμάτων για τα δύο χρόνια είχε αλλαγές που θεωρήσαμε αμελητέες.



Εικόνα. 4.6 (α) Αποτύπωμα τυρβωδών ροών (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης) για την περίοδο 01/11/16-31/10/17 (β) Αποτύπωμα τυρβωδών ροών (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης) για την περίοδο 01/11/17-31/10/18 (γ) Σύγκριση των δύο αποτυπωμάτων.

Συζήτηση

Μία αστικοποιημένη περιοχή διαθέτει ένα ευρύ δίκτυο μεταβλητών-πηγών, κυρίως ανθρωπογενών έναντι των φυσικών-βιολογικών. Αυτή η μελέτη αν και εξετάζει μία μικρή σε χωρική έκταση περιοχή, αλλά πυκνοκατοικημένη, οδηγεί σε μία σειρά συμπερασμάτων και αποτίμησης προτύπων που μπορούν να συνδυασθούν και να καταγραφούν από το παγκόσμιο ερευνητικό δίκτυο λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της.

- Ημερίσια Πρότυπα – Ετήσιες Ροές

Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, ξεχωριστά για τις δύο χρονοσειρές η διαφορά μεταξύ των μέσων όρων των ημερίσιων ροών διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνεται περίπου στη μία μονάδα $kg CO_2 m^{-2}y^{-1}$ παρακάτω θα προσπαθήσουμε σε μία εκτενή αναφορά να προσδιορίσουμε σε ποια γεγονότα άπτεται αυτό το γεγονός, μελετώντας το σύνολο των διαγραμμάτων και των πινάκων που έχουν παραχθεί στα αποτελέσματα αλλά και συγκρίνοντας τις ροές με πρότυπα άλλων χωρών. Στη συνολική εικόνα αν ανατρέξουμε και στα κενά (λόγω προβληματικών τιμών) που είχαμε για τις δύο υπό μελέτη χρονοσειρές όπου η διαφορά στην απώλεια της τάξεως των έξι ποσοστιαίων μονάδων από το σύνολο των ετήσιων μετρήσεων καλείται ως σημαντική.

Αρχικά λοιπόν, από την εικόνα 4.1 παρατηρούμε και για τις δύο χρονοσειρές παρόμοια πρότυπα ροών με μικρές αλλαγές, όπως τη μεγαλύτερη διακύμανση τιμών ροής για τις ώρες εμπορικής λειτουργίας του Ηρακλείου 09:00-20:00 για το δεύτερο χρόνο μετρήσεων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το Ηράκλειο ακολουθεί τις εμπορικές και ώρες λειτουργίας της περιοχής, το τυπικό δηλαδή ωράριο εργασίας για καταστήματα και γραφεία είναι 09:00 - 14:00 και 18:00 - 21:00 κατά τις εργάσιμες ημέρες. Τα Σάββατα όπως θα δούμε και αργότερα στην εικόνα 4.3. περισσότεροι εμπορικοί τομείς είναι επίσης ανοικτοί. Στο κέντρο της πόλης επικεντρώνεται η κύρια εμπορική και επιχειρηματική δραστηριότητα της πόλης, επομένως, υπάρχει αυξημένη συσσώρευση οχημάτων και μετακινούμενων ατόμων στο κέντρο κατά τις ώρες λειτουργίας του πρωινού την ημέρα της εβδομάδας. Τα παραπάνω αποτυπώνονται εμφανώς στην εικόνα 4.1 σημειώνοντας μία καθοδική τάση στις ροές από τις 12:00 μέχρι τις 15:00, και μέχρι την επανεκκίνηση των εμπορικών ζωνών μέχρι και το ημερίσιο κλείσιμο στις 20:00. Τις υπόλοιπες ώρες παρατηρείται σταδιακή πτώση των ροών με μία σταθεροποίηση μέχρι και τις πρώτες πρωινές ώρες.

