



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

“Συμβολή στη μελέτη της στατιστικής πρόγνωσης της ποιότητας αέρα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης”

Γερολυμάτου Παρασκευή – Ελένη
Επιβλέπων καθηγητής: Πρόδρομος Ζάνης

Θεσσαλονίκη, 2017





Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας το τελευταίο μέρος των μεταπτυχιακών σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που βοήθησαν να φέρω εις πέρας την κάθε υποχρέωση.

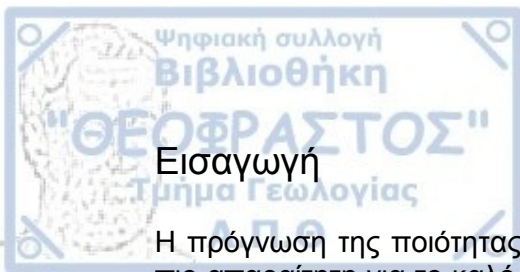
Ευχαριστώ πολύ τον κ. Πρόδρομο Ζάνη, υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής διατριβής, για τη στήριξη, την καθοδήγηση και την μετάδοση των γνώσεων, με αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή έρευνα και εργασία.

Τον κ. Γιάννη Πυθαρούλη, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για τη συλλογή δεδομένων από το μοντέλο πρόγνωσης, την καθοδήγηση και τις προτάσεις του από την αρχή της έρευνας.

Τους υποψήφιους διδάκτορες Στέργιο Κάρτσιο και τον Θάνο Τσικερδέκη για τη βοήθεια τους στη συλλογή δεδομένων και τις συμβουλές στη χρήση λογισμικού επεξεργασίας. Φίλους και γνωστούς για την καλύτερη διαχείριση των τεχνικών μέσων.

Τέλος, δε θα ήθελα να παραλείψω όλους τους καθηγητές του τομέα, συμφοιτητές, την οικογένεια και φίλους που συνέβαλαν με τη γνώση και τη βοήθεια τους ώστε να πραγματοποιήσω το όνειρο μου τα τελευταία τρία χρόνια.

Γερολυμάτου Παρασκευή Ελένη
Θεσσαλονίκη, 2017



Εισαγωγή

Η πρόγνωση της ποιότητας του αέρα στις μεγάλες αστικές περιοχές γίνεται όλο και πιο απαραίτητη για το καλό της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Η παρούσα διπλωματική διατριβή έχει ως σκοπό τη συμβολή στην πρόγνωση της ποιότητας του αέρα στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, με βάση παρατηρησιακά και προγνωστικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, το κύριο κομμάτι της έρευνας είναι η ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων τριήμερης πρόγνωσης (ένα μοντέλο για κάθε ημέρα πρόγνωσης) της ποιότητας του αέρα, της συνέχειας του όζοντος και των αιωρούμενων σωματιδίων.

Πηγή δεδομένων είναι οι παρατηρήσεις τεσσάρων σταθμών της πόλης και προγνώσεις του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης WRF του τομέα μετεωρολογίας και κλιματολογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου, για το έτος 2014. Η ετήσια και εποχιακή ανάλυση παλινδρόμησης, για κάθε σταθμό – σημείο της πόλης, αποδεικνύουν την επίδραση κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου στην ατμοσφαιρική ρύπανση ξεχωριστά. Η συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια και η στατιστική σημαντικότητα τους για κάθε μοντέλο, εκφράζουν τη μεταβλητότητα των φυσικών επιδράσεων που αναπαριστά σε κάθε μοντέλο. Τα εποχιακά παρουσιάζουν τις αλλαγές σήματος των επιδράσεων αυτών για τη διάρκεια ενός έτους.

Λαμβάνοντας υπόψη τη συσχέτιση, τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και τους ανάλογους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης γίνεται εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων όπου σε συνδυασμό με διαγράμματα χρονοσειράς διασποράς βγαίνουν συμπεράσματα για τη χρήση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ως μέθοδος πρόγνωσης ρύπων και την για την απόδοση των μοντέλων αυτών για κάθε μία από τις τέσσερις περιοχές μελέτης

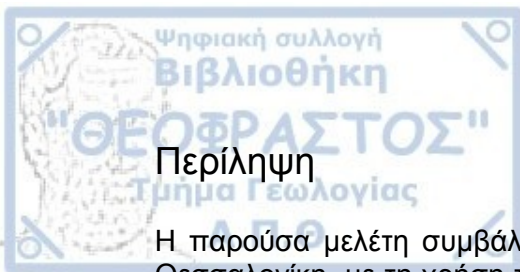
Παρακάτω, στο κεφάλαιο 1, γίνεται περιγραφή βασικών σημείων θεωρίας για το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια όπως οι πηγές, η παραγωγή και ο σχηματισμούς τους, η επίδραση τους στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Επίσης, γίνεται ανάλυση των φυσικών επιδράσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται και των μεθόδων στατιστικής πρόγνωσης ποιότητας αέρα.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά της Θεσσαλονίκης, των τεσσάρων σταθμών της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης WRF και της ανάλυσης παλινδρόμησης ως στατιστικό μοντέλο.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται η ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθείται και η παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων των στατιστικών μοντέλων.

Στο κεφάλαιο 4, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα για την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων σε κάθε περιοχή αλλά και για την απόδοση όλων των μοντέλων.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα που βοήθησαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την δεύτερη και τρίτη ημέρα πρόγνωσης.



Περίληψη

Η παρούσα μελέτη συμβάλλει στη στατιστική πρόγνωση της ποιότητας αέρα στην Θεσσαλονίκη, με τη χρήση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και το υψηλής ανάλυσης αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF που διαχειρίζεται ο τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου, με στόχο τη δημιουργία στατιστικών μοντέλων πρόγνωσης O_3 και PM_{10} . Συγκεκριμένα έγινε ανάπτυξη εξισώσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε ετήσια και εποχιακή βάση (ετήσια και εποχιακά μοντέλα) για τέσσερις από τους σταθμούς ελέγχου ρύπανσης της περιοχής της Θεσσαλονίκης με στόχο την πρόγνωση μέσης τιμής του O_3 και PM_{10} , διάρκειας τριών ημερών.

Το πρώτο κομμάτι μελέτης των μοντέλων διευκρινίζεται από την επίδραση και συσχέτιση των μετεωρολογικών παραμέτρων προς τους ρύπους με τον υπολογισμό της στατιστικής σημαντικότητας και του συντελεστή συσχέτισης κάθε παραμέτρου. Οι τελευταίες, ως προγνωστικές μεταβλητές, είναι: γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa, θερμοκρασία στα 850hPa, θερμοκρασία στα 2 μέτρα, σχετική υγρασία στα 2 μέτρα, ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα, ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους, συνολική βροχόπτωση και εξάγονται από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF του τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Οι συγκεντρώσεις ρύπων της προηγούμενης ημέρας είναι η κυριότερη προγνωστική μεταβλητή συμβάλλοντας στη βελτίωση των στατιστικών μοντέλων πρόγνωσης τόσο για το O_3 όσο και για τα PM_{10} . Ανάλογα με τον σταθμό (αστικό ή περιαστικό) και την εποχή, οι υπόλοιπες μεταβλητές επιδρούν διαφορετικά στις συγκεντρώσεις ρύπων δίνοντας τα αποτελέσματα αποδοτικότητας του κάθε μοντέλου.

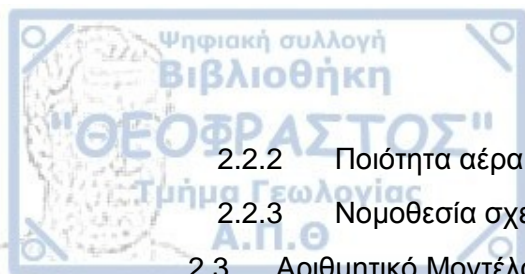
Ο υπολογισμός στατιστικών δεικτών και συντελεστών βοήθησε στην αξιολόγηση των μοντέλων, στο δεύτερο κομμάτι της μελέτης. Με τους τρεις βασικότερους δείκτες, MAE, IOA και r^2 έγινε η σύγκριση με προηγούμενες μελέτες σε περιοχές όπως της Αθήνας και συμπεραίνεται πως τα ετήσια μοντέλα έχουν απόδοση σε ίδιο επίπεδο ή καλύτερη από προηγούμενες μελέτες. Από τα εποχιακά μοντέλα, κάποια έχουν αρκετά καλή απόδοση, κυρίως τα μοντέλα πρόγνωσης O_3 , άλλα όμως, με χαμηλό συντελεστή προσδιορισμού δεν προτείνεται να χρησιμοποιηθούν για πρόγνωση.

Από την αξιολόγηση των στατιστικών μοντέλων πρόγνωσης για τους δύο ρύπους, τα ετήσια μοντέλα δίνουν αρκετά καλύτερα αποτελέσματα από τα εποχιακά. Συγκεκριμένα για την πρόγνωση O_3 , το ετήσιο μοντέλο για το σταθμό της Πλατείας Αγίας Σοφίας δίνει την καλύτερη απόδοση, έπειτα για το σταθμό του Πανοράματος, του Κορδελιού και τέλος το λιγότερο αποδοτικό μοντέλο είναι για το σταθμό της Νεοχωρούδας. Για την πρόγνωση PM_{10} τα μοντέλα ακολουθούν την σειρά Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό και Πανόραμα. Σχετικά με την επιλογή ενός στατιστικού μοντέλου πρόγνωσης με την καλύτερη αξιοπιστία προτείνεται το ετήσιο μοντέλο για το σταθμό της Πλατείας Αγίας Σοφίας τόσο για το O_3 όσο και το αντίστοιχο ετήσιο μοντέλο για τα PM_{10} .



Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	4
Περίληψη.....	5
Κεφάλαιο 1 ^ο	8
1.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση.....	8
1.1.1 Ορισμός.....	8
1.1.2 Πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων.....	8
1.2 Όζον.....	8
1.2.1 Φωτοχημική παραγωγή όζοντος - Χημεία όζοντος.....	9
1.2.2 Φωτοχημικό νέφος.....	12
1.2.3 Επιδράσεις φωτοχημικού νέφους.....	12
1.3 Αιωρούμενα σωματίδια.....	13
1.3.1 Μέγεθος σωματιδίων.....	13
1.3.2 Μηχανισμοί σχηματισμού σωματιδίων.....	14
1.3.3 Χημική σύσταση σωματιδίων.....	16
1.3.4 Επιπτώσεις στην υγεία.....	17
1.4 Επίδραση μετεωρολογίας - μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα.....	17
1.4.1 Ατμοσφαιρική πίεση.....	18
1.4.2 Θερμοκρασιακή αναστροφή και κατακόρυφη ανάμειξη.....	18
1.4.3 Άνεμος και μεταφορά.....	19
1.4.4 Νέφη, ομίχλη και υετός.....	20
1.4.5 Θερμοκρασία.....	20
1.4.6 Σχετική υγρασία.....	20
1.4.7 Τύποι καιρού.....	20
1.5 Εφαρμογές και Ανάγκες Πρόγνωσης.....	22
1.6 Μέθοδοι Πρόγνωσης Όζοντος και Αιωρουμένων Σωματιδίων.....	23
1.6.1 Στατιστική πρόγνωση ποιότητας αέρα.....	23
1.6.2 Ντετερμινιστικό μοντέλο ποιότητας αέρα.....	24
2 Κεφάλαιο 2.....	26
2.1 Τοπογραφικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της πόλης.....	26
2.1.1 Η θαλάσσια αύρα.....	26
2.2 Διαχείριση ποιότητας αέρα στη Θεσσαλονίκη.....	27
2.2.1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας.....	27



2.2.2	Ποιότητα αέρα Θεσσαλονίκης	29
2.2.3	Νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα ατμόσφαιρας	30
2.3	Αριθμητικό Μοντέλο Πρόγνωσης καιρού υψηλής ανάλυσης.....	31
2.4	Εξίσωση Παλινδρόμησης	32
2.4.1	Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση.....	32
2.4.2	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση	32
2.5	Μέθοδος στατιστικής πρόγνωσης.....	33
2.5.1	Επιλογή μεθόδου πρόγνωσης.....	33
2.5.2	Ανάπτυξη ενός στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης.....	33
2.5.3	Πλεονεκτήματα	34
2.5.4	Μειονεκτήματα.....	34
2.6	Επιλογή ανεξάρτητων μεταβλητών	34
2.7	Αξιολόγηση προγνωστικού μοντέλου	35
2.7.1	Αξιολόγηση πρόγνωσης συνεχών μεταβλητών	35
3	Κεφάλαιο 3.....	38
3.1	Μεθοδολογία ανάπτυξης παλινδρόμησης ως στατιστικό μοντέλο πρόγνωσης.....	38
3.1.1	Επιλογή μεταβλητών	38
3.1.2	Εξαγωγή δεδομένων από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF....	39
3.1.3	Γεωγραφικές συντεταγμένες.....	40
3.2	Αποτελέσματα	40
3.2.1	Όζον (O ₃).....	40
3.2.2	Αιωρούμενα σωματίδια (PM ₁₀).....	70
4	Κεφάλαιο 4.....	87
4.1	Συμπεράσματα.....	87
	Βιβλιογραφία.....	91
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	95

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

1.1.1 Ορισμός

Ατμοσφαιρική Ρύπανση καλείται το σύνολο στερεών, αέριων ή και υγρών ρύπων, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα.

Κάποιοι ρύποι μπορεί να επηρεάσουν το περιβάλλον, χωρίς εμφανείς αλλαγές, δηλαδή χωρίς αρνητικές επιπτώσεις, για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι ρύποι μπορεί να έχουν άμεσα καταστρεπτικά αποτελέσματα (Ζάνης 2014).

1.1.2 Πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι πηγές ρύπανσης λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας είναι λιγότερες από τις φυσικές πηγές αλλά ενισχύουν περισσότερο την ατμοσφαιρική ρύπανση. Αιτία αυτού είναι η αύξηση όλων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Η διάκριση των ρύπων γίνεται σε πρωτογενής και δευτερογενής. Πρωτογενής είναι ο ρύπος που προέρχεται απ' ευθείας από την πηγή ενώ δευτερογενής αυτός που παράγεται από άλλον πρωτογενή μέσω χημικών αντιδράσεων.

Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές είναι:

- Τα ηφαίστεια
- Οι πυρκαγιές των δασών
- Οι ωκεανοί
- Η βιολογική αποσύνθεση των φυτών και ζώων
- Η αποσάθρωση του εδάφους
- Φυτά και δένδρα

Ενώ οι σημαντικότερες λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας:

- μέσα μεταφοράς
- οικιακή θέρμανση
- διεργασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- βιομηχανικές καύσεις και εκπομπές

1.2 Όζον

Το όζον είναι αέριο στοιχείο που δεν εκπέμπεται απ ευθείας στην ατμόσφαιρα αλλά δημιουργείται μετά από πολλαπλές χημικές αντιδράσεις και με την βοήθεια του φωτός στην στρατόσφαιρα και τροπόσφαιρα. Το 90% της συνολικής παραγωγής του βρίσκεται στην στρατόσφαιρα (ατμοσφαιρικό στρώμα 20-30 χλμ. πάνω από την επιφάνεια της γης) ενώ το υπόλοιπο 10% στην τροπόσφαιρα (15 χλμ. πάνω από την επιφάνεια), γνωστό ως τροποσφαιρικό όζον με έντονη οξειδωτική αντίδραση και σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Συσσωρεύεται κυρίως σε μεγάλες αστικές περιοχές όπου με συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες συναντώνται μεγάλες συγκεντρώσεις τροποσφαιρικού όζοντος και είναι επιβλαβές για εκατομμύρια ανθρώπους (Paul et al., 1987). Το στρατοσφαιρικό όζον όμως έχει προστατευτικό



ρόλο με την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η μείωση του στην στρατόσφαιρα από ανθρωπογενείς παράγοντες αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα που απασχολούν την επιστημονική και πολιτική κοινότητα.

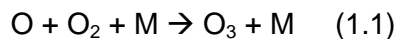
Το όζον δεν συναντάται μόνο στο πρόβλημα της μείωσης του στη στρατόσφαιρα, γνωστό ως "τρύπα του όζοντος" αλλά και στα υπόλοιπα βασικά προβλήματα ρύπανσης όπως το φωτοχημικό νέφος, την αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος και εμμέσως την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η αναγνώριση του ως ρύπος της ατμόσφαιρας έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1940 με την παρατήρηση ασυνήθιστα υψηλών τιμών του στο Los Angeles. Όπως είναι σήμερα γνωστό, ο σχηματισμός του γίνεται από τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και τα οξειδία του αζώτου (NO_x) καθώς ενισχύεται από την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας και υψηλής θερμοκρασίας.

Πηγή της ρίζας υδροξυλίου (OH), αρκετά σημαντικό οξειδωτικό μέσο, είναι το τροποσφαιρικό όζον. Με την παρουσία του υδροξυλίου στην ατμόσφαιρα παρουσιάζεται μείωση διάφορων ενώσεων (CO_2 , CH_4 , H_2O) που συμβάλλουν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Δηλαδή το τροποσφαιρικό όζον συμβάλει στην μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά ένα μικρό ποσοστό. Αντίθετα, το ίδιο το όζον δρα ως θερμοκηπικό αέριο καθώς με την αύξηση του στην τροπόσφαιρα συνεισφέρει στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα.

1.2.1 Φωτοχημική παραγωγή όζοντος - Χημεία όζοντος

Όζον και μονοξείδιο του αζώτου (NO) παράγονται από αντιδράσεις μεταξύ υπέρυθρης ακτινοβολίας (hv), οξυγόνου (O_2) και διοξειδίου του αζώτου (NO_2)

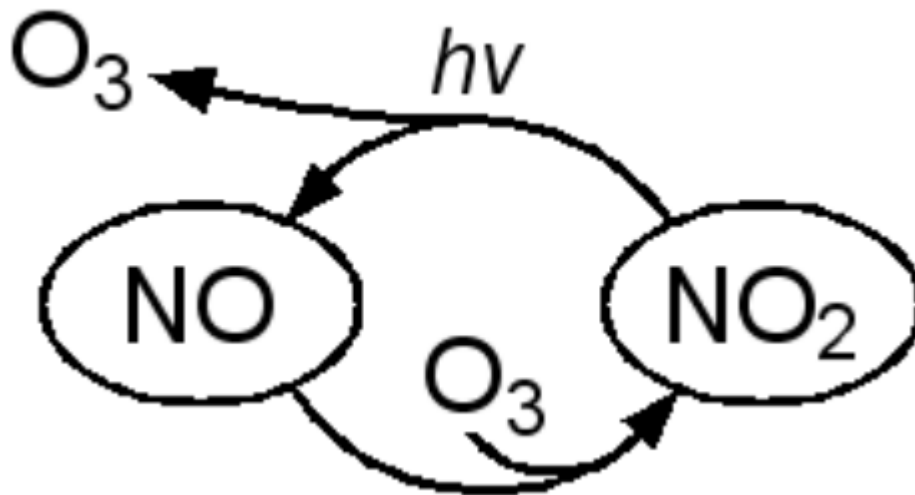


Η πρώτη αντίδραση (1.1), είναι η σημαντικότερη παραγωγής όζοντος και M είναι μια βοηθητική τρίτη ουσία, όπως το N_2 . Η δεύτερη αντίδραση (1.2), η φωτοδιάσπαση του διοξειδίου του αζώτου, πραγματοποιείται σε χαμηλά υψόμετρα (κάτω από 20 χλμ.) καθώς εκεί φτάνει ακτινοβολία μήκους κύματος μεγαλύτερου των 280nm. Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, δηλαδή στην στρατόσφαιρα, η παραγωγή του ατομικού οξυγόνου (O) γίνεται με τη φωτοδιάσπαση του μοριακού οξυγόνου (O_2) με την ακτινοβολία στο βαθύ υπεριώδες (Ζάνης, 2014).

Αμέσως μετά, το παραγόμενο όζον αντιδρά άμεσα με το μονοξείδιο του αζώτου και παράγει διοξείδιο του αζώτου (NO_2)

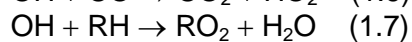
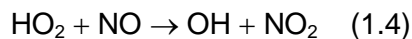


Με συγκεντρώσεις τροποσφαιρικού όζοντος 25 - 45ppb στην ατμόσφαιρα, ο παραπάνω κύκλος αντιδράσεων εκτελείται συνέχεια και γρήγορα ακόμα και χωρίς την παρουσία εκπομπών από ανθρώπινη δραστηριότητα (Altshuller and Lefohn, 1996).

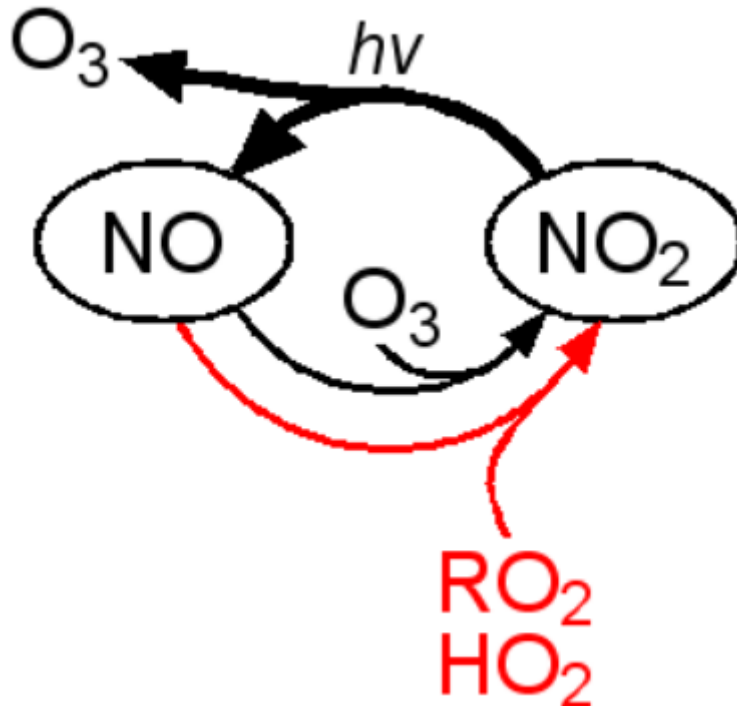


Σχήμα 1.1: Μηδενικός κύκλος όζοντος (πηγή: Ζάνης, 20014)

Στον μηδενικό κύκλο παραγωγής όζοντος (Σχήμα 1.1), προστίθενται οι εκπομπές ανθρωπίνων πηγών που παράγουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), και έχουν σημαντική συμβολή στην αύξηση όζοντος. Στις ενώσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται οι υδρογονάνθρακες που μαζί με οξείδιο του αζώτου αντιδρούν και παράγουν NO_2 . Συγκεκριμένα η υδρο-υπερόξη ρίζα (HO_2) και διάφορες αλκυλό-υπερόξη ρίζες (RO_2) που παράγονται από την οξειδωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και μορίων των υδρογονανθράκων (RH)

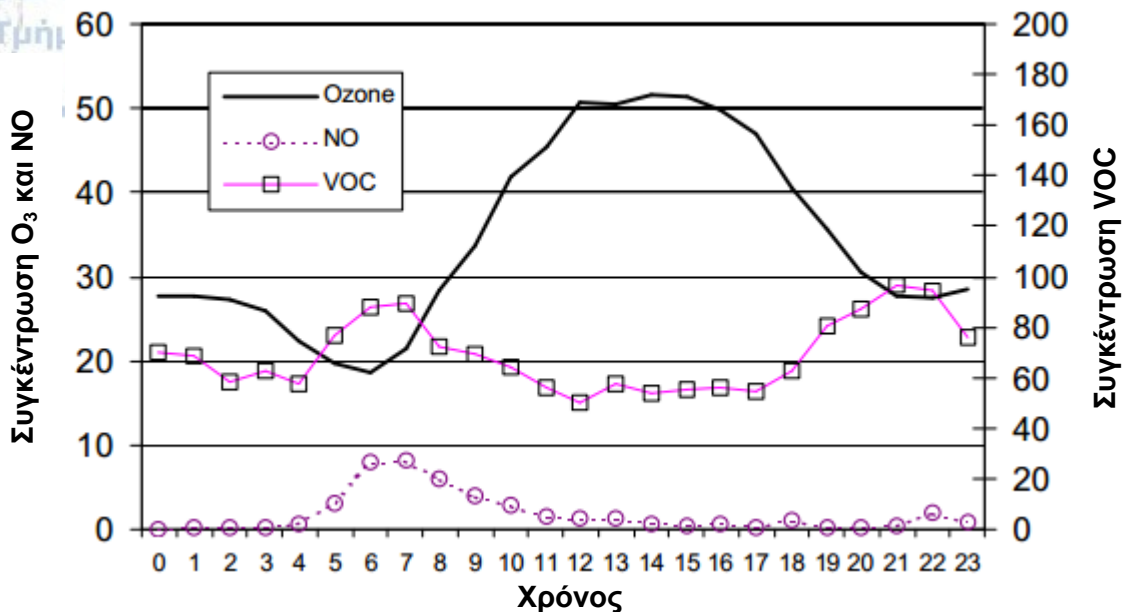


Δηλαδή με την παρουσία των ριζών δεν καταναλώνεται το όζον για την παραγωγή NO_2 και έτσι διακόπτεται η φωτοχημική ισορροπία του προηγούμενου κύκλου αντιδράσεων (Σχήμα 1.2) (Ζάνης 2014).



Σχήμα 1.2: Παραγωγή O_3 με την παρουσία των υπερόξυ ριζών και διατάραξη της φωτοχημικής ισορροπίας (πηγή: Ζάνης, 2014)

Με αύξηση των ενώσεων VOCs, οξειδώνονται μεγαλύτερες ποσότητες NO σε NO_2 με αποτέλεσμα την αύξηση όζοντος. Επιπλέον, οι ανθρωπογενείς πηγές NO δίνουν NO_2 στην ατμόσφαιρα, το οποίο αντιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία παράγοντας NO και O που στη συνέχεια μετατρέπεται σε NO_2 και O_3 . Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.3), η αύξηση των συγκεντρώσεων όζοντος γίνεται μέσα σε λίγες ώρες. Μετά την ανατολή ηλίου NO και VOCs αντιδρούν με το φως δίνοντας όζον, του οποίου οι συγκεντρώσεις καθώς αυξάνονται, μειώνονται NO και VOCs. Γενικά ο βαθμός σχηματισμού του όζοντος εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα καθώς και το χρόνο έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Όμως η πορεία των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας ποικίλει αναλόγως την περιοχή, τις πηγές εκπομπών και τις καιρικές συνθήκες στην κάθε περιοχή.



Σχήμα 1.3: Μέσος ημερήσιος κύκλος συγκεντρώσεων O₃, NO και VOCs για τον Αύγουστο του 1995 σε αστική περιοχή της Μασαχουσέτης (πηγή: EPA, 2003)

1.2.2 Φωτοχημικό νέφος

Η βιομηχανική αιθαλομίχλη δημιουργείται από την κατανάλωση καύσιμων υλών, κυρίως κάρβουνου και αποτελείται βασικά από οξειδία του θείου και αιωρούμενα σωματίδια. Το χαρακτηριστικό νέφος της αιθαλομίχλης δικαιολογείται γιατί πάντα συνοδεύεται από υψηλή σχετική υγρασία (Μελάς, 2000). Αντίθετα, αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία κάνουν λόγο για έναν τεράστιο όγκο νέφους στο Los Angeles, εκεί που μελετήθηκε για πρώτη φορά και χαρακτηρίστηκε ως φωτοχημικό νέφος. Τα επόμενα χρόνια διαπιστώθηκε ως κοινό πρόβλημα των μεγάλων πόλεων μέχρι και σήμερα που εμφανίζεται σε όλο και περισσότερες (Φυτιανός, 2009). Χαρακτηριστικό του νέφους είναι ότι δε σχετίζεται με την υγρασία της ατμόσφαιρας, όπως η βιομηχανική αιθαλομίχλη, αλλά με τον αίθριο καιρό. Ο σχηματισμός του γίνεται από εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου και υδρογονανθράκων τα οποία αντιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία (Μελάς, 2000). Οι αντιδράσεις αυτές γίνονται ταχύτερα με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της ακτινοβολίας με τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ρύπων, όπως NO₂, O₂, αλδεΐδες, οργανικά ανόργανα οξέα και υπεροξέα, ανυδρίτες του νιτρικού οξέος με υπεροξέα (π.χ. PAN), ανόργανα και οργανικά αεροζόλ κ.α. Πολλοί από τους δευτερογενείς ρύπους έχουν οξειδωτική ικανότητα μεγαλύτερη του οξυγόνου (π.χ. O₃, υπεροξείδια, PAN) και ονομάζονται φωτοχημικά οξειδωτικά (Φυτιανός, 2009). Αλλά με τη μείωση της θερμοκρασίας οι αντιδράσεις αυτές επιβραδύνονται και ο σχηματισμός του φωτοχημικού νέφους γίνεται αδύνατος. Έτσι συμπεραίνεται πως ο σχηματισμός του τροποσφαιρικού όζοντος και του νέφους ευνοείται από την ηλιοφάνεια και τους θερμούς μήνες (Ζάνης, 2014).

1.2.3 Επιδράσεις φωτοχημικού νέφους

Τα συστατικά του φωτοχημικού νέφους έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου, τη βλάστηση, τα διάφορα υλικά και χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας (ορατότητα). Όμως ο βαθμός επιρροής του νέφους δεν είναι ακριβώς γνωστός, αν και πολλά συστατικά του είναι ιδιαίτερα τοξικά. Το O₃ είναι τοξικό, το PAN και οι

αλδεΐδες είναι ισχυρά ερεθιστικά των ματιών και του λαιμού ενώ το HNO_3 και το H_2SO_4 είναι ερεθιστικά των πνευμόνων.

Σημαντικές είναι και οι επιδράσεις του νέφους στην ορατότητα της ατμόσφαιρας καθώς η μείωση της οφείλεται στο σχηματισμό αεροζόλ από τον πολυμερισμό μικρότερων μορίων, προϊόντα των χημικών αντιδράσεων. Τα αεροζόλ αποτελούνται κυρίως από οξυγονούχες οργανικές ενώσεις (αλκοόλες, αλδεΐδες, κετόνες, οργανικά οξέα, εστέρες και οργανικά νιτρικά) γιατί οι περισσότερες αντιδράσεις είναι αντιδράσεις οξειδωσης.

Μεγάλη σημασία έχουν οι καταστροφικές επιδράσεις του νέφους στη βλάστηση. Τη μεγαλύτερη φυτοτοξικότητα έχει το PAN, το οποίο δημιουργεί μια μπρούτζινη, γυαλιστερή επιφάνεια στα νεαρά φύλλα. Έκθεση για αρκετές ώρες σε ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις PAN μόλις 20-50 ppb μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στα φυτά. Ευτυχώς όμως, οι συγκεντρώσεις του στην ατμόσφαιρα είναι αρκετά χαμηλές. Από την άλλη το NO_2 βρίσκεται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, αλλά η φυτοτοξικότητα του είναι πολύ μικρότερη. Έτσι, το O_3 αποτελεί τη μεγαλύτερη οξειδωτική απειλή για τη βλάστηση.

Η φυτοτοξικότητα του εκδηλώνεται με χαρακτηριστικές κίτρινες κηλίδες στην επιφάνεια των φύλλων ή απλά με αναστολή ανάπτυξης των φυτών χωρίς παραπάνω συμπτώματα. Έκθεση σε συγκεντρώσεις O_3 περίπου 60 ppb μπορεί να φέρει προσωρινή μείωση της ταχύτητας φωτοσύνθεσης στο φυτό. Για αυτό και οι καταστροφές που προκαλεί σε σοδειές έχουν μεγάλο οικονομικό κόστος, όπως π.χ. στην Καλιφόρνια. Για την προστασία της βλάστησης από το O_3 , έχουν θεσπιστεί και συγκεκριμένα όρια ($200\mu\text{g m}^{-3}$ ως μέση ωριαία τιμή και $65\mu\text{g m}^{-3}$ ως μέση τιμή 24ώρου) (Φυτιανός, 2009).

1.3 Αιωρούμενα σωματίδια

Με τον όρο Αιωρούμενη Σωματιδιακή Ύλη (Particulate Matter) εννοούμε κάθε συστατικό, εκτός από το καθαρό νερό, που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε υγρή ή στερεή μορφή κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και έχει μέγεθος της τάξης των μικρομέτρων (μm) ή μικρότερο, αλλά μεγαλύτερο από την μοριακή διάσπαση (περίπου 2\AA) (Καραθανάσης, 2006). Οι όροι ατμοσφαιρικά αιωρήματα, αιωρούμενα σωματίδια, αερολύματα, αεροζόλς και PM (Particulate Matter) είναι συνώνυμοι.

Η σημασία των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων είναι μεγάλη καθώς:

- Αποτελούν βασικό παράγοντα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- Χρησιμεύουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei) για τη δημιουργία νεφών
- Απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Έχουν σημαντικό ρόλο σε χημικές αντιδράσεις και ηλεκτρικά φαινόμενα
- Σε υψηλές συγκεντρώσεις αποτελούν κίνδυνο για το αναπνευστικό του ανθρώπου (Μελάς, 2007).

1.3.1 Μέγεθος σωματιδίων

Ο χρόνος ζωής των σωματιδίων είναι αντιστρόφως ανάλογος του μεγέθους τους. Η παραμονή των μικρών σωματιδίων διαρκεί από μερικές μέρες ως βδομάδες ενώ των μεγάλων σωματιδίων διαρκεί μερικές ώρες. Το μέγεθος τους εκφράζεται κατά κανόνα από τη διάμετρο τους και η ταξινόμηση τους γίνεται ως εξής:

- Aitken σωματίδια: $0,001 - 0,1\mu\text{m}$



- λεπτά σωματίδια: 0,1 - 1 μm
- γιγαντιαία ή χονδρόκοκκα σωματίδια: $>1 \mu\text{m}$
- σωματίδια καπνού: 1 - 1000 μm
- σκόνη μικρής διαμέτρου: $< 100 \mu\text{m}$
- σκόνη μεγάλης διαμέτρου: $> 100 \mu\text{m}$
- νεφοσταγονίδια: 1 - 100 μm
- σταγόνες βροχής: $> 100 \mu\text{m}$ (Ζάνης, 2014)

1.3.2 Μηχανισμοί σχηματισμού σωματιδίων

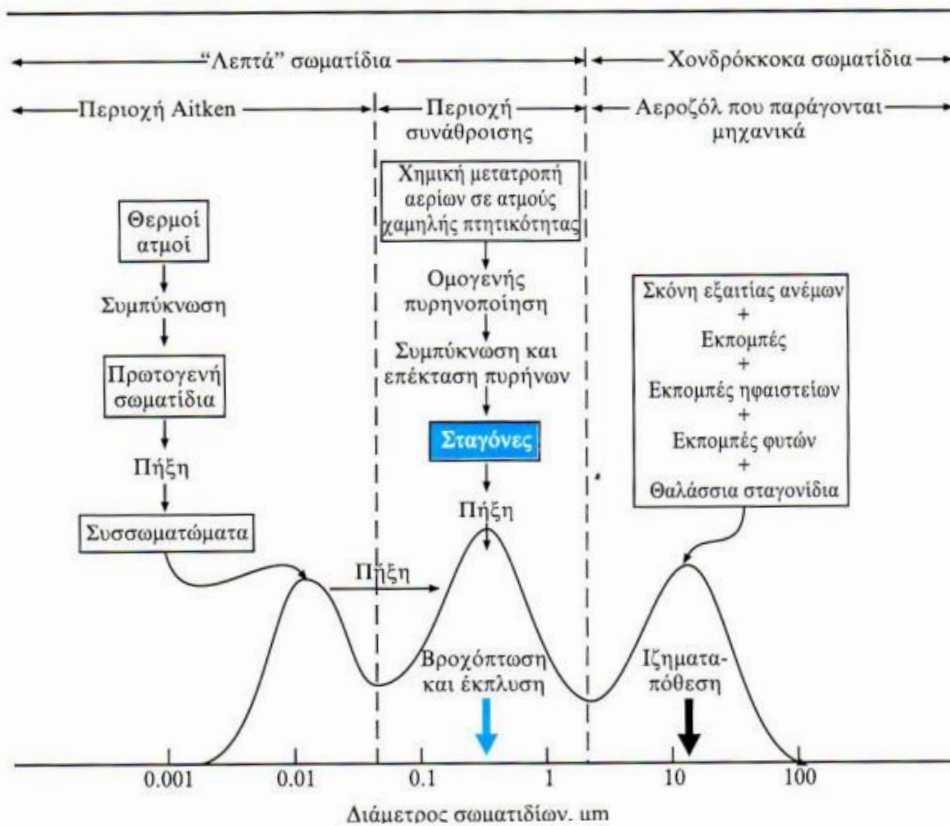
Εκτός από τα εκπεμπόμενα πρωτογενή σωματίδια, διάφορες αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα δίνουν και δευτερογενή σωματίδια. Τα λεπτά σωματίδια, με μέγιστη διάμετρο γύρω στα 0,2 μm , δημιουργούνται από τον μηχανισμό πήξης και συμπύκνωσης (Σχήμα 1.4) και είναι κυρίως θειικά, νιτρικά οργανικά, αμμωνιακά άλατα και ενώσεις του μολύβδου.

Σωματίδια με εύρος 0,1 - 1 μm σχηματίζονται από συμπύκνωση ατμών από προϊόντα καύσης και ατμοσφαιρική σκόνη. Το μικρό βάρος τους είναι ο λόγος που παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μήνες (Πίνακας 1.2).

Τα χονδρόκοκκα σωματίδια, με μέγιστο στα 10 μm , δημιουργούνται από την επιφάνεια της θάλασσας και γης με την βοήθεια του ανέμου ως μικρά σωματίδια και γίνονται μεγαλύτερα μέχρι ως ότου απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα με ξηρή και υγρή εναπόθεση. Τα σωματίδια αυτά είναι κυρίως άμμος, θαλάσσιο αλάτι ή προέρχονται από τη βλάστηση.

Οι πυρήνες Aitken και τα ιόντα έχουν μέγεθος μικρότερο των 0,1 μm και πιθανές πηγές τους είναι από σκόνη, ηφαίστεια, πυρκαγιές δασών, εξατμίσεις αυτοκινήτων, φωτο-οξειδωτικές αντιδράσεις και βιομηχανικές πηγές (Ζάνης, 2014). Τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm ανυψώνονται δυσκολότερα από τον άνεμο λόγω της μεγάλης ταχύτητας καθίζησης που έχουν, με αποτέλεσμα τον μικρότερο χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (Πίνακας 1.2). Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται οι πηγές σωματιδίων και οι ποσότητες που παράγονται από κάθε μία, ενώ στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζονται οι εκπομπές σωματιδίων PM_{10} σε ποσοστά ανάλογα με τον τομέα, για το έτος 1999.

Η καύση ορυκτών καυσίμων (κάρβουνο, πετρέλαιο, diesel) είναι αρκετά σημαντική πηγή σωματιδίων, ενώ οι εκπομπές από καύσεις βενζίνης δίνουν μικρές ποσότητες σωματιδίων (Μελάς, 2007).



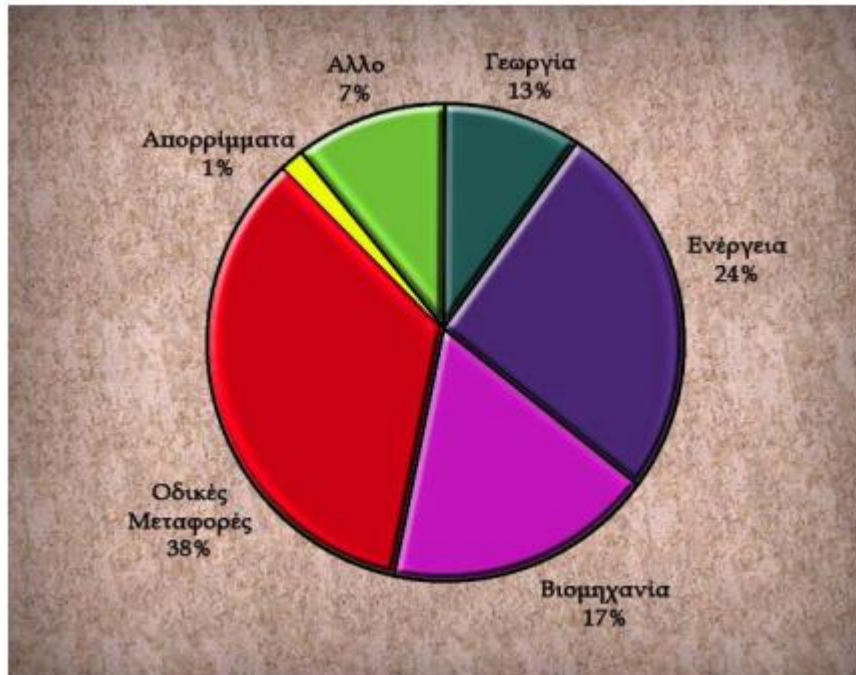
Σχήμα 1.4: Κατανομή των σωματιδίων με τις πηγές, τις βασικές διεργασίες και τους μηχανισμούς σχηματισμού και απομάκρυνσης των σωματιδίων (πηγή: Ζάνης, 2014)

Πίνακας 1.1: Φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές αιωρούμενων σωματιδίων (10^6 τόνοι/έτος) (πηγή: Μελάς, 2007)

ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ		ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ	
Σκόνη	100 – 500	Εκπομπές	10 – 90
Πυρκαγιές δασών	3 – 150	Μετατροπή αερίων σε σωματίδια	160 – 240
Ηφαίστεια	25 – 150	Φωτοχημική μετατροπή αερίων σε σωματίδια	15 – 90
Θάλασσες	4 – 300		
Μετατροπή αερίων σε σωματίδια	270 – 900		
Φωτοχημική μετατροπή αερίων σε σωματίδια	75 – 200		
ΣΥΝΟΛΟ	480 – 2200	ΣΥΝΟΛΟ	185 – 420

Πίνακας 1.2: Χρόνος καθόδου ενός σωματιδίου λόγω βάρους κατά 1 χιλιόμετρο (πηγή: Μελάς, 2007)

Διάμετρος σωματιδίου	Χρόνος καθόδου 1 χιλιόμετρου
0,02	228 χρόνια
0,1	36 χρόνια
1,0	328 ημέρες
10,0	3,6 ημέρες
100,0	1,1 ώρες
1000,0	4 λεπτά



Σχήμα 1.5: Εκπομπές σωματιδίων PM10 ανά τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 1999 (πηγή: Μελάς, 2007)

1.3.3 Χημική σύσταση σωματιδίων

Η επίδραση των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία αλλά και η αναγνώριση της πηγής των σωματιδίων εξαρτάται κυρίως από την χημική τους σύσταση.