Όσον αφορά στη σύγκριση με άλλες πόλεις που έχουν γίνει αντίστοιχες μετρήσεις θα εξεταστούν οι περιπτώσεις της Βασιλείας, Ελβετία[35] και του Μεξικό[36]. Είναι προφανές ότι απαιτούνται περαιτέρω διεξοδικές μελέτες για την ολοκλήρωση της εικόνας και την αντιμετώπιση της συγκρισιμότητας μεταξύ τοποθεσιών και πόλεων, αλλά εν προκειμένω, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην τοπική ετερογένεια της αστικής δομής και τους λόγους της μεταβλητότητας σε διαφορετικά χρονικά πλαίσια, προκειμένου να αποδοθούν επαρκώς οι παράγοντες ελέγχου για τις F_c .

Τα μέσα ημερήσια πρότυπα, της Βασιλείας και του Μεξικό, αποκαλύπτουν μια σαφή εξάρτηση από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες (δηλαδή κυρίως την κυκλοφορία οχημάτων), δεδομένης της πρωινής αύξησης των μετατοπίσεων F_c με σταθερή τάση μέχρι και τις απογευματινές ώρες, όπου η πτώση είναι κατακόρυφη λίγο πριν τις βραδινές ώρες. Όσον αφορά τα Σαββατοκύριακα, ακολουθούν ομοίως χαμηλότερες τάσεις ροών όπως και το Ηράκλειο με μικρές διαφορές που παρατηρούνται τις πρώτες ώρες του Σαββάτου.

Όσον αφορά στις ετήσιες F_c έχουμε $22,7 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ για την περίπτωση της Βασιλείας ενώ για το Μεξικό $24,5 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Όπως αναφέραμε παραπάνω οι δύο αυτές περιοχές μελέτης μπορεί να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ροών μα τα χαρακτηριστικά μορφολογίας, το τελικό αποτύπωμα λήψεως των μετρήσεων (αποτύπωμα περιοχής προέλευσης), ακόμα και τα πρότυπα ανέμων όπως και η τοποθεσία των αντίστοιχων μικρομετεωρολογικών πύργων δεν κάνουν αυτή τη σύγκριση αντικειμενική.

- Ανάλυση FFP

Αν και τελευταίο μέρος στα αποτελέσματά μας, κρίνεται απαραίτητο να εξετάσουμε την ακριβή περιοχή για την οποία παίρνουμε τις μετρήσεις μας στο σύνολο των δύο χρονοσειρών.

Μία πρώτη ματιά δεν μαρτύρα ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των δύο αποτυπωμάτων, μα εξακριβώνεται ότι η σύσταση της εμπεριέχει δύο κύριες και ξεχωριστές ζώνες συνεισφοράς. Η πρώτη περιλαμβάνει την περιοχή βόρεια και βορειοδυτικά του μικρο-μετεωρολογικού πύργου όπου συγκεντρώνεται η εμπορική περιοχή του κέντρου με πλήθος καταστημάτων, ένα μικρό ποσοστό οικιών και τις βασικότερες αρτηρίες κυκλοφορίας να συνιστούν το σύνολο της περιοχής. Το παραπάνω και η κρίσιμη συνεισφορά του διαφαίνεται εντόνως και στον πίνακα 1. όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ποσοτικά διαφορές σε σχέση με τα υπόλοιπα υπό μελέτη τόξα.

Στην νοτιοδυτική μεριά που επίσης έχουμε μεγάλη παρουσία ανέμων και στις δύο χρονοσειρές η περιοχή χαρακτηρίζεται αμιγώς οικιστική με μικρούς δρόμους και άρα μικρή κυκλοφορία. Η συνεισφορά στις ροές διοξειδίου του άνθρακα γίνεται κυριότερα από την καύση ορυκτών καυσίμων για τη θέρμανση των οικιών τους χειμερινούς μήνες, αλλιώς πάλι από τον πίνακα 1. δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλες ροές.

- Wind Roses

Αφού, αναλύσαμε τις περιοχές που πρακτικά παίρνουμε το μεγαλύτερο πλήθος των μετρήσεων, σειρά έχει να εξετάσουμε πως προέκυψαν τα παραπάνω. Η κύρια μεταβλητή που εισάγαμε για την εξαγωγή των αποτυπωμάτων ήταν η κατεύθυνση και η ταχύτητα των ανέμων για τις χρονοσειρές μας. Με τις ίδιες μετρούμενες ποσότητες εξάγουμε και τα wind roses.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να καταλήξουμε στο γεγονός ότι η περίπτωση του Ηρακλείου χαρακτηρίζεται από εμφανή πρότυπα ανέμου για το σύνολο ενός χρόνου, αφού οι μέσοι όροι των δύο ετών ομοιάζουν αρκετά μεταξύ τους, ίσως με

μικρές διαφορές στις εντάσεις ή στη μεγαλύτερη παρουσία βόρειων ανέμων για το χειμώνα 2016-2017.

Αν χαρακτηρίζαμε πιο συγκεκριμένα τις περιόδους θα συμφωνούσαμε ότι ο Χειμώνας χαρακτηρίζεται από Νοτιο-Δυτικούς ανέμους μέρα και νύχτα, με τη μέρα να εμφανίζει μικρότερα ποσοστά και Βόρειων ανέμων. Έπειτα, η Άνοιξη έχει ένα εξαιρετικό ενδιαφέρον καθώς εκτός από τον εμφανή μεταβατικό ρόλο που διαδραματίζει, δηλαδή με την επόμενη πλήρως διαφορετική εικόνα του καλοκαιριού, οι νύχτες με την ημέρα έχουν ιδιαίτερες διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται οι νύχτες να κρατούν τα χειμωνιάτικα χαρακτηριστικά ενώ οι ημέρες να προσεγγίζουν καλύτερα την εικόνα του καλοκαιριού, για αυτό παρατηρούμε και αυτόν το μεταβατικό χαρακτήρα της άνοιξης, το παραπάνω ουσιαστικά συνιστά το τοπικό σύστημα ανέμων του Ηρακλείου, λόγω θαλάσσιας αύρας την ημέρα και χερσαίας τη νύχτα. Όσον αφορά στα καλοκαιρινά wind roses είναι ευδιάκριτοι οι Βορειο-Δυτικοί άνεμοι μέρα και νύχτα, με μικρά ποσοστά Νοτιο-Δυτικών τις νύχτες. Η έντονη παρουσία καλοκαιρινών Βορειο-Δυτικών ανέμων συνθέτουν και αυτό το ιδιαίτερο απότυπωμα που είδαμε και προηγούμενα. Τέλος, για τα Φθινόπωρα θα πρέπει να εξετάσουμε το κάθε έτος ξεχωριστά καθώς εκτός των μεγάλων διαφορών τι δεύτερο έτος παρουσιάζει μονάχα δύο μήνες μετρήσεων αφού οι μετρήσεις μας είναι έως 31/10/2018. Για το πρώτο έτος λοιπόν, θα το χαρακτηρίζαμε και αυτό ως μεταβατικό στάδιο από Καλοκαίρι για Χειμώνα τώρα με εικόνα να ομοιάζει στην εικόνα της άνοιξης, σε μέσους όρους, ημέρα και νύχτα. Για το δεύτερο έτος που έχουμε συμπεριλάβει μονάχα δύο μήνες είναι εμφανής ότι οι μήνες είναι πιο κοντά στο καλοκαίρι και έτσι εξηγούνται οι πολλοί Βορειο-Δυτικοί άνεμοι.

- Μετρήσεις ανά γωνία

Η ποσοτική μελέτη για τις ροές διοξειδίου του άνθρακα με συνάρτηση την γωνία που φυσούσε εκείνη τη στιγμή ο άνεμος μας δίνει την ευκαιρία δημιουργίας του πίνακα 1. και των διαγραμμάτων 4.5.

Ίσως, μία καλή εικόνα για την ανάλυση μας να μας δινόταν κάνοντας διαγράμματα αρχικά μικρότερων τόξων αλλά και μικρότερων χρονικών διαστημάτων. Δυστυχώς μία τέτοια επιλογή είναι πλήρως ανακριβής διότι, όπως φαίνεται εμφανώς από τα wind roses, τα τόξα που έχουμε έντονη παρουσία ανέμου είναι πολύ συγκεκριμένα, δεύτερον τα κενά στην χρονοσειρά μας αγγίζουν το 30% άρα θα είχαμε μία μη ρεαλιστική εικόνα και τέλος όταν περιορίζουμε το χρονικό διάστημα τα ωριαία κενά μεταξύ των μετρήσεων αυξάνουν ραγδαία δημιουργώντας αναληθή πρότυπα, ένα παράδειγμα για το παραπάνω αποτελεί το διάγραμμα της εικόνας 4.6 για το τόξο με κέντρο τις 135° όπου είναι πολύ μικρό το εύρος τιμών που έχουμε.