Τα κύρια συστατικά του ατμοσφαιρικού αερολύματος:

- Ορυκτογενή μέταλλα από επαναιώρηση σκόνης
- Καθαρός άνθρακας από διαδικασίες καύσης
- Οργανικές ενώσεις από προϊόντα ημιτελών καύσεων
- Άλατα του αμμωνίου, προϊόντα εξουδετέρωσης όξινων ουσιών στην ατμόσφαιρα από την αμμωνία
- Άλατα θαλασσινού νερού
- Άλατα ασβεστίου από οικοδομικά υλικά και σκόνη
- Θειικά άλατα, προϊόντα αντιδράσεων του διοξειδίου του θείου
- Νιτρικά άλατα, προϊόντα αντιδράσεων του οξειδίου του αζώτου

1.3.4 Επιπτώσεις στην υγεία

Παιδιά, ηλικιωμένοι και άτομα που πάσχουν από άσθμα ή έχουν προβλήματα με την καρδιά είναι ευαίσθητοι στις υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Η εισχώρηση και εναπόθεση τους στους πνεύμονες του ανθρώπου είναι πιο πιθανή όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος τους (Ζάνης, 2014). Εκτιμάται ότι τα επεισόδια ρύπανσης μικρής διάρκειας είναι υπεύθυνα για το 7-10% των ασθενειών του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος των παιδιών, ενώ το ποσοστό αυξάνεται σε 20% σε μεγάλες αστικές περιοχές. Επίσης, 4-8% πρώιμων θανάτων θεωρείται πως οφείλεται σε έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια (Μελάς, 2007).

Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μm, που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα, αποτελούν το εσπνεύσιμο κλάσμα των σωματιδίων (PM₁₀). Η εναπόθεση των μεγαλύτερων γίνεται στη ρινική κοιλότητα, ενώ όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος αυτών τότε βαθύτερη η εισχώρηση στους αεραγωγούς και τις κυψελίδες. Τα σωματίδια που διαπερνούν τον ρινοφάρυγγα (άνωτερο τμήμα) ονομάζονται και θωρακικά, με διάμετρο μικρότερη των 7 μm. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm αποτελούν το αναπνεύσιμο κλάσμα (PM_{2,5}), το οποίο επιφέρει και τις περισσότερες βλάβες στην υγεία (Φυτιανός, 2009).

1.4 Επίδραση μετεωρολογίας - μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα

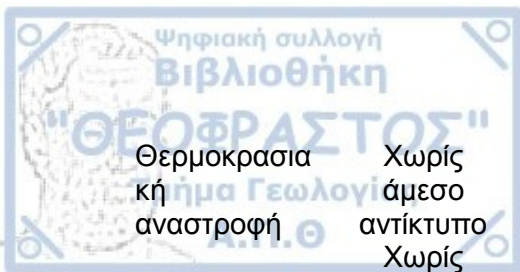
Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και του όζοντος. Κάθε μετεωρολογική παράμετρος επιδρά διαφορετικά στα επίπεδα της ρύπανσης και κάθε μετεωρολογικό φαινόμενο επιδρά ανάλογα με την κλίμακα του. Συγκεκριμένα, οι μετεωρολογικές συνθήκες και παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα είναι:

- Μεταφορά μέσω ανέμου
- Τοπικοί άνεμοι και οριζόντια διασπορά της ρύπανσης λόγω ανέμου
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Κατακόρυφη ανάμειξη και διάχυση της ρύπανσης στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα
- Θερμοκρασία
- Υγρασία

Τα υψηλά και χαμηλά συστήματα μεγάλης κλίμακας, ο καθημερινός κύκλος θέρμανσης - ψύξης και η τοπογραφία είναι σημαντικοί παράγοντες της πορείας των παραπάνω μετεωρολογικών παραμέτρων (EPA, 2003).

Πίνακας 1.3: Επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων και παραμέτρων στις συγκεντρώσεις O₃ και PM₁₀ (πηγή: EPA, 2003)

Φαινόμενα	Εκπομπές	Χημεία	Συσσώρευση/Διασπορά/Απομύκρυνση
Βαρομετρικό χαμηλό και υψηλό	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Η ράχη ευνοεί τη συσσώρευση O ₃ και PM ενώ ο αυλώνας την διασπορά και απομάκρυνση αυτών
Άνεμος και μεταφορά	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Ισχυροί άνεμοι διασπείρουν ρύπους με μείωση παραγωγής O ₃ - PM	Ισχυροί άνεμοι διασπείρουν O ₃ και PM ανάλογα με την εποχή. Όμως, η σκόνη λόγω των ισχυρών ανέμων ευνοεί το σχηματισμό PM



Θερμοκρασιακή αναστροφή	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Μείωση κατακόρυφης ανάμειξης και αύξηση συγκεντρώσεων	Ισχυρή αναστροφή φέρει μείωση κατακόρυφης ανάμειξης και συσσωρευση O ₃ και PM
Βροχόπτωση	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Μείωση στοιχείων που συμβάλλουν στην παραγωγή ρύπων	Απομάκρυνση PM, αλλά χωρίς σημαντική επίδραση στο O ₃
Υγρασία	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Αύξηση παραγωγής δευτερογενών PM	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο
Θερμοκρασία	Συσχετισμός υψηλών θερμοκρασιών με αύξηση εκπομπών (εξάτμισης, βιογενών)	Αύξηση φωτοχημικών αντιδράσεων	Συσχετισμός υψηλών θερμοκρασιών επιφανείας με χαμηλή ποιότητα αέρα αλλά αρκετά υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να ενισχύσουν την κατακόρυφη ανάμειξη και διασπορά
Νέφη/Ομίχλη	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο	Αύξηση PM με τις νεφροσταγόνες και μείωση O ₃ με την απουσία ακτινοβολίας	Νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης είναι απόδειξη ισχυρής κατακόρυφης ανάμειξης αρά και διασποράς ρύπων
Εποχή	Οι πυρκαγιές δασών, καύσεις καυσόξυλων και γεωργίας και μεταφορά σκόνης με τον άνεμο ποικίλλουν ανά εποχή	Διαφορετικά ποσοστά διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για φωτοχημικές αντιδράσεις ανάλογα με την εποχή	Χωρίς άμεσο αντίκτυπο

1.4.1 Ατμοσφαιρική πίεση

Οι κινήσεις μεγάλης κλίμακας (πάνω από 1000 χλμ.) της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας επηρεάζουν σημαντικά τις περιφερειακές και τοπικές καιρικές συνθήκες. Το επίπεδο των 500 hPa στην ατμόσφαιρα μελετάται από τους μετεωρολόγους για την κίνηση των συστημάτων. Συγκεκριμένα, το μέγεθος, η τοποθεσία, η ένταση και η κίνηση των υψηλού ύψους ραχών και χαμηλού ύψους αυλώνων. Γενικά, η χαμηλή ποιότητα του αέρα συνδέεται με συστήματα υψηλής πίεσης ενώ η υψηλή ποιότητα αέρα με χαμηλής πίεσης συστήματα. Όμως η δημιουργία υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα μπορεί να μη συνδέεται με την εμφάνιση ράχης στα 500hPa αλλά με μια ισχυρή πηγή σωματιδίων, όπως πυρκαγιά.

1.4.2 Θερμοκρασιακή αναστροφή και κατακόρυφη ανάμειξη

Η θερμοκρασιακή αναστροφή είναι μια μορφή ευστάθειας κατά την οποία το θερμό στρώμα αέρα καλύπτει το ψυχρότερο στρώμα αέρα. Η αναστροφή αυτή ενισχύει τη μείωση της κατακόρυφης κίνησης και ανάμειξης των ρύπων με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων τους στην ατμόσφαιρα. Η ευστάθεια παίζει σημαντικό ρόλο στα επίπεδα της ρύπανσης των μεγάλων πόλεων. Η αναστροφή λόγω

ακτινοβολίας σχηματίζεται τις νυχτερινές ώρες, καθώς το έδαφος ψύχεται λόγω εκπομπών υπέρυθρης ακτινοβολίας, οι εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια της νύχτας παραμένουν χαμηλά στην ατμόσφαιρα μέχρι το επόμενο πρωί που το έδαφος θα αρχίσει να θερμαίνεται. Διάλυση της αναστροφής γίνεται με τη θέρμανση του αέρα και η κατακόρυφη ανάμειξη ενισχύεται. Σε περίπτωση ισχυρής αναστροφής λόγω ακτινοβολίας ή και ελάχιστης θέρμανσης του αέρα, οι ρύποι παραμένουν χαμηλά στην ατμόσφαιρα.

Με την παρουσία ατμοσφαιρικών συστημάτων η αναστροφή κατάπτωσης είναι πιθανή. Η αύξηση της πίεσης προς το κέντρο του υψηλού συστήματος δημιουργεί την κατακόρυφη κίνηση του αέρα από το μέσο επίπεδο της ατμόσφαιρας προς την επιφάνεια. Με την κίνηση αυτή, ο αέρας συμπιέζεται και θερμαίνεται. Σε ισχυρή αναστροφή κατάπτωσης, κάτι που ξεχωρίζει απ τη θερμοκρασιακή, η θέρμανση του αέρα στην επιφάνεια από την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μην είναι αρκετή για την διάλυση της αναστροφής. Στην περίπτωση αυτή, οι ρύποι παραμένουν χαμηλά στην ατμόσφαιρα για το υπόλοιπο της μέρας, καθώς δεν ευνοείται η κατακόρυφη ανάμειξη. Παρόμοιες αναστροφές, που συμβαίνουν λόγω αδιαβατικής θέρμανσης κατερχόμενου αέρα, είναι αναστροφές στην υπήνεμη πλευρά των βουνών και ανάμεσα στα σύννεφα λόγω την κυττάρων κυκλοφορίας.

Αντίθετα, στην περιοχή που υπάρχει αυλώνας δεν δημιουργείται αναστροφή κατάπτωσης καθώς ο αέρας ανέρχεται από την επιφάνεια προς τη μέση ατμόσφαιρα. Ο ανερχόμενος αέρα ψύχεται λόγω αποσυμπίεσης, δίνοντας ψυχρό αέρα πάνω από θερμό και δημιουργία αστάθειας στην ατμόσφαιρα. Ως αποτέλεσμα, ευνοείται η κατακόρυφη ανάμειξη και η διασπορά των ρύπων (EPA, 2003).

1.4.3 Άνεμος και μεταφορά

Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την πορεία που θα κινηθούν οι αέριες μάζες και οι συγκεντρώσεις ρύπων στην ατμόσφαιρα, άρα και τον τελικό προορισμό αυτών που μεταφέρονται. Από την άλλη, η ταχύτητα ανέμου καθορίζει την ταχύτητα απομάκρυνσης των ρύπων από τις πηγές εκπομπών, δηλαδή ευνοεί αναλογικά τη διάχυση ή διασπορά των ρύπων (Μελάς, 2000).

Τα φαινόμενα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εμφανίζονται σε διαφορετικές κλίμακες, από την μικροκλίμακα ως την παγκόσμια κλίμακα, για αυτό και υπάρχει σύνδεση με την κλίμακα των φυσικών διεργασιών μεταφοράς και διασποράς στην ατμόσφαιρα (Ζάνης, 2014). Συγκεκριμένα ο άνεμος διαχωρίζεται σε μακροκλίμακα, περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Στα μεγάλης κλίμακας συστήματα, η ένταση του ανέμου εξαρτάται από τη βαροβαθμίδα μεταξύ επιφανείας και του ατμοσφαιρικού συστήματος. Για αυτό και ασθενείς περιφερειακοί άνεμοι επιφανείας επικρατούν κάτω από αντικυκλώνα (υψηλή πίεση στο κέντρο), όπου η βαροβαθμίδα είναι ασθενής. Ως αποτέλεσμα είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς η διασπορά αυτών δεν είναι εφικτή από τους ασθενείς ανέμους. Με τον συνδυασμό υψηλών εκπομπών, ο κίνδυνος σοβαρού φαινομένου ρύπανσης είναι αυξημένος, βασικό χαρακτηριστικό των μεγαλουπόλεων. Αντίθετα, μέτριοι ως ισχυροί άνεμοι επικρατούν μεταξύ ενός υψηλού και ενός χαμηλού συστήματος ή κάτω από το κέντρο ενός χαμηλού, καθώς εκεί η βαροβαθμίδα είναι πιο ισχυρή. Το πλεονέκτημα των ισχυρών ανέμων είναι η διασπορά των ρύπων, δηλαδή οι χαμηλές συγκεντρώσεις αυτών στην ατμόσφαιρα (EPA, 2003).

Σε μέσης κλίμακας άνεμο, η διεύθυνση και ταχύτητα του παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς τοπικά συστήματα ανέμου, όπως η θαλάσσια αύρα και αύρα κοιλάδας, επηρεάζουν την ποιότητα ρύπανσης. Οι τοπικοί αυτοί άνεμοι διαμορφώνουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας καθώς ο συνδυασμός αυτών μπορεί να επιφέρει επανακυκλοφορία του αέρα ή στασιμότητα.

1.4.4 Νέφη, ομίχλη και υετός

Στον πίνακα 1.3 αναφέρονται οι λεπτομέρειες των μηχανισμών που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ρύπανση. Για την δημιουργία και ανάπτυξη νέφους απαιτείται η ανάλογη υγρασία, ανοδικές κινήσεις λόγω μηχανικών αιτίων, όπως μέτωπα, ορογραφικός άνεμος, σύγκλιση αερίων μαζών, ή λόγω θερμικών αιτίων, δηλαδή αστάθεια ατμόσφαιρας (θερμός αέρας στα κατώτερα στρώματα, ψυχρός στα ανώτερα). Τα νέφη είναι η κύρια αιτία μείωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή και της μείωσης φωτοχημικών αντιδράσεων, με τις οποίες παράγονται δευτερογενείς ρύποι, όπως είναι το όζον (EPA, 2003).

Η βροχόπτωση είναι ένας μηχανισμός απομάκρυνσης ρύπων μέσω της υγρής απόθεσης προς το έδαφος.

1.4.5 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα διαμόρφωσης της ποιότητας ατμόσφαιρας. Επηρεάζει την ταχύτητα χημικών αντιδράσεων με αποτέλεσμα να επηρεάζει και τις τελικές συγκεντρώσεις των ρύπων. Επίσης, οι εναλλαγές της θερμοκρασίας συνδέονται άμεσα με τις εναλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία από την μια επηρεάζει το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα άρα και την ανάμιξη των ρύπων και από την άλλη τις φωτοχημικές αντιδράσεις για την παραγωγή δευτερογενών ρύπων.

1.4.6 Σχετική υγρασία

Όπως η θερμοκρασία, έτσι και η σχετική υγρασία επηρεάζει τη δημιουργία και την απομάκρυνση ρύπων στην ατμόσφαιρα, όχι όμως στον ίδιο βαθμό. Παρατηρείται ότι με την αύξηση σχετικής υγρασίας υπάρχει μείωση των συγκεντρώσεων όζοντος στην ατμόσφαιρα, αποτέλεσμα της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω νέφωσης αλλά και της παρουσίας υδρατμών με την καταστροφή όζοντος μέσω χημικών αντιδράσεων όπου υπάρχουν χαμηλές συγκεντρώσεις NO_x .

1.4.7 Τύποι καιρού

Ανάλογα του χρόνου εμφάνισης κάθε τύπου καιρού σε μια περιοχή, επηρεάζονται οι τοπικές καιρικές συνθήκες. Για αυτό, η καλύτερη μελέτη του χρονικού αυτού κύκλου εμφάνισης, φέρει και καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα. Στο Σχήμα 1.6 παρατηρείται η πορεία κάθε τύπου καιρού μεγάλης κλίμακας. Για τη μετεωρολογία, τα χαρακτηριστικά αλλάζουν από περιοχή σε περιοχή.

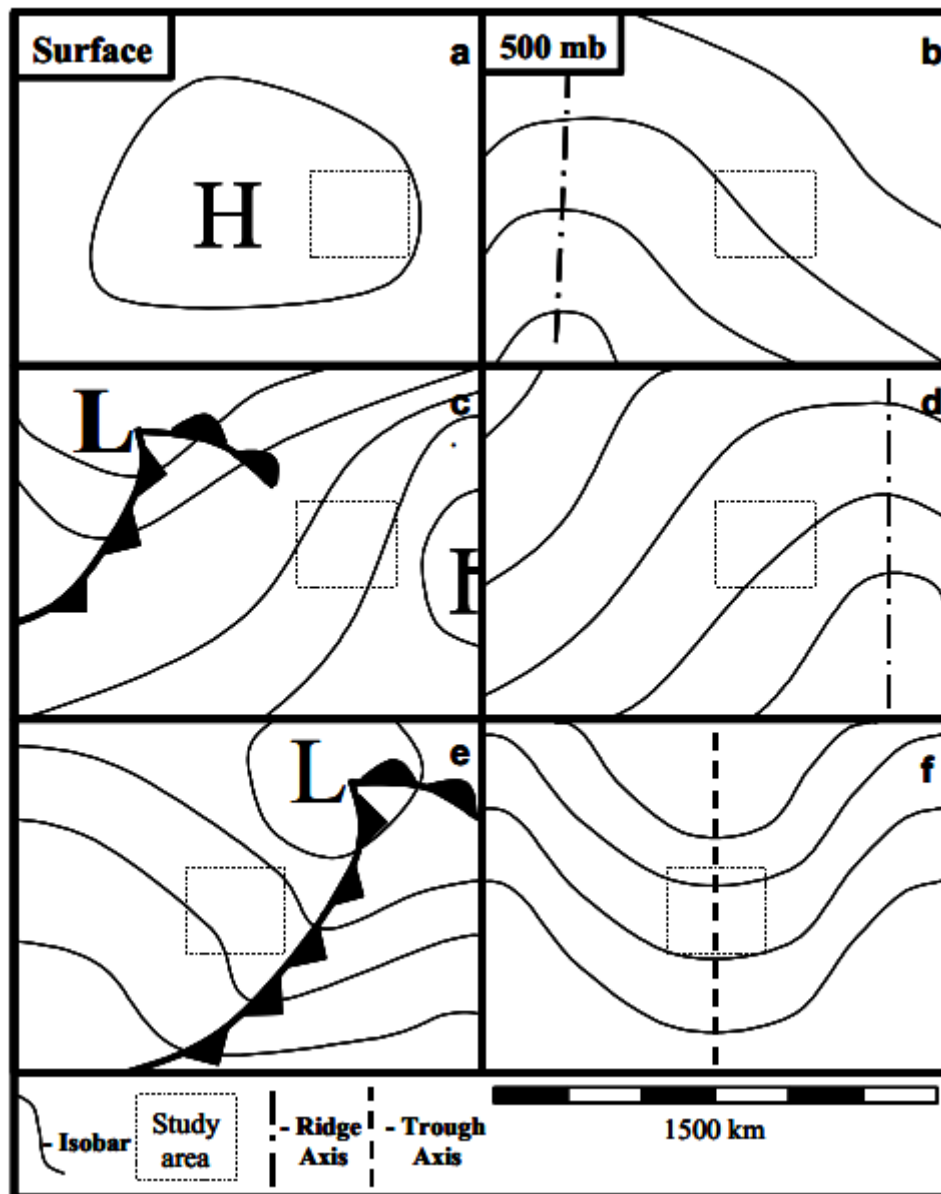
Ράχη - Υψηλό σύστημα: (Σχήμα 1.6 α β) Ένας αντικυκλώνας συνδέεται με χαμηλή ποιότητα αέρα. Επικρατεί μερικές μέρες μετά το πέρασμα ενός ψυχρού μετώπου ή χαμηλού στην ατμόσφαιρα από μια συγκεκριμένη περιοχή. Με τη εμφάνιση υψηλής πίεσης στην επιφάνεια οι άνεμοι γίνονται ασθενείς και ευνοείται η συσσώρευση ρύπων. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνονται οι συγκεντρώσεις ρύπων και με την μείωση της σχετικής υγρασίας επικρατεί ανέφελος ουρανός, δηλαδή ενίσχυση των φωτοχημικών αντιδράσεων. Με την θέρμανση του κατερχόμενου αέρα προς την επιφάνεια, η ατμόσφαιρα γίνεται ευσταθής και η κατακόρυφη ανάμιξη των ρύπων μειώνεται στο ελάχιστο. Συνήθως, η ράχη υψηλού ύψους στη μέση ατμόσφαιρα βρίσκεται δυτικά του υψηλού στην επιφάνεια.

Ράχη - Υψηλό σύστημα (πίσω μέρος): (Σχήμα 1.6 γ δ) Επικρατεί στην περιοχή με την μετακίνηση του υψηλού ανατολικά. Ακόμα και με χαμηλό σύστημα από τα δυτικά, οι

Θερμοκρασίες στην περιοχή είναι υψηλές, ο ουρανός ανέφελος και οι ρύποι παραμένουν στην ατμόσφαιρα σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Αυλώνας - Χαμηλό σύστημα: (Σχήμα 1.6 ε ζ) Ο κυκλώνας είναι χαρακτηριστικό σύστημα χαμηλής πίεσης στην επιφάνεια και αυλώνα στα 500hPa στην ατμόσφαιρα, δυτικά από την περιοχή χαμηλού στην επιφάνεια. Η νέφωση μαζί με την βροχόπτωση μειώνουν αρκετά τις φωτοχημικές αντιδράσεις, ενώ οι δυνατοί άνεμοι και η ανάμειξη των ρύπων φέρουν μείωση των συγκεντρώσεων ρυπαντών.

Με την ράχη στην ατμόσφαιρα οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν συνδέονται με χαμηλή ποιότητα αέρα, κυρίως λόγω των μικρών εναλλαγών καιρού. Για την επιρροή των εναλλαγών αυτών στην ποιότητα του αέρα πρέπει να μελετηθούν ανάλογα με τους ρύπους, την εποχή και την περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 1.6: Κύκλοι συνοπτικού καιρού στην επιφάνεια και στα 500hPa. a και b για ράχη – υψηλό σύστημα, c και d για ράχη – υψηλό σύστημα (πίσω μέρος), e και f για αυλώνα – χαμηλό σύστημα. Οι χάρτες επιφανείας δείχνουν τις ισοβαρείς και οι χάρτες στα 500hPa δείχνουν τις ισοϋψείς (πηγή: EPA, 2003).

1.5 Εφαρμογές και Ανάγκες Πρόγνωσης

Για τη δημιουργία αξιόπιστης πρόγνωσης της ποιότητας αέρα είναι απαραίτητη η κατανόηση των αναγκών και των στόχων δημιουργίας της. Συγκεκριμένα, η πρόγνωση όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων έχει τρεις βασικούς σκοπούς: α) ειδοποίηση για τη δημόσια υγεία, β) προγράμματα ελέγχου επεισοδίων ρύπανσης, γ) ειδικά προγράμματα – σταθμοί παρατηρήσεων.

Προειδοποίηση για τη δημόσια υγεία:

Για την καλύτερη αντιμετώπιση της ρύπανσης μέσα στην ημέρα, το κοινό ενημερώνεται από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης για τη σωστή πρόγνωση των ειδικών. Ανάλογα με την περιοχή οι ανάγκες πρόγνωσης για τη δημόσια υγεία ποικίλλουν, αλλά οι βασικές είναι:

- Πρόγνωση ρύπανσης προσαρμοσμένης για τη δημόσια υγεία (προγνώσεις με τάση για υπερεκτίμηση όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων)
- Ειδικές προγνώσεις για μεγάλες αστικές περιοχές
- Λεπτομερείς προγνώσεις για την ώρα και μέρος των αναμενόμενων υψηλών τιμών ρύπανσης
- Ολοκληρωμένες προγνώσεις από νωρίς το πρωί για την ίδια ημέρα, ώστε να δίνεται η δυνατότητα ενημέρωσης στο κοινό.

Προγράμματα ελέγχου επεισοδίων ρύπανσης:

Ο χειρισμός των επεισοδίων εξαρτάται και από τους ανθρώπους. Με την παράκληση από τις τοπικές κοινωνίες, η εθελοντική μείωση των εκπομπών είναι απαραίτητη τις μέρες με ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες για αύξηση της ρύπανσης. Οι ειδικοί βασίζονται στην πρόγνωση της ποιότητας αέρα για να επικαλεστούν κάποιο από τα προγράμματα, όπου η εθελοντική δράση του κόσμου θα φέρει ως αποτέλεσμα την μείωση της προβλεπόμενης ρύπανσης. Πολλές φορές η συμμετοχή βιομηχανιών και οργανώσεων είναι αρκετά σημαντική (π.χ. δωρεάν μέσα μαζικής μεταφοράς).

Συνήθως, οι προϋποθέσεις για τη σωστή λειτουργία των προγραμμάτων είναι:

- Ελαχιστοποίηση υπερεκτίμησης της ρύπανσης σε κάθε πρόγνωση, με σκοπό την μείωση λανθασμένων-υπερεκτιμημένων προειδοποιήσεων στον κόσμο.
- Λήψη των προγνώσεων όσο πιο νωρίς γίνεται για πιο γρήγορη ενημέρωση των πολιτών.
- Δείκτης αβεβαιότητας της πρόγνωσης ώστε ο κόσμος να μπορεί να εκτιμήσει σωστά.

Ειδικά προγράμματα - σταθμοί παρατηρήσεων:

Τα προγράμματα αυτά δίνουν τιμές της ποιότητας αέρα στην επιφάνεια αλλά και στην ατμόσφαιρα, καθώς και παρατηρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων. Με βάση την πρόγνωση ρύπανσης εκτιμώνται οι μέρες συλλογής τιμών όζοντος με τη χρήση ακριβούς εξοπλισμού. Καθώς τα τελευταία χρόνια αυξήθηκαν οι σταθμοί παρατηρήσεων, απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόγνωση του όζοντος, ειδικά στις αστικές περιοχές όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές όζοντος για αρκετές μέρες. Για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των σταθμών-προγραμμάτων συλλογής παρατηρήσεων, απαιτείται πρόγνωση:

- Ακριβής και συγκεκριμένη
- Πάνω από μιας ημέρας για να δοθεί χρόνος προετοιμασίας του εξοπλισμού
- Με λεπτομέρειες αρχής και τέλους του κάθε επεισοδίου ρύπανσης. (EPA, 2003)

1.6 Μέθοδοι Πρόγνωσης Όζοντος και Αιωρουμένων Σωματιδίων

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι και μοντέλα πρόγνωσης όζοντος και αιωρουμένων σωματιδίων. Υπάρχουν μέθοδοι πολύπλοκες ή απλές, με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας, για αυτό ανάλογα με τις ανάγκες και το ενδιαφέρον του προγνώστη, κάνει χρήση μιας ή παραπάνω μεθόδου πρόγνωσης. Δύο βασικές κατηγορίες είναι τα στατιστικά και ντετερμινιστικά μοντέλα

1.6.1 Στατιστική πρόγνωση ποιότητας αέρα

Η στατιστική πρόγνωση είναι η πιο απλή για την ποιότητα της ατμόσφαιρας καθώς βασίζεται στη στατιστική και χρησιμοποιεί δεδομένα παρατηρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων, συγκεντρώσεων ρύπων και εκπομπών. Απαιτούνται λίγα δεδομένα με χαμηλό υπολογιστικό κόστος (Honore, 2008).

1.6.1.1 Εμμονή (Persistence)

Εμμονή είναι μια ίδια συνεχή κατάσταση. Ως μέθοδος πρόγνωσης είναι απλή καθώς θεωρείται πως οι συγκεντρώσεις ρύπων της αυριανής ημέρας θα είναι ίδιες με τις σημερινές ή χθεσινές. Συνήθως η χρήση της μεθόδου αυτής είναι ιδανική ως βοηθητική έναρξη για άλλες μεθόδους πρόγνωσης, αλλά χρησιμοποιείται και ως σημείο αναφοράς για σύγκριση με κάποια από τις υπόλοιπες. Δεν μπορεί να σταθεί μόνη της για μια πρόγνωση, για αυτό χρησιμοποιείται πάντα σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους.

Η συνοπτική κατάσταση έχει παρόμοια χαρακτηριστικά για αρκετές μέρες και επηρεάζει την κατάσταση της ατμόσφαιρας, ως αποτέλεσμα η ποιότητα του αέρα να παραμένει ίδια, με μικρές αλλαγές για ένα χρονικό διάστημα.

1.6.1.2 Κλιματολογία (Climatology)

Κλιματολογία είναι η μελέτη μέσων και ακραίων καιρικών συνθηκών σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι τεχνικές της κλιματολογίας μπορεί να καθοδηγήσουν τον προγνώστη για την πορεία της πρόγνωσης, όμως δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα.

Η κλιματολογία λειτουργεί με τη θεωρία ότι "η ιστορία επαναλαμβάνεται". Καθώς η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται από τον καιρό, άρα επηρεάζεται και από την κλιματολογία. Πιο συγκεκριμένα, σε πρόγνωση ακραίας τιμής όζοντος, η κλιματολογία αποτελεί βοήθεια για τη σωστή πρόγνωση με βάση τις τιμές όζοντος της ίδιας ημέρας προηγούμενων ετών.

Η μέθοδος αυτή δρα ως οδηγός πρόγνωσης άλλων μεθόδων, αναπτύσσεται εύκολα και γρήγορα αλλά χρησιμοποιείται μόνο ως εργαλείο άλλων μεθόδων και όχι μόνη της. Επίσης, η αναπαράσταση ξαφνικών αλλαγών των εκπομπών δεν είναι εφικτή. Για παράδειγμα, σε μια πυρκαγιά δάσους ή σε μεγάλη αλλαγή πληθυσμού.

1.6.1.3 Κατώφλι (Criteria)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τιμές κατώφλια (κριτήρια) μετεωρολογικών ή ατμοσφαιρικών παραμέτρων με σκοπό την πρόγνωση συγκεντρώσεων ρύπων. Υψηλές συγκεντρώσεις συνδυάζονται με αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, άρα συγκεκριμένες τιμές κατωφλίων θερμοκρασίας συνήθως θα δώσουν ανάλογες (υψηλές ή χαμηλές) ακραίες τιμές όζοντος για λίγες ώρες.

Η μέθοδος κριτήρια είναι εύκολη στη διαχείριση και στην ανάπτυξη. Όμως η επιλογή μεταβλητών και των τιμών κατώφλια είναι υποκειμενική και εξαρτάται από τον προγνώστη. Δίνονται καλύτερα αποτελέσματα όταν υπάρχει ενδιαφέρον αν οι συγκεντρώσεις θα ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη τιμή ή όχι, ενώ για ακριβείς τιμές συγκεντρώσεων δεν συνίσταται η συγκεκριμένη μέθοδος.

1.6.1.4 Δένδρο ταξινόμησης και παλινδρόμησης (Classification & Regression Tree CART)

Ο προγνώστης δημιουργεί δένδρα απόφασης μέσω λογισμικού για να φέρει εις πέρας την πρόγνωση. Με βάση τις τιμές πρόγνωσης της μετεωρολογικής παραμέτρου που χρησιμοποιεί χωρίζει συνεχώς τις ακραίες τιμές του όζοντος σε δύο ομάδες. Η επιλογή της παραμέτρου και της τιμής κατώφλι της καθορίζονται από το λογισμικό, αφού υπολογιστεί η συσχέτιση της παραμέτρου με τους ρύπους (όζον, αιωρούμενα σωματίδια).

Για τη χρήση της μεθόδου CART απαιτείται ελάχιστη εμπειρία αλλά είναι σημαντική για την αρχική ανάπτυξη της. Επίσης, ξεχωρίζει τους διαφορετικούς τρόπους σχηματισμού των ρύπων σε μέρη με παρόμοιες συγκεντρώσεις. Είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την πρόγνωση των αιωρούμενων σωματιδίων, που σχηματίζονται διαφορετικά. Από την άλλη, η παραμικρή αλλαγή στην πρόγνωση της παραμέτρου μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Απαιτείται προσοχή καθώς είναι μια μέθοδος με δεδομένα παρατηρήσεων και προγνώσεων και όποια αλλαγή στην πρόγνωση φέρει πιθανώς ανακριβή αποτελέσματα.

1.6.1.5 Παλινδρόμηση (Regression)

Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύσσεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο καθώς είναι η βασική μέθοδος πρόγνωσης της παρούσας διπλωματικής διατριβής.

1.6.1.6 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks)

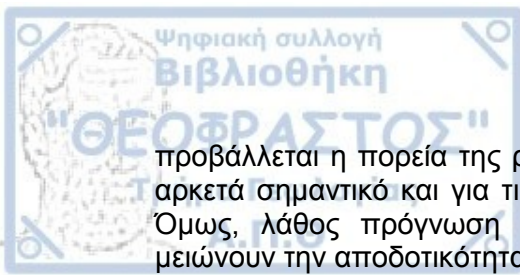
Η μέθοδος τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ιδανική για δεδομένα που ακολουθούν μη γραμμική πορεία, όπως το όζον και τα PM, αν και χρειάζεται 50% περισσότερη προσπάθεια για την ανάπτυξη της από ότι οι εξισώσεις παλινδρόμησης και τα αποτελέσματα πρόγνωσης είναι λιγότερο ακριβή (Comrie, 1997). Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ο πολύπλοκος συνδυασμός συναρτήσεων για τη μετατροπή των δεδομένων (input) σε προγνώσεις (output). Ο σχηματισμός όζοντος και σωματιδίων είναι μη γραμμικός και με τη μέθοδο αυτή διαχωρίζονται σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, πράγμα δύσκολο με άλλες μεθόδους. Επίσης, είναι πιο ακριβής στην πρόγνωση ακραίων τιμών, από ότι η παλινδρόμηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασική μέθοδος ή συμπληρωματική. Από την άλλη, ο σχηματισμός της μεθόδου είναι πολύπλοκος και δημιουργούνται αρκετά σφάλματα (EPA, 2003).

1.6.2 Ντετερμινιστικό μοντέλο ποιότητας αέρα

Σε σύγκριση με τις στατιστικές μεθόδους, ένα ντετερμινιστικό μοντέλο βασίζεται στην ανάλυση των μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστούν τις φυσικές και χημικές διεργασίες σχηματισμού των ρύπων. Ως αποτέλεσμα, δίνει μια λεπτομερή εικόνα της ποιότητας του αέρα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και περιοχή (Honoreé, 2008).

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι απαραίτητα τρία διαφορετικά μοντέλα: μετεωρολογικό μοντέλο για την πρόγνωση μετεωρολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τη μεταφορά και ανάμειξη των ρύπων, μοντέλο εκπομπών ρύπων για την χρονική και χωρική κατανομή και τέλος το μοντέλο ποιότητας αέρα που χρησιμοποιεί τις προγνώσεις των δύο παραπάνω για την αναπαράσταση της μεταφοράς, διασποράς και απόθεσης των ρύπων.

Τα προγνωστικά αυτά μοντέλα βασίζονται σε όλες τις φυσικές και χημικές αντιδράσεις σχηματισμού και απομάκρυνσης των ρυπαντών, ακόμα και για μια αρκετά μεγάλη περιοχή. Με τους χάρτες πρόγνωσης που εξαγουν τα μοντέλα



προβάλλεται η πορεία της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της μέρας, αρκετά σημαντικό και για τις περιοχές που δεν υπάρχουν σταθμοί παρατηρήσεων. Όμως, λάθος πρόγνωση των μετεωρολογικών παραμέτρων ή των εκπομπών μειώνουν την αποδοτικότητα του τρισδιάστατου μοντέλου της ποιότητας αέρα. Το ίδιο ισχύει και για τα τοπικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τον καιρό (EPA, 2003).

2 Κεφάλαιο 2

2.1 Τοπογραφικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της πόλης

Η πόλη της Θεσσαλονίκης βρίσκεται στην Κεντρική Μακεδονία με συντεταγμένες (40,5° N, 22,9° E) και με πληθυσμό περίπου ένα εκατομμύριο κατοίκους. Βόρεια και ανατολικά περιβάλλεται από λόφους (300μ.), νοτιοανατολικά από το όρος Χορτιάτη (1200μ.) ενώ από τα δυτικά παρατηρείται πεδιάδα την οποία διατρέχουν τρεις ποταμοί. Η νότια πλευρά της βρέχεται από το Θερμαϊκό κόλπο. Η πόλη χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα με ηπειρωτικά χαρακτηριστικά και διακρίνεται από ήπιους χειμώνες και ξηρά, ζεστά καλοκαίρια. Το υγρό στοιχείο που την περιβάλλει (Θερμαϊκός κόλπος, λίμνη Λαγκαδά) κάνει την υγρασία ακόμα ένα βασικό χαρακτηριστικό της πόλης, όπως και ο Βαρδάρης, ισχυρός βόρειος άνεμος κατά τη χειμερινή περίοδο. Αντίθετα κατά τη θερινή περίοδο πνέουν νότιοι ασθενείς άνεμοι (Κοντογιάννη, 2008). Στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης η πολύπλοκη τοπογραφία και τα παραπάνω χαρακτηριστικά δημιουργούν ένα τοπικό σύστημα που διαφέρει ουσιαστικά από της συνοπτικής κλίμακας, για παράδειγμα το φαινόμενο θαλάσσιας αύρας και ανοδικές και καθοδικές κινήσεις (Helmis et al., 1996).

2.1.1 Η θαλάσσια αύρα

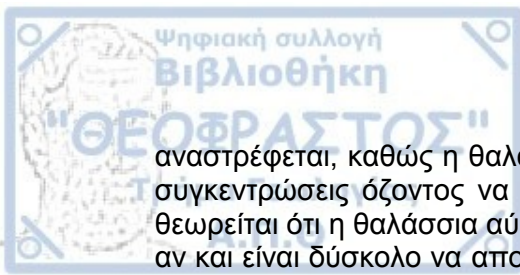
Η έντονη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ξηράς και θάλασσας είναι η κύρια αιτία δημιουργίας της θαλάσσιας αύρας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θέρμανση του εδάφους λόγω ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από της θάλασσας, με αποτέλεσμα ο θερμός αέρας κοντά στο έδαφος να ανέρχεται στην ατμόσφαιρα και αέρας από τη θάλασσα να τον συμπληρώνει.

Η αντίστροφη κίνηση παρατηρείται κατά τη διάρκεια της νύχτας (απόγειος αύρα), όπου ο θερμότερος αέρας βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα και γίνεται μεταφορά μάζας αέρα από την ξηρά προς τη θάλασσα κοντά στην επιφάνεια (Κόλλια, 2012).

2.1.1.1 Η θαλάσσια αύρα στη Θεσσαλονίκη

Μελέτη των χαρακτηριστικών της θαλάσσιας αύρας της Θεσσαλονίκης έγινε από τον Σαχσαμάνογλου (Σαχσαμάνογλου, 1976), για τα έτη 1959 – 1975. Ως αποτέλεσμα της μελέτης αυτής είναι τα δύο κύτταρα θαλάσσιας αύρας στην περιοχή της πόλης. Το πρώτο βρίσκεται στον κόλπο της Θεσσαλονίκης και ξεκινά λίγο μετά την ανατολή του ηλίου και είναι νοτιοδυτικής διεύθυνσης. Τη θερινή περίοδο διαρκεί μέχρι μετά τις μεσημεριανές ώρες λόγω αντιστάθμισης της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ θάλασσας και ξηράς και η διεύθυνση αλλάζει σε νότια με την ενεργοποίηση του κυττάρου στο Θερμαϊκό κόλπο. Τη χειμερινή περίοδο η διεύθυνση της αύρας παραμένει σταθερά σε νοτιοδυτική, δηλαδή παρατηρείται κυρίως μόνο το πρώτο κύτταρο θαλάσσιας αύρας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, το οποίο όπως αναφέρθηκε, ξεκινά από τον κόλπο της πόλης και διαρκεί λιγότερο σε σύγκριση με τους θερινούς μήνες (Κοντογιάννη, 2008).

Αργότερα σε άλλη έρευνα επιβεβαιώθηκαν τα παραπάνω, ότι η περιοχή της Θεσσαλονίκης καλύπτεται από δύο διαφορετικά συστήματα θαλάσσιας αύρας (Helmis et al., 1996), όπου με την αλληλεπίδραση της τοπογραφίας και των υπόλοιπων μετεωρολογικών συνθηκών επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις όζοντος. Το πρώτο βρίσκεται στον κόλπο της Θεσσαλονίκης και το δεύτερο και ισχυρότερο σύστημα βρίσκεται στο Θερμαϊκό κόλπο (Helmis et al., 1996). Η μεταφορά αερίων μαζών από την ξηρά προς τον Θερμαϊκό Κόλπο λόγω βορειοδυτικών ανέμων



αναστρέφεται, καθώς η θαλάσσια αύρα μεταφέρει μάζες αέρα προς την ξηρά. Με τις συγκεντρώσεις όζοντος να διατηρούνται στα ίδια επίπεδα πάνω από τη θάλασσα, θεωρείται ότι η θαλάσσια αύρα συμβάλλει στην αύξηση του όζοντος τις πρωινές ώρες αν και είναι δύσκολο να αποδειχθεί ακριβώς το ποσοστό. Την ίδια στιγμή επικρατούν δύο φαινόμενα, ένα είναι η ροή της θαλάσσιας αύρας και το δεύτερο είναι η διάλυση του νυχτερινού στρώματος που δημιουργείται από αναστροφή λόγω ακτινοβολίας, όπου και τα δύο συμβάλλουν στην τοπική αύξηση του όζοντος με την ανάμειξη των αερίων μαζών (Gusten et al., 1997).

Ως γνωστόν η θαλάσσια αύρα δημιουργείται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της θάλασσας και του εδάφους. Εποχιακά, νωρίς το καλοκαίρι (Μάιο - Ιούνιο), η θερμοκρασία της θάλασσας είναι χαμηλότερη από τις αρχές του φθινοπώρου (Σεπτέμβριο - Οκτώβριο) με αποτέλεσμα να καθυστερεί η απόγεις αύρα (ροή από τη ξηρά προς τη θάλασσα) και με το μεγαλύτερο διαθέσιμο χρόνο δημιουργίας φωτοχημικού νέφους λόγω της έντονης ακτινοβολίας αυξάνονται οι συγκεντρώσεις όζοντος με την ανάμειξη των αερίων μαζών πάνω από την θάλασσα (Gusten et al., 1997).

2.2 Διαχείριση ποιότητας αέρα στη Θεσσαλονίκη

2.2.1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας

Η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης λειτουργεί με ένα δίκτυο σταθμών τοποθετημένους στο νομό. Κάποιοι από τους σταθμούς διαχειρίζονται από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και οι υπόλοιποι από το τμήμα Περιβάλλοντος του Δήμου Θεσσαλονίκης.

Οι παρατηρήσεις O_3 και PM_{10} που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη για την πρόγνωση της ποιότητας του αέρα προέρχονται από σταθμούς της Περιφέρειας. Συγκεκριμένα, η Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (ΠΚΜ) έχει την ευθύνη λειτουργίας των σταθμών από το 2001, αρμοδιότητα που της μεταβιβάστηκε από την Αποκεντρωμένη Διοίκηση Μακεδονίας - Θράκης το Νοέμβριο του 2011. Το δίκτυο της αποτελείται από 7 σταθμούς:

- Πλατεία Αγίας Σοφίας
- Α.Π.Θ.
- Καλαμαριά
- Κορδελιό
- Νεοχωρούδα
- Πανόραμα
- Σίνδος

Λόγω έλλειψης δεδομένων από τους υπόλοιπους σταθμούς, η χρήση των παρατηρήσεων έγινε από τους εξής: Αγ. Σοφίας, Κορδελιό, Νεοχωρούδα, Πανόραμα. Τέσσερις σταθμοί τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία της πόλης, με διαφορετικά τοπογραφικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά (Χάρτης 2.1)



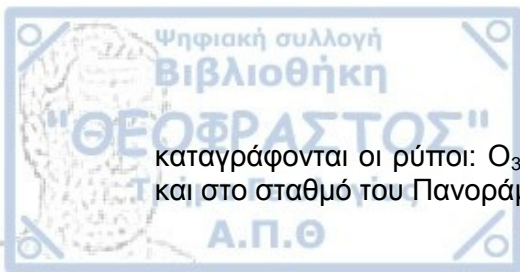
Χάρτης 2.1: Δίκτυο σταθμών της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (Πηγή: Παπακώστα κ.α., 2014)

Αγίας Σοφίας: Ο σταθμός στην πλατεία Αγίας Σοφίας βρίσκεται στο κέντρο της πόλης (αστικός σταθμός), στα 27 μέτρα, δηλαδή σε μικρό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας. Η περιοχή του σταθμού επηρεάζεται αρκετά από τον άνεμο και για το λόγο αυτό δεν υπάρχουν μετεωρολογικές παρατηρήσεις από τον συγκεκριμένο σταθμό καθώς δε θα ήταν αντιπροσωπευτικές με την περιοχή του σταθμού. Γίνεται καταγραφή μετρήσεων των ρύπων O_3 , PM_{10} , CO και NO_x .

Κορδελιό: Ο σταθμός του Κορδελιού βρίσκεται στη δυτική Θεσσαλονίκη, τοποθετημένος στα 30 μέτρα από τη θάλασσα και οι συγκεντρώσεις των ρύπων επηρεάζονται από το χαρακτηριστικό της βιομηχανικής περιοχής. Για αυτό το λόγο χαρακτηρίζεται ως βιομηχανικός και αστικός σταθμός. Γίνεται καταγραφή μετρήσεων όλων των ρύπων (O_3 , PM_{10} , CO , NO_x και SO_2) και μετεωρολογικών παραμέτρων.

Πανόραμα: Ο σταθμός αυτός είναι τοποθετημένος στα 363 μέτρα, σε περιοχή με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους δύο προηγούμενους σταθμούς. Για αυτό και ο χαρακτηρισμός του ως περιαστικός είναι εμφανής. Οι μετρήσεις που συλλέγονται από τον σταθμό είναι των ρύπων O_3 , PM_{10} και NO_x και των μετεωρολογικών παραμέτρων: ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία και υγρασία. Οι παράμετροι αυτοί είναι ίδιοι για τον κάθε σταθμό της περιφέρειας, εκτός από της πλατείας Αγίας Σοφίας όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Νεοχωρούδα: Ο τέταρτος και τελευταίος σταθμός ενδιαφέροντος για τη συλλογή δεδομένων των ρύπων βρίσκεται στα 229 μέτρα στα δυτικά προάστια της πόλης και έξω από το χωριό Νεοχωρούδα. Χαρακτηρίζεται ως υποβάθρου και περιαστικός και



καταγράφονται οι ρύποι: O_3 , PM_{10} και NO_x και μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως και στο σταθμό του Πανοράματος (Παπακώστα κ.α., 2014).

2.2.2 Ποιότητα αέρα Θεσσαλονίκης

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η ρύθμιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πόλης ελέγχεται από ένα δίκτυο σταθμών μέτρησης το οποίο είναι υπό ευθύνη της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος και Χωροταξίας (Δι.ΠΕ.ΧΩ.), της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (Π.Κ.Μ.) και το οποίο αποτελεί μέρος του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.), από ένα δίκτυο σταθμών μέτρησης του Δήμου Θεσσαλονίκης και ένα δίκτυο του Δήμου Εχεδώρου (airthess.gr) .

Τα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα συνδέονται με τις λειτουργίες της περιοχής, το ανάγλυφο της και τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν.

Από το 2001 ως το 2013 παρατηρείται καθοδική τάση στις εκπομπές των ρύπων, στις μετρούμενες συγκεντρώσεις PM_{10} στους σταθμούς του ΕΔΠΑΡ της ΠΚΜ. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά για μικρή μείωση στις συγκεντρώσεις με αναστροφή της τάσης κατά το έτος 2011 στους περιαστικούς σταθμούς της πόλης. Από την άλλη οι συγκεντρώσεις του O_3 δεν έχουν εμφανή τάση καθώς στους αστικούς σταθμούς η διαχρονική πορεία του είναι σταθερή ενώ στους περιαστικούς παρατηρείται μεταβλητότητα με αυξομειώσεις (Παπακώστα κ.α., 2014). Κατά τους θερινούς μήνες παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές. Ο δευτερογενής αυτός ρύπος σχηματίζεται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων με απαραίτητη προϋπόθεση την ηλιακή ακτινοβολία, για αυτό και η αυξημένη διάρκεια ηλιοφάνειας και ένταση της συμβάλλουν στην αύξηση των συγκεντρώσεων του. Όσον αφορά την ημερήσια μεταβολή του ρύπου, τις ημέρες του Σαββατοκύριακου παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων του. Το φαινόμενο αυτό λέγεται weekend effect (Παπακώστα κ.α., 2014) και οφείλεται στις αλλαγές των συγκεντρώσεων των προδρόμων του καθώς ο σχηματισμός του όζοντος είναι μια μη γραμμική διαδικασία η οποία εξαρτάται από άλλους ρύπους. Οι εκπομπές που μειώνονται το Σαββατοκύριακο φέρουν την μείωση των NO_x στην ατμόσφαιρα και την αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος καθώς δεν αντιδρά με NO . Ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας το μέγιστο των συγκεντρώσεων του εμφανίζεται τις απογευματινές ώρες (15:00 - 17:00) αφού συνδέεται με την αύξηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας τις ίδιες ώρες.

Η διαφορετική πορεία των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην πόλη είναι εξίσου σημαντική με το όζον καθώς παρουσιάζουν αρκετά υψηλές τιμές τους χειμερινούς μήνες. Συγκεκριμένα οι υψηλές συγκεντρώσεις κατά το Δεκέμβριο του 2013 οφείλονται στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν (άπνοια, θερμοκρασιακή αναστροφή, ανομβρία) αλλά και στις διαφορετικές συνθήκες των πολιτών χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς τρόπους θέρμανσης των κατοικιών. Για αυτό το λόγο παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις τις βραδινές ώρες (19:00 - 23:00) καθώς είναι οι ώρες αιχμής της θέρμανσης. Παρόλο τις υψηλές συγκεντρώσεις, τις ημέρες Σάββατο και Κυριακή παρατηρείται μια μικρή μείωση στα PM_{10} ως μέση ετήσια συγκέντρωση (Παπακώστα κ.α., 2014).

Συγκεκριμένα για τους τέσσερις σταθμούς, εκείνοι της Πλατείας Αγίας Σοφίας και Κορδελιού θεωρούνται αστικοί ενώ οι σταθμοί Πανοράματος και Νεοχωρούδας περιαστικοί, για αυτό υπάρχει και η διαφορετική επίδραση μετεωρολογικών παραμέτρων σε κάθε περιοχή συμβάλλοντας σε διαφορετική κατανομή συγκεντρώσεων όζοντος.



Το διυλιστήριο πετρελαίου ΕΚΟ βρίσκεται κοντά στο σταθμό Νεοχωρούδας, ο οποίος επηρεάζεται από τις εκπομπές των VOC. Είναι η δεύτερη σημαντικότερη πηγή στην περιοχή, μετά από την κυκλοφοριακή κίνηση και το 15% της συνολικής εκπομπής VOC στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι ασθενείς βόρειοι άνεμοι μεταφέρουν εμπλουτισμένες μάζες αέρα σε VOC από την περιοχή της Νεοχωρούδας και της υπόλοιπης βιομηχανικής περιοχής προς τα νότια και τους υπόλοιπους σταθμούς της πόλης. Υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος στο σταθμό Κορδελιού οφείλονται στις πηγές ρυπαντών που βρίσκονται κοντά, λόγω βιομηχανιών και κυκλοφοριακής κίνησης (Moussiopoulos et al., 2006)

Οι σταθμοί Πανοράματος και Νεοχωρούδας χαρακτηρίζονται από υψηλότερες συγκεντρώσεις όζοντος σε σχέση με τους αστικούς σταθμούς Πλ.Αγίας Σοφίας και Κορδελιό. Οι υψηλές τιμές NO₂ στους δύο προηγούμενους σταθμούς μέσα στην πόλη συσχετίζονται με την κίνηση οχημάτων και ως αποτέλεσμα με τις χαμηλές τιμές όζοντος. Αντίθετα, οι χαμηλές τιμές NO₂ στο Πανόραμα και Νεοχωρούδα σχετίζονται με υψηλές τιμές όζοντος στην περιοχή καθώς ευνοούνται οι πρόδρομοι ρύποι δημιουργίας όζοντος (Moussiopoulos et al., 2009).

Ο σταθμός του Κορδελιού φέρει τις υψηλότερες τιμές αιωρούμενων σωματιδίων λόγω της τοποθεσίας του κοντά στην βιομηχανική περιοχή. Στο δυτικό μέρος της πόλης (Κορδελιό) καταγράφονται υψηλές τιμές όλη τη διάρκεια του έτους.

2.2.3 Νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα ατμόσφαιρας

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) παρουσιάζονται τα νομοθετημένα όρια και στόχοι που ισχύουν στην Ελλάδα για το δίκτυο σταθμών της ΠΚΜ και στην συγκεκριμένη περίπτωση για το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀. Επίσης, αναγράφονται τα όρια ενημέρωσης του κοινού και τα όρια λήψης έκτακτων μέτρων (όρια συναγερμού). Η ισχύουσα νομοθεσία μέχρι σήμερα είναι:

- Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21ης Μαΐου 2008, για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα στην Ευρώπη.
- ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103 (ΦΕΚ 4888/30.3.11) "Μέτρα για την βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ".

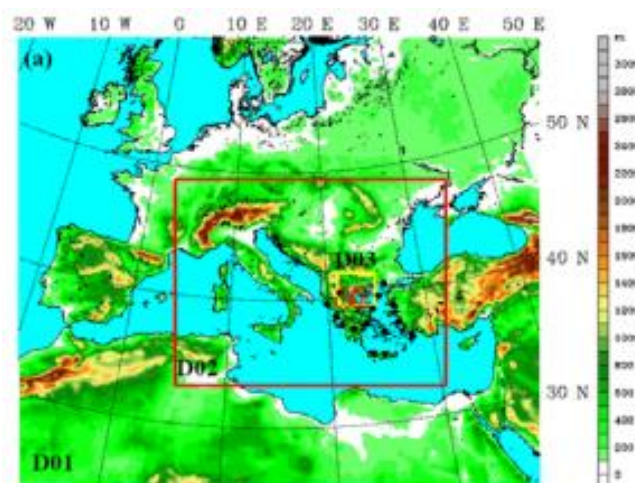
Η αντιμετώπιση των επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης έχει θεσμοθετηθεί με την απόφαση 9452/08 του γ.γ της ΠΚΜ (ΦΕΚ 1652Β/08), όπως αυτή τροποποιήθηκε από την ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103 (Παπακώστα κ.α., 2014).

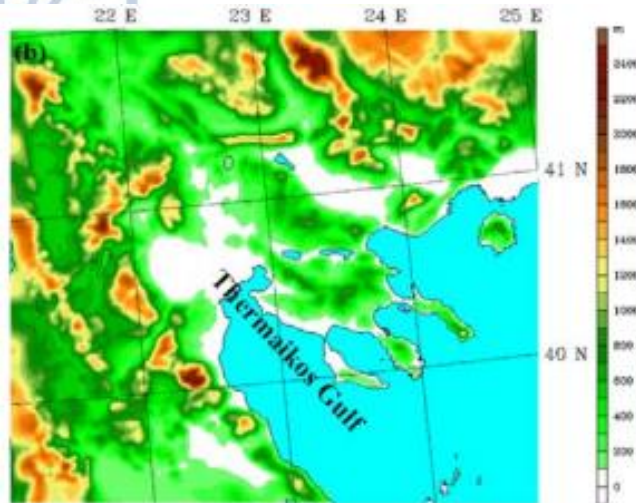
Πίνακας 2.1: Νομοθετημένες οριακές τιμές των ρύπων O_3 και PM_{10} (Πηγή: Παπακώστα κ.α., 2014)

Ρύπος	Χρονική Περίοδος	Τιμή	Όρια για την προστασία της υγείας		Όρια ενημέρωσης		Όρια συναγερμού	
			Επιτρεπόμενες υπερβάσεις	Χρονική Περίοδος	Τιμή	Χρονική Περίοδος	Τιμή	
O_3	Μέγιστος ημερήσιος Μ.Ο. 8 ωρών	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25	1 ώρα	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 ώρες	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	1 ημέρα	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35					
PM_{10}		40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	7 ημέρες	90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 ημέρες	110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	1 έτος							

2.3 Αριθμητικό Μοντέλο Πρόγνωσης καιρού υψηλής ανάλυσης

Η συλλογή των δεδομένων πρόγνωσης των μετεωρολογικών παραμέτρων έγινε από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού του εργαστηρίου Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Είναι το μη-υδροστατικό μοντέλο Weather Research and Forecasting με το δυναμικό πυρήνα ARW (WRF-ARW) και χρησιμοποιείται με σκοπό την παραγωγή προγνώσεων καιρού. Τρεις είναι οι περιοχές ολοκλήρωσης (domain) του μοντέλου. Το πρώτο πλέγμα (D01) (Χάρτης 2.2 a) καλύπτει την Ευρώπη, Μεσόγειο και την Βόρεια Αφρική, το δεύτερο (D02) (Χάρτης 2.2 a) καλύπτει την Ελλάδα και το τρίτο (D03) (Χάρτης 2.2 b) την ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας και το Θερμαϊκό κόλπο και οι χωρικές διακριτοποιήσεις είναι 15 χλμ. x 15 χλμ., 5 χλμ. x 5 χλμ. και 1,667 χλμ. x 1,667 χλμ. αντιστοίχως. Τα δύο εσωτερικά πλέγματα είναι επάλληλα με το εξωτερικό πλέγμα χαμηλής διακριτοποίησης. Η πρόγνωση καιρού είναι για τις επόμενες τέσσερις μέρες, δηλαδή 96 ώρες και ο αρχικός χρόνος είναι 12UTC. Οι αρχικές και οι πλευρικές οριακές συνθήκες διατίθενται από την επιχειρησιακή ανάλυση και την τρίωρη πρόγνωση του NCEP/GFS (National Centers for Environmental Predictions/Global Forecast System) (Pytharoulis et. al, 2014).





Χάρτης 2.2: Τοπογραφία (μέτρα) των (α) τριών πλεγμάτων (DO1, DO2, DO3) και (β) του μικρότερου πλέγματος (DO3) (Πηγή: Pytharoulis et al., 2015)

Για τη χρονική περίοδο που χρησιμοποιούνται τα δεδομένα στην δημιουργία στατιστικής πρόγνωσης έχουν γίνει δύο αξιολογήσεις του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης. Η πρώτη χρονική περίοδος είναι από τον Ιούνιο 2013 έως τον Μάιο 2014 (Pytharoulis et. al, 2014) και η δεύτερη από το Μάρτιο 2014 έως το Φεβρουάριο 2015 (Pytharoulis et. al, 2015). Την πρώτη περίοδο το μοντέλο παρουσιάζει υπερεκτίμηση του συνολικού αριθμού βροχοπτώσεων αλλά υποεκτιμά τις ακραίες τιμές. Επίσης παρατηρείται υπερεκτίμηση της ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα όλες τις χρονικές στιγμές και ελάχιστα μειωμένη μέση τιμή πρόγνωσης της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα, σε σχέση με την παρατήρηση. Τέλος η σχετική υγρασία στα 2 μέτρα υπερεκτιμάται τις απογευματινές ώρες 12-18UTC. Κατά την δεύτερη περίοδο η αξιολόγηση έδειξε παρόμοια αποτελέσματα και για τις τέσσερις παραπάνω μεταβλητές.

2.4 Εξίσωση Παλινδρόμησης

2.4.1 Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Η ανάλυση παλινδρόμησης περιγράφει τη μεταβλητότητα μιας τυχαίας τιμής y χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη πληροφορία για μια ή περισσότερες μεταβλητές (x_1, x_2 κτλ.). Το πρόβλημα της παλινδρόμησης είναι η εύρεση ενός μοντέλου που περιγράφει την εξάρτηση της τυχαίας τιμής y (εξαρτημένη μεταβλητή - predictand) από μια μεταβλητή x (ανεξάρτητη - predictor) ή και από περισσότερες.

Στην απλή γραμμική παλινδρόμηση η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι μόνο μια και οι δύο αυτές μεταβλητές έχουν γραμμική σχέση (Κουγιουμτζής, 2016).

2.4.2 Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση θεωρούμε ότι η τυχαία μεταβλητή Y εξαρτάται γραμμικά από κάποιες μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n . Η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y_i για τιμές της κάθε μεταβλητής δίνεται από τη σχέση:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2.1)$$

Ο όρος b_0 είναι η τεταγμένη της εξίσωσης και κάθε μια από τις n μεταβλητές έχει το δικό της συντελεστή.

Για κάθε τιμή y_i αντιστοιχεί μια τιμή-υπόλοιπο (e_i), η οποία τιμή είναι η διαφορά μεταξύ της παρατήρησης και της y_i . Οι υποθέσεις στη πολλαπλή όπως και στη

γραμμική είναι πως τα υπόλοιπα e_i και η κάθε τιμή y_i ακολουθούν κανονική κατανομή με σταθερή διασπορά. Σε αυτή την περίπτωση εξίσωση παλινδρόμησης αναπαριστά μια επιφάνεια και όχι μια γραμμή όπως στην απλή παλινδρόμηση, με αποτέλεσμα το κάθε υπόλοιπο να αναπαριστά γεωμετρικά την απόσταση πάνω ή κάτω από την επιφάνεια αυτή με μια κάθετη γραμμή. (Wilks, 1995)

2.5 Μέθοδος στατιστικής πρόγνωσης

2.5.1 Επιλογή μεθόδου πρόγνωσης

Η επιλογή της κύριας μεθόδου πρόγνωσης της παρούσας μελέτης έγινε με βάση τον οδηγό πρόγνωσης ποιότητας ατμόσφαιρας του Environmental Protection Agency των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA, 2003) καθώς η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλές περιοχές όπως για την πρόγνωση των (Hubbard M. and Cobourn W.G., 1998).

Η παλινδρόμηση είναι μια μέθοδος περιγραφής της σχέσης μεταβλητών. Για αυτό και στην περίπτωση πρόγνωσης ποιότητας του αέρα περιγράφει τη σχέση μεταξύ του ρύπου (εξαρτημένη μεταβλητή) και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών.

2.5.2 Ανάπτυξη ενός στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης

Για την ολοκλήρωση ενός μοντέλου πρόγνωσης όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ είναι απαραίτητα τα παρακάτω βήματα:

1. Διευκρίνιση των φυσικών και χημικών διαδικασιών που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των παραπάνω ρύπων στην περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία γίνεται με βάση τη βιβλιογραφία και κλιματική ανάλυση.
2. Επιλογή των μεταβλητών που αναπαριστούν τις παραπάνω διαδικασίες στην περιοχή. Με τη χρήση λογισμικού ή βιβλιογραφίας μπορούν να επιλεγθούν οι πιο σημαντικές μεταβλητές.
3. Δημιουργία αρχείου δεδομένων για τους ρύπους και μεταβλητές. Προτείνεται διάρκεια δεδομένων τριών ετών για καλύτερα αποτελέσματα.
4. Χρήση ενός λογισμικού στατιστικής ανάλυσης για τον υπολογισμό των συντελεστών και της σταθεράς που συμπληρώνουν την εξίσωση.
5. Αξιολόγηση του μοντέλου με βάση τη στατιστική και την εξαρτημένη μεταβλητή. Για συνεχής εξαρτημένες μεταβλητές όπως το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιούνται οι ανάλογοι δείκτες αξιολόγησης.

Επίσης, κάποια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει υπόψη ο προγνώστης είναι:

- Το O₃ και PM₁₀ έχουν λογαριθμική κατανομή αν και η παλινδρόμηση είναι η καλύτερη μέθοδος πρόγνωσης για μεταβλητές με κανονική κατανομή.
- Η παλινδρόμηση έχει την τάση καλύτερης πρόγνωσης για τη μέση κατάσταση ρύπανσης και όχι για τις ακραίες τιμές (υψηλές τιμές συγκεντρώσεων). Οπότε, η βελτίωση της πρόγνωσης υψηλών συγκεντρώσεων είναι δυνατή με δευτερεύων εξίσωση παλινδρόμησης, η χρήση της οποίας γίνεται μόνο όταν η αρχική εξίσωση δώσει τιμές από ένα όριο και πάνω.
- Απαιτείται προσοχή και μελέτη στον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν για την εξίσωση. Για την αποφυγή της μείωσης της αποτελεσματικότητας του κάθε μοντέλου είναι απαραίτητη η χρήση 5 ως 10 ανεξάρτητων μεταβλητών με σκοπό την πρόγνωση όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων.

- Μία μεταβλητή μπορεί να αναπαριστά μια ομάδα άλλων μεταβλητών. Για να αποφευχθεί πλεονασμός θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ανόμοιες και διαφορετικές μεταβλητές.
- Ο διαχωρισμός των δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Για παράδειγμα, διαχωρισμός ανά εποχή, τύπο καιρού και διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές.

Συμπεραίνεται πως για την ανάπτυξη του μοντέλου απαιτείται μέτρια εμπειρία από τον προγνώστη αν και για την ολοκλήρωση του και τη δημιουργία της εξίσωσης χρειάζεται μόνο ένα φύλλο εργασίας των δεδομένων. Όσο αφορά τις απαραίτητες μετεωρολογικές γνώσεις είναι χρήσιμες για τον έλεγχο των προγνώσεων των ρύπων, να είναι μέσα στο φυσικά όρια.

Κάθε προγνωστική τιμή έχει ένα ποσοστό αβεβαιότητας το οποίο εξαρτάται και από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Ένας εύκολος έλεγχος είναι μια μικρή εναλλαγή των δεδομένων και πως μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της ατμόσφαιρας.

2.5.3 Πλεονεκτήματα

- Η μέθοδος ανάλυσης της παλινδρόμησης είναι αρκετά χρησιμοποιούμενη σε διάφορους τομείς και με επιτυχία στη πρόγνωση ρύπων.
- Το λογισμικό είναι διαθέσιμο για κάθε προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή και είναι εύκολο στη χρήση.
- Η παλινδρόμηση είναι μια μέθοδος αντικειμενικής πρόγνωσης που μειώνει ανθρώπινα σφάλματα υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης της πρόγνωσης.
- Με τη μέθοδο αυτή διευκρινίζεται η σχέση μεταβλητών που υποκειμενικά δεν είναι εύκολα εφικτό.
- Για ένα μοντέλο πρόγνωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασική μέθοδος ή και σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους πρόγνωσης.

2.5.4 Μειονεκτήματα

- Για την ανάπτυξη της μεθόδου απαιτείται ένας μέτριος βαθμός εμπειρίας και προσπάθειας.
- Η εξίσωση που δημιουργείται με την παλινδρόμηση προτείνεται για πρόγνωση μέσης τιμής αντί ακραίων τιμών (π.χ. μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπων). Πιθανόν θα υποεκτιμήσει τις μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων και θα υπερεκτιμήσει τις ελάχιστες (EPA, 2003).

2.6 Επιλογή ανεξάρτητων μεταβλητών

Η επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών για οποιαδήποτε μέθοδος πρόγνωσης ρύπων γίνεται στα πρώτα στάδια με βάση την περιοχή μελέτης. Για ένα επαρκές αποτέλεσμα είναι βασικό να ληφθούν υπόψη προϋποθέσεις όπως οι παρακάτω:

- Κατανόηση των φαινομένων που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις όζοντος και σωματιδίων στην περιοχή. Παλαιότερες μελέτες στη βιβλιογραφία ή λεπτομέρειες της περιοχής μπορούν να δώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες.

- Επιλογή μεταβλητών που αναπαριστούν και συμπληρώνουν τα παραπάνω φαινόμενα. Για παράδειγμα η χρήση των συγκεντρώσεων PM_{10} της προηγούμενης μέρας ως μια από τις μεταβλητές, μπορεί να φέρει καλύτερη πρόγνωση αυτών για την επόμενη μέρα.
- Επιλογή προγνώσεων και παρατηρήσεων ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Η πρόγνωση των ρύπων εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και συγκεντρώσεις της επόμενης μέρας και όχι από της σημερινής ή της προηγούμενης, για αυτό προτιμώνται και προγνωστικές τιμές.
- Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα των δεδομένων. Με την αξιοπιστία της πηγής των δεδομένων και την άμεση διάθεση τους καθημερινά, τη σωστή χρονική στιγμή, η εκτέλεση της πρόγνωσης γίνεται σωστά και με λιγότερα πιθανά σφάλματα. Όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να είναι διαθέσιμες πριν την ώρα πρόγνωσης για την επόμενη μέρα.

Με τις παραπάνω προϋποθέσεις, η τελική επιλογή του αριθμού των μεταβλητών εξαρτάται από την εκτίμηση του προγνώστη. Με βάση τη στατιστική ανάλυση και τις απαραίτητες γνώσεις, ο αριθμός των μεταβλητών μειώνεται σε όσες είναι απαραίτητες. Στην αναγνώριση των μεταβλητών αυτών μπορούν να βοηθήσουν τεχνικές όπως:

- Ανάλυση κατά συστάδες (Cluster analysis): η μέθοδος αυτή διαχωρίζει τα δεδομένα σε παρόμοιες και ανόμοιες υποομάδες. Αρκετές μεταβλητές μπορεί να είναι παρόμοιες (π.χ. θερμοκρασία σε διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας) ή μια μεταβλητή μπορεί να αναπαριστά μια ομάδα διαφορετικών μεταβλητών. Για την αποφυγή πλεονασμού προτιμάται να μη χρησιμοποιούνται παρόμοιες μεταβλητές.
- Η ανάλυση συσχέτισης εκτιμά τη σχέση μεταξύ της εξαρτημένης και των διάφορων ανεξάρτητων μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από -1 (μεγάλη αρνητική σχέση) ως +1 (μεγάλη θετική σχέση) και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλη αρνητική ή θετική σχέση με την εξαρτημένη μεταβλητή.
- Η εκτίμηση του προγνώστη είναι υποκειμενική και βασίζεται στην κρίση και τη γνώση του. Διαγράμματα διασποράς μπορούν να βοηθήσουν για τη σωστή εκτίμηση των μεταβλητών (EPA, 2003).

2.7 Αξιολόγηση προγνωστικού μοντέλου

Με τον όρο πρόγνωση θεωρούμε την εκτίμηση μιας μελλοντικής κατάστασης, έτσι με τον όρο αξιολόγηση πρόγνωσης εννοούμε τον προσδιορισμό της ποιότητας πρόγνωσης (π.χ. καιρού). Με αυτό τον τρόπο γίνεται σύγκριση της πρόγνωσης με την αντίστοιχη τιμή παρατήρησης (ποιοτική ή ποσοτική εκτίμηση). Ως αποτέλεσμα, εκτιμάται κάθε σφάλμα του μοντέλου πρόγνωσης.

2.7.1 Αξιολόγηση πρόγνωσης συνεχών μεταβλητών

Για την αξιολόγηση μοντέλων που έχουν ως στόχο την πρόγνωση συγκεντρώσεων συνεχών μεταβλητών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι στατιστικοί δείκτες. Δύο είναι οι πιο κοινές μεθόδους, Mean Absolute Error (MAE) και Root Mean Squared Error (RMSE) (Wilks, 1995). Άλλοι τρεις δείκτες έρχονται να συμπληρώσουν τους προηγούμενους, το ίδιο σημαντικοί: Mean Error - Bias (ME), Skill Score και ο συντελεστής συσχέτισης (EPA, 2003). Κυρίως προτείνεται η χρήση του RMSE ή MAE και του δείκτη συμφωνίας Index of Agreement (IOA) (Willmott, 1982).

- **MAE** είναι ο αριθμητικός μέσος των απόλυτων τιμών των διαφορών μεταξύ της κάθε πρόγνωσης f και παρατήρησης o . Η τιμή του θεωρείται το άθροισμα της συνολικής ποιότητας των προγνώσεων. Αν ισούται με το 0 τότε οι προγνώσεις είναι τέλειες, χωρίς σφάλματα, ενώ η τιμή του μεγαλώνει ανάλογα με τις διαφορές κάθε ζευγαριού. Η εξίσωση του δείκτη είναι:

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |f - o| \right) \quad (2.2)$$

και οι μονάδες μέτρησης: ppb, ppm, mg/m³ κ.α.

- **RMSE** είναι η μέση τετραγωνισμένη διαφορά μεταξύ της πρόγνωσης και παρατήρησης, σαν τον δείκτη MAE που χρησιμοποιεί απόλυτες τιμές. Το RMSE είναι ευαίσθητο στα μεγαλύτερα σφάλματα - υπόλοιπα πρόγνωσης λόγω του τετραγώνου για αυτό και παίρνει τιμές από το 0 για τέλειες προγνώσεις, ως και μεγάλες θετικές τιμές όσο οι διαφορές αυξάνονται. Και τα δύο είναι μετρήσεις εύρους των σφαλμάτων. Η εξίσωση του είναι:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (f - o)^2 \right)} \quad (2.3)$$

και οι μονάδες μέτρησης: ppb, ppm, mg/m³ κ.α.

- Το σφάλμα **ME** (bias) είναι το συστηματικό σφάλμα. Δεν παρέχει πληροφορίες για το τυπικό εύρος μεμονωμένων προγνώσεων, αλλά μια μέση κατάσταση υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης των προγνώσεων. Παίρνει θετικές τιμές όταν οι προγνώσεις είναι αρκετά υψηλές (υπερεκτίμηση) και αρνητικές όταν είναι αρκετά χαμηλές (υποεκτίμηση) σε σχέση με τις παρατηρήσεις. Το καλύτερο αποτέλεσμα είναι να δώσει τιμή κοντά στο μηδέν όμως δεν αρκεί για την συνολική αξιολόγηση του μοντέλου. Η εξίσωση που το αναπαριστά είναι:

$$ME = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (f - o) \right) \quad (2.4)$$

και οι μονάδες μέτρησης: ppb, ppm, mg/m³ κ.α.

- Ο **συντελεστής συσχέτισης** δείχνει τη γραμμική σχέση δύο μεταβλητών (πρόγνωση - παρατήρηση) αλλά δε φέρει κανένα στοιχείο σφάλματος. Η καλύτερη τιμή που μπορεί να δώσει ο συντελεστής είναι 1. Θετική τιμή του συντελεστή δείχνει πως η πλειονότητα των προγνωστικών τιμών συσχετίζεται με την πλειονότητα των παρατηρήσεων ακολουθώντας ίδια μεταβολή, ενώ αρνητική τιμή είναι χαρακτηριστικό αντιστρόφως ανάλογης μεταβολής των δύο τύπων δεδομένων. Η υψηλή συσχέτιση δεν σημαίνει αυτόματα και υψηλή ποιότητα του μοντέλου πρόγνωσης, για αυτό και δεν θα πρέπει να είναι ο μοναδικός δείκτης που χρησιμοποιείται αλλά να είναι βοηθητικός (Wilks, 1995) (EPA, 2003).



$$C_{fo} = \left(\frac{\text{Cov}(f, o)}{sf \cdot so} \right) \quad (2.5)$$

- Ο δείκτης συμφωνίας **IOA**, παίρνει τιμές 0 ως 1 και εκφράζει αντίστοιχα την απόλυτη διαφωνία και απόλυτη συμφωνία των προγνώσεων f με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις o .

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |f_i - o_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|f_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (2.6)$$

Όπου \bar{o} είναι η μέση τιμή παρατηρήσεων στην εξίσωση (2.6).

Απαραίτητος είναι ο συνδυασμός των παραπάνω δεικτών μαζί με διαγράμματα απεικόνισης δεδομένων και μέση τιμή προγνώσεων και παρατηρήσεων για μια περιεκτική εκτίμηση της απόδοσης στατιστικού μοντέλου (Willmott et al., 1985). Στα αποτελέσματα (Κεφάλαιο 3) παρουσιάζονται διαγράμματα διασποράς και χρονοσειράς των προγνώσεων και παρατηρήσεων συγκεντρώσεων όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων.

3 Κεφάλαιο 3

3.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης παλινδρόμησης ως στατιστικό μοντέλο πρόγνωσης

Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου στατιστικού μοντέλου έχει ως στόχο την πρόγνωση μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων O_3 και PM_{10} για τις επόμενες τρεις ημέρες σε mg/m^3 . Η επιλογή της παλινδρόμησης ως μεθόδου πρόγνωσης βασίζεται στην βιβλιογραφία (EPA, 2003; Slini et al., 2002; Robeson and Steyn, 1990; Chaloulakou et al., 1999). Η μέθοδος της εμμονής (persistence) είναι συμπληρωματική, καθώς θεωρείται και αποδεικνύεται πως η συγκέντρωση όζοντος και σωματιδίων μιας ημέρας θα είναι παρόμοια με της επόμενης.

Πρώτα έγινε η συλλογή των ωριαίων παρατηρήσεων των ρύπων από τέσσερις σταθμούς της ΠΚΜ (Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό, Πανόραμα, Νεοχωρούδα) για τη χρονική περίοδο Δεκέμβριος 2013 - Νοέμβριος 2014, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση παλινδρόμησης και για την αξιολόγηση της. Η επιλογή των τεσσάρων σταθμών έγινε με βάση την διαθεσιμότητα παρατηρήσεων των δύο ρύπων και την τοποθεσία τους. Ο κάθε ένας από τους σταθμούς βρίσκεται σε περιοχές της πόλης με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Μετά τη συλλογή των παρατηρήσεων ακολούθησε ο υπολογισμός των ημερήσιων μέσων τιμών, μέσω του στατιστικού λογισμικού Excel, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εξίσωση παλινδρόμησης. Ελλείψεις δεδομένων παρατηρούνται σε μικρό βαθμό για το όζον, χωρίς να αλλάζει η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αλλά σε μεγαλύτερο βαθμό για τα αιωρούμενα σωματίδια δυσκολεύοντας την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα εποχιακά μοντέλα. Όλα τα παρακάτω μοντέλα έχουν μια κοινή περίοδο χωρίς δεδομένα στο τέλος Αυγούστου (26/8 – 31/8), καθώς το μοντέλο WRF δεν παρείχε προγνώσεις από το τρίτο πλέγμα ($D03$). Κάποιες από τις ημέρες αυτές καλύφθηκαν από διαθέσιμες προγνώσεις προηγούμενης ημέρας (25/8) ενώ οι υπόλοιπες αφαιρέθηκαν απ τη χρονοσειρά. Η ίδια μέθοδος αφαίρεσης ημερών ακολουθήθηκε και για αυτές που δεν υπήρχαν παρατηρήσεις όζοντος ή αιωρούμενων σωματιδίων από τους σταθμούς.

3.1.1 Επιλογή μεταβλητών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε ανάπτυξη διάφορων μεθόδων για την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών, η χρήση των οποίων βοηθάει στην πρόγνωση ρύπων. Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Αρχικά, ο πρώτος διαχωρισμός μεταβλητών έγινε με βάση τον αμερικανικό οδηγό πρόγνωσης (EPA, 2003) και τον τρόπο επίδρασης κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου στις συγκεντρώσεις των δύο αυτών ρύπων. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές με τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης κάθε μίας από τις μεταβλητές με το όζον ή τα αιωρούμενα σωματίδια από ένα σταθμό αλλά και με την ανάλυση παλινδρόμησης και την αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων από τους σταθμούς, όπως αναφέρεται στο δεύτερο κεφάλαιο, δε χρησιμοποιούνται. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τελικές μεταβλητές που περιλαμβάνονται και η γενική σχέση τους με υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων (Πίνακας 3.1), η οποία διαμορφώνεται ανάλογα με την περιοχή και την εποχή. Ο δείκτης p-value στους παρακάτω πίνακες εκφράζει τη στατιστική σημαντικότητα της κάθε μεταβλητής δηλαδή τη σχέση των αντίστοιχων μεταβλητών και την αξιοπιστία του

αποτελέσματος, με τιμή του δείκτη μικρότερη από 0,05 να εκφράζει σημαντικότητα και τη σημασία της μεταβλητής στα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης.

Πίνακας 3.1 Εξαρτημένες μεταβλητές για πρόγνωση των ρύπων (πηγή: EPA, 2003)

Μεταβλητή	Χρήση	Συμβολή για υψηλές τιμές O ₃	Συμβολή για υψηλές τιμές PM ₁₀
Θερμοκρασία στα 850hPa	Κατακόρυφη ανάμειξη	Υψηλή	Υψηλή
Γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa	Συνοπτική κατάσταση καιρού	Υψηλή	Υψηλή
Θερμοκρασία στα 2m	Παραγωγή όζοντος	Υψηλή	Υψηλή
Ταχύτητα ανέμου στα 10m	Διάχυση και διασπορά των ρυπαντών	Χαμηλή	Χαμηλή
Σχετική υγρασία στα 2m	επίδραση νεφοκάλυψης στο O ₃ – Επίδραση σε δευτερογενείς αντιδράσεις για τα PM ₁₀	Χαμηλή	Υψηλή
Βροχόπτωση	Υγρή εναπόθεση		Καθόλου ή ελάχιστη
Διάρκεια ημέρας	Ηλιακή ακτινοβολία	Υψηλή	
Συγκέντρωση όζοντος ή σωματιδίων προηγούμενης μέρας	Εμμονή	Υψηλή	Υψηλή

Η μεταβλητή συγκέντρωσης όζοντος (p_{ren}O₃) ή αιωρούμενων σωματιδίων (p_{ren}PM₁₀) της προηγούμενης μέρας είναι η τιμή παρατήρησης κάθε σταθμού για την ίδια ημέρα που δίνει το μοντέλο WRF τις τιμές πρόγνωσης. Έτσι τα μοντέλα πρώτης ημέρας πρόγνωσης, δίνουν πρόγνωση για την επόμενη ημέρα, της δεύτερης ημέρας πρόγνωσης δίνουν για δύο ημέρες μετά ενώ το μοντέλο τρίτης ημέρας πρόγνωσης αφορά πρόγνωση μετά από τρεις ημέρες.

Το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης του τομέα δίνει όλες τις προγνωστικές τιμές που χρησιμοποιούνται παρακάτω για την ανάλυση παλινδρόμησης.

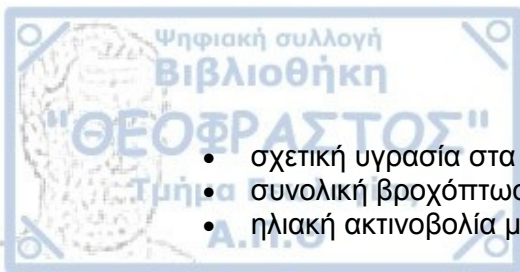
3.1.2 Εξαγωγή δεδομένων από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF

Αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του μοντέλου γίνεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Όπως αναφέρθηκε, τρέχει σε τρεις περιοχές ολοκλήρωσης και τα δεδομένα προέρχονται από την πρώτη και τρίτη. Το πλέγμα της Ευρώπης (D01) είναι το μεγαλύτερο με χωρική διακριτοποίηση 15 χλμ. X 15 χλμ. (Χάρτης 2.2) ενώ το τρίτο της περιοχής της Θεσσαλονίκης (D03) είναι το μικρότερο με την καλύτερη χωρική διακριτοποίηση 1,677 χλμ. X 1,677 χλμ. Το πρώτο πλέγμα δίνει προγνώσεις ανά 3 ώρες και οι μεταβλητές που εξάγονται από αυτό είναι οι:

- θερμοκρασία στα 850hPa (T850) (°C)
- γεωδυναμικό ύψος των 500hPa (G500) (gpm)

Ενώ από το τρίτο πλέγμα έγινε εξαγωγή των ωριαίων προγνώσεων των παρακάτω μεταβλητών:

- θερμοκρασία στα 2 μέτρα (T2m) (°C)
- ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα (WS10m) (m/s)



- σχετική υγρασία στα 2 μέτρα (RH2m) (%)
- συνολική βροχόπτωση (PREC) (mm)
- ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους (SOL) (W/m²)

Η διάδοση των ατμοσφαιρικών κυμάτων από το ένα πλέγμα του μοντέλου στο άλλο μπορεί να φέρει σφάλματα. Η ταχύτητα διάδοσης του εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων του πλέγματος με τη χαμηλότερη διακριτοποίηση. Δηλαδή, αν το κύμα αναλύεται καλά στο μεγαλύτερο πλέγμα τότε θα περάσει με τη σωστή ταχύτητα στο πλέγμα με την υψηλότερη διακριτοποίηση. Από την άλλη, το πλέγμα που δεν έχει αναλυθεί σωστά, θα διαδοθεί με μικρότερη ταχύτητα από την πραγματική, κάτι που μπορεί να αλλάξει τον προσανατολισμό του κύματος. Στη χειρότερη περίπτωση, το κύμα μπορεί ακόμα και να ανακλαστεί, αλλά με την χρήση κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων το φαινόμενο αυτό μειώνεται αρκετά (www.meted.ucar.edu).