Έτσι, καταλήγουμε σε ετήσια τόξα μετρήσεων για το εύρος των 90 μοιρών. Αρχικά, για το πρώτο τόξο ($0^\circ < \text{κατεύθυνση ανέμου} < 90^\circ$) παρατηρούμε ότι ομοιάζει εξαιρετικά με τα ετήσια πρότυπα που εξάγουμε στην εικόνα 1.1. Το παραπάνω είναι απόλυτα δικαιολογημένο αφού κοιτάζοντας τα Wind Roses παρατηρούνται και στις δύο χρονικές περιόδους έντονη εμφάνιση βόρειων ανέμων και επίσης στη βόρεια μεριά του μικρο-μετεωρολογικού πύργου έχουμε τις κεντρικές αρτηρίες κυκλοφορίας του Ηρακλείου. Στη συνέχεια έχουμε ήδη αναφερθεί στην

ανακρίβεια που προσφέρει το τοξο των $90^\circ < \text{κατεύθυνση ανέμου} < 180^\circ$ όποτε θα ασχοληθούμε κυριότερα με τα τόξα από $180^\circ < \text{κατεύθυνση ανέμου} < 360^\circ$, τα οποία είναι σύμφωνα με τα Wind Roses τα τόξα με τα ποσοστά μεγαλύτερης εμφάνισης ανέμων. Βέβαια, οι ροές έχουν ιδιαίτερα μικρή τάση για το σύνολο της ημέρας, με το τόξο από $270^\circ < \text{κατεύθυνση ανέμου} < 360^\circ$ να εμφανίζει ήπια χαρακτηριστικά ημερίσιων προτύπων όπως στην εικόνα 4.1. Το παραπάνω έχει σχεδόν εξηγηθεί κοιτάζοντας τις περιοχές από τις οποίες έχουμε τους νότιους ανέμους όπου πρόκειται για κυρίως οικιστική περιοχή όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

- Ροές διοξειδίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η κεντρική ιδέα για την εικόνα 4.4 έγκειται στο πόσο τελικά συνεισφερε ο κάθε μήνας στις χρονοσειρές μας αλλά και το κατά πόσο αλλάζουν τα ημερήσια πρότυπα του καθενός. Από τη συνάρτηση θερμοκρασίας-ροών και την εικόνα 4.5 διαφαίνεται ότι η περίοδος 01/11/17-31/10/18 είναι αισθητά πιο ζεστή γεγονός που μας δικαιολογεί μειωμένη χρήση συστημάτων-μηχανών καύσης ορυκτών καυσίμων, άρα και εκπομπών CO_2 στην πόλη του Ηρακλείου από την οικιστική ζώνη. Σε αυτό το σημείο, θα θέλαμε να θυμήσουμε ότι τους χειμερινούς μήνες στην πόλη χρησιμοποιούνται συσκευές θέρμανσης των οικιών που λειτουργούν με καύση ορυκτών καυσίμων. Διαπιστώνεται ότι οι μήνες Νοέμβριος έως και το Μάρτιο, με εξαίρεση το Φλεβάρη του 2017, για την πρώτη χρονοσειρά έχουν μεγαλύτερες τιμές F_c γεγονός που δικαιολογείται από τη χαμηλότερη θερμοκρασία αλλά και από τους έντονους νοτιοδυτικούς ανέμους που μας δίνουν μετρήσεις από μία αμιγώς οικιστική περιοχή. Πλησιάζοντας το καλοκαίρι, παρατηρούνται αυξομειώσεις των ροών, ανοδική τάση της θερμοκρασίας με χαμηλότερες ροές να έχουμε τον Αύγουστο, πλέον δεν χρησιμοποιούνται οικιακές συσκευές θέρμανσης άρα την κυριότερη συνεισφορά έχουν πλέον τα μέσα μετακίνησης.

- Μηνιαίος Διαχωρισμός

Σε βαθύτερη ανάλυση, η παρατήρηση της εικόνας 4.2. δείχνει πλέον ποσοτικά, τη συνεισφορά Καθημερινών και Σαββατοκύριακων για τις δύο χρονοσειρές.