Για το λόγο αυτό τα δεδομένα των δύο πρώτων μεταβλητών (θερμοκρασία στα 850hPa και γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa) εξάγονται από το πρώτο πλέγμα (D01) με τη χαμηλότερη διακριτοποίηση και όχι από το τρίτο (D03), όπως οι υπόλοιπες μεταβλητές. Μετά από την εξαγωγή τους σε αρχεία .grb, γίνεται η επιλογή τους τις ανάλογες χρονικές στιγμές και ο υπολογισμός των ημερήσιων τιμών με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού του έργου E R project. Ο αρχικός χρόνος πρόγνωσης του μοντέλου δηλαδή του πρώτου πλέγματος (D01) είναι 12UTC, ενώ για τα δύο μικρότερα πλέγματα είναι 18UTC. Για το λόγο αυτό η πρώτη χρονική στιγμή δεδομένων είναι 00UTC, μετά από δώδεκα ώρες, δηλαδή μετά από το spin-up τις πρώτες έξι ώρες.

3.1.3 Γεωγραφικές συντεταγμένες

Στο προηγούμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους τέσσερις σταθμούς της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας από τους οποίους χρησιμοποιούνται δεδομένα για τις συγκεντρώσεις των ρύπων. Οι σταθμοί αυτοί είναι: πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό, Πανόραμα, Νεοχωρούδα (Χάρτης 2.1). Οι προγνώσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων εξάγονται από το κοντινότερο σημείο πλέγματος προς τον κάθε σταθμό (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2 Γεωγραφικές συντεταγμένες των τεσσάρων σταθμών (πραγματικές και κοντινότερα σημεία του κάθε πλέγματος)

	Σταθμός		Πλέγμα D01		Πλέγμα D03	
	Γ. πλάτος	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Γ. μήκος	Γ. πλάτος	Γ. μήκος
Αγίας Σοφίας	40.6328	22.9470	40.5972	22.85214	40.594	22.85
Κορδελιό	40.6680	22.8926	40.73346	22.86908	40.674	22.898
Πανόραμα	40.5875	23.0336	40.58421	23.03156	40.578	23.026
Νεοχωρούδα	40.7358	22.8740	40.73346	22.86908	40.738	22.866

3.2 Αποτελέσματα

3.2.1 Όζον (O₃)

Μετά το πέρας της επεξεργασίας των δεδομένων με την ανάκτηση τους και τον έλεγχο ποιότητας, η ανάλυση παλινδρόμησης είναι το επόμενο βήμα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις με τους συντελεστές και τα αποτελέσματα της ανάπτυξης μοντέλου για τρεις προγνωστικές μέρες, ανά έτος και ανά εποχή, με βάση τις μετρήσεις στα τέσσερα σημεία-σταθμούς της πόλης. Επιπλέον, περιλαμβάνεται η αξιολόγηση του κάθε μοντέλου με στατιστικούς δείκτες πίνακες και διαγράμματα.

Τέλος, οι συνοπτικοί πίνακες για τα ετήσια και εποχιακά μοντέλα δίνουν συνολική εικόνα για τις μεταβλητές και την αξιολόγησή τους.

Για τον έλεγχο γραμμικής σχέσης μεταξύ της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής και της εξαρτημένης προγνωστικής υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, ενώ ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας κάθε μεταβλητής.

Με βάση την εμμονή (persistence) των συγκεντρώσεων όζοντος, η μεταβλητή της συγκέντρωσης όζοντος προηγούμενης ημέρας θεωρείται σημαντική για την εξαγωγή ακριβής πρόγνωσης.

3.2.1.1 Ετήσια ανάλυση παλινδρόμησης

Η εξίσωση 3.1 είναι η εξίσωση παλινδρόμησης με την οποία εκφράζεται η σχέση της εξαρτημένης με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι συντελεστές κάθε μεταβλητής στην εξίσωση παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.3) για όλα τα στατιστικά μοντέλα σε ετήσια βάση. Δηλαδή, για τους τέσσερις σταθμούς για κάθε ημέρα πρόγνωσης συγκεντρώσεων όζοντος.

$$O_3 = a * prevO_3 + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.1)$$

Πίνακας 3.3: Συντελεστές μεταβλητών των στατιστικών μοντέλων σε ετήσια βάση για τους τέσσερις σταθμούς

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Αγ. Σοφίας	1	0,426	-0,002	-0,982	0,981	0,019	1,701	0,095	0,289	2,847
	2	0,089	0,001	-1,441	1,228	0,154	1,924	0,153	0,255	-32,117
	3	0,023	-0,0007	-1,117	1,036	0,076	1,666	0,162	0,886	-11,978
Κορδελιό	1	0,515	-0,004	-1,065	0,698	-0,038	1,317	0,072	0,242	24,295
	2	0,277	-0,009	-1,474	1,035	-0,044	1,6005	0,104	0,195	52,136
	3	0,168	-0,007	-1,529	1,058	-0,034	1,570	0,112	0,270	44,308
Πανόραμα	1	0,605	-0,016	0,196	0,428	-0,335	-0,681	0,022	0,361	128,709
	2	0,390	-0,014	0,380	0,367	-0,395	-0,482	0,057	0,427	129,423
	3	0,261	-0,021	0,275	0,658	-0,407	-0,361	0,071	0,079	172,813
Νεοχωρούδα	1	0,530	-0,008	-0,329	-0,581	-0,180	1,135	0,066	0,061	77,743
	2	0,326	-0,0008	-0,690	-0,862	-0,255	0,684	0,099	0,198	53,539
	3	0,234	0,002	-1,123	-0,555	-0,249	0,815	0,105	0,126	37,672

Πλατεία Αγίας Σοφίας

Για την εκπόνηση των τριών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 262 ημέρες του έτους. Τα δεδομένα του σταθμού είναι διαθέσιμα για όλο το έτος, εκτός από την περίοδο: 14/7 – 24/10, δηλαδή 104 μέρες.

Πίνακας 3.4: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε **bold** οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev O_3	1,385E-17	0,105	0,704	0,862	0,741	0,732
G500	0,737	0,860	0,940	0,256	0,228	0,223
T850	0,0006	8,611E-05	0,0037	0,562	0,542	0,537
T2m	0,0006	0,0007	0,005	0,704	0,683	0,669
RH2m	0,783	0,075	0,423	-0,429	-0,444	-0,475
WS10m	3,316E-07	1,243E-06	0,0004	0,186	0,269	0,233
SOL	3,457E-14	2,124E-22	1,808E-23	0,854	0,843	0,833
PREC	0,196	0,366	0,0007	-0,068	-0,105	-0,006

Πίνακας 3.5: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	262	262	262
Μέσος όρος παρατηρήσεων	35,799	35,584	35,536
Μέσος όρος προγνώσεων	35,799	35,584	35,536
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	19,883	19,798	19,849
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	18,317	17,455	17,269
Μέσο σφάλμα (ME)	-1,700E-14	-2,195E-14	-2,4E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	6,045	7,253	7,59
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	7,721	9,324	9,767
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,957	0,934	0,927
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,921	0,881	0,870
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,848	0,777	0,756

Παραπάνω (Πίνακας 3.4) παρουσιάζεται η στατιστική σημαντικότητα και ο συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής των αποτελεσμάτων παλινδρόμησης. Πρώτα από όλα παρατηρείται η διαφορά της στατιστικής σημαντικότητας του όζοντος προηγούμενης μέρας κατά τις τρεις μέρες πρόγνωσης. Μόνο την πρώτη μέρα πρόγνωσης ο δείκτης παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα αλλά η συσχέτιση με το όζον είναι υψηλή για την κάθε μέρα πρόγνωσης. Από την άλλη, το γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa έχει αρκετά υψηλές τιμές του δείκτη p και αρκετά μικρές του συντελεστή συσχέτισης, ενώ η θερμοκρασία στο επίπεδο των 850hPa, η δεύτερη μεταβλητή συνοπτικής κατάστασης, συμβάλλει σε αξιόπιστα αποτελέσματα του

μοντέλου με μέτρια θετική συσχέτιση. Παρόμοια κατάσταση και για τη θερμοκρασία στα 2 μέτρα με θετικές υψηλές τιμές συσχέτισης για κάθε μέρα πρόγνωσης. Όσον αφορά την σχετική υγρασία στα 2 μέτρα και την συνολική βροχόπτωση δεν παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα και ούτε αξιόλογες (αρνητικές) τιμές συσχέτισης με το όζον. Ενώ οι μεταβλητές ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα και συνολική ακτινοβολία μικρού μήκους συμβάλλουν σε αξιόπιστα αποτελέσματα του μοντέλου, η συσχέτιση τους με το όζον δεν ακολουθεί την ίδια πορεία.

Στον Πίνακα 3.5 αναγράφονται στατιστικοί δείκτες και τιμές μέσου όρου, των οποίων ο υπολογισμός έγινε για την αξιολόγηση των προγνωστικών μοντέλων για το σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας. Σε συνδυασμό με τον μέσο όρο προγνώσεων για το όζον και με το ME το οποίο φαίνεται να είναι σχεδόν μηδέν, το μοντέλο παρουσιάζει τόσο θετικά όσο και αρνητικά σφάλματα, αλλά όχι μηδενικά σφάλματα. Για το λόγο αυτό όποιο συμπέρασμα θα πρέπει να υπολογίζεται σε συνδυασμό με το MAE. Ο δείκτης συμφωνίας είναι αρκετά υψηλός και για τις τρεις ημέρες.

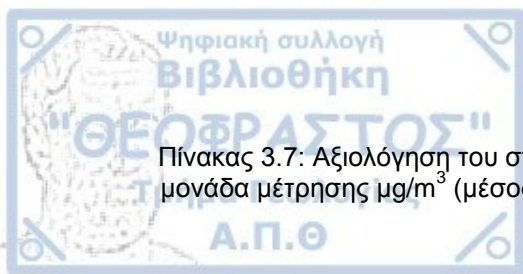
Κορδελιό

Όπως και στον προηγούμενο σταθμό, με βάση τις παρατηρήσεις όζοντος του σταθμού του Κορδελιού έγινε η εξαγωγή των εξισώσεων από την ανάλυση παλινδρόμησης και για τις τρεις προγνωστικές ημέρες.

Για την εκπόνηση τους χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 362 ημέρες του έτους καθώς ο σταθμός παρείχε δεδομένα για όλα το έτος.

Πίνακας 3.6: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	5,021E-32	3,493E-07	0,0002	0,774	0,601	0,563
G500	0,554	0,278	0,346	0,128	0,099	0,099
T850	0,0006	9,398E-05	0,0001	0,317	0,317	0,322
T2m	0,016	0,002	0,002	0,432	0,437	0,446
RH2m	0,517	0,507	0,624	-0,436	-0,472	-0,479
WS10m	1,215E-06	7,246E-08	6,862E-07	0,061	0,147	0,150
SOL	6,236E-10	1,477E-16	4,759E-18	0,680	0,689	0,682
PREC	0,135	0,271	0,074	-0,019	-0,047	6,93E-05



Πίνακας 3.7: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	362	362	362
Μέσος όρος παρατηρήσεων	36,823	36,736	36,718
Μέσος όρος προγνώσεων	36,823	36,736	36,718
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	15,753	15,814	15,838
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	13,364	12,621	12,427
Μέσο σφάλμα (ME)	1,331E-14	1,59E-14	5,35E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	6,611	7,481	7,891
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	8,329	9,516	9,806
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,913	0,879	0,870
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,848	0,798	0,784
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,719	0,636	0,615

Στον Πίνακα 3.6 ο δείκτης στατιστικής σημαντικότητας και ο συντελεστής συσχέτισης της κάθε μεταβλητής παρουσιάζει παρόμοια κατάσταση με τον σταθμό Πλατείας Αγίας Σοφίας, με αρκετά μικρότερο συντελεστή συσχέτισης για τις μεταβλητές θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια αλλά και για το όζον της προηγούμενης μέρας

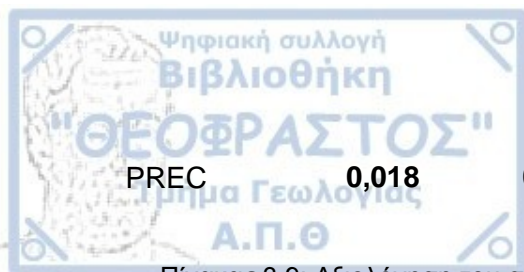
Το ίδιο ισχύει και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ο δείκτης συμφωνίας IOA και ο συντελεστής συσχέτισης r είναι μικρότεροι αλλά με μικρή διαφορά.

Πανόραμα

Και για τον περιστατικό σταθμό του Πανοράματος η περίοδος μελέτης δεν παρουσίασε ελλείψεις δεδομένων, για αυτό και χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 362 ημέρες του έτους.

Πίνακας 3.8: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	2,757E-40	4,316E-16	5,201E-08	0,875	0,795	0,740
G500	0,0601	0,153	0,0323	0,450	0,436	0,424
T850	0,619	0,437	0,598	0,685	0,676	0,662
T2m	0,275	0,4404	0,1890	0,726	0,718	0,712
RH2m	4,965E-07	2,860E-07	4,046E-07	-0,562	-0,5401	-0,581
WS10m	0,028	0,138	0,307	-0,191	-0,178	-0,140
SOL	0,0406	1,059E-05	1,961E-07	0,769	0,781	0,796



PREC 0,018 0,024 0,604 -0,088 -0,0902 -0,116

Πίνακας 3.9: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	362	362	362
Μέσος όρος παρατηρήσεων	70,005	69,928	69,855
Μέσος όρος προγνώσεων	70,005	69,928	69,874
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	21,430	21,602	21,714
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	19,280	18,573	18,378
Μέσο σφάλμα (ME)	-5,551E-14	-3,7E-14	5,87E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,357	8,617	8,965
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,342	11,017	11,553
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,945	0,920	0,911
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,899	0,859	0,845
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,809	0,739	0,716

Ο Πίνακας 3.8 δίνει τις τιμές στατιστικής σημαντικότητας και συσχέτισης των μεταβλητών με τις παρατηρήσεις όζοντος για το σταθμό Πανοράματος. Παρατηρείται διαφορετική σχέση των μεταβλητών σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα μοντέλα. Οι προγνωστικές τιμές για τη θερμοκρασία με τις υψηλές τιμές συσχέτισης δεν παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα. Σε αντίθεση με τον αρκετά χαμηλό δείκτη για την σχετική υγρασία, ενώ η ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα δείχνει να συμβάλλει σε καλύτερα αποτελέσματα μόνο στο μοντέλο για πρόγνωση της επόμενης ημέρας. Η συνολική βροχόπτωση παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα για την πρώτη και δεύτερη μέρα πρόγνωσης, ενώ η σχεδόν μηδενική συσχέτιση της μεταβλητής με το όζον δείχνει τη διαφορετική μεταβλητότητα της κάθε παραμέτρου. Το όζον της προηγούμενης ημέρας, η σχετική υγρασία στα 2 μέτρα και η συνολική ακτινοβολία μικρού μήκους δίνουν σωστά συμπεράσματα και για τα τρία μοντέλα κάθε μέρα πρόγνωσης.

Τα στοιχεία της αξιολόγησης των τριών μοντέλων του σταθμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9. Μόνο στο μοντέλο για την τρίτη μέρα πρόγνωσης ο μέσος όρος προγνώσεων είναι ελάχιστα διαφορετικός από των παρατηρήσεων. Ο δείκτης συμφωνίας IOA και οι συντελεστές r και r^2 δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα για την αξιολόγηση του ετήσιου μοντέλου για το Πανόραμα, ενώ το MAE σε σύγκριση με το μέσο όρο και τα προηγούμενα δύο μοντέλα είναι μικρό.

Νεοχωρούδα

Για τον υπολογισμό των εξισώσεων ανάλυσης παλινδρόμησης με βάση της παρατηρήσεις όζοντος του περιβατικού σταθμού Νεοχωρούδας χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 291 ημέρες του έτους. Τα

δεδομένα από το σταθμό αυτό παρουσιάζουν ελλείψεις τις περιόδους: Δεκέμβριο του 2013, 16/1 - 4/2, 28/8 – 31/8 (λόγω του μοντέλου WRF) και 13/11 – 31/11.

Πίνακας 3.10: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O₃ για την ημέρα πρόγνωσης (Νεοχωρούδα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	9,372E-27	7,021E-11	3,824E-06	0,710	0,535	0,435
G500	0,421	0,938	0,847	-0,2701	-0,2604	-0,259
T850	0,4309	0,157	0,027	-0,2104	-0,205	-0,203
T2m	0,154	0,068	0,245	-0,153	-0,151	-0,135
RH2m	0,0019	0,00014	0,0005	-0,189	-0,164	-0,190
WS10m	1,520E-05	0,0179	0,005	0,1685	0,156	0,1689
SOL	2,113E-07	6,447E-12	7,279E-13	0,295	0,313	0,329
PREC	0,661	0,177	0,458	-0,071	-0,137	-0,135

Πίνακας 3.11: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης μg/m³ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Νεοχωρούδα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	291	290	289
Μέσος όρος παρατηρήσεων	54,392	54,536	54,588
Μέσος όρος προγνώσεων	54,392	54,536	54,588
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	14,736	14,627	14,610
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	11,655	10,396	9,974
Μέσο σφάλμα (ME)	3,441E-14	3,855E-14	3,536E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,077	7,986	8,352
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,001	10,271	10,657
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,873	0,811	0,787
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,790	0,710	0,682
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,625	0,505	0,466

Στα αποτελέσματα της παλινδρόμησης για κάθε ένα από τα τρία μοντέλα του σταθμού Νεοχωρούδας (Πίνακας 3.10), ξεχωρίζουν οι μεταβλητές του όζοντος προηγούμενης μέρας, σχετικής υγρασίας στα 2 μέτρα, ταχύτητα ανέμου στα 10 μέτρα και συνολική ακτινοβολία μικρού μήκους με στατιστική σημαντικότητα προς τα αποτελέσματα αλλά με μικρή συσχέτιση με τις παρατηρήσεις όζοντος του σταθμού.

Η αξιολόγηση του δίνει χαμηλότερους δείκτες αλλά με μικρή διαφορά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα παραπάνω μοντέλα.

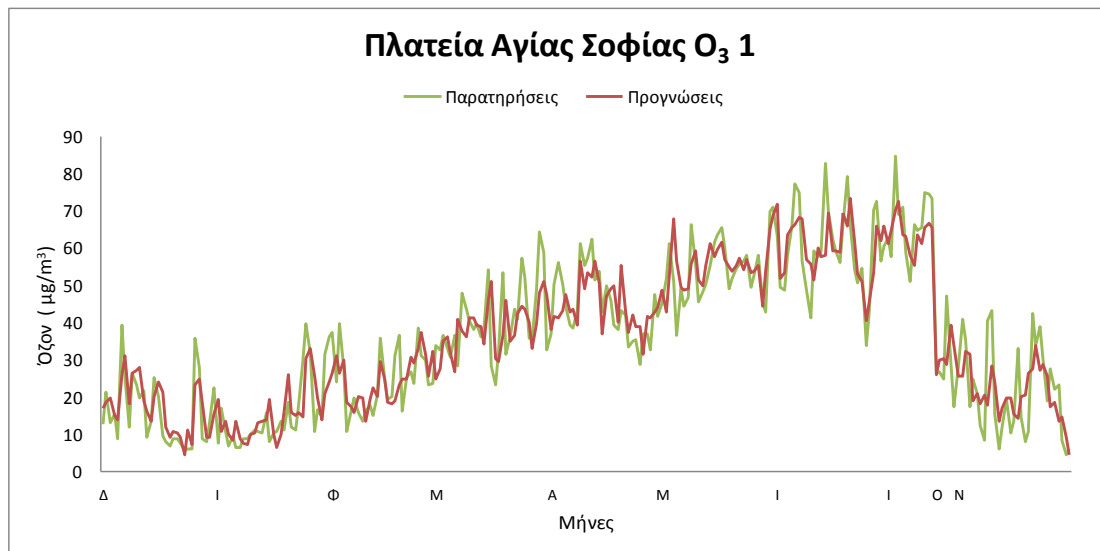
3.2.1.1.1 Διαγράμματα πρώτης ημέρας πρόγνωσης

Για μια συνολική εικόνα της απόδοσης του μοντέλου παλινδρόμησης, τα παρακάτω διαγράμματα αναπαράστασης δεδομένων (χρονοσειράς και διασποράς) συμπληρώνουν την ανάλυση στατιστικών δεικτών.

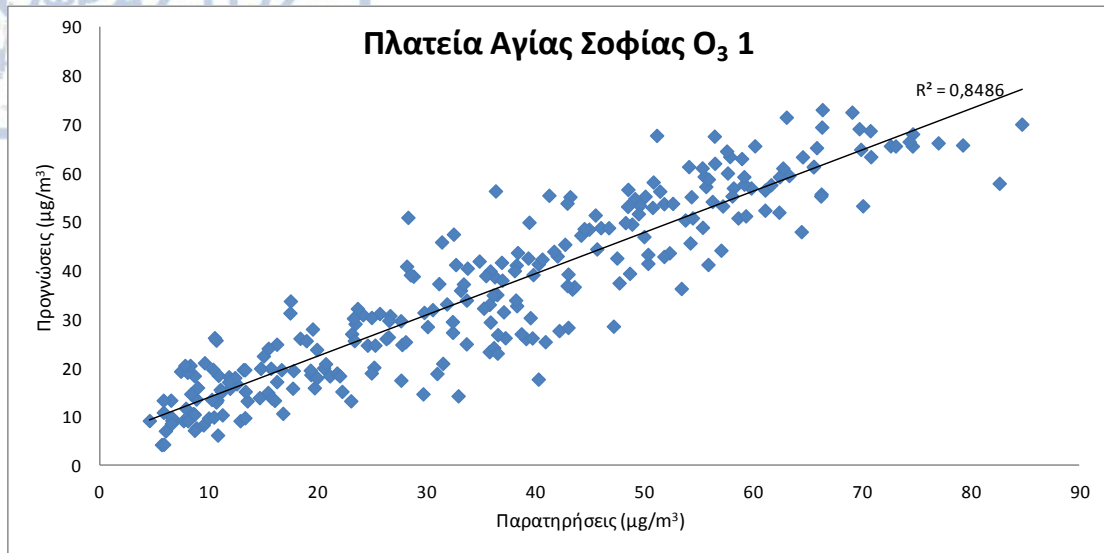
Η σχεδίαση αυτών αναπαριστά την πρόγνωση των στατιστικών μοντέλων παλινδρόμησης για την πρώτη ημέρα και για τους τέσσερις σταθμούς μελέτης. Συγκεκριμένα, το κάθε διάγραμμα χρονοσειράς (Σχήμα 3.1, Σχήμα 3.3, Σχήμα 3.5) δείχνει την πορεία που ακολουθούν για όλο το έτος, οι τιμές παρατηρήσεων και προγνώσεων όζοντος σε πράσινη και κόκκινη καμπύλη. Ενώ τα διαγράμματα διασποράς (Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.4, Σχήμα 3.6) εκφράζουν τη σχέση παρατηρήσεων (οριζόντιος άξονας x) και προγνώσεων (κατακόρυφος άξονας y) του μοντέλου. Μαζί με τον συντελεστή συσχέτισης μας δείχνουν ακριβώς τη φύση και το μέγεθος της συσχέτισης των δύο μεταβλητών.

Το κάθε διάγραμμα χρονοσειράς αναπαριστά την συνέχεια των πραγματικών δεδομένων (πράσινη καμπύλη) από τους σταθμούς και των προγνωστικών (κόκκινη καμπύλη). Παρατηρείται μια μικρή τάση υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης των υψηλών και χαμηλών συγκεντρώσεων αντίστοιχα (EPA, 2003) αν και οι δύο καμπύλες ακολουθούν την ίδια τάση αύξησης ή μείωσης.

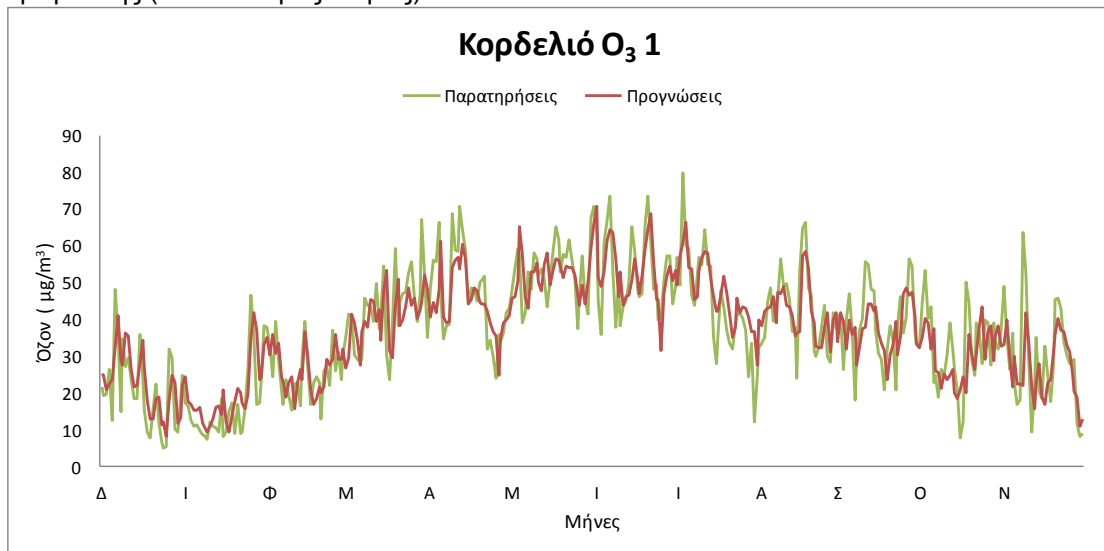
Τα διαγράμματα διασποράς εκφράζουν τη γραμμική σχέση των δύο μεταβλητών του τύπου. Σε κάθε ένα η γραμμή τάσης είναι ευθεία από κάτω αριστερά προς τα επάνω δεξιά με τη διασπορά των τιμών να είναι παρόμοια. Με βάση και τον συντελεστή συσχέτισης στους πίνακες αξιολόγησης φαίνεται πως τα δεδομένα του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας (Σχήμα 3.2, Πίνακας 3.5) και Πανοράματος (Σχήμα 3.6, Πίνακας 3.9) ακολουθούν την πιο ισχυρή γραμμική σχέση. Για το σταθμό του Κορδελιού και έπειτα για της Νεοχωρούδας ακολουθούν μια λιγότερο ισχυρή γραμμική σχέση.



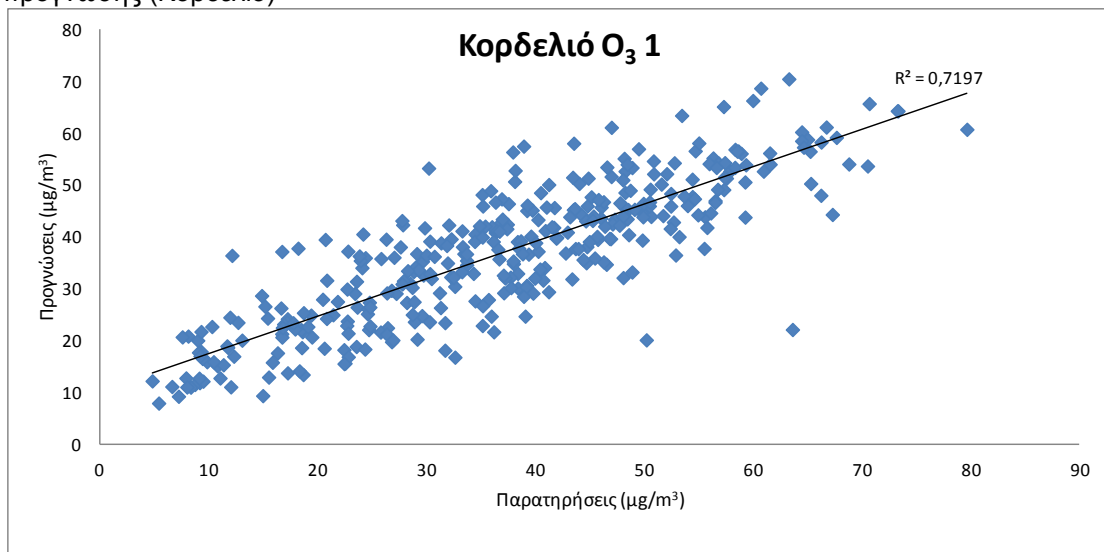
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)



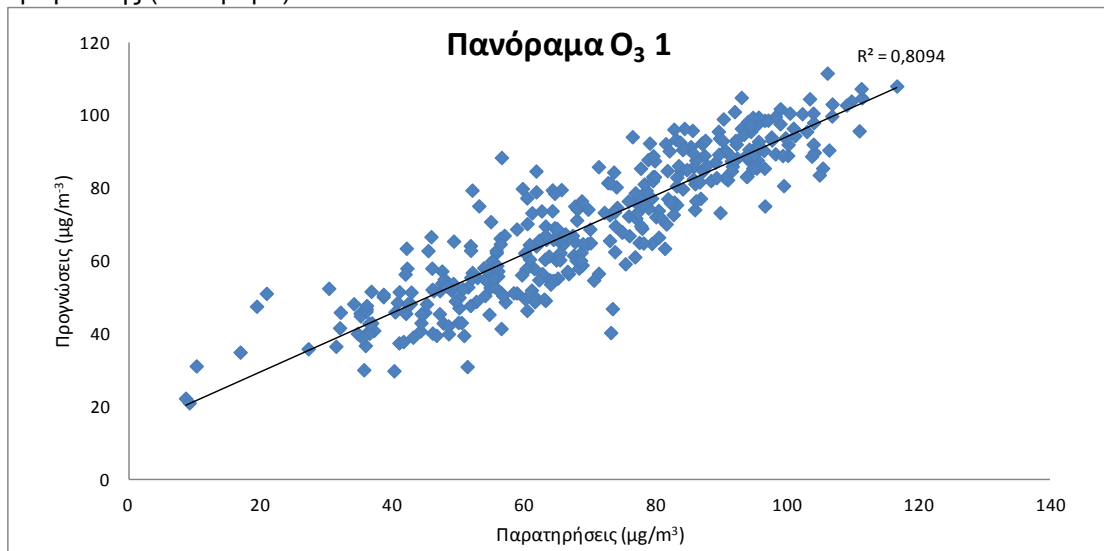
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)



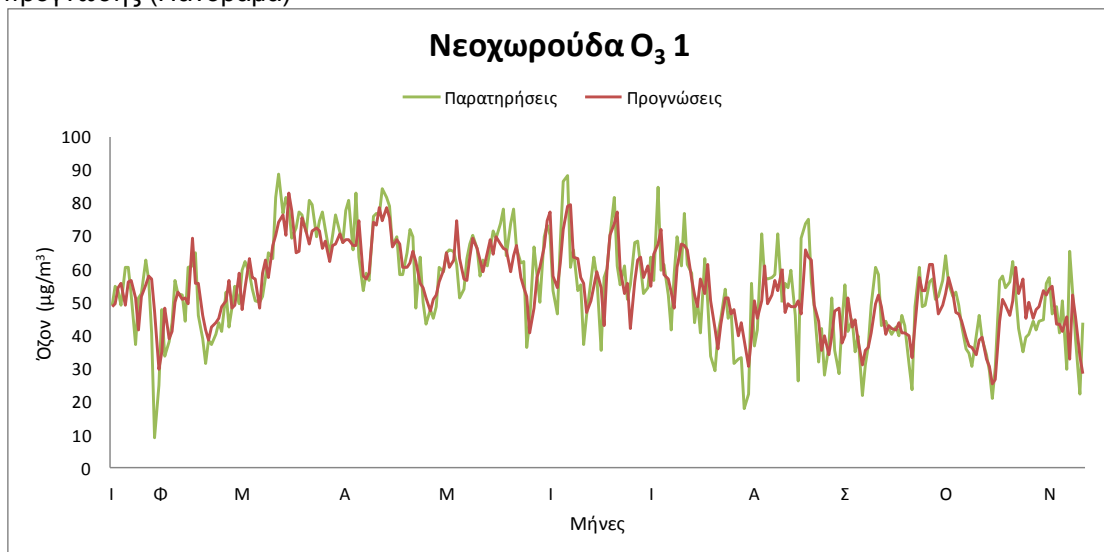
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)



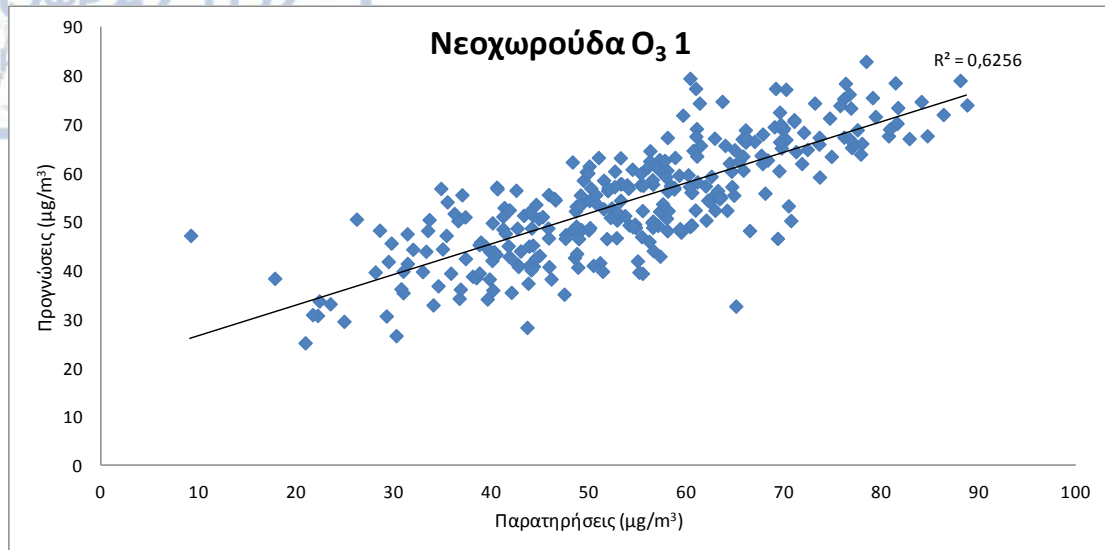
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O_3 την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O_3 την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O_3 την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Νεοχωρούδα)



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Νεοχωρούδα)

Σχόλια

Οι μεταβλητές με τους συντελεστές σε κάθε εξίσωση ακολουθούν την φυσική επίδραση στις συγκεντρώσεις όζοντος. Με βάση τη συσχέτιση τους, ο συντελεστής συγκέντρωσης όζοντος προηγούμενης ημέρας αναμένεται να έχει τη μεγαλύτερη θετική τιμή από τους υπόλοιπους.

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει αυξημένη πιθανότητα επεισοδίων ρύπανσης όταν οι συγκεντρώσεις των ρύπων προηγούμενης ημέρας είναι υψηλότερες από το κανονικό (Robeson and Steyn, 1990). Για αυτό και η χρήση της εμμονής όζοντος (συγκέντρωση όζοντος προηγούμενης ημέρας) ως ανεξάρτητη μεταβλητή παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην πρόγνωση του ρύπου. Έχει ήδη αποδειχθεί ότι η απόδοση του μοντέλου αυξάνεται με τη χρήση εμμονής των μεταβλητών ποιότητας αέρα.

Μετά από τη μεταβλητή όζοντος, η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους παρουσιάζει ισχυρή σχέση με την πρόγνωση συγκέντρωσης. Ακολουθεί η θερμοκρασία στα 2 μέτρα, η θερμοκρασία στα 850hPa, μεταβλητή που εκφράζει την κατακόρυφη ανάμειξη στην ατμόσφαιρα και ακόμα λιγότερο ισχυρή συσχέτιση παρουσιάζει η σχετική υγρασία στα 2 μέτρα. Αν και έχει αποδειχθεί πως η συσχέτιση της τελευταίας μεταβλητής με το όζον είναι ισχυρή αρνητική (Demuzere et al. 2009; Dueñas et al., 2002). Υψηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας συνδέονται με νέφωση και αστάθεια, δηλαδή μείωση της παραγωγής όζοντος (Camalier et al. 2007). Η συγκεκριμένη σειρά των μεταβλητών συμπεραίνεται από τα αποτελέσματα των σταθμών Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιού και Πανοράματος, για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης, με βάση τον συντελεστή συσχέτισης. Προηγούμενες μελέτες αποδεικνύουν την ισχυρή αρνητική σχέση της ταχύτητας ανέμου με τις συγκεντρώσεις όζοντος στην ατμόσφαιρα (Dueñas et al., 2002) όμως από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται η σχεδόν μηδενική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών σε ετήσια βάση, με στατιστική σημαντικότητα σε όλα τα παραπάνω μοντέλα. Η πορεία της επίδρασης στη διάρκεια ενός έτους φαίνεται στην εποχιακή ανάλυση. Το γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa εκφράζει τη συνοπτική κατάσταση και την επίδραση που έχει στα επίπεδα όζοντος στην ατμόσφαιρα. Είναι από τις λιγότερο σημαντικές μεταβλητές που συμπεριλήφθηκαν καθώς στην περιοχή της Θεσσαλονίκης η συνοπτική κατάσταση παραμένει χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές για αρκετές μέρες. Σε ημέρες με αντικυκλώνα παρατηρούνται σχετικά πιο υψηλές τιμές όζοντος καθώς οι

συνθήκες που επικρατούν συμβάλλουν στην αύξηση αυτών ενώ αντίθετα σε ημέρες κυκλώνα οι μετεωρολογικές μεταβλητές επηρεάζουν αρνητικά τις συγκεντρώσεις όζοντος. Παρόλα αυτά, μονάχα στο σταθμό Πανοράματος (τις τρεις προγνωστικές ημέρες) φαίνεται να υπάρχει η επιρροή αυτή (Πίνακας 3.8).

Στον Πίνακα 3.12 παρατίθενται συνοπτικά οι μεταβλητές του κάθε μοντέλου που παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα σε φθίνουσα σειρά με βάση τον απόλυτο συντελεστή συσχέτισης με το O₃ και με το ανάλογο πρόσημο του. Δηλαδή στο κάθε κελί πίνακα, πρώτη είναι αυτή με τη μεγαλύτερη συσχέτιση. Οι prevO₃ και SOL είναι οι δύο σημαντικότερες για κάθε μοντέλο, ενώ οι μεταβλητές θερμοκρασίας και η ταχύτητα ανέμου WS10m συμπληρώνουν τα μοντέλα των αστικών σταθμών Αγίας Σοφίας και Κορδελιό. Για τους δύο περιφερειακούς σταθμούς Πανοράματος και Νεοχωρούδας, οι μεταβλητές θερμοκρασίας δεν εμφανίζονται ως στατιστικά σημαντικές αλλά η RH2m ακολουθεί τις prevO₃ και SOL και για τη Νεοχωρούδα η ταχύτητα ανέμου WS10m. Για το σταθμό Πανοράματος, τις δύο πρώτες ημέρες πρόγνωσης η συνολική βροχόπτωση PREC παρουσιάζει τη μικρότερη συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις όζοντος από των υπολοίπων μεταβλητών. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τοποθεσίας και τοπογραφίας της περιοχής είναι ο λόγος που κάθε παράμετρος φέρει λιγότερο ή περισσότερο ισχυρή σχέση με το όζον.

Πίνακας 3.12: Μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,05$) για την ανάλυση παλινδρόμησης σε φθίνουσα σειρά με βάση τον συντελεστή συσχέτισης τους με το O₃ για κάθε ετήσιο μοντέλο.

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	+prevO ₃	+SOL	+SOL
	+SOL	+T2m	+T2m
	+T2m	+T850	+T850
	+T850	+WS10m	+WS10m
	+WS10m		-PREC
Κορδελιό	+prevO ₃	+SOL	+SOL
	+SOL	+prevO ₃	+prevO ₃
	+T2m	+T2m	+T2m
	+T850	+T850	+T850
	+WS10m	+WS10m	+WS10m
Πανόραμα	+prevO ₃	+prevO ₃	+SOL
	+SOL	+SOL	+prevO ₃
	-RH2m	-RH2m	-RH2m
	-WS10m	-PREC	+G500
	-PREC		
Νεοχωρούδα	+prevO ₃	+prevO ₃	+prevO ₃
	+SOL	+SOL	+SOL
	-RH2m	-RH2m	-T850
	+WS10m	+WS10m	-RH2m
			+WS10m

Αξιολόγηση

Η επιλογή των μέσων αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων έγινε με βάση προηγούμενες μελέτες και συγγράμματα (Wilks, 1995; Willmott, 1982; Willmott et al., 1985). Στον Πίνακα 3.13 παρατίθενται οι τιμές τριών δεικτών αξιολόγησης MAE, IOA, r², σε κλίμακα 0-1. Το κανονικοποιημένο MAE με τιμή 0 για MAE ίσο με 0 μg/m³ και 1 για MAE ίσο με τη μέση τιμή του ρύπου.

Με βάση τους τρεις παραπάνω δείκτες, το ετήσιο μοντέλο πρώτης ημέρας πρόγνωσης στο σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα με

αυτό του Πανοράματος να έρχεται επόμενο. Έπειτα τα μοντέλα Κορδελιού και Νεοχωρούδας έχουν μικρότερη αποδοτικότητα με της Νεοχωρούδας να έχει χαμηλό συντελεστή r^2 . Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες MAE και IOA μοντέλων παλινδρόμησης περιοχών όπως της Αθήνας. Με βάση τους Slini et al. (2002) και Chaloulakou et al. (1999) τα πιο αξιόπιστα από τα παραπάνω μοντέλα υπερέρχουν ελάχιστα από των δύο προηγούμενων μελετών.

Καθώς η απόδοση ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης μειώνεται για πρόγνωση μετά από μία ημέρες, έτσι και εδώ, με τη χρήση τιμών πρόγνωσης κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου για τις επόμενες τρεις ημέρες, μειώνεται και η απόδοση του στατιστικού μοντέλου για τη δεύτερη και για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης, σε σύγκριση με την πρώτη. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση 1-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ στα σφάλματα MAE και RMSE, ενώ μικρή μείωση παρουσιάζουν ο δείκτης συμφωνίας IOA και οι συντελεστές r και r^2 από την πρώτη μέχρι την τρίτη ημέρα πρόγνωσης.

Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων έναντι των προγνώσεων κάθε μοντέλου δείχνει την απουσία ικανότητας πρόγνωσης των ακραίων συγκεντρώσεων (σε όλους τους παραπάνω πίνακας αξιολόγησης των μοντέλων).

Πίνακας 3.13: Δείκτες MAE, IOA και r^2 για κάθε ετήσιο μοντέλο O_3 .

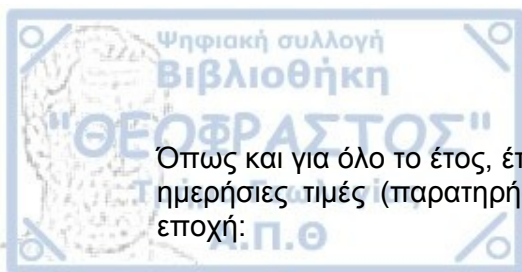
		Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	MAE	0,168	0,203	0,213
	IOA	0,957	0,934	0,927
	r^2	0,848	0,777	0,756
Κορδελιό	MAE	0,179	0,203	0,214
	IOA	0,913	0,879	0,870
	r^2	0,719	0,636	0,615
Πανόραμα	MAE	0,105	0,123	0,128
	IOA	0,945	0,920	0,911
	r^2	0,809	0,739	0,716
Νεοχωρούδα	MAE	0,130	0,146	0,153
	IOA	0,873	0,811	0,787
	r^2	0,625	0,505	0,466

3.2.1.2 Εποχιακή ανάλυση παλινδρόμησης

Εκτός από τα ετήσια στατιστικά μοντέλα πρόγνωσης συγκεντρώσεων όζοντος, αρκετά εποχιακά μοντέλα έχουν υπολογισθεί (Otero et al., 2016) με στόχο την ανάλυση επίδρασης κάθε μεταβλητής.

Μετά από την ανάλυση παλινδρόμησης για όλο το έτος, τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή στατιστικών μοντέλων πρόγνωσης της συγκέντρωσης όζοντος στην ατμόσφαιρα και για τους τέσσερις σταθμούς στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, για κάθε εποχή.

Λόγω της διαθεσιμότητας δεδομένων, για τον σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας υπολογίσθηκαν τα μοντέλα παλινδρόμησης για το χειμώνα και άνοιξη και για το σταθμό Νεοχωρούδας μόνο για την άνοιξη και το καλοκαίρι. Για τους σταθμούς Κορδελιού και Πανοράματος έγινε ανάπτυξη μοντέλων και για τις τέσσερις εποχές.



Όπως και για όλο το έτος, έτσι και για κάθε μοντέλο εποχής χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) με τις ανάλογες ημέρες σε κάθε εποχή:

- Χειμώνας (Δεκέμβριος – Φεβρουάριος): 90 ημέρες
- Άνοιξη (Μάρτιος – Μάιος): 92 ημέρες
- Καλοκαίρι (Ιούνιος – Αύγουστος): 89 ημέρες
- Φθινόπωρο (Σεπτέμβριος – Νοέμβριος): 91 ημέρες

Πλατεία Αγίας Σοφίας

Στον Πίνακα 3.41 παρουσιάζονται οι συντελεστές της εξίσωσης 3.1 για το σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας.

$$O_3 = a * prevO_3 + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.1)$$

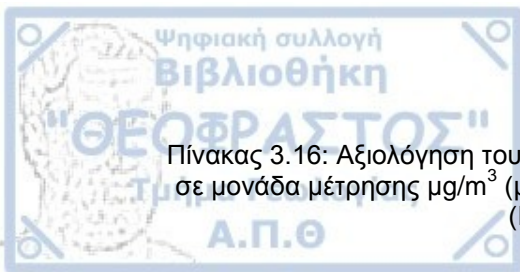
Πίνακας 3.14: Συντελεστές εξισώσεων των στατιστικών μοντέλων κάθε εποχής (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Χειμώνας	1	0,357	0,007	-0,849	0,639	0,185	2,878	0,107	0,131	-69,373
	2	0,135	0,012	-1,636	1,233	0,223	2,805	0,121	0,365	-98,316
	3	0,037	0,0004	-0,905	0,089	0,146	1,743	0,151	1,899	-16,541
Άνοιξη	1	0,406	-0,009	-0,767	0,722	-0,137	1,042	0,063	0,213	64,136
	2	0,074	-0,005	-0,441	0,650	-0,069	2,141	0,067	0,073	48,341
	3	0,079	-0,007	-0,782	1,171	-0,100	1,469	0,085	0,429	52,184

Χειμώνας

Πίνακας 3.15: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O₃ για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO ₃	7,664E-05	0,1386	0,6881	0,536	0,297	0,311
G500	0,4722	0,3221	0,9686	-0,378	-0,418	-0,453
T850	0,0094	0,0001	0,0272	-0,332	-0,355	-0,328
T2m	0,1631	0,0285	0,8594	-0,091	-0,091	-0,095
RH2m	0,0713	0,0638	0,2142	-0,047	-0,106	-0,129
WS10m	6,241E-08	8,084E-06	0,0021	0,424	0,430	0,433
SOL	4,541E-05	1,376E-05	1,359E-06	0,335	0,279	0,234
PREC	0,7939	0,3371	1,530E-05	0,163	0,182	0,335



Πίνακας 3.16: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	90	90	90
Μέσος όρος παρατηρήσεων	18,091	18,326	18,452
Μέσος όρος προγνώσεων	18,091	18,326	18,452
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	9,661	9,780	9,887
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,582	7,012	7,256
Μέσο σφάλμα (ME)	-2,929E-14	4,539E-15	1,89E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	4,336	5,033	5,014
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	4,079	6,799	6,678
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,869	0,819	0,831
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,784	0,717	0,733
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,615	0,514	0,538

Στον Πίνακα 3.15 αναλύεται κάθε μεταβλητή ξεχωριστά ως προς τα αποτελέσματα του μοντέλου, με το δείκτη στατιστικής σημαντικότητας και τον συντελεστή συσχέτισης. Η θερμοκρασία στα 850hPa, η ταχύτητα του ανέμου και η ακτινοβολία μικρού μήκους δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης, έχοντας τους μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης, με τη συσχέτιση του ανέμου με το όζον, να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη. Επιπλέον, το όζον της προηγούμενης μέρα, η θερμοκρασία στα 2 μέτρα και η συνολική βροχόπτωση παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης, τη δεύτερη και την τρίτη αντίστοιχα για κάθε μεταβλητή.

Με βάση τον μέσο όρο των παρατηρήσεων και προγνώσεων όζοντος και το σφάλμα ME φαίνεται πως τα υπόλοιπα είναι τόσο θετικά όσο και αρνητικά, όπως και τα υπόλοιπα μοντέλα της μελέτης αυτής (Πίνακας 3.16). Σε σχέση με το επόμενο μοντέλο για την άνοιξη και τις μεγαλύτερες μέσες τιμές που παρουσιάζει, το μοντέλο για το χειμώνα έχει μεγάλα MAE στα τρία μοντέλα.

Πίνακας 3.17: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτές που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
pre vO_3	1,048E-05	0,4736	0,4357	0,590	0,321	0,330
G500	0,5295	0,7387	0,6394	0,158	0,148	0,126
T850	0,1889	0,4922	0,2286	0,222	0,236	0,224
T2m	0,2769	0,3920	0,1053	0,407	0,421	0,410
RH1000	0,2639	0,6307	0,4799	-0,462	-0,464	-0,386
WS10m	0,0455	0,0057	0,1068	0,176	0,408	0,229
SOL	0,0134	0,0115	0,0011	0,533	0,549	0,510
PREC	0,6576	0,8756	0,1772	-0,249	-0,231	-0,090

Πίνακας 3.18: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	92	92	92
Μέσος όρος παρατηρήσεων	46,127	46,447	46,632
Μέσος όρος προγνώσεων	46,127	46,447	46,632
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	10,692	10,754	10,655
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,828	7,025	6,741
Μέσο σφάλμα (ME)	-1,737E-14	4,016E-15	-8,6E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,696	6,447	6,395
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	7,242	8,098	8,207
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,833	0,765	0,747
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,732	0,653	0,632
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,536	0,426	0,4002

Με βάση την σημαντικότητα των μεταβλητών ως προς τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη εποχή ξεχωρίζουν η ταχύτητα του ανέμου και η εισερχόμενη ακτινοβολία, η οποία έχει και τους μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης με τις παρατηρήσεις του όζοντος. Η μεταβλητή της συγκέντρωσης όζοντος της προηγούμενης μέρας παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα και υψηλή συσχέτιση μόνο στην πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πίνακας 3.17).

Στον παραπάνω πίνακα αξιολόγησης (Πίνακας 3.18) παρατηρούνται χαμηλά σφάλματα σε σχέση με το μέσο όρο και για τις τρεις ημέρες. Ο συντελεστής συσχέτισης r των προγνώσεων με τις παρατηρήσεις είναι υψηλός, αντίθετα με τον

συντελεστή προσδιορισμού r^2 που είναι πιο χαμηλός για κάθε ημέρα. Εδώ το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE για κάθε προγνωστική ημέρα είναι σχετικά μικρό.

Κορδελιό

$$O_3 = a * \text{prev}O_3 + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.1)$$

Πίνακας 3.19: Συντελεστές μεταβλητών των στατιστικών μοντέλων (Κορδελιό)

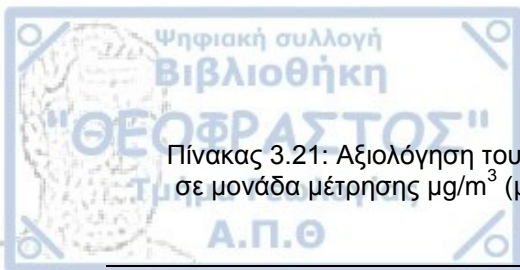
	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Χειμώνας	1	0,277	0,018	-1,087	0,365	0,028	2,788	0,144	1,568	-117,487
	2	0,065	0,005	-1,160	0,299	0,053	2,551	0,133	0,713	-35,834
	3	0,050	-0,009	-0,399	-0,587	0,029	2,402	0,125	1,325	57,101
Άνοιξη	1	0,485	-0,013	0,005	-0,182	-0,104	1,226	0,047	-0,469	93,755
	2	0,092	-0,013	0,921	-1,042	-0,267	1,173	0,065	-0,042	126,291
	3	0,085	-0,009	-0,350	0,399	-0,319	0,165	0,054	0,229	96,710
Καλοκαίρι	1	0,404	-0,014	-0,829	-0,977	-0,531	1,106	0,038	-0,637	164,109
	2	0,204	0,007	-0,959	-2,153	-0,639	1,140	0,058	-0,210	76,080
	3	0,063	-0,009	-0,998	-2,566	-0,810	1,278	0,049	-0,342	207,982
Φθινόπωρο	1	0,381	0,011	-0,807	-0,470	-0,067	-0,168	0,105	0,596	-41,556
	2	-0,070	-0,013	-2,071	1,526	-0,109	1,522	0,110	0,050	89,617
	3	-0,036	-0,005	-2,443	1,858	-0,058	1,352	0,095	0,186	37,001

Χειμώνας

Για τις τρεις εξισώσεις των στατιστικών μοντέλων (Πίνακας 3.17), με βάση το σταθμό του Κορδελιού τους τρεις χειμερινούς μήνες χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις – προγνώσεις) για 90 ημέρες (Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο).

Πίνακας 3.20: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	0,0003	0,425	0,549	0,509	0,241	0,266
G500	0,063	0,638	0,321	-0,351	-0,399	-0,447
T850	0,001	0,008	0,362	-0,488	-0,500	-0,477
T2m	0,437	0,591	0,262	-0,342	-0,371	-0,329
RH2m	0,707	0,558	0,743	-0,185	-0,241	-0,233
WS10m	1,693E-09	1,957E-07	7,727E-07	0,505	0,569	0,603
SOL	4,85E-09	2,549E-07	1,152E-05	0,219	0,232	0,168
PREC	0,0001	0,019	0,0005	0,197	0,146	0,255



Πίνακας 3.21: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	90	90	90
Μέσος όρος παρατηρήσεων	20,514	20,667	20,91
Μέσος όρος προγνώσεων	20,514	20,667	20,91
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	9,884	10,004	10,234
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	8,271	7,759	7,981
Μέσο σφάλμα (ME)	5,852E-14	-1,5E-14	-1,9E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	4,401	5,049	5,169
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	5,382	6,279	6,37
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,905	0,865	0,867
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,836	0,775	0,779
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,700	0,601	0,608

Οι προγνώσεις κάθε μεταβλητής επηρεάζουν διαφορετικά τα αποτελέσματα σε κάθε εποχή και σταθμό. Το χειμώνα για το σταθμό του Κορδελιού, ο άνεμος, η εισερχόμενη ακτινοβολία και η συνολική βροχόπτωση παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα με βάση τον δείκτη p και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης. Η θερμοκρασία στα 850hPa παρουσιάζει σημαντικότητα για τις δύο πρώτες προγνωστικές μέρες. Η μεταβλητή αυτή της θερμοκρασίας και ο άνεμος έχουν την υψηλότερη συσχέτιση με το όζον από ότι οι υπόλοιπες μεταβλητές.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας για το χειμώνα, η συσχέτιση των μεταβλητών είναι παρόμοια (Πίνακας 3.15, Πίνακας 3.16).

Με βάση τον μέσο όρο για κάθε μέρα πρόγνωσης, το MAE δεν είναι αρκετά μικρό αλλά ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 είναι ικανοποιητικός ως δείκτης της μεταβλητότητας των προγνώσεων όζοντος που οφείλεται στην μεταβλητότητα όλων των παραμέτρων.

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	3,335E-07	0,388	0,423	0,579	0,274	0,251
G500	0,421	0,448	0,615	0,167	0,155	0,155
T850	0,994	0,312	0,708	0,188	0,195	0,193
T2m	0,815	0,284	0,676	0,260	0,263	0,282
RH2m	0,388	0,076	0,043	-0,405	-0,443	-0,437
WS10m	0,026	0,046	0,808	0,150	0,150	0,072
SOL	0,076	0,028	0,069	0,462	0,431	0,434
PREC	0,363	0,925	0,585	-0,308	-0,324	-0,205

Πίνακας 3.23: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	92	92	92
Μέσος όρος παρατηρήσεων	47,583	47,889	47,928
Μέσος όρος προγνώσεων	47,583	47,889	47,928
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	11,040	11,082	11,064
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,669	5,965	5,718
Μέσο σφάλμα (ME)	-7,877E-15	-2,7E-14	-3,4E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	6,043	7,426	7,382
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	7,898	9,288	9,42
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,801	0,658	0,639
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,694	0,538	0,516
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,482	0,289	0,216

Στον πίνακα αξιολόγησης του μοντέλου για την άνοιξη (Πίνακας 3.23) παρατηρείται η χαμηλότερη απόδοση των μοντέλων δεύτερης και τρίτης ημέρας. Η τυπική απόκλιση των προγνώσεων είναι μικρότερη στα δύο μοντέλα άρα η αδυναμία πρόγνωσης των ακραίων τιμών είναι πιο έντονη σε σύγκριση με την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Με τους αρκετά χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού r² φαίνεται πως οι ανεξάρτητες μεταβλητές δεν αρκούν για σωστή πρόγνωση την άνοιξη για το σταθμό Κορδελιού.

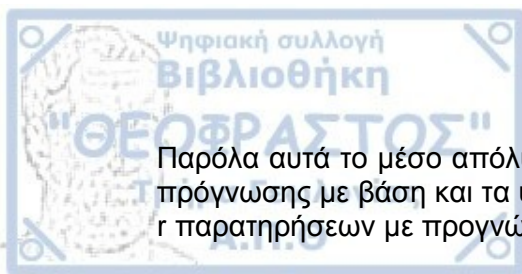
Πίνακας 3.24: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev O_3	8,082E-06	0,023	0,421	0,640	0,345	0,119
G500	0,523	0,774	0,702	-0,286	-0,234	-0,167
T850	0,354	0,427	0,368	-0,477	-0,464	-0,397
T2m	0,374	0,141	0,049	-0,373	-0,348	-0,278
RH2m	0,001	0,001	3,937E-05	-0,394	-0,334	-0,404
WS10m	0,058	0,058	0,026	0,453	0,379	0,427
SOL	0,193	0,083	0,150	0,418	0,387	0,413
PREC	0,191	0,694	0,426	-0,129	-0,207	-0,244

Πίνακας 3.25: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	89	89	89
Μέσος όρος παρατηρήσεων	45,988	45,743	45,535
Μέσος όρος προγνώσεων	45,988	45,743	45,535
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	12,441	12,310	12,482
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	10,328	9,340	9,599
Μέσο σφάλμα (ME)	-1,864E-14	3,47E-15	9,58E-16
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,436	6,510	6,181
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	6,897	7,974	7,934
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,900	0,851	0,857
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,830	0,758	0,769
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,689	0,575	0,591

Για το καλοκαιρινό μοντέλο πρόγνωσης (Πίνακας 3.24) η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου είναι οι δύο μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα του, για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης. Η μεταβλητή του όζοντος προηγούμενης ημέρας παρουσιάζει επίσης μικρό δείκτη p για την πρώτη και δεύτερη μέρα πρόγνωσης.



Παρόλα αυτά το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE είναι σχετικά μικρό και τις τρεις ημέρες πρόγνωσης με βάση και τα υπόλοιπα στατιστικά μοντέλα. Ο συντελεστής συσχέτισης r παρατηρήσεων με προγνώσεων είναι μεγάλος (Πίνακας 3.25).

Φθινόπωρο

Πίνακας 3.26: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev O_3	0,0002	0,453	0,701	0,503	0,077	0,073
G500	0,621	0,520	0,812	0,049	-0,078	-0,058
T850	0,322	0,018	0,007	-0,033	-0,022	0,018
T2m	0,628	0,116	0,041	0,076	0,143	0,186
RH2m	0,681	0,487	0,716	-0,261	-0,456	-0,410
WS10m	0,802	0,030	0,056	-0,017	0,213	0,248
SOL	0,012	0,004	0,011	0,332	0,416	0,406
PREC	0,031	0,861	0,395	0,033	-0,002	0,073

Πίνακας 3.27: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	91	91	91
Μέσος όρος παρατηρήσεων	33,109	32,544	32,395
Μέσος όρος προγνώσεων	33,109	32,544	32,395
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	11,954	12,187	12,346
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,440	7,883	7,687
Μέσο σφάλμα (ME)	-2,122E-14	-3,1E-14	2,67E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,337	7,202	7,646
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,304	9,242	9,607
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,746	0,764	0,736
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,622	0,646	0,622
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,387	0,418	0,387

Η μεταβλητή της εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι η μοναδική με δείκτη p μικρότερο από 0,05 και τις τρεις ημέρες πρόγνωσης (Πίνακας 3.26). Το όζον προηγούμενης μέρας και η συνολική βροχόπτωση εκφράζουν στατιστική σημαντικότητα μόνο στην πρώτη μέρα πρόγνωσης, ενώ η θερμοκρασία στα 850hPa και η ταχύτητα ανέμου στη δεύτερη και τρίτη μέρα πρόγνωσης. Τέλος η θερμοκρασία στα 2 μέτρα εκφράζει στατιστική σημαντικότητα για αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο για το μοντέλο της τρίτης ημέρας. Όλες οι μεταβλητές παρουσιάζουν αρκετά μικρό ή και σχεδόν μηδενικό

συντελεστή συσχέτισης εκτός από τη μεταβλητή του όζοντος για την πρώτη μέρα πρόγνωσης και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και για τις τρεις ημέρες, μεταβλητές που παρουσιάζουν και στατιστική σημαντικότητα. Όμως και η σχετική υγρασία έχει υψηλή συσχέτιση με το όζον αλλά δεν είναι αρκετά ασφαλές να πούμε ότι συμβάλλει για αξιόπιστα αποτελέσματα του μοντέλου καθώς δεν παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα. Οι δείκτες των δύο μεταβλητών των θερμοκρασιών μπορεί να είναι και τυχαίοι καθώς τη δεύτερη και τρίτη ημέρα πρόγνωσης οι τιμές προγνώσεων των μεταβλητών έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σφαλμάτων από ότι για την πρώτη μέρα πρόγνωσης.

Με βάση τον συντελεστή προσδιορισμού r^2 παρατηρείται πως η μεταβλητότητα των προγνώσεων οφείλεται μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό στη μεταβλητότητα των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται (Πίνακας 3.27).

Σε κάθε εποχή το όζον της προηγούμενης ημέρας συμβάλλει σε αξιόπιστα αποτελέσματα του μοντέλου και έχει υψηλό συντελεστή συσχέτισης r με τις παρατηρήσεις όζοντος για τη μέρα πρόγνωσης.

Πανόραμα

$$O_3 = a * prevO_3 + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.1)$$

Πίνακας 3.28: Συντελεστές μεταβλητών των στατιστικών μοντέλων (Πανόραμα)

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Χειμώνας	1	0,531	-0,013	-0,617	1,515	-0,425	-0,337	-0,005	0,816	120,057
	2	0,266	0,002	-0,884	2,042	-0,482	0,582	0,038	0,645	34,444
	3	0,124	-0,011	-0,487	1,619	-0,474	0,335	-0,0003	0,478	126,237
Ανοιξη	1	0,443	0,004	1,252	-0,481	-0,528	-0,902	-0,041	0,080	59,459
	2	0,148	0,006	2,198	-1,652	-0,727	-0,318	-0,007	0,306	85,692
	3	0,108	0,007	1,428	-0,628	-0,706	-0,069	-0,015	0,069	73,899
Καλοκαίρι	1	0,546	0,0009	0,727	-0,370	-0,274	-0,516	-0,001	0,103	50,084
	2	0,372	0,008	0,086	0,588	-0,255	-0,584	-0,001	0,353	7,797
	3	0,155	-0,011	-0,571	1,470	-0,268	-1,379	0,015	-0,106	128,453
Φθινόπωρο	1	0,612	0,011	0,185	0,428	-0,116	-0,271	0,044	0,212	-51,619
	2	0,384	0,007	-0,403	1,314	-0,101	0,057	0,096	0,074	-35,641
	3	0,222	-0,012	0,363	0,627	-0,127	-0,129	0,152	-0,042	87,680

Παραπάνω στα αποτελέσματα της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης για το σταθμό Πανοράματος σε ετήσια βάση, παρατηρείται η σημασία της σχετικής υγρασίας. Το ίδιο αναμένεται και στην ανάλυση σε εποχική βάση και συγκεκριμένα στις εποχές που η συγκέντρωση όζοντος επηρεάζεται περισσότερο από την σχετική υγρασία.

Πίνακας 3.29: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O₃ για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	2,891E-08	0,006	0,244	0,573	0,282	0,098
G500	0,413	0,918	0,539	0,048	0,046	-0,006
T850	0,391	0,303	0,623	0,110	0,103	0,052
T2m	0,090	0,049	0,186	0,113	0,121	0,082
RH2m	0,001	0,001	0,005	-0,313	-0,287	-0,272
WS10m	0,649	0,347	0,633	0,020	0,081	0,115
SOL	0,868	0,295	0,995	0,158	0,185	0,173
PREC	0,120	0,091	0,406	-0,036	0,070	-0,044

Πίνακας 3.30: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης μg/m³ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	90	90	90
Μέσος όρος παρατηρήσεων	51,718	51,941	52,340
Μέσος όρος προγνώσεων	51,718	51,941	52,340
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	12,707	12,603	12,620
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	8,391	6,622	4,872
Μέσο σφάλμα (ME)	1,377E-14	-2,4E-14	-2,6E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,258	8,218	9,056
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,489	10,663	11,576
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,766	0,650	0,494
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,660	0,525	0,386
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,436	0,276	0,149

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.29), παρατηρείται πως τα αποτελέσματα του μοντέλου για το χειμώνα επηρεάζουν το όζον προηγούμενης ημέρας την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης, η θερμοκρασία στα 2 μέτρα τη δεύτερη ημέρα και η σχετική υγρασία και τις τρεις ημέρες. Το όζον προηγούμενης ημέρας και η σχετική υγρασία μονάχα παρουσιάζουν πιο υψηλή συσχέτιση με την πρόγνωση όζοντος από όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές.

Από τον Πίνακα 3.29 αλλά και από τον Πίνακα 3.30 παρατηρείται ότι οι μεταβλητές στο σύνολο τους δεν έδωσαν αξιόλογα αποτελέσματα, με βάση τον συντελεστή προσδιορισμού r² αλλά και τον συντελεστή συσχέτισης r μεταξύ των παρατηρήσεων και προγνώσεων του όζοντος. Όμως το MAE είναι μικρό, όπως και στα υπόλοιπα

μοντέλα. Σε σύγκριση με το χειμώνα των δύο προηγούμενων σταθμών τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά.

Άνοιξη

Πίνακας 3.31: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O₃ για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	2,925E-06	0,127	0,246	0,653	0,406	0,337
G500	0,786	0,743	0,712	0,456	0,435	0,429
T850	0,196	0,052	0,218	0,479	0,460	0,433
T2m	0,650	0,191	0,613	0,466	0,458	0,436
RH2m	0,0004	7,426E-05	0,0001	-0,547	-0,572	-0,575
WS10m	0,165	0,668	0,916	-0,084	-0,085	-0,084
SOL	0,172	0,811	0,568	0,347	0,378	0,347
PREC	0,848	0,405	0,836	-0,292	-0,294	-0,328

Πίνακας 3.32: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης μg/m³ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	92	92	92
Μέσος όρος παρατηρήσεων	77,314	77,556	77,625
Μέσος όρος προγνώσεων	77,314	77,556	77,625
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	13,611	13,425	13,405
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	10,223	8,863	8,750
Μέσο σφάλμα (ME)	1,699E-15	5,1E-15	2,05E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,133	7,816	7,953
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	8,936	10,028	10,100
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,843	0,770	0,765
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,751	0,660	0,652
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,509	0,435	0,426

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για την άνοιξη είναι παρόμοια με του μοντέλου για το χειμώνα καθώς μόνο η σχετική υγρασία συμβάλλει για αξιόπιστα αποτελέσματα και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης. Το όζον προηγούμενης ημέρας μόνο την πρώτη ημέρα και η θερμοκρασία στα 850hPa τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη συσχέτιση με το όζον από όλες τις υπόλοιπες για τις ίδιες ημέρες πρόγνωσης που παρουσιάζουν και στατιστική σημαντικότητα. Δηλαδή αυτές οι τρεις είναι οι κύριες μεταβλητές για την εξαγωγή αξιόπιστων και σωστών αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στην αξιολόγηση του μοντέλου της άνοιξης παρατηρείται μικρό MAE.

Πίνακας 3.33: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
pre vO_3	2,708E-08	0,0002	0,117	0,666	0,480	0,302
G500	0,965	0,729	0,648	0,370	0,362	0,336
T850	0,506	0,949	0,675	0,465	0,419	0,376
T2m	0,757	0,703	0,338	0,437	0,415	0,414
RH2m	0,054	0,144	0,140	-0,326	-0,290	-0,372
WS10m	0,368	0,334	0,036	-0,234	-0,267	-0,317
SOL	0,965	0,962	0,579	0,041	0,124	0,250
PREC	0,788	0,427	0,828	-0,224	-0,144	-0,290

Πίνακας 3.34: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	89	89	89
Μέσος όρος παρατηρήσεων	92,841	92,935	92,930
Μέσος όρος προγνώσεων	92,841	92,935	92,930
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	9,603	9,499	9,565
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	6,852	5,577	5,142
Μέσο σφάλμα (ME)	1,165E-14	2,4E-15	5,56E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,435	6,09	6,141
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	6,690	7,646	8,019
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,814	0,700	0,660
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,713	0,587	0,537
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,509	0,344	0,289

Η υψηλή συσχέτιση δεν δικαιολογείται ως αίτιο για τα αποτελέσματα. Οι δύο αυτοί δείκτες μαζί δίνουν καλύτερα συμπεράσματα. Το όζον προηγούμενης ημέρας έχει τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης για τις δύο πρώτες ημέρες πρόγνωσης όπως και τον μικρότερο δείκτη p , είναι δηλαδή η μεταβλητή που επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα του μοντέλου (Πίνακας 3.33). Επίσης η ταχύτητα ανέμου κατά την τρίτη ημέρα πρόγνωσης παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα. Οι μεταβλητές θερμοκρασίας έχουν μέτρια θετική συσχέτιση το καλοκαίρι.

Με βάση τον υψηλό μέσο όρο όζοντος, το MAE και το RMSE είναι αρκετά μικρά (Πίνακας 3.34). Η συσχέτιση r των παρατηρήσεων με τις προγνώσεις συγκεντρώσεων όζοντος είναι υψηλή μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης και ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 της ανάλυσης και για τις τρεις ημέρες είναι μικρός. Μόνο ένα μικρό μέρος της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων οφείλεται στις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται.

Φθινόπωρο

Πίνακας 3.35: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	4,069E-10	0,0001	0,028	0,823	0,717	0,609
G500	0,628	0,769	0,627	0,427	0,416	0,420
T850	0,840	0,739	0,772	0,617	0,603	0,594
T2m	0,669	0,327	0,639	0,702	0,698	0,683
RH2m	0,503	0,531	0,458	-0,445	-0,438	-0,487
WS10m	0,699	0,934	0,866	-0,169	-0,225	-0,114
SOL	0,274	0,040	0,001	0,679	0,736	0,763
PREC	0,388	0,857	0,844	-0,086	-0,167	-0,144

Πίνακας 3.36: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	91	91	91
Μέσος όρος παρατηρήσεων	58,368	57,504	56,754
Μέσος όρος προγνώσεων	58,368	57,504	56,754
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	19,060	19,540	19,850
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	16,29	15,996	15,856
Μέσο σφάλμα (ME)	1,243E-14	-8,8E-15	1,66E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	7,805	8,886	9,342
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,842	11,160	11,877
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,917	0,893	0,878
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,843	0,808	0,790
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,730	0,670	0,638

Για το φθινόπωρο τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι διαφορετικά από τις υπόλοιπες εποχές αλλά και από του φθινοπώρου με βάση το σταθμό Κορδελιού. Εδώ (Πίνακας 3.35), για τις τρεις προγνωστικές ημέρες, το όζον προηγούμενης ημέρας παρουσιάζει μικρό δείκτη p στατιστικής σημαντικότητας και υψηλό

συντελεστή συσχέτισης. Επίσης, παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζει η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους για την δεύτερη και τρίτη ημέρας πρόγνωσης. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου και η μεταβλητότητα τους βασίζεται κυρίως σε αυτές τις μεταβλητές. Η θερμοκρασία στα 2 μέτρα έχει υψηλό συντελεστή συσχέτισης αλλά ο δείκτης r είναι αρκετά μεγάλος, κάτι που δεν αρκεί για να θεωρηθεί πως επηρεάζει τα αποτελέσματα όπως οι δύο παραπάνω μεταβλητές.

Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης και προσδιορισμού αλλά και του δείκτη συμφωνίας IOA είναι υψηλοί σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στατιστικά μοντέλα σε εποχιακή βάση (Πίνακας 3.36).

Νεοχωρούδα

$$O_3 = a * prevO_3 + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.1)$$

Πίνακας 3.37: Συντελεστές εξισώσεων των στατιστικών μοντέλων κάθε εποχής (Νεοχωρούδα)

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Άνοιξη	1	0,521	0,011	-0,147	-0,719	-0,223	0,911	0,039	-0,109	-16,448
	2	0,247	0,027	0,721	-1,945	-0,419	0,510	0,054	0,266	-66,869
	3	0,247	0,026	-0,216	-0,755	-0,406	0,574	0,026	-0,282	-70,524
Καλοκαίρι	1	0,329	-0,033	-0,983	-1,311	-0,709	0,949	0,010	-0,388	311,895
	2	0,146	-0,011	-2,611	-0,935	-0,913	0,916	0,024	0,219	215,319
	3	0,048	-0,024	-2,879	-1,208	-1,126	0,836	0,032	0,464	317,027

Άνοιξη

Πίνακας 3.38: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Νεοχωρούδα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	7,493E-09	0,006	0,003	0,664	0,458	0,408
G500	0,437	0,078	0,067	0,095	0,089	0,090
T850	0,835	0,368	0,786	-0,110	-0,131	-0,154
T2m	0,347	0,022	0,361	-0,138	-0,159	-0,156
RH2m	0,011	5,631E-05	7,075E-05	-0,536	-0,566	-0,600
WS10m	0,012	0,235	0,192	0,122	0,070	0,077
SOL	0,099	0,030	0,262	0,122	0,112	0,173
PREC	0,721	0,433	0,263	-0,333	-0,293	-0,417

Πίνακας 3.39: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Νεοχωρούδα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	92	92	92
Μέσος όρος παρατηρήσεων	65,896	66,013	65,916
Μέσος όρος προγνώσεων	65,896	66,013	65,916
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	10,812	10,800	10,874
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	8,298	7,391	7,654
Μέσο σφάλμα (ME)	1,621E-15	5,28E-14	-9,3E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,567	6,182	6,292
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	6,894	7,832	7,681
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,854	0,790	0,807
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,767	0,684	0,703
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,588	0,468	0,495

Για την άνοιξη (Πίνακας 3.38) οι μεταβλητές όζοντος προηγούμενης ημέρας και η σχετική υγρασία παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα και τις τρεις ημέρες πρόγνωσης και την υψηλότερη συσχέτιση με τις παρατηρήσεις όζοντος για την ημέρα πρόγνωσης, από τις υπόλοιπες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται. Η θερμοκρασία στα 2 μέρα και η ηλιακή ακτινοβολία έχουν δείκτη p μικρότερο του 0,05 τη δεύτερη ημέρα πρόγνωσης και η ταχύτητα ανέμου την πρώτη ημέρα. Η συσχέτιση των τριών είναι σχεδόν μηδενική και η τιμή του δείκτη που έχουν δίνει ένα ποσοστό αβεβαιότητας για την συμβολή των τριών αυτών μεταβλητών σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης η συνολική βροχόπτωση έχει μέτρια αρνητική συσχέτιση με το όζον για την άνοιξη.

Στην αξιολόγηση του μοντέλου αυτού με βάση τα δεδομένα του σταθμού Νεοχωρούδας παρατηρούνται μικρά σφάλματα αλλά και σχετικά μικρό συντελεστή προσδιορισμού r^2 για κάθε ημέρα πρόγνωσης (Πίνακας 3.39).

Καλοκαίρι

Πίνακας 3.40: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις O_3 για την ημέρα πρόγνωσης (Νεοχωρούδα)

	Δείκτης P στατιστικής σημαντικότητας			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prevO3	0,001	0,102	0,574	0,547	0,299	0,142
G500	0,303	0,745	0,499	-0,335	-0,289	-0,225
T850	0,416	0,021	0,008	-0,440	-0,431	-0,408
T2m	0,246	0,422	0,305	-0,336	-0,329	-0,299
RH2m	0,002	0,0001	3,397E-06	-0,284	-0,234	-0,258
WS10m	0,115	0,097	0,102	0,368	0,349	0,308
SOL	0,802	0,550	0,510	0,312	0,273	0,278
PREC	0,472	0,633	0,391	-0,062	-0,094	-0,048

Πίνακας 3.41: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Νεοχωρούδα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	88	88	88
Μέσος όρος παρατηρήσεων	53,449	53,539	53,575
Μέσος όρος προγνώσεων	53,449	53,539	53,575
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	14,688	14,333	14,265
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	10,846	9,971	10,043
Μέσο σφάλμα (ME)	9,446E-15	-1,2E-14	-8,9E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	8,048	8,320	8,070
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,849	10,237	10,073
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,833	0,797	0,806
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,738	0,695	0,704
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,545	0,483	0,495

Για το καλοκαίρι (Πίνακας 3.40), όπως και για την άνοιξη παραπάνω (Πίνακας 3.38), η σχετική υγρασία συμβάλλει για αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, η θερμοκρασία στα 850hPa για τη δεύτερη και τρίτη ημέρα αλλά και το όζον προηγούμενης ημέρας κατά την πρώτη ημέρα πρόγνωσης

Το MAE φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερο από ότι στο προηγούμενο μοντέλο της άνοιξης αλλά ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 για κάθε ημέρα είναι σε παρόμοια κατάσταση. Οι προγνώσεις κάθε μεταβλητής επηρεάζουν διαφορετικά τα αποτελέσματα σε κάθε εποχή και σταθμό.

Σχόλια

Μελετώντας τα αποτελέσματα κάθε εποχής σε κάθε σταθμό ξεχωρίζει η διαφορετική σχέση των μεταβλητών με το όζον. Έχοντας διαθέσιμα δεδομένα για κάθε εποχιακό μοντέλο και την σύγκριση κάθε σταθμού γίνεται η διάκριση των μεταβλητών ανάλογα με το βαθμό επιρροής.

Εποχιακά μοντέλα για το χειμώνα υπολογίσθηκαν με βάση τους σταθμούς Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό και Πανόραμα και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης. Η μεταβλητή όζοντος προηγούμενης ημέρας είναι η πιο ισχυρή, όπως στα ετήσια μοντέλα και από τις μετεωρολογικές παραμέτρους η ταχύτητα ανέμου, το γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa και η θερμοκρασία στα 850hPa φαίνεται να έχουν αρκετά μεγάλη αρνητική (ταχύτητα ανέμου) και θετική (γεωδυναμικό ύψος και θερμοκρασία) σχέση με τη συγκέντρωση όζοντος. Όπως και στα αποτελέσματα των ετήσιων μοντέλων έτσι και στα εποχιακά μοντέλα για τον χειμώνα, η σχετική υγρασία είναι η ισχυρότερη μεταβλητή επίδρασης στο όζον μετά από αυτήν προηγούμενης ημέρας. Η σχέση των μετεωρολογικών παραμέτρων ισχύει και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης ενώ το όζον προηγούμενης ημέρας παρουσιάζει την ισχυρότερη σχέση μόνο την πρώτη ημέρα.

Για την άνοιξη έγινε υπολογισμός μοντέλων και για τους τέσσερις σταθμούς, για τρεις ημέρες πρόγνωσης. Αξιολογή σχέση με το όζον και στους τέσσερις σταθμούς

παρουσιάζουν το όζον προηγούμενης ημέρας (μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης), ενώ η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους φαίνεται να έχει την ισχυρότερη θετική σχέση με το όζον στους σταθμούς Πλατεία Αγίας Σοφίας και Κορδελιό, την οποία ακολουθεί η ταχύτητα ανέμου WS10m. Από την άλλη, η βροχόπτωση φαίνεται να επηρεάζει ελάχιστα αρνητικά τις συγκεντρώσεις όζοντος, με βάση τους σταθμούς Κορδελιού και Νεοχωρούδας, στη δυτική περιοχή της πόλης. Επίσης μικρή σχέση έχει η θερμοκρασία στα 2 μέτρα και την άνοιξη, ενώ η θερμοκρασία στα 850hPa επιδρά μόνο στην περιοχή του σταθμού Πανοράματος.

Το καλοκαίρι, με βάση τα δεδομένα στην περιοχή των σταθμών Κορδελιού, Πανοράματος και Νεοχωρούδας η $prevO_3$ φέρει ισχυρή επιρροή στην πρόγνωση όζοντος την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης. Η σχετική υγρασία είναι η επόμενη κοινή παράμετρος και για τους τρεις σταθμούς με σχετικά μεγάλη αρνητική επίδραση στο όζον. Συγκεκριμένα στο σταθμό Πανοράματος παρατηρείται η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα και στα 850hPa, σε σύγκριση με τους άλλους δύο σταθμούς. Στο σταθμό περιοχής Κορδελιού, ενώ το χειμώνα η διεύθυνση ανέμου έχει ισχυρή αρνητική συσχέτιση με το όζον, το καλοκαίρι γίνεται θετική (Demuzere et al., 2009).

Τέλος, για το φθινόπωρο με διαθέσιμα δεδομένα από τους σταθμούς Κορδελιού και Πανοράματος, οι δύο κοινές μεταβλητές επιρροής ως προς το όζον είναι οι συγκεντρώσεις όζοντος προηγούμενης ημέρας, για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης και η ηλιακή ακτινοβολία. Όπως στα εποχικά μοντέλα άνοιξης και καλοκαιριού, έτσι και του φθινοπώρου, για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης, η θερμοκρασία στα 2 μέτρα και 850hPa ξεχωρίζει με τη μεγάλη θετική συσχέτιση με το όζον, μονάχα στην περιοχή του σταθμού Πανοράματος.

Όπως και για τα ετήσια μοντέλα πρόγνωσης όζοντος, ο πίνακας 3.42 παρουσιάζει τις μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα, σε φθίνουσα σειρά συσχέτισης για κάθε εποχιακό μοντέλο των τεσσάρων σταθμών, με το πρόσημο του συντελεστή συσχέτισης, μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Για τους σταθμούς Αγίας Σοφίας και Κορδελιού οι μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα $prevO_3$, SOL, WS10m παρατηρούνται και στα εποχιακά μοντέλα για όλο το έτος. Το ίδιο και οι μεταβλητές $prevO_3$ και RH1000 για το Πανόραμα και Νεοχωρούδα. Η στατιστική σημαντικότητα κάποιων μεταβλητών αλλάζει κατά τη δεύτερη ή τρίτη ημέρα πρόγνωσης, κυρίων της $prevO_3$, με αύξηση του δείκτη p value και αλλαγές της WS10m.

Πίνακας 3.42: Μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,05$) για την ανάλυση παλινδρόμησης, σε φθίνουσα σειρά με βάση τη συσχέτιση τους με το O_3 για κάθε εποχιακό μοντέλο πρώτης ημέρας πρόγνωσης

	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Αγ. Σοφίας	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$		
	+WS10m	+SOL		
	+SOL	+WS10m		
	-T850			
Κορδελιό	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$
	+WS10m	+SOL	+WS10m	+SOL
	-T850	+WS10m	-RH2m	+PREC
	+SOL			
Πανόραμα	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$	+ $prevO_3$
	-RH2m	-RH2m	-RH2m	
Νεοχωρούδα		+ $prevO_3$	+ $prevO_3$	
		-RH2m	-RH1000	
		+WS10m		

Αξιολόγηση

Η απόδοση όλων των εποχιακών μοντέλων πρόγνωσης όζοντος ακολουθούν ίδια πορεία. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα αξιολόγησης των ετήσιων μοντέλων, οι δείκτες και τα σφάλματα έχουν παρόμοιες τιμές. Ο δείκτης συμφωνίας IOA και οι συντελεστές συσχέτισης r και προσδιορισμού r^2 μειώνονται από την πρώτη στην τρίτη ημέρα πρόγνωσης σε κάθε μοντέλο. Οι χαμηλότερες τιμές αυτών εμφανίζονται στα μοντέλα άνοιξης της περιοχής Κορδελιού και χειμώνα στο Πανοράματος.