Ξεκινώντας από την ποιοτική ανάλυση, δηλαδή των ημερίσιων προτύπων, από την εικόνα 4.3., παρατηρούμε για το σύνολο των εικοσι-τεσσάρων μηνών κοινά ημερήσια πρότυπα με παρόμοιες διακυμάνσεις όπως στην εικόνα 4.1. με τις μεγαλύτερες ροές να παρατηρούνται στις 11:00 και μετά από μία ραγδαία καθοδική τάση παρατηρείται η επόμενη αύξηση τις απογευματινές ώρες με αποκορύφωμα συνήθως στις 18:00. Το γεγονός ότι τα ημερήσια πρότυπα δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου δεν είναι κάτι που συναντάται ιδιαίτερα στις υπόλοιπες περιοχές μελέτης με συστήματα EC. Έντονη διαφορά αποτελούν οι μειωμένες τιμές του Αυγούστου γεγονός που αξίζει περαιτέρω συζήτηση. Οι καλοκαιρινούς μήνες συνίστανται με τις διακοπές των περισσότερων εργαζομένων ανά την ελληνική επικράτεια όποτε αυτό θα μπορούσε να σημάνει μία μείωση. Από την άλλη το Ηράκλειο αποτελεί σημείου τουρισμού για μία περίοδο περίπου πέντε μηνών από το Μάιο μέχρι και το τέλος Σεπτεμβρίου χωρίς βέβαια αυτό να δείχνει να επηρεάζει

ιδιαίτερα τις συνολικές ροές διοξειδίου του άνθρακα και ιδίως για τους καλοκαιρινούς μήνες που οι βορειοδυτικοί άνεμοι δίνουν καλύτερα εικόνα μετρήσεων από τους δρόμους έντονης κυκλοφορίας του Ηρακλείου.

Το διάγραμμα αυτό δείχνει τους μήνες διαχωρισμένους σε Καθημερινές και Σαββατοκύριακα έχοντας ουσιαστικά αθροίσει τις συνολικές ροές κάθε περιόδου πολλαπλασιασμένες με τις αντίστοιχες της ημέρες. Οι διακυμάνσεις των Καθημερινών εμφανίζουν μία σημαντική διαφορά στο σύνολο των 12-μηνων για τα δύο έτη με την πρώτη χρονοσειρά να καταγράφει εμφανώς μεγαλύτερες ροές.

Συμπερασματα

Η παρούσα πτυχιακή για το διάστημα εργασίας της καταγράφει και παρουσιάζει τις ροές διοξειδίου του άνθρακα σε αστικό περιβάλλον όπως αυτές παρουσιάζονται στη θεωρία και υπολογίζονται μέσω της ανάλογη ανάλυση δεδομένων σε κατάλληλες χρονοσειρές με παράλληλο άξονα τις μοίρες εμφάνισης του ανέμου και την χρονική περίοδο που γινόταν η μέτρηση. Ακόμα, δημιουργήθηκαν εικόνες που παρουσιάζουν τα πρότυπα ανέμου της περιοχής μελέτης καθώς και τα αντίστοιχα αποτυπώματα (FFPs). Όλα τα παραπάνω εφαρμόστηκαν για την περίπτωση του Ηρακλείου για τη χρονική περίοδο Νοεμβρίου 2016 – Οκτωβρίου 2018. Καταλήγουμε λοιπόν στα εξής:

- Οι δύο ετήσιες χρονοσειρές εμφανίζουν παρόμοια πρότυπα ροών με μικρές αλλαγές, και συγκλίνουν σε ένα κοινό πρότυπο που χαρακτηρίζεται από μέγιστες τιμές ροών το μεσημέρι (11:00 -12:00), ακολουθώντας μία πτωτική τάση μέχρι το επόμενο μέγιστο το απόγευμα (19:00). Στο σύνολο τους τα πρότυπα F_c όπου για την περίοδο 01/11/16-31/10/17 έχουμε $19,6 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ ενώ για 01/11/17-31/10/18 $18,7 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$
- Ύστερα από επεξεργασία καταλήγουμε να μη συμπεριλαμβάνουμε στην ανάλυση των δεδομένων για το 2016 - 2017 τα κενά αγγίζοντας το 20,3% των συνολικών ετήσιων μετρήσεων ενώ για το 2017 - 2018 το 26,8% και συνολικά, το 23,5% και για τα δύο έτη.
- Όσον αφορά στα αποτυπώματα που δημιουργήθηκαν δε διαφαίνονται ιδιαίτερες διαφορές. Διαφορές οι οποίες εντοπίζονται στο νότιο μέρος των αποτυπωμάτων που καλύπτουν οικιστική ζώνη ενώ στο βόρειο αφορούν κατά κύριο λόγο εμπορική ζώνη και έτσι δικαιολογούνται πιθανές αλλαγές στις ποσοτικές μετρήσεις των ροών διοξειδίου του άνθρακα.
- Ο πίνακας που παρουσιάζεται δίνει μία πιο συνοπτική εικόνα για τις ροές ανά γωνία μετρήσεων εκδηλώνοντας μικρές διαφορές για τις δύο χρονοσειρές. Με το διαχωρισμό των ροών ανά γωνία γίνεται πλέον σαφής και ευδιάκριτος ο ρόλος που έχει το κάθε τόξο στο σύνολο των ετήσιων ροών, αναδεικνύοντας το τόξο με κέντρο τις 45 μοίρες το κυριάρχο και σταθερότερο στη συνεισφορά των ροών στο συνολικό διάστημα των μετρήσεων.
- Μέσω των Wind Roses καταλήγουμε σε χαρακτηρισμό εμφανών προτύπων ανέμου για το σύνολο ενός χρόνου του Ηρακλείου, και αναδεικνύονται τα πρότυπα σε ημερίσια και νυχτερινά αλλά και ανά τετράμηνο λήψεων. Τα πρότυπα αυτά όπως έχουμε εξηγήσει κατάλληλα στα FFPs διέφεραν από έτος σε έτος. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει τις συνολικές ροές μας αφού οι εκάστοτε μετρήσεις έρχονται από διαφορετικές περιοχές σε αρκετά σημεία.

Βιβλιογραφία

- [1] North Carolina Climate Office, “Composition of the Atmosphere.” [Online]. Available: <https://climate.ncsu.edu/edu/Composition>.
- [2] European Environment Agency, “EMEP EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 Introduction,” no. 21, 2551.
- [3] T. E. Graedel and P. J. Crutzen, *Atmospheric Change An Earth System Perspective*, 1st ed. W.H. Freeman and Company, 1993.
- [4] “Monthly Average Mauna Loa CO₂.” [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [5] ECMWF, “Greenhouse Gases,” 2019. [Online]. Available: <https://climate.copernicus.eu/greenhouse-gases>. [Accessed: 09-Apr-2019].
- [6] A. Baccini, W. Walker, L. Carvalho, M. Farina, and R. A. Houghton, “Response to Comment on ‘Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss,’” *Science (80-.)*, vol. 363, no. 6423, p. eaat1205, 2019.
- [7] FAOSTAT, “Dataset Information : Methodology and Quality Information :,” vol. 5, no. 1997, 2013.
- [8] H. R. and M. Roser, “CO₂ and other Greenhouse Gas Emissions,” *Our World Data*, 2019.
- [9] G. Churkina, “The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle,” *Front. Ecol. Evol.*, vol. 3, no. January, pp. 1–9, 2016.
- [10] N. Chrysoulakis, E. A. de Castro, and E. J. Moors, “Understanding Urban Metabolism: A Tool for Urban Planning.” p. 232, 2015.
- [11] S. M. Miller and A. M. Michalak, “Constraining sector-specific CO₂ and CH₄ emissions in the US,” no. January, pp. 3963–3985, 2017.
- [12] S. Stagakis, N. Chrysoulakis, N. Spyridakis, C. Feigenwinter, and R. Vogt, “Eddy Covariance measurements and source partitioning of CO₂ emissions in an urban environment: Application for Heraklion, Greece,” *Atmos. Environ.*, vol. 201, no. August 2018, pp. 278–292, 2019.
- [13] B. Crawford, C. S. B. Grimmond, and A. Christen, “Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area,” *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 4, pp. 896–905, 2011.
- [14] R. Moriwaki and M. Kanda, “Seasonal and Diurnal Fluxes of Radiation, Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide over a Suburban Area,” *J. Appl. Meteorol.*, vol. 43, no. 11, pp. 1700–1710, 2004.
- [15] S. Stagakis, “Innovative methodologies for in-situ monitoring of CO₂ emissions in urban areas,” 2018. [Online]. Available: [https://connectingnature.eu/sites/default/files/images/inline/Stavros Stagakis-1.pdf](https://connectingnature.eu/sites/default/files/images/inline/Stavros%20Stagakis-1.pdf).
- [16] Κ. ΧΕΛΜΗΣ and Γ. ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ, “Σημειώσεις Φυσικής Περιβάλλοντος,” Αθήνα, 2005.
- [17] D. Aubinet, M., Vesala, T., Papale, *Eddy Covariance - A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, no. March. 2554.
- [18] J. D. Jacob, P. B. Chilson, A. L. Houston, and S. W. Smith, “Considerations for atmospheric measurements with small unmanned aircraft systems,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 9, no. 7, pp. 1–16, 2018.
- [19] T. R. Oke, “Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites,” *World Meteorol. Organ.*, no. 81, p. 51, 2006.
- [20] Π. Κασσωμένος, *Φυσική Περιβάλλοντος*. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2017.