Στον Πίνακα 3.43 παρακάτω συνοψίζονται οι τιμές των σημαντικότερων δεικτών αξιολόγησης των παραπάνω εποχιακών μοντέλων πρόγνωσης O_3 , με τιμές σε κλίμακα 0-1. Ο δείκτης MAE παίρνει τιμές από 0 ως 1 με βάση το μέσο όρο O_3 κάθε μοντέλου με 0 για MAE ίσο με $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και 1 για MAE ίσο με το μέσο όρο. Σε bold είναι οι καλύτερες τιμές για κάθε δείκτη.

Με βάση τον δείκτη IOA για το σταθμό Κορδελιού, το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης το καλοκαίρι έχει καλύτερη απόδοση από ότι την άνοιξη (Otero et al., 2016). Επίσης, τα μοντέλα χειμώνα και καλοκαιριού διατηρούν αρκετά μεγαλύτερο r^2 από ότι των δύο μεταβατικών εποχών (Demuzere et al., 2009). Δηλαδή η μεταβλητότητα των προγνώσεων εκφράζεται καλύτερα το χειμώνα και το καλοκαίρι με τη χρήση παλινδρόμησης παρά την άνοιξη και το φθινόπωρο.

Πίνακας 3.43: Δείκτες MAE, IOA και r^2 εποχιακών μοντέλων O_3 πρώτης ημέρας πρόγνωσης (σε bold οι καλύτερες τιμές για κάθε δείκτη).

		Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
Αγ. Σοφίας	MAE	0,239	0,123		
	IOA	0,869	0,833		
	r^2	0,615	0,536		
Κορδελιό	MAE	0,214	0,126	0,118	0,221
	IOA	0,905	0,801	0,900	0,746
	r^2	0,700	0,482	0,689	0,387
Πανόραμα	MAE	0,140	0,092	0,058	0,133
	IOA	0,766	0,843	0,814	0,917
	r^2	0,436	0,509	0,509	0,730
Νεοχωρούδα	MAE		0,084	0,150	
	IOA		0,854	0,833	
	r^2		0,588	0,545	

Με το πέρας της μελέτης (Πίνακας 3.13, Πίνακας 3.43) προτείνεται η χρήση ετήσιων μοντέλων πρόγνωσης O_3 . Με βάση τη στατιστική έχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα από ότι τα εποχιακά μοντέλα ίδιας περιόδου.

3.2.2 Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})

Για την πρόγνωση αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και για την πρόγνωση όζοντος. Έγινε χρήση ακριβώς των ίδιων μετεωρολογικών παραμέτρων και της μεταβλητής PM_{10} της προηγούμενης ημέρας ($prevPM_{10}$).

Η εξαγωγή μοντέλων παλινδρόμησης έγινε για τις τρεις προγνωστικές ημέρες σε ετήσια και εποχιακή βάση αλλά για τρεις σταθμούς: Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό, Πανόραμα. Ο σταθμός Νεοχωρούδας δε συμπεριλήφθηκε λόγω μη διαθεσιμότητας των παρατηρήσεων PM_{10} .

3.2.2.1 Ετήσια ανάλυση παλινδρόμησης

Η εξίσωση 3.2 είναι η εξίσωση παλινδρόμησης με την οποία εκφράζεται η σχέση της εξαρτημένης με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Είναι ίδια με την εξίσωση 3.1, για την πρόγνωση αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} καθώς χρησιμοποιούνται οι ίδιες ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι συντελεστές κάθε μεταβλητής στην εξίσωση παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.44) για όλα τα στατιστικά μοντέλα σε ετήσια βάση. Δηλαδή, για τους τρεις σταθμούς για κάθε ημέρα πρόγνωσης.

$$PM_{10} = a * prevPM_{10} + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.44: Συντελεστές μεταβλητών των στατιστικών μοντέλων σε ετήσια βάση για τους τέσσερις σταθμούς

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Αγ. Σοφίας	1	0,493	0,0005	-0,103	-0,177	-0,162	0,662	0,087	0,778	10,014
	2	0,223	0,002	-0,247	-0,118	-0,023	1,410	0,130	0,466	-13,517
	3	0,166	-0,005	0,038	-0,085	-0,182	0,698	0,123	0,758	49,313
Κορδελιό	1	0,592	0,012	1,661	-1,076	-0,348	-0,751	-0,066	-0,202	-12,838
	2	0,357	0,022	2,181	-1,733	-0,356	-0,804	-0,082	-0,117	-47,699
	3	0,262	0,036	2,230	-2,094	-0,326	-0,557	-0,083	-0,291	-120,52
Πανόραμα	1	0,533	0,021	0,500	-0,270	0,134	0,246	-0,005	-0,196	-120,74
	2	0,162	0,027	-0,043	0,490	0,055	-0,142	-0,030	-0,025	-139,70
	3	0,047	0,027	-0,488	0,851	0,039	-0,879	-0,039	0,050	-132,55

Πλατεία Αγίας Σοφίας

Για την εκπόνηση των τριών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 262 ημέρες του έτους. Τα δεδομένα του σταθμού είναι διαθέσιμα για όλο το έτος, εκτός από την περίοδο: 14/7 – 24/10, δηλαδή 104 μέρες.

Πίνακας 3.45: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM_{10} για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev PM_{10}	5,274E-20	0,0001	0,008	0,837	0,715	0,689
G500	0,949	0,788	0,603	0,270	0,253	0,251
T850	0,754	0,550	0,930	0,547	0,536	0,531
T2m	0,591	0,771	0,841	0,640	0,634	0,626
RH2m	0,048	0,816	0,097	-0,428	-0,451	-0,487
WS10m	0,085	0,001	0,196	0,146	0,233	0,175
SOL	4,029E-10	9,084E-15	1,713E-13	0,802	0,801	0,788
PREC	0,003	0,151	0,012	-0,040	-0,117	-0,034

Πίνακας 3.46: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

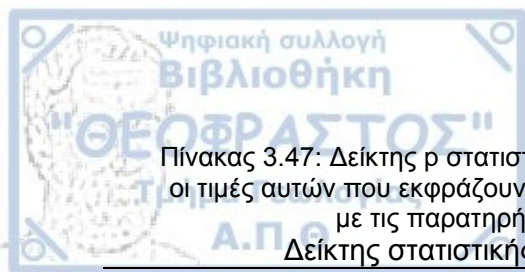
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	262	262	262
Μέσος όρος παρατηρήσεων	36,697	36,678	36,637
Μέσος όρος προγνώσεων	36,697	36,678	36,637
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	19,352	19,377	19,435
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	17,073	16,123	15,823
Μέσο σφάλμα (ME)	7,118E-15	-2E-14	-4,9E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	6,718	8,236	8,73
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	9,092	10,727	11,264
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,934	0,903	0,891
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,882	0,832	0,814
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,778	0,692	0,662

Με βάση τον δείκτη p value και τον συντελεστή συσχέτισης της κάθε μεταβλητής με την πρόγνωση PM_{10} , οι πιο σημαντικές μεταβλητές με θετική επίδραση ως προς τα σωματίδια αυτά είναι οι συγκεντρώσεις σωματιδίων προηγούμενης ημέρας (prevPM_{10}) και η ηλιακή ακτινοβολία, για τις τρεις προγνωστικές ημέρες. Ενώ με βάση τον συντελεστή συσχέτισης, λιγότερη ισχυρή θετική σχέση έχουν οι T850 και T2m. Η στατιστική σημαντικότητα που εμφανίζει η βροχόπτωση την πρώτη και τρίτη ημέρα πρόγνωσης μπορεί να είναι τυχαία καθώς ο συντελεστής συσχέτισης είναι σχεδόν μηδενικός.

Στον Πίνακα 3.46 είναι όλοι οι δείκτες αξιολόγησης των τριών μοντέλων πρόγνωσης σωματιδίων για την περιοχή του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας. Όπως στα μοντέλα πρόγνωσης όζοντος, έτσι και εδώ το ME είναι σχεδόν μηδενικό όμως σε συνδυασμό με τα MAE και RMSE εξάγονται τα σωστά συμπεράσματα. Ο δείκτης συμφωνίας IOA εκφράζει σχεδόν τέλεια συμφωνία των προγνώσεων με τις παρατηρήσεις και στα τρία μοντέλα. Σε συνδυασμό με τους συντελεστές r και r^2 αποδεικνύεται η καλή απόδοση τους.

Κορδελιό

Για τα ετήσια μοντέλα των τριών προγνωστικών ημερών της περιοχής Κορδελιού χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) για 151 ημέρες του έτους. Τα δεδομένα του σταθμού είναι διαθέσιμα για όλο το έτος, εκτός από την περίοδο: 1/12 – 24/ 12 για το 2013, 24/4 – 28/10 και 14-15/11 για το 2014.



Πίνακας 3.47: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM_{10} για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev PM_{10}	2,493E-17	1,287E-06	0,0002	0,724	0,529	0,477
G500	0,437	0,240	0,037	0,304	0,309	0,346
T850	0,019	0,009	0,006	0,180	0,187	0,192
T2m	0,162	0,049	0,015	-0,052	-0,064	-0,099
RH2m	0,031	0,052	0,066	0,105	0,089	0,120
WS10m	0,271	0,274	0,421	0,009	-0,078	-0,105
SOL	0,011	0,005	0,003	-0,368	-0,349	-0,377
PREC	0,617	0,791	0,672	-0,033	-0,113	-0,156

Πίνακας 3.48: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	151	151	151
Μέσος όρος παρατηρήσεων	42,815	42,425	42,084
Μέσος όρος προγνώσεων	42,815	42,425	42,084
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	19,687	19,317	18,555
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	15,162	12,502	12,168
Μέσο σφάλμα (ME)	5,233E-14	3,72E-15	-9,4E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	9,371	12,029	11,534
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	12,516	14,675	13,961
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,860	0,760	0,769
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,770	0,647	0,655
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,593	0,418	0,430

Με την παλινδρόμηση για κάθε ημέρα για τον σταθμό του Κορδελιού φαίνεται η αρκετά ισχυρή σχέση της μεταβλητής prev PM_{10} με τα PM_{10} , με διαφορά από τη δεύτερη σημαντικότερη μεταβλητή ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σταθμό αυτό η SOL παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τα σωματίδια και χαμηλότερη από τα αποτελέσματα για την Πλατεία Αγίας Σοφίας. Οι μεταβλητές T850, T2m και RH2m έχουν χαμηλό δείκτη p τις τρεις ημέρες, τη δεύτερη και τρίτη ημέρα και πρώτη και δεύτερη ημέρα αντίστοιχα (Πίνακας 3.47) με συσχέτιση σχεδόν μηδενική.

Η αξιολόγηση των μοντέλων Κορδελιού (Πίνακας 3.48) παρουσιάζει παρόμοιες τιμές δεικτών με της Πλατείας Αγίας Σοφίας (Πίνακας 3.46) με μικρότερο συντελεστή προσδιορισμού r^2 και τις τρεις ημέρες πρόγνωσης. Μόνο το μισό ποσοστό μεταβλητότητας στο σύνολο των μεταβλητών επηρεάζει την μεταβλητότητα πρόγνωσης αιωρούμενων σωματιδίων.

Για τις εξισώσεις της περιοχής Πανοράματος (Πίνακας 3.49) χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις). Τα δεδομένα του σταθμού είναι διαθέσιμα για 145 ημέρες του έτους. Οι περίοδοι χωρίς δεδομένα είναι: 1/12 – 24/ 12 για το 2013, 24/4 – 4/11 για το 2014

Πίνακας 3.49: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM_{10} για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
$prevPM_{10}$	8,321E-13	0,039	0,539	0,659	0,340	0,259
G500	0,027	0,024	0,014	0,386	0,385	0,387
T850	0,313	0,938	0,395	0,248	0,259	0,229
T2m	0,638	0,433	0,204	0,163	0,199	0,147
RH2m	0,104	0,574	0,697	0,247	0,148	0,222
WS10m	0,528	0,715	0,028	-0,033	-0,102	-0,305
SOL	0,681	0,062	0,019	-0,281	-0,247	-0,288
PREC	0,341	0,904	0,850	0,071	-0,048	-0,009

Πίνακας 3.50: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r , r^2) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	145	145	145
Μέσος όρος παρατηρήσεων	22,508	22,129	22,152
Μέσος όρος προγνώσεων	22,508	22,129	22,152
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	10,267	9,981	9,965
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,336	5,025	5,157
Μέσο σφάλμα (ME)	-2,479E-14	4,89E-14	-3,4E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,323	6,947	7,038
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	7,159	8,593	8,497
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,817	0,622	0,634
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,714	0,503	0,517
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,510	0,253	0,267

Πρώτα από όλα, την ισχυρότερη σχέση με τις προγνωστικές τιμές PM_{10} έχει η $prevPM_{10}$ μεταβλητή για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πίνακας 3.50). Από τις υπόλοιπες, το γεωδυναμικό ύψος με βάση τον δείκτη στατιστικής σημαντικότητας αλλά και την συσχέτιση δείχνει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα πρόγνωσης των τριών ημερών, ενώ η $prevPM_{10}$ για την δεύτερη ημέρα πρόγνωσης και η ηλιακή ακτινοβολία για την τρίτη ημέρα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με του γεωδυναμικού

ύψους. Για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης ο άνεμος έχει ασθενής αρνητική συσχέτιση με τα σωματίδια.

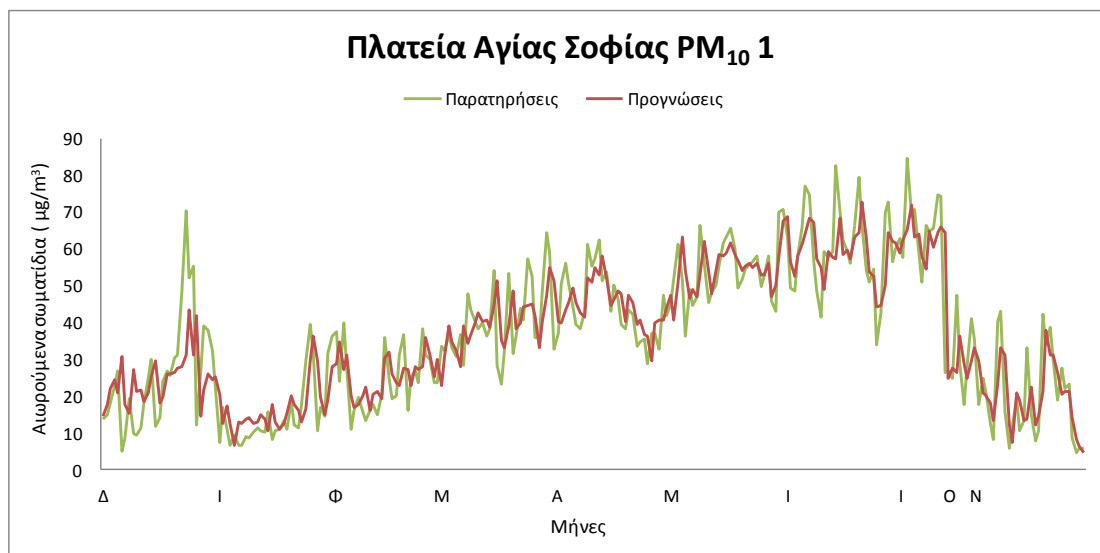
Τα αποτελέσματα αξιολόγησης της πρώτης ημέρας πρόγνωσης είναι φανερά καλύτερα από των δύο επόμενων. Έν συγκρίσει με όλα τα παραπάνω μοντέλα η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των ημερών αυτών είναι μεγαλύτερη, με πιθανή αιτία την ισχυρή σχέση της μεταβλητής συγκεντρώσεων PM_{10} προηγούμενης ημέρας μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης.

3.2.2.1.1 Διαγράμματα πρώτης ημέρας πρόγνωσης

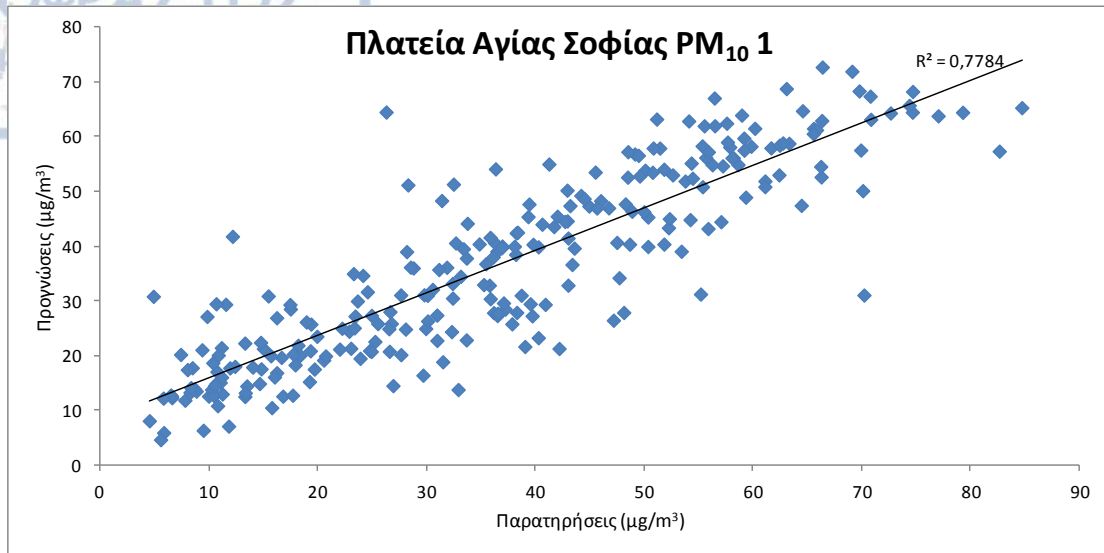
Η σχεδίαση αναπαράστασης δεδομένων των ετήσιων μοντέλων πρόγνωσης όζοντος επαναλαμβάνεται με τα ίδια διαγράμματα για την πρόγνωση αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα, διαγράμματα χρονοσειράς και διασποράς για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης και για τις τρεις περιοχές των σταθμών μελέτης.

Η συνέχεια που ακολουθούν οι παρατηρησιακές και προγνωστικές τιμές των PM_{10} στη διάρκεια του 2014, παρουσιάζεται στα διαγράμματα χρονοσειράς (Σχήμα 3.9, Σχήμα 3.11, Σχήμα 3.13) με πράσινη και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα. Στον άξονα y φαίνονται οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων ενώ στον άξονα x οι μήνες του έτους με τα διαθέσιμα δεδομένα. Όπως στις χρονοσειρές όζοντος, έτσι και εδώ παρατηρείται η αδυναμία της παλινδρόμησης στην πρόγνωση ακραίων τιμών (EPA, 2003). Επίσης, επαναλαμβάνεται η ακολουθία των τιμών πρόγνωσης με την ίδια τάση αύξησης και μείωσης των παρατηρησιακών τιμών.

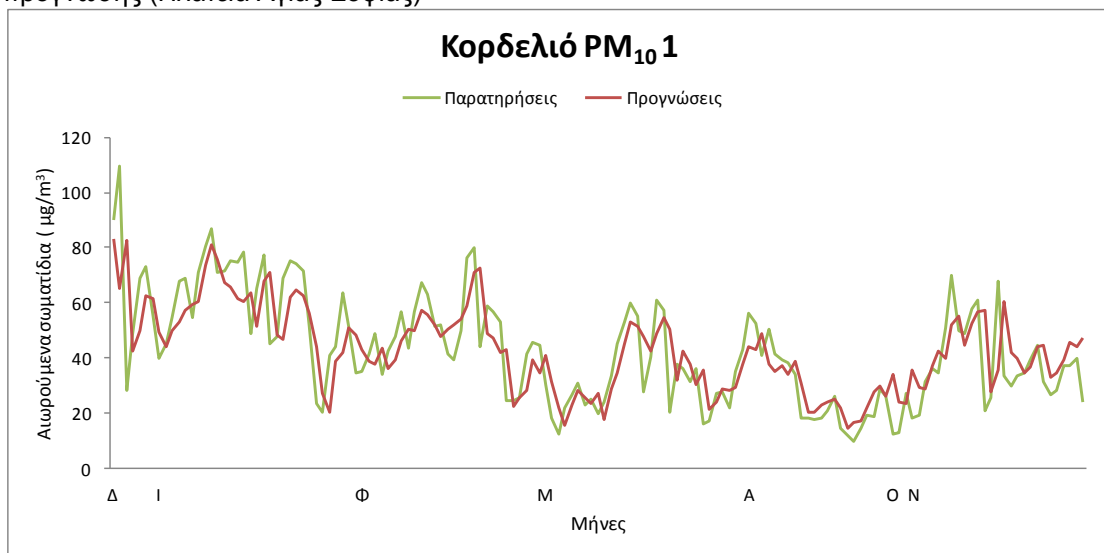
Το διάγραμμα διασποράς (Σχήμα 3.10, Σχήμα 3.12, Σχήμα 3.14) εκφράζει τη σχέση που ακολουθούν οι παρατηρήσεις (άξονας x) και οι προγνώσεις PM_{10} (άξονας y). Με βάση την γραμμή τάσης και τους συντελεστές προσδιορισμού και συσχέτισης και στις τρεις περιοχές τα δεδομένα έχουν γραμμική σχέση. Η πιο ισχυρή παρουσιάζεται στο σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας (Σχήμα 3.10, Πίνακας 3.46).



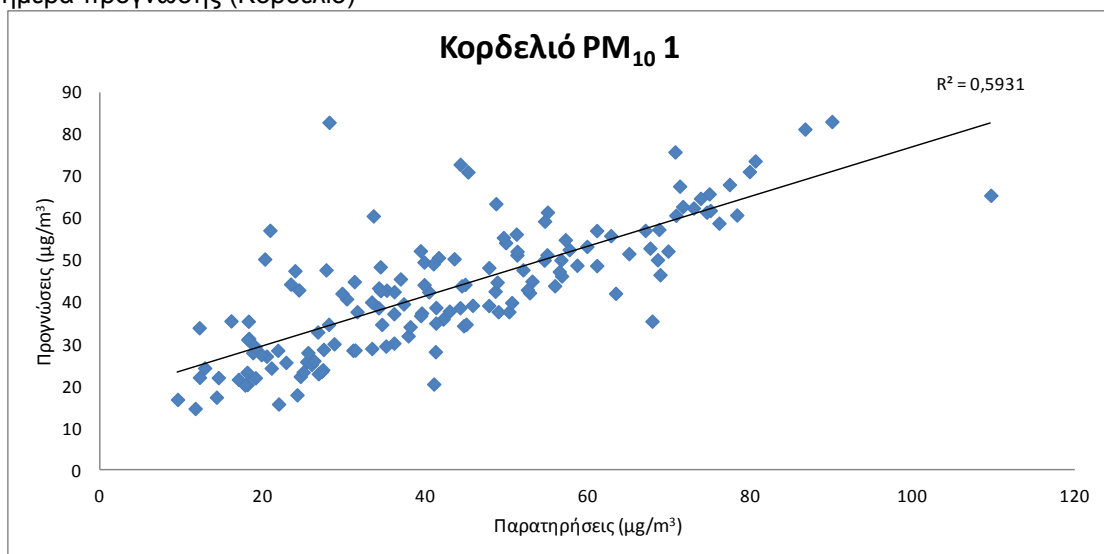
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM_{10} την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)



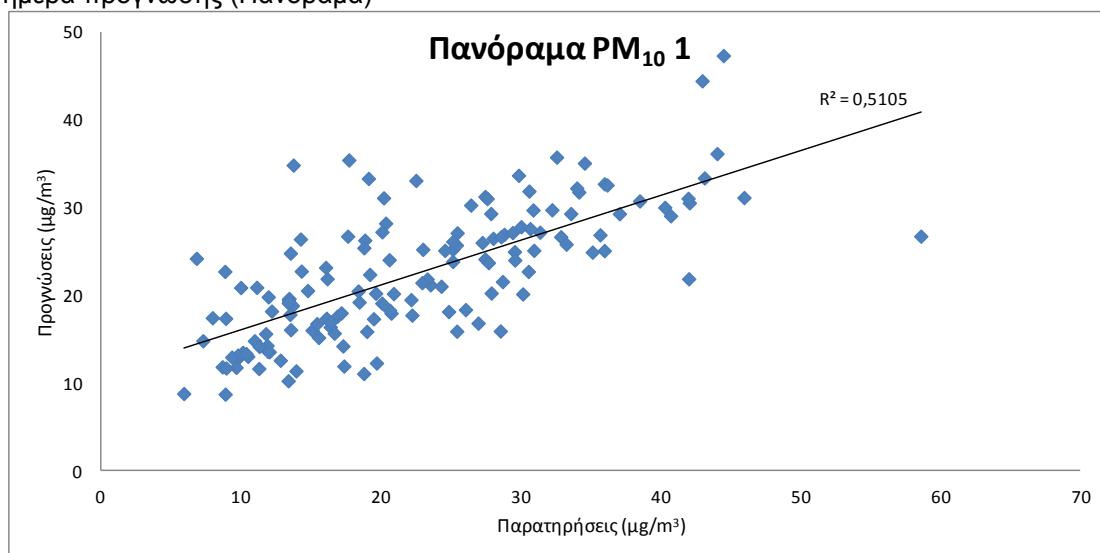
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ την πρώτη ημέρας πρόγνωσης (Κορδελιό)



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα χρονοσειράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα διασποράς παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ την πρώτη ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

Σχόλια

Όπως παραπάνω (πρόγνωση συγκεντρώσεων όζοντος) έτσι κι εδώ, η μεταβλητή συγκέντρωσης προηγούμενης ημέρας βελτιώνει αρκετά την απόδοση των στατιστικών μοντέλων (Slini et al., 2006). Η ισχυρή αυτή συσχέτιση φέρει δεύτερη σημαντικότερη την ηλιακή ακτινοβολία, θετική για την Πλατεία Αγίας Σοφίας και έπειτα αρνητική για το Κορδελιό και Πανόραμα. Η αλλαγή του σήματος της ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους, με θετικό μέγιστο το καλοκαίρι (Demuzere et al., 2009) και η έλλειψη δεδομένων κατά τους θερινούς μήνες για το Κορδελιό και Πανόραμα μπορεί να οφείλεται για τη διαφορετική επίδραση της ακτινοβολίας σε κάθε σταθμό. Η θετική σχέση του γεωδυναμικού ύψους στα 500hPa (Πανόραμα Πίνακας 3.49) δείχνει την επίδραση ύπαρξης αντικυκλώνα ή κυκλώνα στην ατμόσφαιρα καθώς οι καλές καιρικές συνθήκες έμμεσα επιδρούν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀.

Η σύνοψη των μεταβλητών κάθε ετήσιου μοντέλου πρόγνωσης PM₁₀ με στατιστική σημαντικότητα (Πίνακας 3.51) δίνει συνολική εικόνα για την επίδραση (θετική ή

αρνητική) των μεταβλητών στις συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Οι μεταβλητές $prevPM_{10}$ και SOL είναι οι δύο στατιστικά σημαντικότερες και με την ισχυρότερη συσχέτιση με τα σωματίδια σε όλα τα μοντέλα πρόγνωσης. Για το σταθμό Αγίας Σοφίας η σχετική υγρασία RH2m και η PREC είναι οι επόμενες δύο στατιστικά σημαντικές αλλά με χαμηλή συσχέτιση. Για το σταθμό Κορδελιού η T850, η RH2m και η μεταβλητή θερμοκρασίας T2m ακολουθούν την ηλιακή ακτινοβολία και την $prevPM_{10}$ ενώ για το σταθμό Πανοράματος είναι το γεωδυναμικό ύψος G500 που επηρεάζει τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων.

Πίνακας 3.51: Μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,05$) για την ανάλυση παλινδρόμησης, σε φθίνουσα σειρά με βάση τον συντελεστή συσχέτισης τους με τα PM_{10} για κάθε ετήσιο μοντέλο.

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	+ $prevPM_{10}$	+SOL	+SOL
	+SOL	+ $prevPM_{10}$	+ $prevPM_{10}$
	-RH2m	+WS10m	-PREC
	-PREC		
Κορδελιό	+ $prevPM_{10}$	+ $prevPM_{10}$	+ $prevPM_{10}$
	-SOL	-SOL	-SOL
	+T850	+T850	+G500
	+RH2m	+RH2m	+T850
Πανόραμα	+ $prevPM_{10}$	+ $prevPM_{10}$	+G500
	+G500	+G500	-WS10m
		-SOL	-SOL

Αξιολόγηση

Το σχεδόν μηδενικό ME και τα μεγαλύτερα MAE και RMSE, μαζί με την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση παρατηρήσεων από των προγνώσεων και τα διαγράμματα παρουσίασης της χρονοσειράς αποδεικνύουν την αδυναμία πρόγνωσης ακραίων τιμών της γραμμικής παλινδρόμησης.

Όλες οι τιμές και δείκτες μειώνονται από την πρώτη προς την τρίτη ημέρα πρόγνωσης, κάτι που αποδείχθηκε και στα μοντέλα για το όζον καθώς για την πρώτη ημέρα η πρόγνωση είναι καλύτερη από ότι για την δεύτερη και την τρίτη ημέρα.

Στον Πίνακα 3.52 παρατίθενται οι τιμές τριών δεικτών αξιολόγησης MAE, IOA, r^2 , σε κλίμακα 0-1. Το σφάλμα MAE με τιμή 0 για MAE ίσο με $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ και 1 για MAE ίσο με τη μέση τιμή. Από τους τρεις δείκτες συμπεραίνεται πως το μοντέλο πρώτης ημέρας πρόγνωσης του σταθμού Αγίας Σοφίας έχει την καλύτερη απόδοση. Έπειτα το μοντέλο κάθε ημέρας πρόγνωσης του σταθμού Κορδελιού δίνει καλύτερα αποτελέσματα από του Πανοράματος.

Πίνακας 3.52: Δείκτες MAE, IOA και r^2 για κάθε ετήσιο μοντέλο PM_{10} (σε bold οι καλύτερες τιμές των δεικτών).

		Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	MAE	0,183	0,224	0,238
	IOA	0,934	0,903	0,891
	r^2	0,778	0,692	0,662
Κορδελιό	MAE	0,218	0,283	0,274
	IOA	0,860	0,760	0,769
	r^2	0,593	0,418	0,430
Πανόραμα	MAE	0,236	0,313	0,317
	IOA	0,817	0,622	0,634
	r^2	0,510	0,253	0,267

3.2.2.2 Εποχιακή ανάλυση παλινδρόμησης

Η ίδια μέθοδος παλινδρόμησης ακολουθείται και για τα PM_{10} , όπως αναλύεται και για το O_3 . Με βάση την ίδια χρονοσειρά δεδομένων υπολογίζονται τα ακόλουθα στατιστικά μοντέλα πρόγνωσης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα για τους τρεις σταθμούς στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, για τις εποχές χειμώνα και άνοιξη.

Λόγω της διαθεσιμότητας δεδομένων, για τον σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας υπολογίστηκαν τα μοντέλα παλινδρόμησης για το χειμώνα και άνοιξη, ενώ για τους σταθμούς Κορδελιό και Πανόραμα μονάχα για το χειμώνα.

Όπως και για όλο το έτος, έτσι και για κάθε μοντέλο εποχής χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές (παρατηρήσεις και προγνώσεις) με τις ανάλογες ημέρες σε κάθε εποχή:

- Χειμώνας (Δεκέμβριος – Φεβρουάριος): 90 (Αγ.Σοφίας) και 66 ημέρες (Κορδελιό, Πανόραμα)
- Άνοιξη (Μάρτιος – Μάιος): 92 ημέρες (Αγ. Σοφίας)

Πλατεία Αγίας Σοφίας

$$PM_{10} = a * prevPM_{10} + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.53: Συντελεστές εξισώσεων των στατιστικών μοντέλων κάθε εποχής (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Χειμώνας	1	0,688	-0,008	0,467	-0,955	-0,036	-0,672	0,010	-0,903	65,140
	2	0,467	-0,004	0,803	-1,659	-0,089	-0,475	0,019	0,098	55,394
	3	0,377	-0,015	1,302	-2,198	-0,237	-0,827	0,032	0,684	134,516
Άνοιξη	1	0,406	-0,009	-0,767	0,722	-0,137	1,042	0,063	0,213	64,136
	2	0,074	-0,005	-0,441	0,650	-0,069	2,141	0,067	0,073	48,341
	3	0,079	-0,007	-0,782	1,171	-0,100	1,469	0,085	0,429	52,184

Πίνακας 3.54: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM₁₀ για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
preνPM ₁₀	5,489E-12	1,524E-05	0,0006	0,666	0,440	0,322
G500	0,593	0,818	0,372	0,007	-0,018	-0,065
T850	0,301	0,209	0,051	-0,039	-0,077	-0,048
T2m	0,155	0,053	0,010	-0,214	-0,187	-0,144
RH2m	0,806	0,638	0,214	-0,017	-0,054	-0,084
WS10m	0,330	0,601	0,356	-0,010	0,052	-0,004
SOL	0,746	0,613	0,446	0,087	0,024	0,049
PREC	0,208	0,866	0,312	-0,061	-0,023	0,072

Πίνακας 3.55: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης μg/m³ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	90	90	90
Μέσος όρος παρατηρήσεων	21,455	21,680	21,875
Μέσος όρος προγνώσεων	21,455	21,680	21,875
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	12,202	12,239	12,268
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	8,698	6,120	5,552
Μέσο σφάλμα (ME)	8,289E-15	-9,9E-15	-1,4E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	6,578	8,212	8,282
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	8,510	10,540	10,879
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,815	0,631	0,571
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,712	0,500	0,452
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,508	0,250	0,204

Μετά από το ετήσιο μοντέλο, η εποχιακή ανάλυση για το χειμώνα και την άνοιξη δείχνει την επίδραση κάθε μεταβλητής. Με την preνPM₁₀ να έχει την ισχυρότερη σχέση για τις τρεις ημέρες και σε αυτό το μοντέλο, φαίνεται να ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες καθώς μόνο η θερμοκρασία στα 2 μέτρα παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα τη δεύτερη και τρίτη ημέρα πρόγνωσης με χαμηλό αρνητικό συντελεστή συσχέτισης (Πίνακας 3.54).

Αν και ο δείκτης συμφωνίας IOA των παρατηρήσεων με τις προγνώσεις είναι σχεδόν 1, οι συντελεστές συσχέτισης r και προσδιορισμού r² είναι χαμηλοί, ειδικά την δεύτερη και τρίτη ημέρα πρόγνωσης (Πίνακας 3.55).

Πίνακας 3.56: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM₁₀ για την ημέρα πρόγνωσης (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
preνPM ₁₀	1,048E-05	0,473	0,435	0,590	0,321	0,329
G500	0,529	0,738	0,639	0,158	0,147	0,125
T850	0,188	0,492	0,228	0,222	0,236	0,223
T2m	0,276	0,391	0,105	0,406	0,420	0,409
RH2m	0,263	0,630	0,479	-0,462	-0,464	-0,386
WS10m	0,045	0,005	0,106	0,175	0,407	0,228
SOL	0,013	0,011	0,001	0,533	0,548	0,510
PREC	0,657	0,875	0,177	-0,248	-0,023	-0,089

Πίνακας 3.57: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης μg/m³ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r²) (Πλατεία Αγίας Σοφίας)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	92	92	92
Μέσος όρος παρατηρήσεων	46,127	46,447	46,632
Μέσος όρος προγνώσεων	46,127	46,447	46,632
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	10,692	10,754	10,655
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	7,828	7,025	6,741
Μέσο σφάλμα (ME)	-1,737E-14	4,02E-15	-8,6E-15
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	5,696	6,447	6,395
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	7,242	8,098	8,207
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,833	0,765	0,747
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,732	0,653	0,632
Συντελεστής προσδιορισμού (r ²)	0,536	0,426	0,400

Την άνοιξη (Πίνακας 3.56) παρατηρούνται διαφορετικές επιδράσεις των μετεωρολογικών μεταβλητών. Η preνPM₁₀ θεωρείται σημαντική μεταβλητή μόνο για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης ενώ η ηλιακή ακτινοβολία και για τις τρεις ημέρες με ισχυρή θετική επίδραση και οι δύο. Λιγότερο σημαντική σχέση παρουσιάζουν ο άνεμος WS10m την πρώτη και δεύτερη ημέρα πρόγνωσης αλλά και οι T2m και RH1000 με θετική και αρνητική συσχέτιση αντίστοιχα.

Οι δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου για την άνοιξη (Πίνακας 3.57) ακολουθούν παρόμοια πορεία με του χειμώνα (χειμώνας Πίνακας 3.55).

$$PM_{10} = a * prevPM_{10} + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.58: Συντελεστές εξισώσεων των στατιστικών μοντέλων κάθε εποχής (Κορδελιό)

Χειμώνας	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
	1	0,226	0,040	0,647	2,132	-0,365	-0,112	-0,148	0,805	-166,425
	2	-0,086	0,007	2,040	2,846	-0,305	0,715	-0,235	-1,109	32,527
	3	-0,113	0,026	1,474	1,800	-0,454	-0,777	-0,246	-1,947	-45,221

Πίνακας 3.59: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM_{10} για την ημέρα πρόγνωσης (Κορδελιό)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
prev PM_{10}	0,052	0,403	0,214	0,565	0,264	0,107
G500	0,136	0,773	0,213	0,373	0,427	0,541
T850	0,506	0,047	0,120	0,483	0,520	0,541
T2m	0,107	0,022	0,102	0,478	0,490	0,458
RH2m	0,146	0,200	0,037	0,032	0,023	-0,029
WS10m	0,926	0,484	0,424	-0,097	-0,158	-0,307
SOL	0,013	6,449E-05	2,545	-0,316	-0,259	-0,138
PREC	0,432	0,088	0,023	0,162	-0,142	-0,298

Πίνακας 3.60: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Κορδελιό)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	66	66	66
Μέσος όρος παρατηρήσεων	55,508	54,602	53,217
Μέσος όρος προγνώσεων	55,508	54,602	53,217
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	18,131	17,867	17,055
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	13,104	12,856	12,536
Μέσο σφάλμα (ME)	3,832E-14	-1,9E-14	3,92E-14
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	9,598	9,661	9,466
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	12,436	12,313	11,476
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,828	0,822	0,832
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,722	0,719	0,735
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,522	0,517	0,540

Η παλινδρόμηση για το χειμώνα στο σταθμό Κορδελιού, δείχνει πως η μεταβλητή $prevPM_{10}$ επιδρά σημαντικά στην πρόγνωση μονάχα για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Οι μεταβλητές θερμοκρασιών T850 και T2m έχουν θετική σχέση με τα σωματίδια, όσο και η μεταβλητή συγκέντρωσης προηγούμενης ημέρας και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης, ενώ το γεωδυναμικό ύψος φέρει το ίδιο ισχυρή σχέση για τη δεύτερη και τρίτη ημέρα. Η ηλιακή ακτινοβολία φέρει αρνητική επίδραση στις συγκεντρώσεις σωματιδίων και για τις τρεις ημέρες πρόγνωσης, ενώ στο σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας η συσχέτιση αυτής είναι σχεδόν μηδενική (Πίνακας 3.54).

Με βάση την παραπάνω αξιολόγηση (Πίνακας 3.60) οι δείκτες και οι συντελεστές δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την αξιολόγηση των δύο προηγούμενων εποχιακών.

Πανόραμα

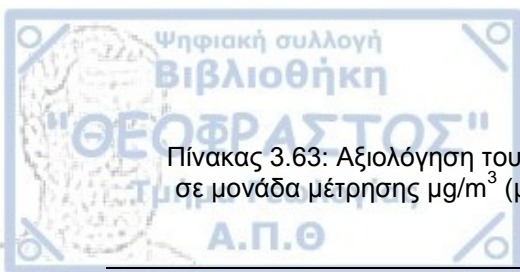
$$PM_{10} = a * prevPM_{10} + b * G500 + c * T850 + d * T2m + e * RH2m + f * WS10m + g * SOL + h * PREC + i \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.61: Συντελεστές εξισώσεων των στατιστικών μοντέλων κάθε εποχής (Πανόραμα)

Χειμώνας	Ημέρα	a	b	c	d	e	f	g	h	i
	1	0,491	0,008	0,980	-0,608	0,227	0,867	0,012	-0,511	-53,506
	2	0,040	-0,002	0,889	-0,008	0,233	-0,571	-0,042	-0,451	26,490
	3	-0,041	0,006	-0,020	0,707	0,188	-1,581	-0,030	-0,584	-21,974

Πίνακας 3.62: Δείκτης p στατιστικής σημαντικότητας για την ανάλυση παλινδρόμησης (σε bold οι τιμές αυτών που εκφράζουν σημαντικότητα) και συντελεστής συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τις παρατηρήσεις PM_{10} για την ημέρα πρόγνωσης (Πανόραμα)

	Δείκτης στατιστικής σημαντικότητας P			Συντελεστής συσχέτισης		
	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
$prevPM_{10}$	1,564E-05	0,709	0,691	0,589	0,196	0,118
G500	0,531	0,856	0,652	0,224	0,278	0,342
T850	0,152	0,220	0,976	0,242	0,292	0,300
T2m	0,420	0,992	0,431	0,252	0,249	0,249
RH2m	0,080	0,085	0,166	0,171	0,097	0,090
WS10m	0,223	0,290	0,012	0,011	-0,223	-0,428
SOL	0,664	0,136	0,357	-0,130	-0,145	-0,122
PREC	0,245	0,122	0,202	0,129	-0,161	-0,157



Πίνακας 3.63: Αξιολόγηση του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης με στατιστικούς δείκτες σε μονάδα μέτρησης $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, ME, MAE, RMSE) και τιμές 0-1 (IOA, r, r^2) (Πανόραμα)

	Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Πλήθος παρατηρήσεων	65	65	65
Μέσος όρος παρατηρήσεων	23,357	22,948	22,849
Μέσος όρος προγνώσεων	23,357	22,948	22,849
Τυπική απόκλιση παρατηρήσεων	8,604	8,283	8,433
Τυπική απόκλιση προγνώσεων	5,552	3,972	4,4497
Μέσο σφάλμα (ME)	-1,243E-14	7,11E-15	0
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	4,999	5,867	5,871
Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	6,522	7,212	7,078
Δείκτης συμφωνίας (IOA)	0,763	0,592	0,648
Συντελεστής συσχέτισης (r)	0,645	0,479	0,533
Συντελεστής προσδιορισμού (r^2)	0,416	0,229	0,284

Και για το συγκεκριμένο μοντέλο, η prevPM_{10} είναι η πιο σημαντική μεταβλητή ως προς την πρόγνωση των σωματιδίων και τη συμβολή σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Ο άνεμος στα 10 μέτρα έχει το ίδιο ισχυρή αλλά αρνητική επίδραση στις συγκεντρώσεις για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης.