- [21] C. S. B. Grimmond and T. R. Oke, “Areodynamic Propriertise of Urban Areas Derived From Analysis_Grimmond1998.Pdf.” 1999.
- [22] G. Bonan, *Ecological climatology*, vol. 8, no. 4. 2017.
- [23] N. Chrysoulakis *et al.*, “Sustainable urban metabolism as a link between biophysical sciences and urban planning: The BRIDGE project,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 112, no. 1, pp. 100–117, 2013.
- [24] J. H. C. Gash and A. D. Culf, “Applying a linear detrend to eddy correlation data in realtime,” *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 79, no. 3, pp. 301–306, 2004.
- [25] D. Vickers and L. Mahrt, “graphDBSummary,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 14, pp. 512–526, 1997.
- [26] E. K. Webb and R. Leuning, “Givoly, D., and D. Palmon. Insider Trading and the .pdf,” pp. 85–100, 1980.
- [27] J. Moncrieff, R. Clement, J. Finnigan, and T. Meyers, “Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series,” in *Handbook of Micrometeorology. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, X. Lee, W. Massman, and B. Law, Eds. Springer, Dordrecht, 2004.
- [28] J. B. Moncrieff *et al.*, “A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide,” *J. Hydrol.*, vol. 188–189, no. 1–4, pp. 589–611, 1997.
- [29] T. Foken, G. Mathias, M. Mauder, L. Mahrt, B. Amiro, and W. Munger, “Chapter 9 POST-FIELD DATA QUALITY CONTROL,” no. 1988, pp. 181–208, 2004.
- [30] T. Foken and B. Wichura, “Tools for quality assessment of surface-based flux measurements],” vol. 1923, no. 95, 1996.
- [31] F. Wang *et al.*, “An Empirical Study on the Impact Path of Urbanization to Carbon Emissions in the China Yangtze River Delta Urban Agglomeration,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 6, p. 1116, 2019.
- [32] N. Kljun, P. Calanca, M. W. Rotach, and H. P. Schmid, “A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP),” *Geosci. Model Dev.*, vol. 8, no. 11, pp. 3695–3713, 2015.
- [33] M. Kanda, A. Inagaki, T. Miyamoto, M. Gryschka, and S. Raasch, “A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces,” *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 148, no. 2, pp. 357–377, 2013.
- [34] Science Daily, “Troposphere.” [Online]. Available: <https://www.sciencedaily.com/terms/troposphere.htm>.
- [35] B. Lietzke, R. Vogt, C. Feigenwinter, and E. Parlow, “On the controlling factors for the variability of carbon dioxide flux in a heterogeneous urban environment,” *Int. J. Climatol.*, vol. 35, no. 13, pp. 3921–3941, 2015.
- [36] E. Velasco *et al.*, “Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City,” *Atmos. Environ.*, vol. 97, pp. 226–238, 2014.