Όπως σε κάθε μοντέλο και στο συγκεκριμένο για το χειμώνα οι τιμές των σφαλμάτων δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ενώ οι συντελεστές r και r^2 είναι χαμηλοί, ο IOA δείχνει σχεδόν τέλεια συμφωνία των παρατηρήσεων με τις προγνώσεις.

Σχόλια

Με την σύγκριση των αποτελεσμάτων χειμώνα-άνοιξης του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας παρατηρείται το διαφορετικό αντίκτυπο που έχουν οι μεταβλητές. Η θερμοκρασία αέρα παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση το χειμώνα (Πίνακας 3.54) αλλά θετική και μεγαλύτερη την άνοιξη (Πίνακας 3.56).

Επίσης μεγάλη είναι η διαφορά της ηλιακής ακτινοβολίας με σχεδόν μηδενικό συντελεστή το χειμώνα και αρκετά ισχυρή την άνοιξη και για το σταθμό του Κορδελιού που παρουσιάζει ισχυρή αρνητική συσχέτιση το χειμώνα. Συμπεραίνεται πως η αντίδραση και των δύο το καλοκαίρι θα είναι ακόμα πιο ισχυρή ως προς τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων.

Η σχετική υγρασία φαίνεται να επιδρά σημαντικά στις συγκεντρώσεις σωματιδίων την άνοιξη με αρνητική συσχέτιση, ενώ το χειμώνα σχεδόν μηδενική.

Η σημαντική επίδραση που έχει η ταχύτητα ανέμου WS10m στην κατανομή συγκεντρώσεων (Κόλλια, 2012) παρατηρείται στο σταθμό Πανοράματος, την τρίτη ημέρα πρόγνωσης αλλά και της Αγίας Σοφίας την άνοιξη (Πίνακας 3.64). Όμως οι αλλαγές της στατιστικής σημαντικότητας και συσχέτισης κατά τις τρεις ημέρες πρόγνωσης δεν βγαίνουν σωστά συμπεράσματα για την επίδραση των μεταβλητών σε κάθε περιοχή από τα εποχιακά μοντέλα.

Οι μετεωρολογικές μεταβλητές έχουν διαφορετικό σήμα κατά τη διάρκεια του έτους. Οι περισσότερες επηρεάζουν θετικά (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία) ή αρνητικά

(σχετική υγρασία) τις συγκεντρώσεις σωματιδίων τους θερινούς μήνες (Πίνακας 3.56).

Πίνακας 3.64: Μεταβλητές με στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,05$) σε φθίνουσα σειρά με βάση τον συντελεστή συσχέτισης τους με τα PM_{10} για κάθε εποχιακό μοντέλο.

		Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	Χειμώνας	+prev PM_{10}	+prev PM_{10} -T2m	+prev PM_{10} -T2m -T850
	Άνοιξη	+prev PM_{10} +SOL +WS10m	+SOL +WS10m	+SOL
Κορδελιό	Χειμώνας	+prev PM_{10} -SOL	+T850 +T2m -SOL -PREC	-PREC -SOL -RH2m
	Πανόραμα	Χειμώνας	+prev PM_{10}	-WS10m

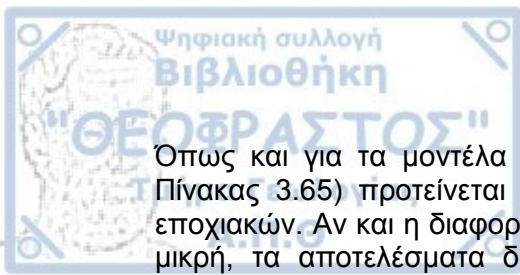
Αξιολόγηση

Σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες γραμμικής παλινδρόμησης και άλλων στατιστικών μεθόδων για την πρόγνωση PM_{10} (Slini et al., 2006; Demuzere et al., 2009), οι τιμές των στατιστικών δεικτών των μοντέλων που παρουσιάστηκαν είναι αρκετά μεγαλύτερες ή παρόμοιες. Συγκεκριμένα με βάση το δείκτη συμφωνίας IOA των Slini et al. (2006) για τη μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης, όλα τα παραπάνω μοντέλα έχουν σχεδόν πλήρη συμφωνία παρατηρήσεων και προγνώσεων των PM_{10} (αρκετά υψηλό IOA), ενώ με βάση το RMSE των Demuzere et al. (2009) για τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι στα ίδια επίπεδα με τα παραπάνω ετήσια μοντέλα.

Στον Πίνακα 3.65 παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι δείκτες αξιολόγησης των εποχιακών μοντέλων πρόγνωσης PM_{10} , με το σφάλμα MAE παρακάτω να παίρνει τιμές 0 για MAE ίσο με $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ και τιμή 1 για MAE ίσο με τη μέση τιμή, από τους ξεχωριστούς πίνακες αξιολόγησης κάθε μοντέλου. Η πρόγνωση του σταθμού Πανοράματος έχει τη χαμηλότερη αποδοτικότητα, του Κορδελιού με τον υψηλότερο IOA.

Πίνακας 3.65: Δείκτες MAE, IOA και r^2 για κάθε εποχιακό μοντέλο πρόγνωσης PM_{10} (σε bold οι καλύτερες τιμές για κάθε δείκτη).

			Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3
Αγ. Σοφίας	Χειμώνας	MAE	0,306	0,378	0,378
		IOA	0,815	0,631	0,571
		r^2	0,508	0,250	0,204
Αγ. Σοφίας	Άνοιξη	MAE	0,123	0,138	0,137
		IOA	0,833	0,765	0,747
		r^2	0,536	0,426	0,400
Κορδελιό	Χειμώνας	MAE	0,172	0,176	0,177
		IOA	0,828	0,822	0,832
		r^2	0,522	0,517	0,540
Πανόραμα	Χειμώνας	MAE	0,214	0,255	0,256
		IOA	0,763	0,592	0,648
		r^2	0,416	0,229	0,284



Όπως και για τα μοντέλα πρόγνωσης O_3 , έτσι και για των PM_{10} (Πίνακας 3.52, Πίνακας 3.65) προτείνεται η χρήση των ετήσιων μοντέλων πρόγνωσης αντί των εποχιακών. Αν και η διαφορά αποδοτικότητας ετήσιων και εποχιακών μοντέλων είναι μικρή, τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα για το 2014 λόγω έλλειψης παρατηρήσεων των σταθμών Κορδελιό και Πανόραμα για τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους (διαθέσιμα δεδομένα για 151 και 145 ημέρες αντίστοιχα).

4 Κεφάλαιο 4

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της ανάλυσης πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη δημιουργία στατιστικών μοντέλων πρόγνωσης O_3 και PM_{10} , ετήσιων και εποχιακών για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η πρόγνωση έγινε με βάση τις παρατηρησιακές τιμές των σταθμών: Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό, Πανόραμα, Νεοχωρούδα (μόνο για το όζον) και τις προγνώσεις μετεωρολογικών παραμέτρων του αριθμητικού μοντέλου WRF του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου για κάθε μια από τις τέσσερις περιοχές των σταθμών.

Η αξιολόγηση των μοντέλων έγινε όπως προτείνεται από τους Wilks (1995) και Willmott (1982, 1985) με τους στατιστικούς δείκτες για συνεχείς μεταβλητές όπως το όζον και τα σωματίδια ενώ τα διαγράμματα χρονοσειράς και διασποράς συμπληρώνουν την εικόνα της αποδοτικότητας.

Με τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης και τον υπολογισμό της συσχέτισης κάθε μεταβλητής με τους δύο ρύπους μελετάται η επίδραση κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην πρόγνωση όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων, σε κάθε σταθμό ετησίως και εποχιακά.

Από τις παραπάνω διαδικασίες γίνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων που παραθέτονται στην συνέχεια. Στόχος είναι η κατανόηση των στατιστικών μοντέλων για την καλύτερη πρόγνωση των ρύπων.

Η μέθοδος ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προηγούμενες μελέτες, σε συνδυασμό μαζί με άλλες μεθόδους ή ξεχωριστά. Στην συγκεκριμένη μελέτη η επιλογή της έγινε με βάση τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση των προηγούμενων μελετών αλλά και με βάση το στόχο της παρούσας, την πρόγνωση μέσης τιμής των δύο ρύπων. Η σημαντική διαφορά της παρούσας με πολλές από τις προηγούμενες είναι η χρήση προγνώσεων για τις ανεξάρτητες μεταβλητές, από τοπικό αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF.

Ανάλογα και με την μέση τιμή, οι δείκτες MAE και RMSE έχουν τιμές με εύρος 4-10 $\mu g/m^3$ και 4-13 $\mu g/m^3$ αντίστοιχα. Σε σύγκριση με άλλες μελέτες (Slini et al., 2002; Chaloulakou et al. 1999; Robeson and Steyn, 1990; Slini et al., 2006) οι τιμές των σφαλμάτων της παρούσας μελέτης αλλά και του δείκτη συμφωνίας IOA που χρησιμοποιείται σε ορισμένες είναι το ίδιο καλές.

Λόγω της διάρκειας της χρονικής περιόδου τα αποτελέσματα των προγνώσεων θεωρούνται με βάση τις μεταβολές των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του έτους σε συνήθεις καιρικές συνθήκες (Dueñas et al., 2002). Σημαντικό είναι να σημειωθούν δύο στοιχεία της μεθόδου με σκοπό την πρόγνωση διάρκειας τριών ημερών:

- Από την αξιολόγηση της παλινδρόμησης συμπεραίνεται η *αδυναμία πρόγνωσης των ακραίων μέγιστων και ελάχιστων τιμών*. Απόδειξη αυτής είναι τα διαγράμματα χρονοσειράς όπου η καμπύλη των προγνώσεων ακολουθεί την τάση της καμπύλης παρατηρήσεων αλλά με μικρότερη αύξηση (για ακραία μέγιστη) ή μείωση (για ακραία ελάχιστη) της καμπύλης. Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση παρατηρήσεων από των προγνώσεων για κάθε μοντέλο παλινδρόμησης, σε συνδυασμό με το πολύ μικρό μέσο σφάλμα δίνουν το ίδιο συμπέρασμα για την πρόγνωση ακραίων τιμών.
- Όλες οι τιμές της αξιολόγησης των μοντέλων και οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών στα περισσότερα από αυτά παρουσιάζουν *πτωτική τάση από την πρώτη προς την τρίτη ημέρα πρόγνωσης*. Δηλαδή ο δείκτης IOA είναι πιο

μικρός για το μοντέλο δεύτερης και τρίτης ημέρα πρόγνωσης από τον δείκτη της πρώτης, ενώ τα σφάλματα MAE και RMSE αυξάνονται, δηλαδή μειώνεται κατά ένα μικρό βαθμό την αποδοτικότητα του κάθε μοντέλου, όπως και για τους υπόλοιπους δείκτες και συντελεστές. Η αποδοτικότητα του αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης μειώνεται όσο αυξάνεται η διάρκεια πρόγνωσης με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται προγνώσεις με μικρότερη ακρίβεια στα στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης και να μειώνεται ελάχιστα η αποδοτικότητα.

Όζον

Από τη μελέτη πρόγνωσης ρύπανσης του όζοντος προκύπτει η επίδραση κάθε μεταβλητής στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων.

Με την επιλογή των μεταβλητών για τη δημιουργία των μοντέλων και τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής εκφράζεται η διαφορετικότητα τους και η αποδοτικότητα τους στην πρόγνωση. Ο δείκτης συμφωνίας έχει μικρές αλλαγές για κάθε μια περιοχή, δίνοντας την χαμηλότερη τιμή για την περιοχή Νεοχωρούδας (0,787 για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης) και την υψηλότερη για της Πλατείας Αγίας Σοφίας (0,957 για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης).

Παρακάτω παρατίθενται τα κύρια σημεία από τα μοντέλα πρόγνωσης O₃:

- Η αξιολόγηση αποδοτικότητας των μοντέλων για την περιοχή της Θεσσαλονίκης δίνει ως πιο αξιόπιστο το *ετήσιο μοντέλο πρόγνωσης O₃ του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας* για την πρώτη ημέρα πρόγνωσης. Οι συγκεντρώσεις του ρύπου στην περιοχή του σταθμού επηρεάζονται αρκετά από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, με αρκετά υψηλό r^2 (Πίνακας 3.13). Η περιοχή του σταθμού φαίνεται να μην επηρεάζεται αρκετά από άλλους παράγοντες (όπως στο Πανόραμα) με αποτέλεσμα τους υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού. Η αξιολόγηση όλων των μοντέλων είναι αρκετά καλή σε σύγκριση με παρόμοιες στατιστικές μελέτες όμως προτείνεται η χρήση ετήσιου μοντέλου, ανάλογα και με το ενδιαφέρον του ερευνητή.
- Η μεταβλητή *συγκέντρωσης όζοντος προηγούμενης ημέρας* επιδρά σημαντικά στην πρόγνωση και για τη βελτίωση κάθε στατιστικού μοντέλου είναι απαραίτητη η χρήση της. Το ίδιο και η μεταβλητή *ηλιακής ακτινοβολίας SOL*, η οποία αναλόγως με την ένταση της, επηρεάζει τις φωτοχημικές αντιδράσεις για την παραγωγή δευτερογενών ρύπων.
- Από την *αξιολόγηση των εποχιακών μοντέλων πρόγνωσης όζοντος για τους σταθμούς Κορδελιού και Πανοράματος* (διαθέσιμα δεδομένα για όλο το έτος) παρατηρείται πως οι τιμές των σφαλμάτων MAE το καλοκαίρι είναι καλύτερες από των υπόλοιπων εποχών (Πίνακας 3.43). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ένταση των παραγόντων που επηρεάζουν το όζον το καλοκαίρι (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, σχετική υγρασία). Οι χαμηλοί συντελεστές προσδιορισμού για το χειμώνα του Πανοράματος δείχνουν πως οι τελικές συγκεντρώσεις όζοντος μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικούς παράγοντες από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες.
- Οι σταθμοί Πανοράματος και Νεοχωρούδας ως *περιαστικοί σταθμοί παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις όζοντος όλο το έτος*. Και οι δύο βρίσκονται σε υψόμετρο, ειδικά ο σταθμός Πανοράματος στον οποίο παρατηρείται μεγαλύτερη μέση τιμή όζοντος. Τα επίπεδα τιμών NO_x μέσα στην πόλη λόγω της αυξανόμενης κυκλοφοριακής κίνησης, φέρουν και

χαμηλότερα επίπεδα όζοντος. Αναφέροντας την πόλη, εννοείται για τους δύο αστικούς σταθμούς Πλατεία Αγίας Σοφίας και Κορδελιού (Moussiopoulos et al., 2009). Για καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών στις περιοχές αυτές θα έπρεπε να συμπεριληφθούν και άλλοι παράγοντες εκτός των μετεωρολογικών (π.χ. συγκεντρώσεις άλλων ρύπων).

- Εποχιακά, οι αλλαγές της επίδρασης των μεταβλητών στις συγκεντρώσεις όζοντος οφείλονται στις εναλλαγές των καιρικών συνθηκών και της έντασης κάθε μεταβλητής, ανάλογα με την εποχή. Για παράδειγμα η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι συμβάλλει σε υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 .

Σχετικά με τα εποχιακά μοντέλα πρόγνωσης οι μετεωρολογικές παράμετροι ακολουθούν μια κοινή επίδραση για τους δύο αστικούς σταθμούς (Πλατεία Αγίας Σοφίας, Κορδελιό). Συγκεκριμένα η ταχύτητα ανέμου και ακτινοβολία μικρού μήκους επηρεάζουν θετικά την κατανομή όζοντος σε μεγάλο ποσοστό το χειμώνα. Ενώ το υπόλοιπο έτος η ηλιακή ακτινοβολία διατηρείται στο ίδιο επίπεδο, η ταχύτητα ανέμου δεν επιδρά σημαντικά τις μεταβατικές εποχές (Άνοιξη - Φθινόπωρο). Οι μεταβλητές συνοπτικής κατάστασης και θερμοκρασίας στα 2 μέτρα έχουν αρνητική ή μηδενική επίδραση την ψυχρή περίοδο, ενώ κατά τη θερινή αυξάνεται σημαντικά, συμβάλλοντας σε ακόμα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όζοντος. Η σχετική υγρασία διατηρεί μια αρνητική συσχέτιση, σημαντική κυρίως για τη θερινή περίοδο.

Από την άλλη, οι δύο σταθμοί Πανοράματος και Νεοχωρούδας αντιμετωπίζονται διαφορετικά λόγω της τοποθεσίας τους και των χαρακτηριστικών τους. Η σχετική υγρασία διατηρεί ισχυρή αρνητική επίδραση ως προς την κατανομή όζοντος στη διάρκεια του έτους, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Με βάση προηγούμενη μελέτη του Τρεμούλη (2012), η σχετική υγρασία παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές από τους υπόλοιπους σταθμούς, όλο το έτος. Για αυτό συμβάλλει έντονα στη μεταβολή των συγκεντρώσεων όζοντος, μαζί με τις μεταβλητές θερμοκρασίας τους καλοκαιρινούς μήνες.

Σωματίδια

Σχετικά με τη πρόγνωση μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης PM_{10} παρατίθενται παρακάτω τα κύρια συμπεράσματα:

- Η συμβολή της μεταβλητής συγκεντρώσεων *σωματιδίων προηγούμενης ημέρας* φαίνεται να βελτιώνει όλα τα μοντέλα, όπως και για το όζον. Οι υπόλοιπες μετεωρολογικές παράμετροι έχουν διαφορετική επίδραση στην περίπτωση των PM_{10} .
- Για το σταθμό Πανοράματος με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} όλο το έτος δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των μετεωρολογικών μεταβλητών στην κατανομή τους. Τα χαμηλά επίπεδα ρύπανσης εκεί οφείλονται στο αστικό υπόβαθρο ρύπανσης, δηλαδή σωματιδιακή ρύπανση από εκπομπές φυσικών πηγών και από μεταφορά δευτερογενών σωματιδίων από άλλες περιοχές (Κόλλια, 2012). Η σχετική υγρασία δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα PM_{10} σε καμία εποχή του έτους (Demuzere et al., 2009).
- Με βάση την μεταβλητότητα της φυσικής επίδρασης που παρουσιάζει κάθε μοντέλο, σε συνδυασμό με το συντελεστή r και το δείκτη IOA, η εξίσωση παλινδρόμησης δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα πρόγνωσης για το σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας και λιγότερο καλή για το σταθμό Πανοράματος. Σε κάθε μοντέλο η διαφορά του IOA είναι αρκετά μικρή ενώ του r^2 μεγάλη.



Συμπεραίνεται πως η μεταβλητότητα των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα για το σταθμό Πανοράματος δεν οφείλεται σε όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται αλλά είναι αρκετές για την εξαγωγή καλής πρόγνωσης των συγκεντρώσεων.

Το αντίκτυπο της θερμοκρασίας αέρα φαίνεται να δρα διαφορετικά σε κάθε εποχή. Συγκρίνοντας το χειμώνα και την άνοιξη για το σταθμό Πλατεία Αγίας Σοφίας, η συσχέτιση είναι αρνητική για την πρώτη εποχή και μεγάλη θετική για την άνοιξη. Με διαθέσιμα δεδομένα για το καλοκαίρι, η συσχέτιση αυτή θα ήταν υψηλότερη (Demuzere et al., 2009)

Η διαθεσιμότητα παρατηρήσεων από κάθε σταθμό για το έτος 2014 περιορίζει τα συμπεράσματα επίδρασης των μεταβλητών στις συγκεντρώσεις. Για τον τρόπο επίδρασης τους αλλά και για την καλύτερη εποχιακή ανάλυση τους θα ήταν απαραίτητη η χρήση τουλάχιστον ενός έτους δεδομένων. Τα δεδομένα αρκούν για το χειμώνα και άνοιξη.

Προτάσεις

Το ετήσιο μοντέλο πρόγνωσης του σταθμού Πλατεία Αγίας Σοφίας προτείνεται σε κάθε ερευνητή που ενδιαφέρεται για μελλοντική πρόγνωση των δύο ρύπων (O_3 ή PM_{10}) στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Η καλή γνώση των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, της τοποθεσίας και του μικροκλίματος της είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή χρήση της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών για την εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτήν.

Για βελτίωση των μοντέλων με χαμηλή απόδοση προτείνεται η προσθήκη δεδομένων εκτός των μετεωρολογικών όπως δείκτες κυκλοφοριακής κίνησης, ημέρες διακοπών, αργιών ή σαββατοκύριακου και συγκεντρώσεις άλλων ρύπων.

Από τα παραπάνω μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης χαρακτηριστική είναι η απουσία ικανότητας πρόγνωσης υψηλών τιμών, η οποία και αποδεικνύεται σε κάθε προηγούμενη μελέτη. Σκοπός της παρούσας είναι η πρόγνωση μέσης τιμής αλλά στην περίπτωση ενδιαφέροντος πρόγνωσης μέγιστης τιμής ρύπου ιδανική μέθοδος είναι η εφαρμογή μιας επιπλέον ειδικής ανάλυσης παλινδρόμησης (Chaloulakou et al., 1999).



Βιβλιογραφία

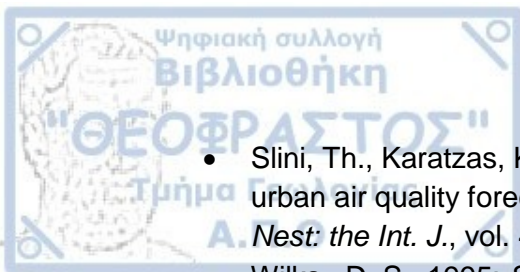
Ελληνική

- Ζάνης, Π., 2014: *Σημειώσεις για την ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας*. Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκης, σελ.181
- Καραθανάσης, Σ., 2006: *Ατμοσφαιρική ρύπανση*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
- Κόλλια, Π., 2012: Μελέτη σωματιδιακής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.142
- Κοντογιάννη, Π., 2008: Μελέτη της θαλάσσιας αύρας στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου μέσης κλίμακας. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.100
- Κουγιουμτζής, Δ., 2016: *Σημειώσεις της Εφαρμοσμένης Στατιστικής Ανάλυσης*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.22
- Μελάς, Δ., 2000: *Ατμοσφαιρική Ρύπανση (οδηγός εκπαιδευτικών)*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, σελ.53
- Μελάς, Δ., 2004: *Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος*. Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Παπακώστα, Ε., Συμεωνίδης, Θ., Τσαγκαρλής, Γ., 2014: Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013, Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, σελ.78
- Σαχσαμάνογλου, Χ. Σ., 1976: Η θαλάσσια αύρα στη Θεσσαλονίκη, *Δελτίο Ε.ΜΤ.Ε.* Τόμος 1, Τεύχος 2^ο, σελ. 19-33.
- Τρεμούλης, Ε., 2012: Μελέτη της φωτοχημικής ρύπανσης στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.198
- Φυτιανός, Κ., και Σαμαρά – Κωνσταντίνου, Κ., 2009: *Χημεία Περιβάλλοντος*. University Studio Press.

Ξένη

- Altshuller, A. P., and Lefohn, A. S., 1996: Background Ozone in the Planetary Boundary Layer Over the United States, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46:2, 134-141.
- Camalier, L., Cox, W., and Dolwick, P., 2007: The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, *Atmospheric Environment*, 41, 7127-7137.
- Chaloulakou, A., Assimacopoulos, D., and Lekkas, T., 1999: Forecasting daily maximum ozone concentrations in the Athens basin, *Environmental Monitoring and Assessment*, 56, 97-112.
- Comrie A.C., 1997: Comparing neural networks and regression models for ozone forecasting. *J.Air & Waste Manag. Assoc.* 47, pp 653-663

- Demuzere, M., Trigo, R. M., Vila-Guerau de Arellano, J., and Van Lipzing, N. P. M., 2009: The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2695-2714.
- Dueñas, C., Fernández, M. C., Cañete, S., Carretero, J., and Liger, E., 2002: Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean coast, *Sci Total Environ*, 299, 97-113.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 2003: Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and PM_{2.5}) Forecasting Program. EPA-456/R-03-002.
- Gusten, H., Heinrich, G., Monnich, E., Weppner, J., Cvitas, T., Klainsinc, L., Varotsos, C. A., and Moussiopoulos, N., 1997: Thessaloniki '91 Field measurement campaign – II: Ozone formation in the greater Thessaloniki area. *Atmospheric Environment* 37 (8), 1115-1126.
- Helmis, C. G., Tombrou, M., Asimakopoulos, D. N., Soilemes, A., Gusten, H., Moussiopoulos N., and Hazardidou, A., 1996: Thessaloniki '91 Field measurement campaign – I: The wind field and the atmospheric boundary layer structure over the Greater Thessaloniki Area. *Atmospheric Environment*, Part I 31, 1101-1114.
- Hubbard, M.C., and Cobourn, W. G., 1998: Development of a regression model to forecast ground level ozone concentration in Louisville, KY. *Atmospheric Environment* Vol.32, No. 14/15, 2637-2647.
- Moussiopoulos, N., Papalexioy, S., Sahm., P., 2006: Wind flow and photochemical air pollution in Thessaloniki, Greece. Part I: Simulations with the European Zooming Model. *Environmental Modelling & Software*, vol 21, 12, 1741-51.
- Moussiopoulos, N., Vlachokostas, Ch., Tsilingiridis, G., Douros, I., Hourdakis, E., Naneris, C., Sidiropoulos, C., 2009: Air quality status in Greater Thessaloniki Area and the emission reductions needed for attaining the EU air quality legislation. *Sci Total Environ*. 407, 1268-1285.
- Otero, N., Sillmann, J., Schnell, J.L., Rust H. W. and Butler, T., 2016: Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. *Environmental Research Letter*, vol 11, 2.
- Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Kotsopoulos, S., Bampzelis, D., Karacostas, T., Katragkou, E., 2015: Verification of the Operational High-Resolution WRF Forecasts produced by WaveForUs Project, Thessaloniki, 62-65
- Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Kotsopoulos, S., Bampzelis, D., Katragkou, E., Karacostas, T., 2014: A High-Resolution Numerical Weather Prediction system for Greece: Model Setup and Performance Analysis. *10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, 20-22 October Thessaloniki 2014*.
- Robeson, S. M, and Steyn, D. G., 1990: Evaluation and comparison of statistical forecast models for daily maximum ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 24B, 303-312.
- Slini, Th., Kaprara, A., Karatzas, K., and Moussiopoulos, N., 2006: PM₁₀ forecasting for Thessaloniki, Greece. *Environmental Modelling and Software*, vol. 21, 4, 559-565.



- Slini, Th., Karatzas, K., Papadopoulos, A., 2002: Regression analysis and urban air quality forecasting: An application for the city of Athens. *Global Nest: the Int. J.*, vol. 4, 2-2, 153-162.
- Wilks., D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, an introduction*. Academic Press, 250-254, 159-175.
- Willmott, C. J., 1982: Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Willmott, C. J., Ackleson S. G., Davis R. E., Feddema, J.J., Klink K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., and Rowe, C. M., 1985: Statistics for the evaluation and comparison of models, *J. Geophys. Res.*, 90(C5), 8995-9005.

Διευθύνσεις στο διαδίκτυο

<http://www.airthess.gr/>

http://www.meted.ucar.edu/nwp/model_structure/print.htm



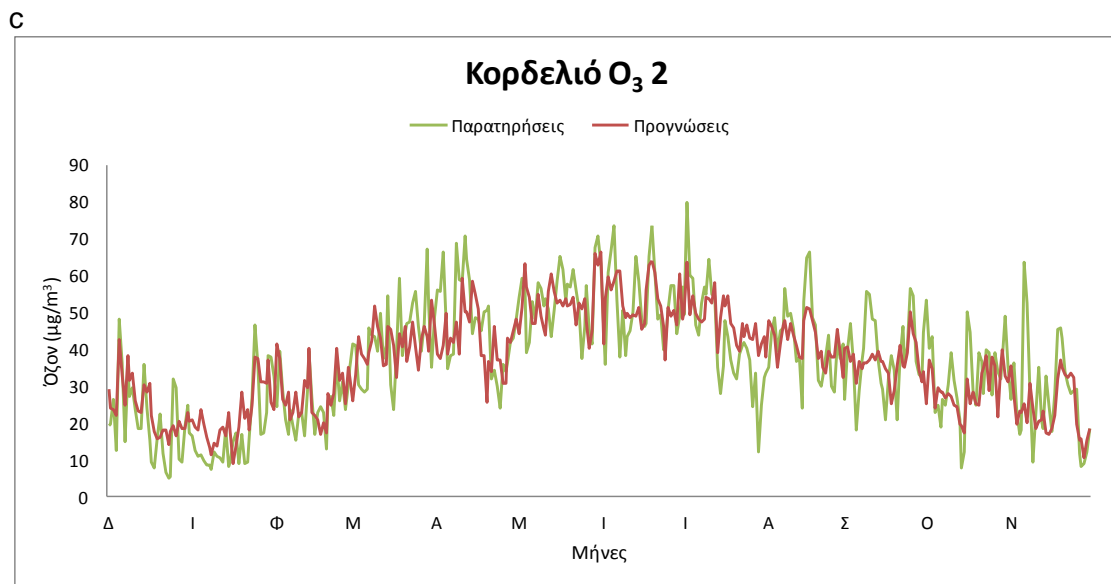
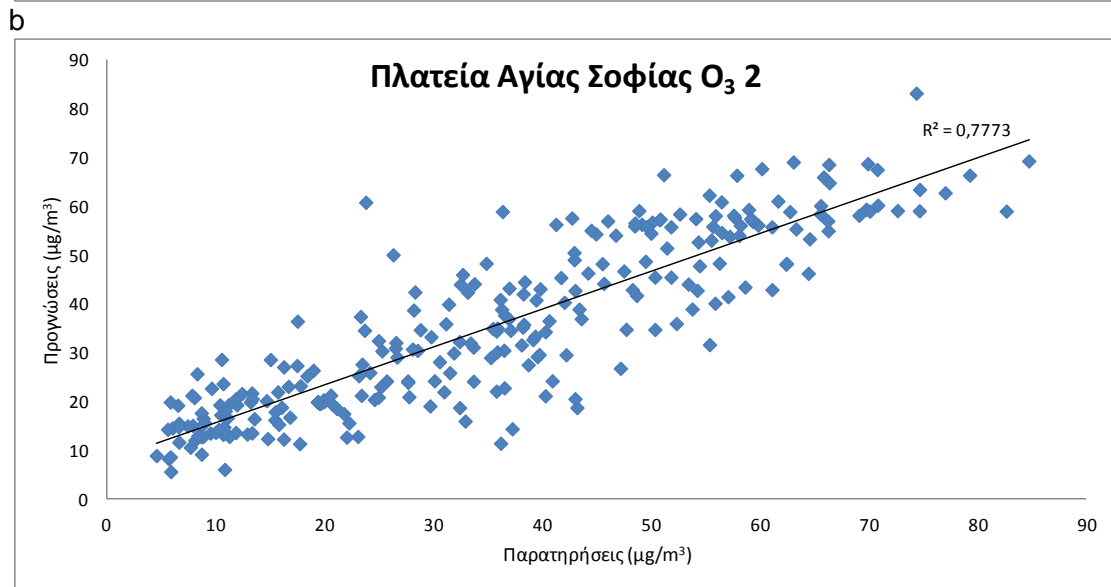
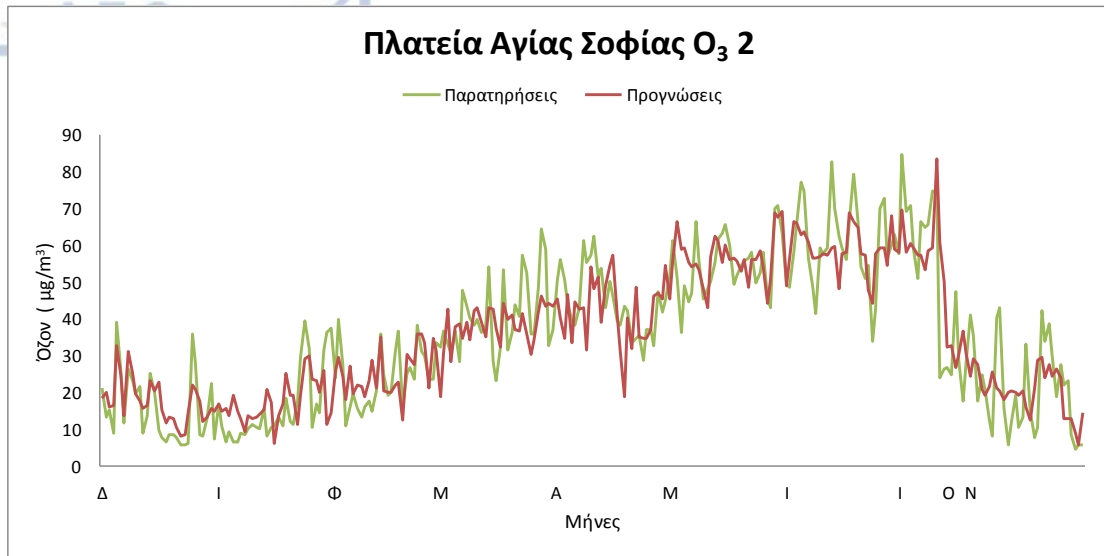
Abstract

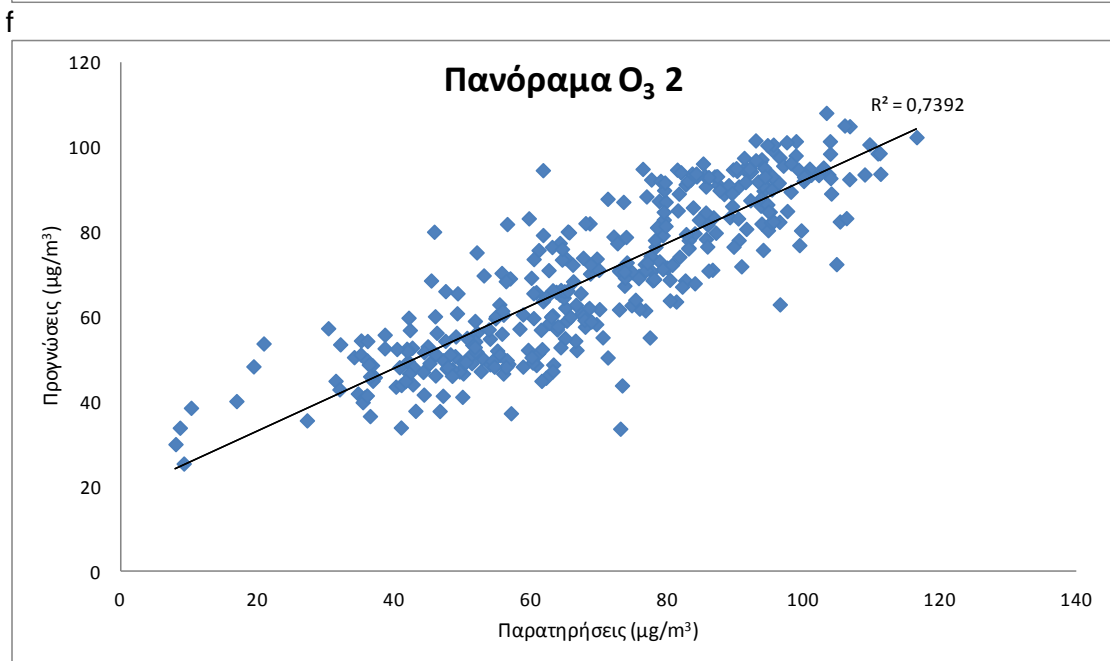
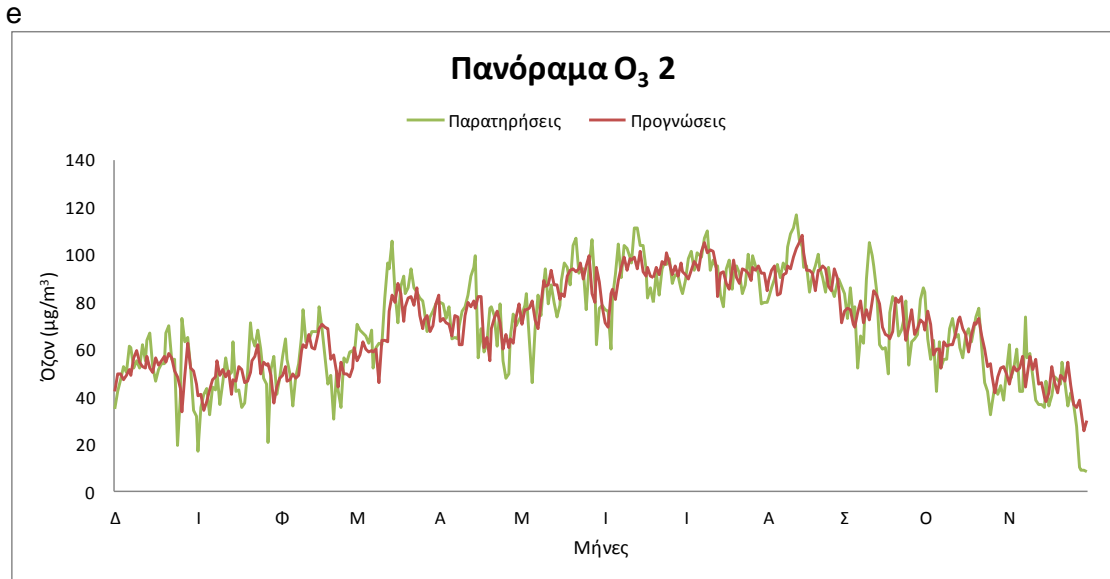
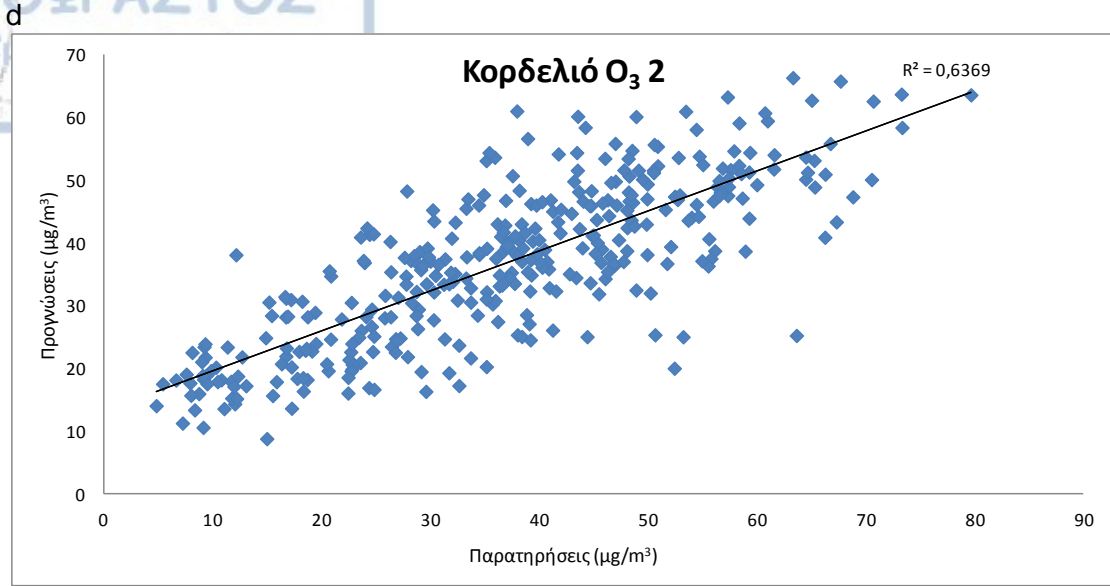
This thesis contributes to statistical forecast of air quality of Thessaloniki, using the multiple linear regression and the high-resolution weather research and forecasting model WRF, managed by the laboratory of Meteorology and Climatology of the Aristotle University of Thessaloniki in order to generate statistical forecast models for O_3 and PM_{10} . Multiple linear regression equations are generated at annual and seasonal basis (annual and seasonal models) for four different areas of the city (three for PM_{10}), aiming to a 3-day forecast of the mean daily values of pollutants' concentrations.

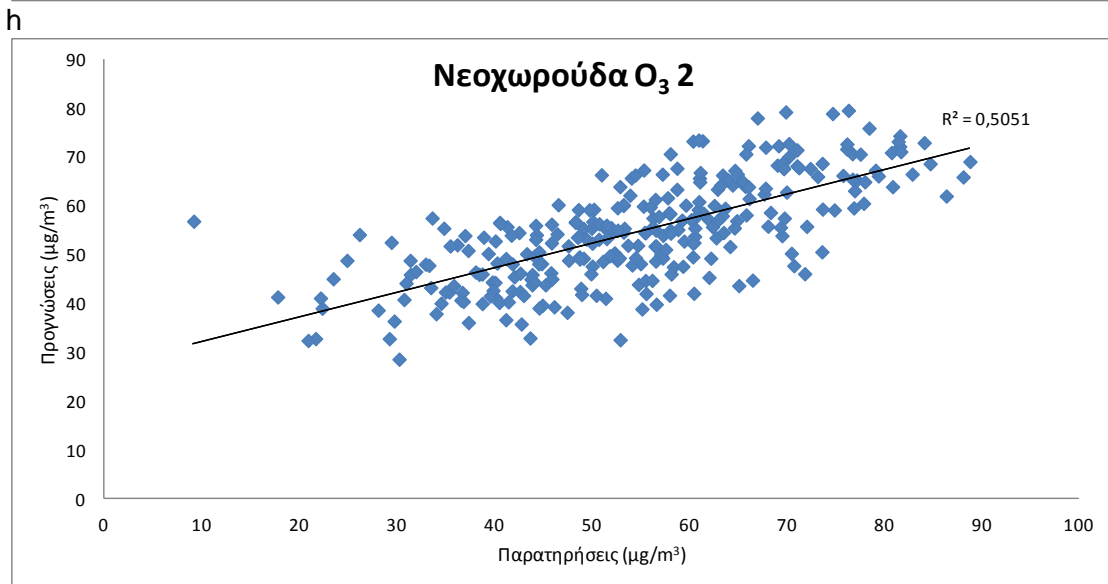
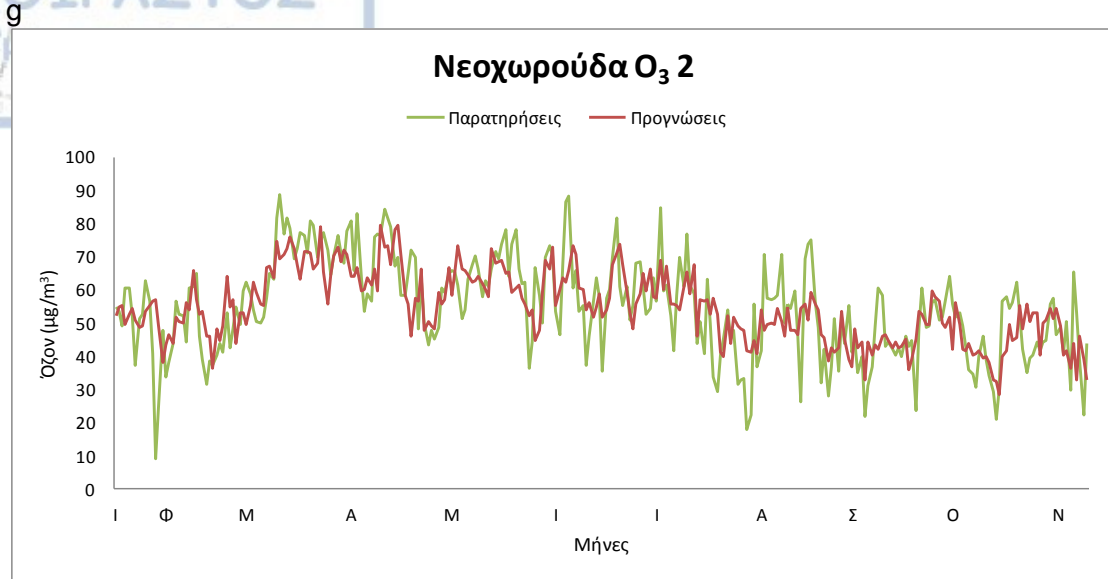
The first part of the thesis clarifies the effect and correlation of the meteorological parameters with the pollutants calculating the statistical significance and correlation coefficient of every variable. The latter ones, the prognostic variables are: geopotential height 500hPa, temperature 850hPa, temperature 2m, relative humidity 2m, wind speed 10m, incoming solar radiation, total precipitation and extracted from numerical weather prediction model WRF of the laboratory of Meteorology and Climatology. The most important of the prognostic variables is the observed pollutants concentration of the previous day, leading to considerable improvements of the statistical forecast models. The rest of the prognostic variables (predictors) affect the pollutants' concentrations in different ways, depending on the area (urban or suburban) and the season of the year.

The second part of the thesis is focused on the calculation of statistical measures and indices for the models' evaluation and their overall performance. The comparison of the current and previous similar studies is based on three of the statistical measures, MAE, IOA and r^2 . It is concluded that the annual models adopted here have similar or better performance in comparison with previous studies carried out at Athens. Some of the seasonal models, mostly the ones for the O_3 forecast, even if they demonstrate an adequate performance, they are not suggested for operation forecast.

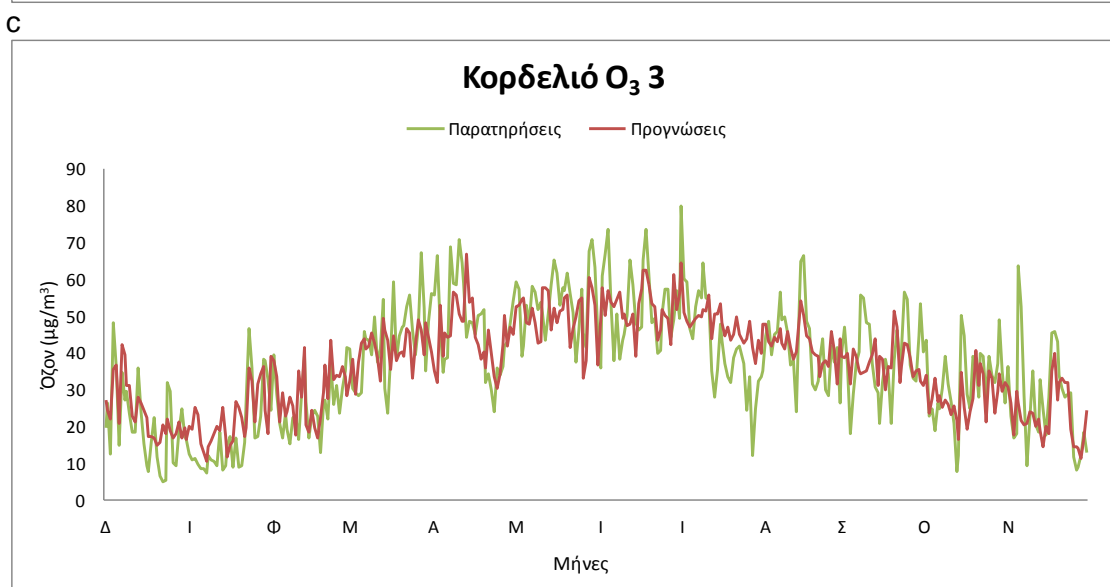
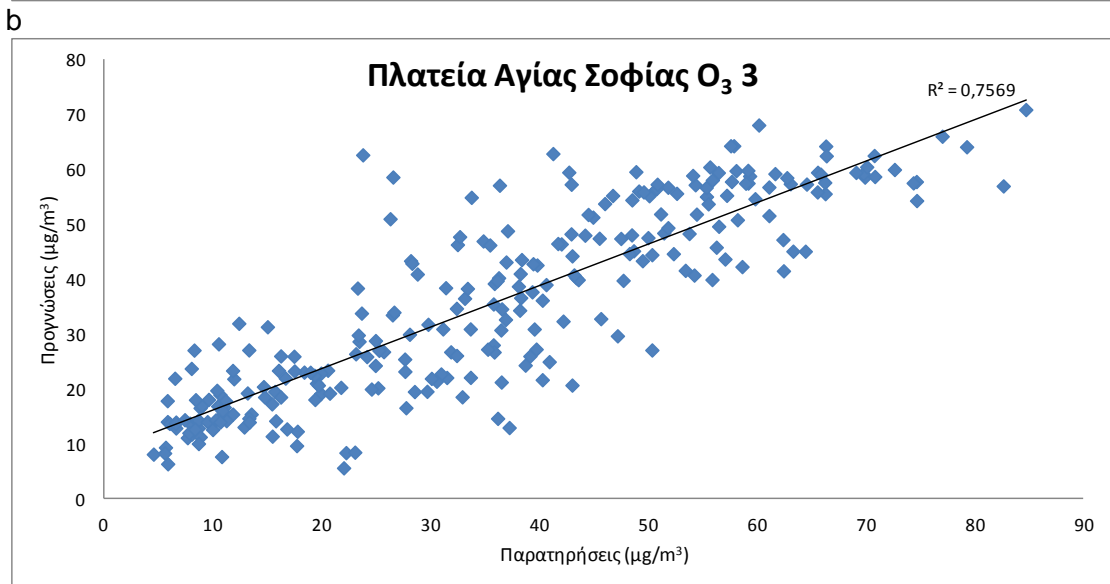
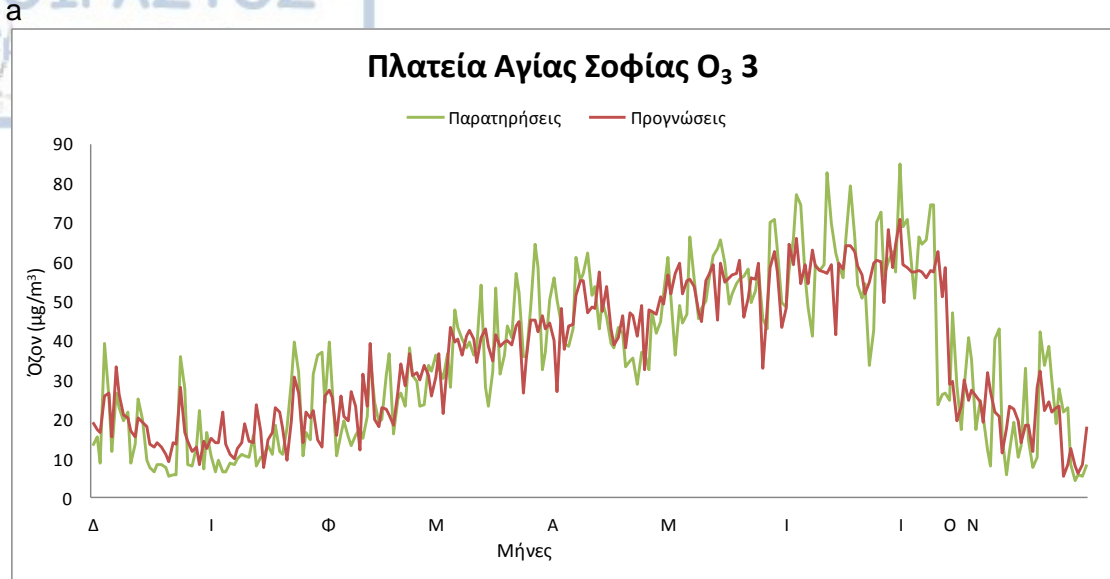
The evaluation of the statistical models separates the annual from the seasonal models giving a better performance for the first ones. For the O_3 forecast, the annual model for the station Plateia Agias Sofias has the best performance, then the model for Panorama, Kordelio and finally for Neoxorouda. For the PM_{10} forecast, the best model is the annual model for Plateia Agias Sofias and then Kordelio and Panorama. With regard to the selection of an air quality statistical forecast model with the best reliability, the annual model for Plateia Agias station is proposed for both O_3 and the corresponding annual model for PM_{10} .

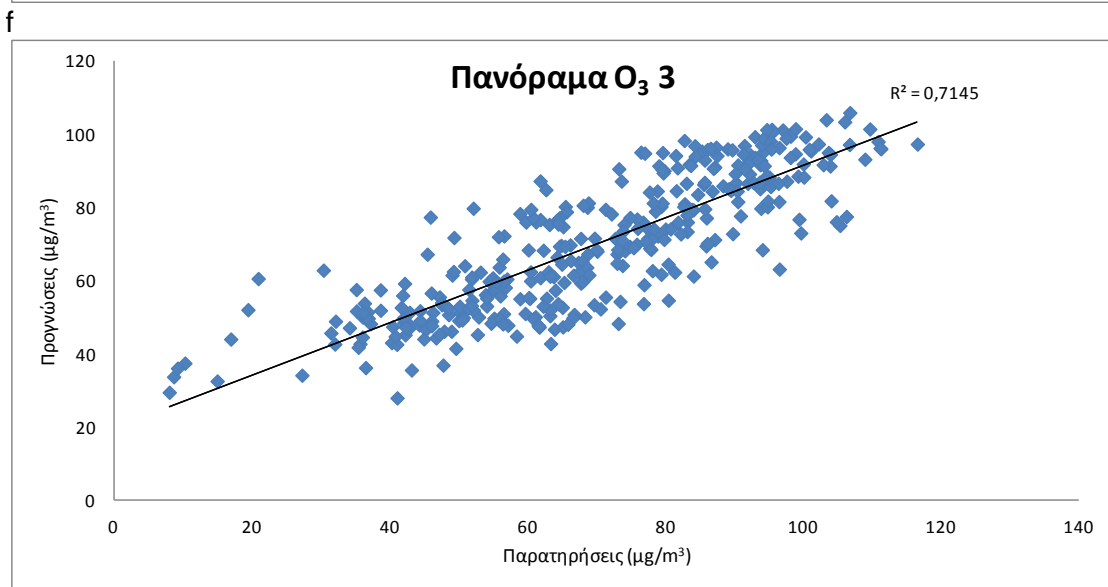
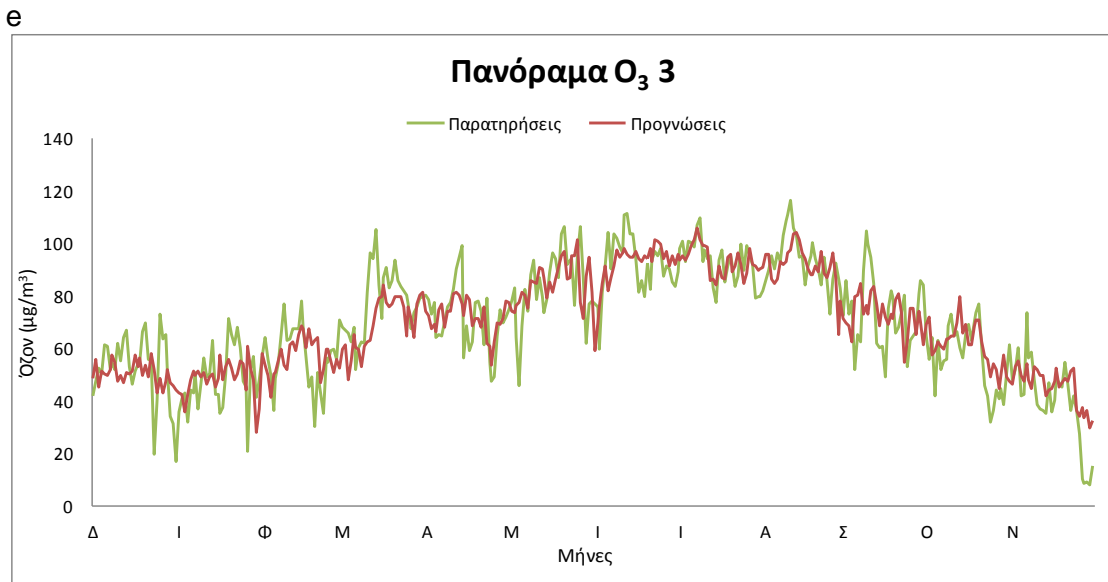
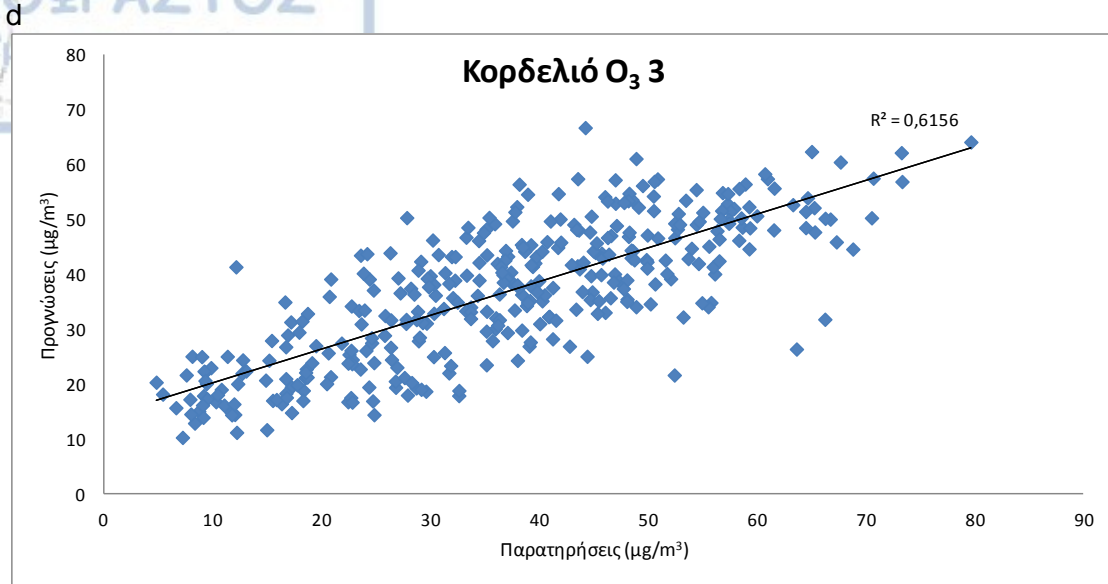


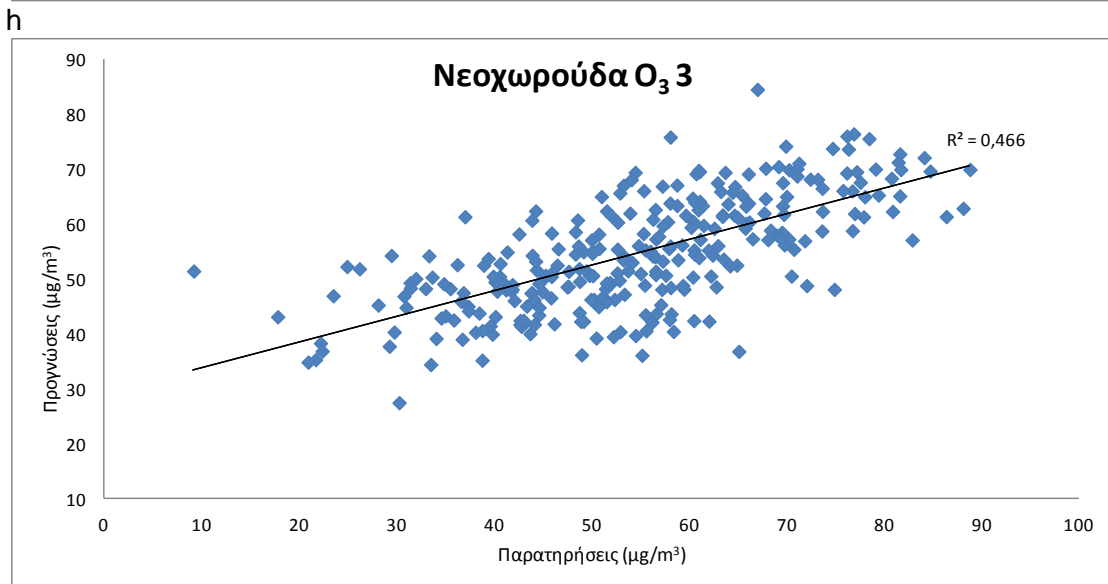
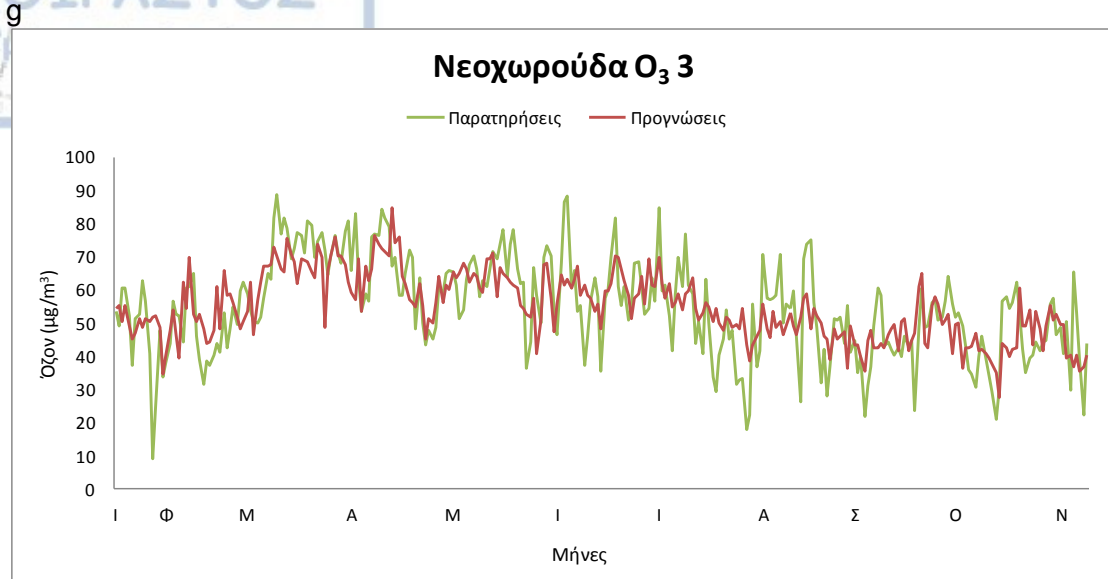




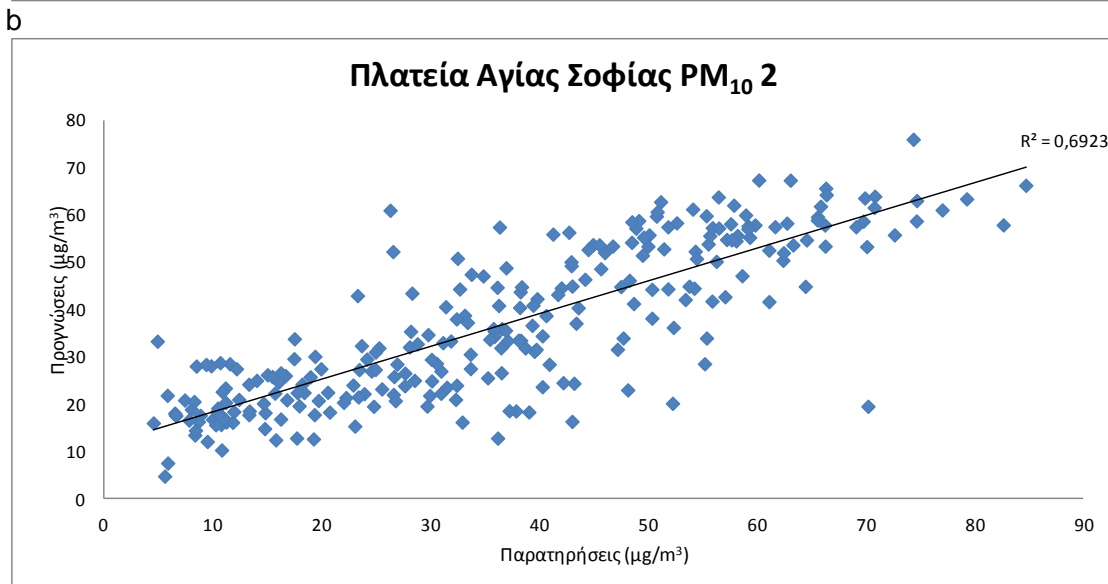
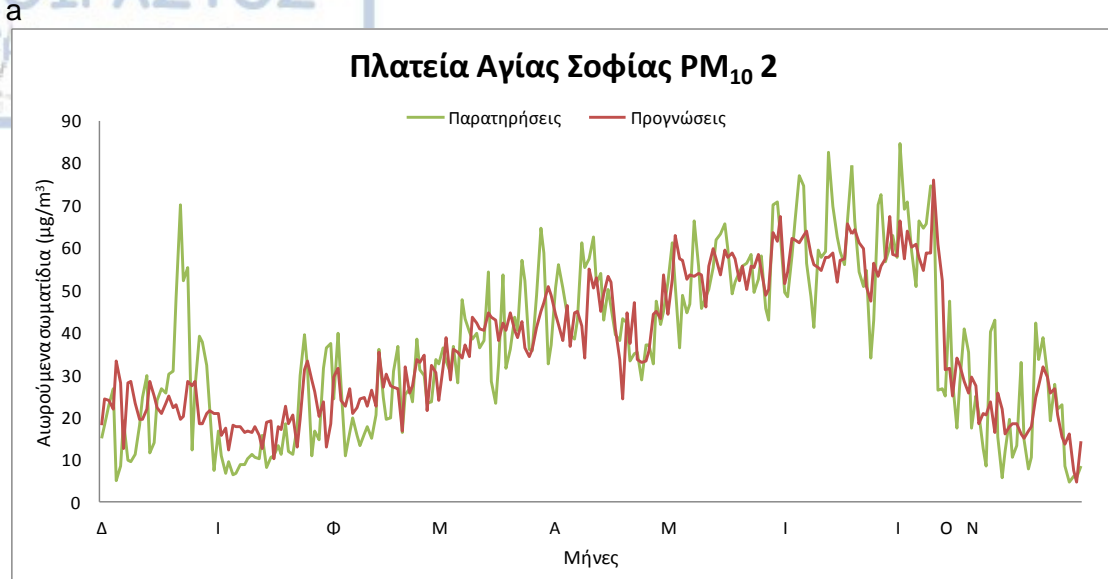
Σχήμα 5.1: Διαγράμματα παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ (a - h) για την δεύτερη ημέρα πρόγνωσης

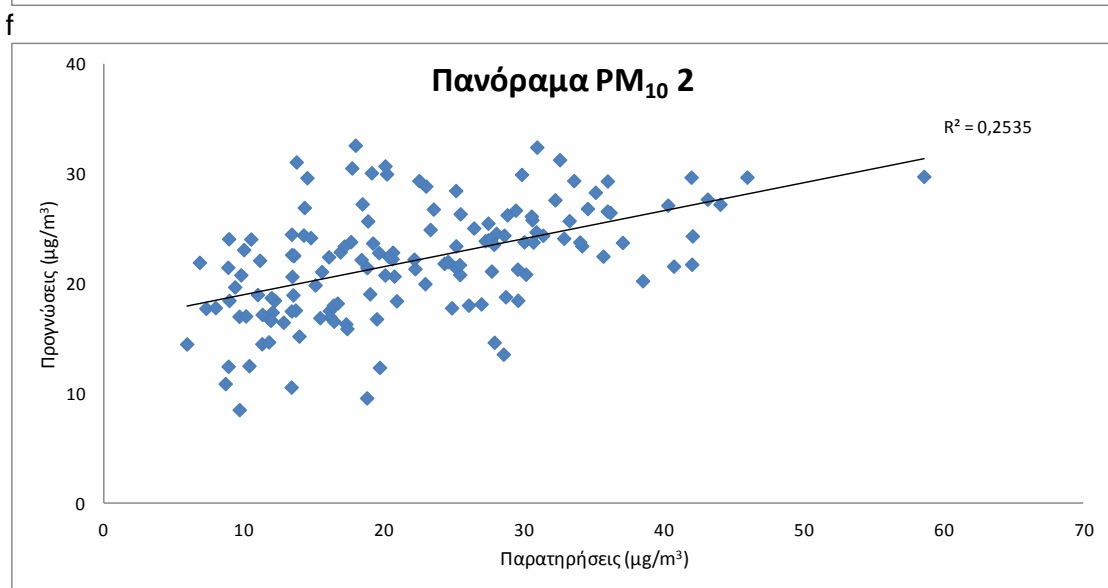
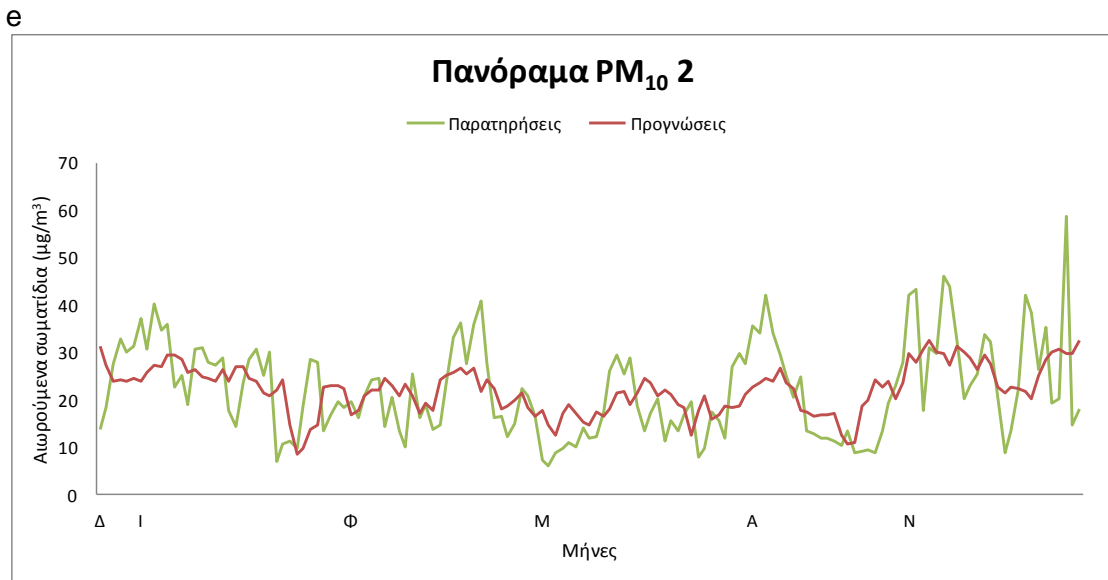
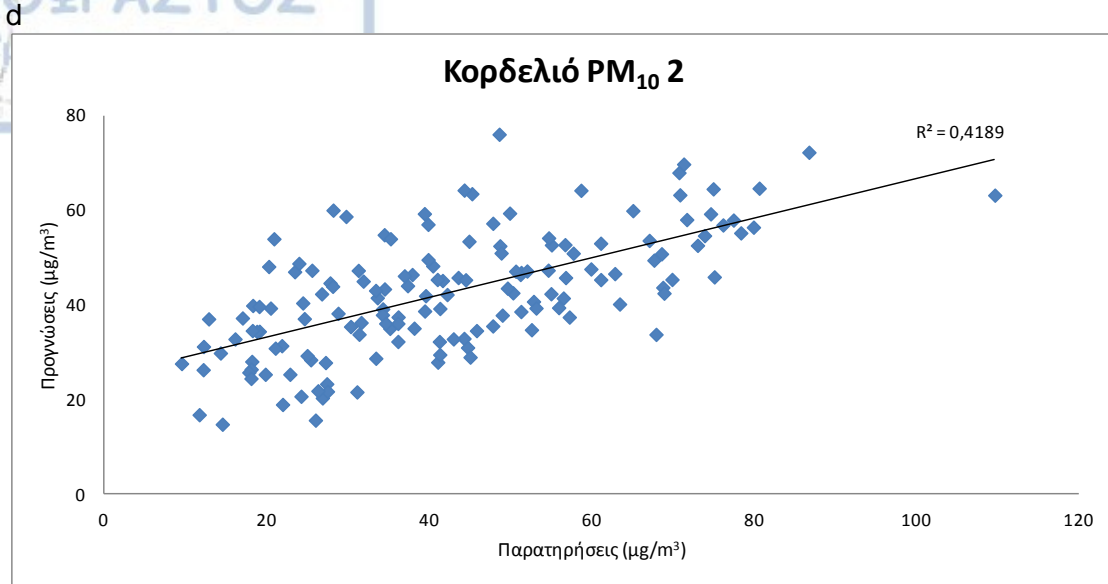




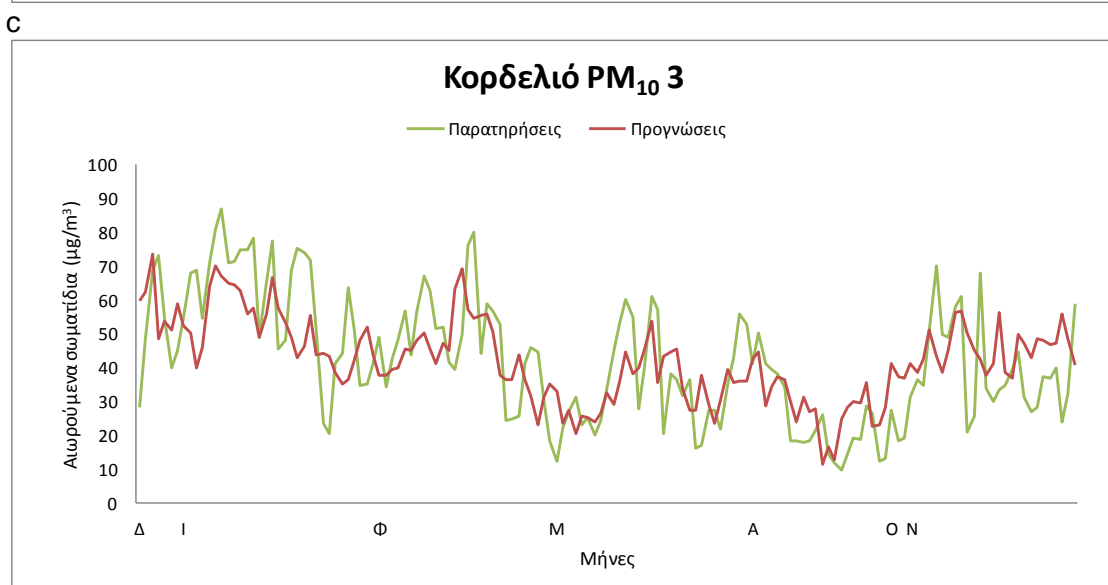
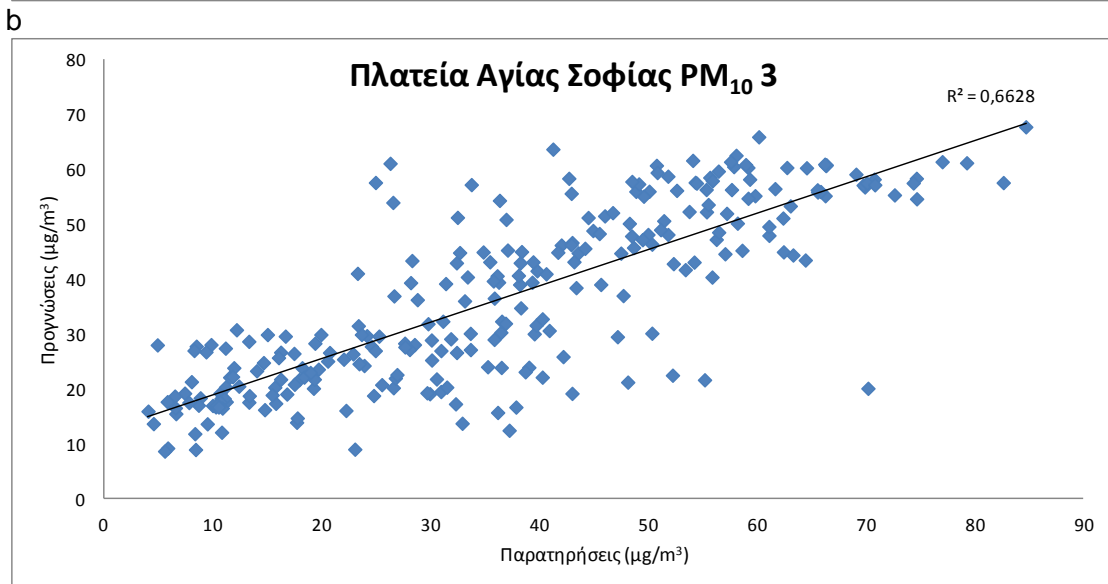
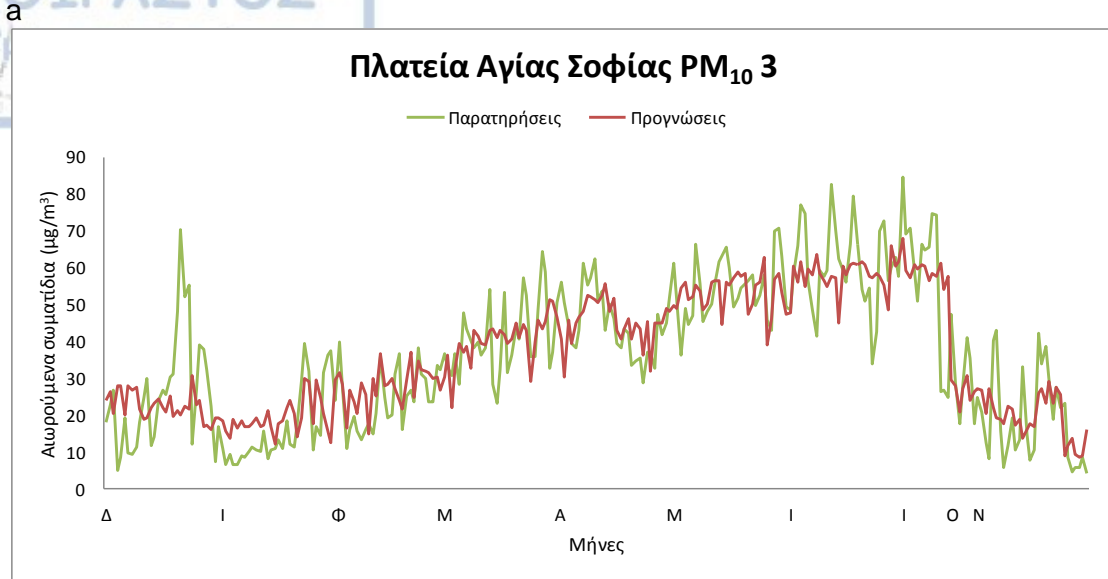


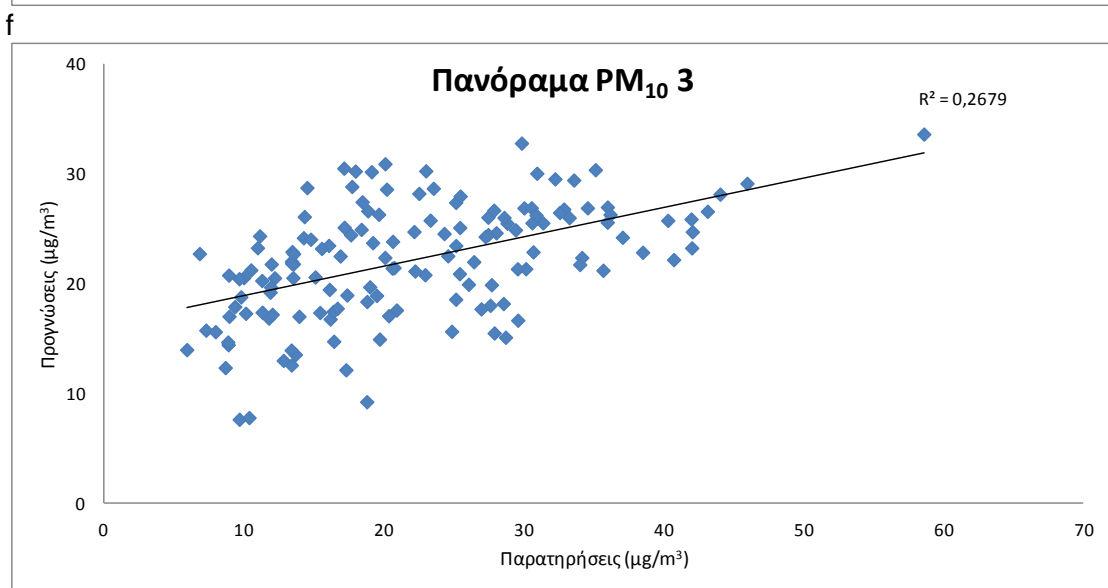
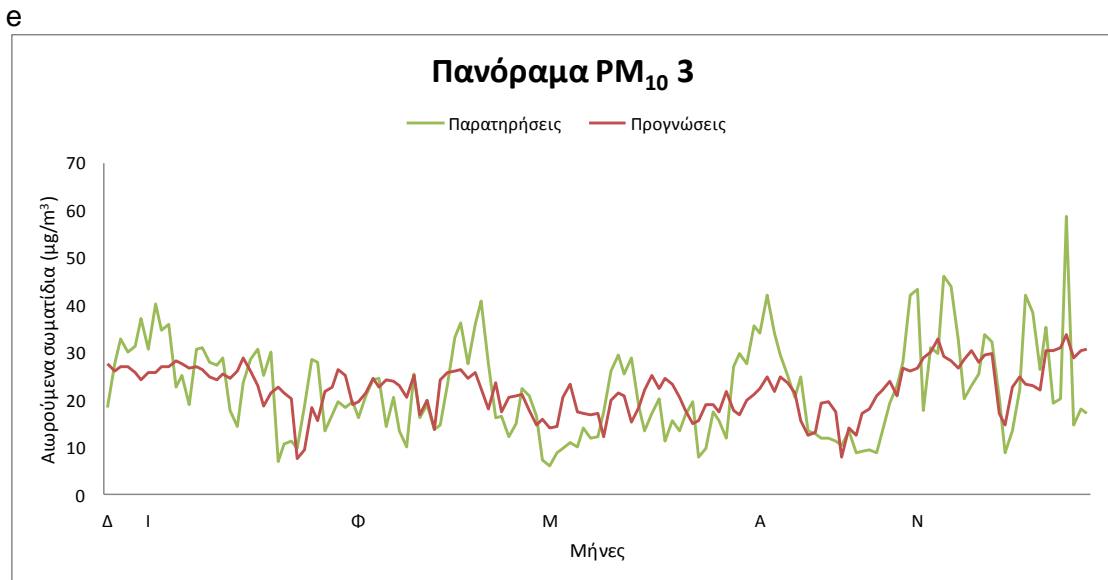
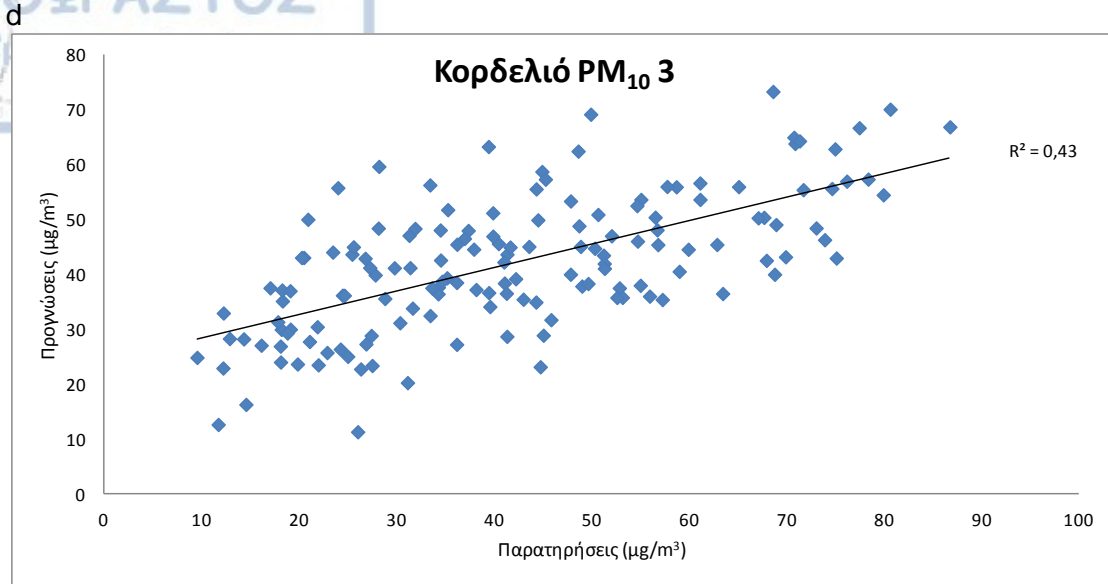
Σχήμα 5.2: Διαγράμματα παρατηρήσεων και προγνώσεων O₃ (a - h) για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης





Σχήμα 5.3: Διαγράμματα παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ (a - f) για την δεύτερη ημέρα πρόγνωσης





Σχήμα 5.4: Διαγράμματα παρατηρήσεων και προγνώσεων PM₁₀ (a - f) για την τρίτη ημέρα πρόγνωσης